РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ РОСАТОМ

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Объединенный институт высоких температур РАН
Научный совет РАН по физике плазмы
Научный совет РАН по комплексной проблеме
«Физика низкотемпературной плазмы»

Государственный научный центр РФ ТРИНИТИ
Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

XLIX МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗВЕНИГОРОДСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ ICPAF-2022

14 – 18 марта 2022 г.

г. Москва

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Финансовая поддержка:

Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН
Государственная корпорация РОСАТОМ
Проектный центр ИТЭР ГК РОСАТОМ
Государственный научный центр РФ ТРИНИТИ

Москва, 2022

УДК 533.9
PACS 52.20-52.75
ББК 22.333
М43

XLIX Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу
14 – 18 марта 2022 г., г. Москва. Сборник тезисов докладов.
М.: АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2022 г. – 230 с.

В сборник включены тезисы докладов по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, представленные на XLIX Международную Звенигородскую конференцию по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу учеными из институтов Министерства науки и высшего образования РФ, Российской академии наук, предприятий российской государственной корпорации РОСАТОМ, Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», университетов и высших учебных заведений России, стран СНГ, научных центров стран Европейского союза, Японии и других стран.

Составители:

В.А. Иванов, И.А. Гришина, М.Л. Нагаева, Д.Г. Васильков, С.А. Двинин, В.С. Воробьев, Г.А. Вергунова, А.И. Мещеряков

Макет – И.А. Гришина, М.Л. Нагаева, С.Н. Сатунин

© АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН»
© Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
© Авторы, 2022

ISBN 978-5-6042115-6-4

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
STATE CORPORATION ROSATOM

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
Scientific Council on Plasma Physics, Russian Academy of Sciences
Scientific Council on the Complex Problem "Physics of Low Temperature Plasma", Russian Academy of Sciences

Science and Technology Center PLASMAIOFAN
State Research Center of Russian Federation TRINITY
National Research Nuclear University MEPhI
Lomonosov Moscow State University

XLIX International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion ICPAF-2022

March 14-18, 2022

Moscow

BOOK OF ABSTRACTS

Financial Support

Science and Technology Center PLASMAIOFAN
State Corporation ROSATOM
Project Center ITER of the State Corporation ROSATOM
State Research Center of Russian Federation TRINITY

Moscow, 2022

PACS 52.20–52.75

XLIX International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. March 14-18, 2022, Moscow. Book of Abstracts
Moscow: Science and Technology Center PLASMAIOFAN, 2022– pp. 230

This book includes the abstracts on plasma physics and controlled fusion presented at the **XLIX International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion** in 2022 **(ICPAF-2022)** by scientists from the institutes of Russian Academy of Sciences and Ministry of Science and Higher Education of Russia, from organizations of the Russian State Corporation ROSATOM, from the National Research Center "Kurchatov Institute", from the leading universities of higher education system of Russia, as well as from scientific centers and laboratories of the Commonwealth of Independent States (CIS), European Union, Japan and from other countries.

Compiled by:

V.A. Ivanov, I.A. Grishina, M.L. Nagaeva, D.G. Vasilkov, S.A. Dvinin, V.S. Vorobyev, G.A. Vergunova, A.I. Meshcheryakov

Layout by:

I.A. Grishina, M.L. Nagaeva, S.N. Satunin

© Science and Technology Center PLASMAIOFAN
© Prokhorov General Physics Institute, RAS
ISBN 978-5-6042115-6-4 © Authors, 2022

Программный комитет

Велихов Е.П.	академик РАН, председатель
Ильгисонис В.И.	доктор физико-математических наук, ГК РОСАТОМ, зам. председателя
Александров А.Ф.	доктор физико-математических наук, МГУ
Бурдаков А.В.	доктор физико-математических наук, ИЯФ СО РАН
Воробьев В.С.	доктор физико-математических наук, ОИВТ РАН
Вергунова Г.А.	кандидат физико-математических наук, ФИАН
Готт Ю.В.	доктор физико-математических наук, НИЦ «Курчатовский институт»
Гребенщиков С.Е.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН
Гусаков Е.З.	доктор физико-математических наук, ФТИ РАН
Гуськов С.Ю.	доктор физико-математических наук, ФИАН
Двинин С.А.	доктор физико-математических наук, МГУ
Денисов Г.Г.	член-корреспондент РАН, ИПФ РАН
Иванов А.А.	доктор физико-математических наук, ИЯФ СО РАН
Иванов В.А.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН
Коссый И.А.	доктор физико-математических наук, ИОФ РАН
Красильников А.В.	доктор физико-математических наук, Проектный Центр ИТЭР
Кузнецов А.П.	доктор физико-математических наук, НИЯУ МИФИ
Лебедев Ю.А.	доктор физико-математических наук, ИНХС РАН
Мещеряков А.И.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН
Мирнов С.В.	доктор физико-математических наук, ТРИНИТИ
Пастухов В.П.	доктор физико-математических наук, НИЦ «Курчатовский институт»
Романников А.Н.	доктор физико-математических наук, ТРИНИТИ

Организационный комитет

Иванов В.А.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН, председатель
Гришина И.А.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН, секретарь
Васильков Д.Г.	кандидат физико-математических наук, ИОФ РАН, зам. председателя
Аникеев А.В.	кандидат физико-математических наук, ГК РОСАТОМ
Андрианова М.С.	руководитель проектного офиса, ГК РОСАТОМ
Калашников П.А.	советник проектного офиса, ГК РОСАТОМ
Воронова Е.В.	научный сотрудник, ИОФ РАН
Гаспарян Ю.М.	кандидат физико-математических наук, НИЯУ МИФИ
Камолова Т.И.	кандидат технических наук, НТЦ ПЛАЗМАИОФАН
Нагаева М.Л.	кандидат физико-математических наук, НТЦ ПЛАЗМАИОФАН
Сатунин С.Н.	научный сотрудник, ИОФ РАН
Шевченко А.А.	ведущий инженер, НИЯУ МИФИ

СОДЕРЖАНИЕ

сборника тезисов докладов XLIX Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС

Разделы, авторы и названия докладов	Страницы
ОБЗОРНЫЕ ДОКЛАДЫ	**29-43**
Иванов В.А. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) К 90-ЛЕТИЮ ЛЬВА МИХАЙЛОВИЧА КОВРИЖНЫХ (1931-2021)	29
Вергунова Г.А. (*ФИАН, г. Москва, Россия*) К 90-ЛЕТИЮ ВЛАДИСЛАВА БОРИСОВИЧА РОЗАНОВА (1932-2019)	30
Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Белоплотов Д.В., Виноградов Н.П., Ломаев М.И., Сорокин Д.А. (*ИСЭ СО РАН, г. Томск, Россия*) ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ГОЛУБЫХ СТРУЙ И КРАСНЫХ СПРАЙТОВ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЯДОВ	31
Гуськов С.Ю. *(ФИАН, г. Москва, Россия*) О РЕКОРДНЫХ ДОСТИЖЕНИЯХ ЛИВЕРМОРСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ (США) В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА	32
	33
Багрянский П.А. *(ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) РАБОТЫ ПО РАЗВИТИЮ ПРОЕКТА ГДМЛ В ИЯФ СО РАН	34
Кудряшов С.И. (*ФИАН, г. Москва, Россия*) НАСТОЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ АБЛЯЦИОННОЙ ПЛАЗМЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ: НОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ПРИМЕНЕНИЯ	35
Иосилевский И. Л. (*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*) ЭЛЕКТРОСТАТИКА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ В РАВНОВЕСНЫХ КУЛОНОВСКИХ СИСТЕМАХ	36
Гусейн-заде Н.Г. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) СИНТЕЗ КАТАЛИЗАТОРОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЕМ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ГИРОТРОНА	37
	38
Krasilnikov A.V. (*Institution "Project Center ITER", Moscow, Russia*) TECHNOLOGICAL PLATFORMS OF ITER AND TRT FOR FUSION ENERGY DEVELOPMENT	39
Химченко Л.Н., Красильников А.В. (*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия*) ИТЭР. СБОРКА ТОКАМАКА И ДАЛЬНЕЙШАЯ ИНТЕГРАЦИЯ В ТЕРМОЯДЕРНОЕ СООБЩЕСТВО	40

[1,2]Кутеев Б.В., [1,2]Шленский М.Н. (*[1,2]НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; [1,2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 41
АКТУАЛЬНЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НАРАБОТКИ ТОПЛИВНЫХ НУКЛИДОВ

[1]Семенов И.Б., [1]Голачев В.М., [1]Ларионов А.С., [1]Лазарева С.Г., [1]Миронова Е.Ю., [1]Миронов А.Ю., [1]Нагорный Н.В., [1]Портоне С.С., [1]Семенов О.И., [1]Звонарева А.А., [1]Гужев Д.И. [1]Журавлев М.К., [1]Николаев А.И. (*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия*) 42
СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР

Пономарев А.В., Ульянов Д.К. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 43
ПЛАЗМЕННЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ ШУМА С ИНВЕРСНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ. ЭКСПЕРИМЕНТ

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ» 47-106

Савельев В.В. (*ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 47
ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОНФИГУРАЦИЙ В ТОРОИДАЛЬНЫХ ЛОВУШКАХ С ВЫТЯНУТЫМ ПО Z СЕЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ МОРОЗОВА-СОЛОВЬЕВА

[1,2]Исаев М.Ю., [2]Ануарулы О., [3]Брюннер С., [4]Герлер Т., [1]Нургалиев М.Р., [1]Смирнов Д.В. (*[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; [2]МФТИ (ГУ), г. Долгопрудный, Россия, [3]Швейцарский плазменный центр, Федеральная политехническая школа Лозанны, Швейцария, [4]Институт физики плазмы Макса Планка, Гаршинг, Германия*) 48
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИРОКИНЕТИЧЕСКИХ ПЕРЕНОСОВ С ITG В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10 С ОМИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ

[1]Бишаев А.М., [1]Буш А.А., [2]Гавриков М.Б., [1]Каменцев Е.К., [1]Козинцева М.В., [2]Савельев В.В. (*[1]РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, [2]ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 49
ВЛОЖЕННЫЕ КОРОТКОЗАМКНУТЫЕ КАТУШКИ ИЗ ВТСП 2 ЛЕНТЫ ДЛЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЛОВУШКИ - ГАЛАТЕИ

[1]Приходько В.В., [1]Черноштанов И.С., [1,2]Шмигельский Е.А., [1]Яковлев Д.В. (*[1]ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; [2]НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 50
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ БЫСТРЫХ ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ В ВОДОРОДНОЙ МИШЕННОЙ ПЛАЗМЕ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ

Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Ильясова М.В., Киселев Е.О., Курскиев Г.С., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Щёголев П.Б. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 51
РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Ильясова М.В., Курскиев Г. С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Щеголев П.Б. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 52
ПОТЕРИ БЫСТРЫХ ИОНОВ, ВЫЗВАННЫЕ ТОРОИДАЛЬНЫМИ

АЛЬФВЕНОВСКИМИ МОДАМИ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

[1]Чан К.В.,[1,2]Будаев В.П.,[1]Дедов А.В.,[1]Федорович С.Д.,[1,3]Кавыршин Д.И., [1,2]Карпов А.В.,[2]Мартыненко Ю.В.,[1]Комов А.Т.,[1]Лубенченко А.В., [1]Лукашевский М.В.,[1]Захаренков А.В.,[1]Губкин М.К.,[1]Васильев Г.Б.,[1]Рогозин К.А., [1]Коньков А.А.,[1]Кваскov В.С. (*[1]НИУ МЭИ, г. Москва, Россия; [2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия;[3]ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*) 53
РЕЖИМЫ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

[1,2]Сандомирский А.В., [1,2]Лизунов А.А. (*[1]ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; [2]НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 54
ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

[1,2]Карпов А.В., [1]Федорович С.Д., [1,2]Будаев В.П., [1]Дедов А.В.,[1,2]Мартыненко Ю.В., [1]Губкин М.К., [1]Лукашевский М.В., [1]Комов А.Т., [1]Захаренков А.В., [1]Варава А.Н., [1]Лубенченко А.В., [1]Марченков А.Ю., [1]Чан Куанг В., [1]Рогозин К.А., [1]Коньков А.А., [1]Васильев Г.Б.,[1]Штелинг В.С. (*[1]НИУ МЭИ, г. Москва, Россия; [2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 55
ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ МАКЕТОВ ОХЛАЖДАЕМОЙ ЛИТИЕВОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМОЙ В ПЛМ

[1]Федорович С.Д., [1,2]Будаев В.П., [1]Дедов А.В.,[1]Карпов А.В., [1,2]Мартыненко Ю.В., [1]Губкин М.К., [1]Лукашевский М.В., [1]Комов А.Т., [1]Захаренков А.В., [1]Варава А.Н., [1]Лубенченко А.В., [1]Слива А.П., [1]Марченков А.Ю., [1]Чан Куанг В., [1]Рогозин К.А., [1]Коньков А.А., [1]Кваскov В.С.,[1]Васильев Г.Б.,[1]Штелинг В.С. (*[1]НИУ МЭИ, г. Москва, Россия; [2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 56
ИСПЫТАНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМОЙ В ПЛМ

[1]Хрипунов Б.И., [1]Койдан В.С., [1]Семенов Е.В., [1]Муравьев С.В., [1]Унежев В.Н., [1]Гуреев В.М., [1]Цветков А.А. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 57
РАДИАЦИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫЙ ВОЛЬФРАМ В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

[1]Андреев В.Ф., [1,2]Недбайлов К.О. (*[1]НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия; [2]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*) 58
ВОССТАНОВЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ Т-15МД ИЗ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

Пинженин Е.И., Багрянский П.А., Солдаткина Е.И., Коробейникова О.А., Яковлев Д.В., Анненков В.В., Волчок Е.П., Тимофеев И.В. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 59
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В УСТАНОВКУ ГДЛ

[1,4]Васильев Г.Б., [1,2]Будаев В.П., [1]Федорович С.Д., [1,3]Кавыршин Д.И., [1,2]Карпов А.В., [1]Чан Куанг В., [1,2]Мартыненко Ю.В., [1]Комов А.Т., [1]Лубенченко А.В., [1]Лукашевский М.В., [1]Захаренков А.В., [1]Губкин М.К., [1]Рогозин К.А., [1]Коньков А.А., [1,4]Бурмистров Д.А. (*[1]НИУ МЭИ, г. Москва, Россия; [2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, [3]ОИВТ РАН, г. Москва, Россия* 60

,[4]*ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия*)
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛМ-М

[1]Днестровский Ю.Н., [1,2]Мельников А.В., [3]Лопес-Бруна Д., [3] Пастор И., [1]Днестровский А.Ю., [1]Черкасов С.В., [1]Данилов А.В., [1]Елисеев Л.Г., [1]Хабанов Ф.О., [1]Лысенко С.Е., [4]Сычугов Д.Ю. (*[1]НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, [2]НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, [3]Laboratorio Nacional de Fusion, CIEMAT, Madrid, Spain, [4]МГУ им. М.В. Ломоносова, ВМК, г, Москва, Россия*) 61
СРАВНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА В ПЛАЗМЕ С ЭЦР-НАГРЕВОМ В СТЕЛЛАРАТОРЕ TJ-II И В ТОКАМАКЕ Т-10

Васина Я.А., Пришвицын А.С, Джурик А.С., Щербак А.Н., Джигайло Н.Т., Лазарев В.Б., Мирнов С.В. (*АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, округТроицк, г. Москва, Россия*) 62
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СБОРА ЛИТИЯ МНОГОСЛОЙНЫМ КОЛЛЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ КПС С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ЭМИТТЕРОМ НА ТОКАМАКЕ Т-11М

Жильцов Н.С., Курскиев Г.С., Баженов А.Н., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Ермаков Н.В., Ильясова М.В., Киселёв Е.О., Коваль А.Н., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Щёголев П.Б. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 63
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ T_e И n_e В РЕЖИМАХ С НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

[1]Хромов Н.А., [1]Бахарев Н.Н., [2]Векшина Е.О., [1]Гусев В.К., [2]Долгова К.В., [1]Жильцов Н.С., [1]Киселев Е.О., [1]Курскиев Г.С., [1]Минаев В.Б., [2]Молчанов П.А., [1]Петров Ю.В., [2]Рожанский В.А., [1]Сахаров Н.В., [1]Тельнова А.Ю., [2]Тимохин В.М., [1]Токарев В.А., [1]Тюхменева Е.А., [1]Щеголев П.Б. (*[1]ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, [2]СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 64
ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА ДИВЕРТОРНЫЕ ПЛАСТИНЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ ИНЖЕКЦИИ АЗОТА И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ПРЕДСКАЗАНИЯМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Длугач Е.Д., Кутеев Б.В. (*НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия*) 65
ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТОКА В ПЛАЗМЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ

Черноштанов И.С. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 66
ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ДИНАМИКУ ИОНОВ В ВИНТОВОЙ МАГНИТНОЙ ПРОБКЕ

[1,2]Черноштанов И.С.,[2]Дудникова Г.И.,[2]Вшивков В.А.,[2]Боронина М.А., [2]Соловьев А.А. (*[1]ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, [2]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 67

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДА В ДИАМАГНИТНЫЙ РЕЖИМ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ

[1]Драбинский М.А., [1]Субботин Г.Ф., [1,2]Земцов И.А., [1,3]Панфилов Д.С., [1]Сушков А.В., [1]Анашкин И.О., [1]Рой И.Н., [1,3,4]Мельников А.В., [1]Баркалов Е.Е. ([1]*НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия,* [2]*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,* [3]*НИУ МФТИ, г. Москва, Россия,* [4]*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*) 68
3Д МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСА ТОКАМАКА Т-15МД

[1]Хабанов Ф.О., [1]Драбинский М.А., [1]Елисеев Л.Г., [1,2,3]Мельников А.В., [1,4]Харчев Н.К., [1]Лысенко С.Е., [1,2]Саранча Г.А., [1]Вадимов Н.А., [1,2]Горбун М.С., [1,2]Крохалев О.Д., [1]Гуцевич Е.И. , [1]Прокофьева Т.Ю. , [1,5]Норов С.А., [1,5]Аммосов Я.М., [1,6]Шелегеда И.А. ([1]*НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия,* [2]*НИУ МФТИ, г. Москва, Россия,* [3]*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия,* [4]*ИОФ РАН, г. Москва, Россия,* [5]*РУДН, г. Москва, Россия,* [6]*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*) 69
ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ДВОЙНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД

[1,2]Касьянова Н.В., [1]Разумова К.А., [1]Андреев В.Ф. ([1]*НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия,* [2]*НИУ МФТИ, г. Москва, Россия*) 70
АНАЛИЗ РЕЖИМОВ С НАИЛУЧШИМ УДЕРЖАНИЕМ ЭНЕРГИИ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА

[1]Солоха В.В., [1]Курскиев Г.С., [1,2]Яшин А.Ю., [1] Гусев В.К., [1] Жильцов Н.С., [1]Киселев Е.О., [1]Минаев В.Б., [1]Мирошников И.В., [1]Петров Ю.В., [2]Петров А.В., [2]Пономаренко А.М., [1]Сахаров Н.В., [1]Ткаченко Е.Е., [1]Толстяков С.Ю., [1]Тюхменева Е.А. ([1]*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия,* [2]*ФГАОУ ВО "СПбПУ", г. Санкт-Петербург, Россия*) 71
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПИЛИНГ-БАЛЛОННОЙ МОДЫ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

[1,2]Горяинов В.Ю., [1]Воронин А.В. ([1]*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия;* [2]*ФГАОУ ВО "СПбПУ", г. Санкт-Петербург, Россия*) 72
ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТОКОВОГО СЛОЯ В КОАКСИАЛЬНОМ УСКОРИТЕЛЕ ПЛАЗМЫ

[1,2]Саранча Г.А., [1,2,3]Мельников А.В., [1]Елисеев Л.Г., [1]Хабанов Ф.О., [1,4]Харчев Н.К. ([1]*НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия,* [2]*НИУ МФТИ, г. Москва, Россия;* [3]*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия,* [4]*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 73
О ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ДАЛЬНИХ КОРРЕЛЯЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В ПЛАЗМЕ СТЕЛЛАРАТОРА TJ-II

[1]Крохалев О.Д., [1,2]Мельников А.В., Драбинский М.А., Елисеев Л.Г., Хабанов Ф.О. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия;* [1]*НИУ МФТИ, г. Москва, Россия;* [2]*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*) 74
ГАМ НА ПЕРИФЕРИИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-10

[1,2]Топорков Д.А., [1,5]Бурмистров Д.А., [1]Гаврилов В.В., [1]Житлухин А.М., [1]Костюшин В.А., [1,2]Лиджигоряев С.Д., [1,4]Пушина А.В., [3,4]Пикуз С.А., [3,4]Рязанцев С.Н., [3,4]Скобелев И.Ю. ([1]*ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия;* [2]*НИУ МФТИ, г. Москва, Россия;* [3]*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия;* [4]*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия;* [5]*НИУ МЭИ, г. Москва, Россия*) 75

ГЕНЕРАЦИЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА С ГАЗОВОЙ И ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНЯМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

[1,2]Кукушкин А.Б., [1]Куличенко А.А. (*[1]НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, [2]НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*) 76
МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ПО КОРРЕЛЯЦИОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

[1,2]Кукушкин А.Б., [1]Сдвиженский П.А., [1]Неверов В.С. (*[1]НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, [2]НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*) 77
ПРИНЦИПЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОДОБИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА

[1,2]Кукушкин А.Б., [1,2]Хуснутдинов Р.И. (*[1]НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, [2]НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*) 78
МЕТОД БЫСТРОЙ ОЦЕНКИ ПОТОКА СМЕСИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА СО СТЕНКИ В ПЛАЗМУ ТОКАМАКА ПО Н-АЛЬФА СПЕКТРОСКОПИИ

[1]Толкачев М.С., [1]Инжеваткина А.А., [2]Ларичкин М.В., [2]Ломов К.А., [1]Судников А.В., [2]Устюжанин В.О., [1]Черноштанов И.С. (*[1]ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; [2]НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 79
НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛАЗМЫ В ВИНТОВОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

[1]Пономаренко А.М., [2]Гусев В.К., [2]Жильцов Н.С., [2]Киселев Е.О., [2]Курскиев Г.С., [2]Минаев В.Б, [1]Петров А.В., [2]Петров Ю.В., [2]Сахаров Н.В., [2]Щеголев П.Б., [1,2]Яшин А.Ю. (*[1]ФГАОУ ВО "СПбПУ", г. Санкт-Петербург, Россия, [2]ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 80
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ELM НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДОпПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Поступаев В.В., Баткин В.И., Бурдаков А.В., Бурмасов В.С., Иванов И.А., Куклин К.Н., Лыкова Ю.А., Мельников Н.А., Меклер К.И., Никишин А.В., Полосаткин С.В., Ровенских А.Ф., Сидоров Е.Н., Скляров В.Ф., Сковородин Д.И. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 81
ФИЗИЧЕСКИЙ ЗАПУСК МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКИ ГОЛ-NB

[1]Минашин П.В., [1,2]Кукушкин А.Б. (*[1]НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, [2]НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*) 82
ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫХ ПОТЕРЬ В ТОКАМАКАХ С СИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ (ТРТ, ИГНИТОР И ДР.)

Горенков И.А., Приходько В.В., Мурахтин С.В., Багрянский П.А., Савкин В.Я. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 83
ПРОЕКТ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ НА УСТАНОВКАХ ГДЛ И КОТ

[1]Белов А.С.,[1]Губский К.Л.,[1]Крат С.А.,[1]Алиева А.И., [1]Ефимов Н.Е., [1]Пришвицын А.С., [1]Кузнецов А.П. (*НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия*) 84
СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА "МИФИСТ" НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОДИННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Колесниченко К.С., Воскобойников Р.В, Иванов Р.С., Коробейникова О.А., Мурахтин С.В., Савкин В.Я. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 85
ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МИШЕННОЙ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА УСТАНОВКЕ КОТ

Судников А.В., Иванов И.А., Инжеваткина А.А., [1]Ларичкин М.В., [1]Ломов К.А., Поступаев В.В., Толкачёв М.С., [1]Устюжанин В.О. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; [1]НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 86
ТЕЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ С ВИНТОВЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Джурик А.С., Васина Я.А., Лазарев В.Б., Лешов Н.В., Мирнов С.В., Пришвицын А.С. (*[1]ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия*) 87
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕКЦИИ КАПЕЛЬ ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ НА ТОКАМАКЕ Т-11М

[1]Инжеваткина А.А., [1]Судников А.В., [1]Иванов И.А., [2]Устюжанин В.О. (*[1]ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; [2]НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 88
ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В РЕЖИМЕ УДЕРЖАНИЯ И УСКОРЕНИЯ В ВИНТОВОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

[1,2]Хавин В.Э., [1]Трошин Г.А., [1]Теплова Н.В., [1]Гусаков Е.З., [1]Лашкул С.И. (*[1]ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; [2]ФГАОУ ВО "СПбПУ", г. Санкт-Петербург, Россия*) 89
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЖНЕГИБРИДНОГО ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДИНАМИЧЕСКОГО КОДА FRTC И КОДА ASTRA

Христо М.С., Беклемишев А.Д. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 90
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМА ДИАМАГНИТНОГО УДЕРЖАНИЯ В ГДМЛ С ИНЖЕКЦИЕЙ БЫСТРЫХ ИОНОВ

[1]Беденко С.В., [1]Луцик И.О., [1]Полозков С.Д.,[2]Матюшин А.А., [3]Аржанников А.В., [3]Приходько В.В., [4]Модестов Д.Г., [4]Шмаков В.М. (*[1]НИ ТПУ, г. Томск, Россия; [2]АО "ОКБ Гидропресс", г. Подольск, Россия; [3]ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; [4]РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия*) 91
ГИБРИДНАЯ "СИНТЕЗ-ДЕЛЕНИЕ" РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА: CFD-ИССЛЕДОВАНИЯ

Неудачин С.В. (*НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия*) 92
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ПРИ СИЛЬНОМ ЭЦРН НА ТОКАМАКЕ Т-10

Ефимов Н.Е., Синельников Д.Н., Булгадарян Д.Г. (*НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия*) 93
РАЗРАБОТКА АНАЛИЗАТОРА НЕЙТРАЛОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ ТОКАМАКА МИФИСТ

[1]Крат С.А., [1]Пришвицын А.С., [1]Алиева А.И., [1]Ефимов Н.Е., [1]Виницкий Е.А., [1,2]Уласевич Д.Л., [1]Изарова А.Д., [1]Подоляко Ф.С., [1]Перевозчикова О.А., [1,3]Мещеряков А.И., [1,4]Сорокин И.А., [1,2]Мельников А.В., [1]Грунин А.В., [1]Беграмбеков Л.Б., [1]Казиев А.В., [1,4]Колодко Д.В., [1]Исакова А.С., [1]Белов А.С., [1]Губский К.Л., [1]Онгена Дж. (*[1]НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия,* 94

[2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; [3]ИОФ РАН, г, Москва, Россия; [4]ИРЭ РАН, г. Москва, Россия)
ТОКАМАК МИФИСТ-0: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

[1,2]Яшин А.Ю., [2]Гусев В.К., [2]Жильцов Н.С., [2]Киселев Е.О., [2]Курскиев Г.С., [2]Минаев В.Б, [2]Патров М.И., [1]Петров А.В., [2]Петров Ю.В., [1]Пономаренко А.М., [2]Сахаров Н.В. (*[1]ФГАОУ ВО "СПбПУ", г. Санкт-Петербург, Россия, [2]ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 95
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОКЛАССИЧЕСКОЙ ТИРИНГ-МОДЫ МЕТОДОМ ДОППЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Пименов И.С. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 96
ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ КОЛЛЕКТИВНОГО ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИРОТРОНОВ

[1]Ананьев С.С., [1]Иванов Б.В., [1,2]Кутеев Б.В., [3]Юхимчук А.А. 97
(*[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; [2]НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия; [3]РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия*)
СОСТОЯНИЕ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМОЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ГССД В РФ

[1]Ананьев С.С., [1]Панасенков А.А., [1,2]Кутеев Б.В. (*[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; [2] НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия*) 98
СОСТОЯНИЕ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА И ТОПЛИВНОЙ ИНЖЕКЦИИ В ВИДЕ ПУЧКА БЫСТРЫХ АТОМОВ ДЛЯ ГССД В РФ

Агеев А.В., Степанов С.Ю. (*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия*) 99
МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА ОБМОТКИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА Т-11М В СРЕДЕ "MICRO-CAP 11"

Дейчули П.П., Бруль А.В., Вахрушев Р.В., Дейчули Н.П., Иванов А.А., Ступишин Н.В., Колмогоров В.В. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 100
МОДЕРНИЗАЦИЯ ДУГОРАЗРЯДНОГО ГЕНЕРАТОРА ПЛАЗМЫ ДЛЯ МОЩНЫХ АТОМАРНЫХ ИНЖЕКТОРОВ СЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

Бруль А.В., Дейчули П.П., Давыденко В.И., Иванов А.А., Сорокин А.В., Ступишин Н.В. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 101
ОПТИМИЗАЦИЯ ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОЩНОГО АТОМАРНОГО ПУЧКА С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ

[1]Иванов Б.В., [1]Ананьев С.С. (*[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 102
ОЦЕНКА УРОВНЯ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ВОСПРОИЗВОДСТВА ТРИТИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРИТИЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РОССИИ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА ДЕМО-ТИН

Мещеряков А.И., Гришина И.А., Вафин И.Ю. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 103
КОМПЛЕКС ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ УВЛЕЧЕНИЯ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Мещеряков А.И., Гришина И.А. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 104
ДИНАМИКА УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ И НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА САМОСОГЛАСОВАННОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕЖИМЕ ЭЦР НАГРЕВА В

СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

[1,2]Васильков Д.Г., [1]Хольнов Ю.В. (*[1]ИОФ РАН, г. Москва, Россия, [2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,*) 105
СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЛАЗМЕ СТЕЛЛАРАТОРА Л-2М

[1]Мирнов С.В., [2]Вертков А.В., [2]Жарков М.Ю., [2]Курячий А.В., [2]Люблинский И.Е., [1]Джурик А.С, [1]Мурачев М.М., [1]Лазарев В.Б., [1]Джигайло Н.Т., [1]Лешов Н.В., [1]Чекушин Р.В., [1]Кравчук С.И., [1]Морозов В.А., [1]Антонов П.А., [1]Зорин А.В., [1]Васина Я.А., [1]Петрова Н.П. (*[1]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия, [2]АО «Красная Звезда», г. Москва, Россия*) 106
СОЗДАНИЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-11М ДЕЙСТВУЮЩЕЙ МОДЕЛИ ПОЛУЗАМКНУТОГО КОНТУРА ЦИРКУЛЯЦИИ ЛИТИЯ ДЛЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТОКАМАКА

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ» **109-127**

Демченко Н.Н. *(ФИАН, г. Москва, Россия)* 109
САМОСОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА БЕЗ ЭМПИРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ДЛЯ МНОГОПУЧКОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ МИШЕНИ

Аблесимов В.Е., Малькин А.Г., Пашарина О.Ю. (*РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров, Россия*) 110
ГЕНЕРАЦИЯ УЗКОНАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В ПЛАЗМОФОКУСНОМ РАЗРЯДЕ - ОТКРЫТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Змитренко Н.В. (*ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 111
О РАБОТАХ В.Б. РОЗАНОВА ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ УСТОЙЧИВОСТИ СЖАТИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ МИШЕНЕЙ ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА (К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

Пастухов А.В., Акунец А.А., Перваков К.С., Кувшинов И.Р., Громов А.И., Борисенко Н.Г. (*ФИАН, г. Москва, Россия*) 112
ПОРИСТАЯ СТРУКТУРА МАЛОПЛОТНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ - ПОЛИМЕР-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХСШИТОГО ПОЛИ-АЛЬФА-МЕТИЛСТИРОЛА

Александрова И.В., Акунец А.А., Гаврилкин С.Ю., Иваненко О.М., Корешева Е.Р., Кошелев Е.Л., Мицен К.В., Никитенко А.И., Тимашева Т.П., Цветков А.Ю. (*ФИАН, г. Москва, Россия*) 113
КОЛЬЦЕВАЯ СИСТЕМА ВТСП-МАГЛЕВ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО УСКОРЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ МИШЕНЕЙ: РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Баронова Е.О. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 114
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПО ОТНОСТЕЛЬНЫМ ИНТЕНСИВНОСТЯМ ЛИНИЙ ArXVII МЕТОДАМИ ПОИСКА ПО СЕТКЕ

[1]Вихрев В.В., [1]Баронова Е.О., [2]Фролов А.Ю. ([1]*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия,* [2]*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*) 115
СРАВНЕНИЕВОЗМОЖНЫХ КОЛИЧЕСТВ И ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА В Z-ПИНЧАХ И УСТАНОВКАХ ТОКАМАК

Мозговой А.Г. (*ФИАН, г. Москва, Россия; ООО «Знаю Как», г. Москва, Россия*) 116
КОЛЛАЙДЕР КОМПАКТНЫХ ТОРОВ

Гаврилин Р.О., Хурчиев А.О., Канцырев А.В., Высоцкий С.А., Колесников Д.С., Голубев А.А., Рудской И.В., Волков В.А., Дроздовский А.А., Куйбеда Р.П., Федин П.А., Савин С.М., Кузнецов А.П. (*ИТЭФ, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 117
ИЗМЕРЕНИЕ ТОРМОЗНЫХ ПОТЕРЬ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА С ЭНЕРГИЕЙ 100 кэВ/а.е.м. В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

[1]Волков Г.С., [1]Грабовский Е.В., [1]Грицук А.Н., [1]Комаров Г.Л., [2]Рупасов А.А., [1]Фролов И.Н., [1]Хилько М.В. ([1]*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия,* [2]*ФИАН, г. Москва, Россия*) 118
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ СЖАТИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ Z – ПИНЧЕЙ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ ПЛАЗМЫ

Романова В.М., Тиликин И.Н., Тер-Оганесьян А.Е., Мингалеев А.Р., Шелковенко Т.А., Пикуз С.А. (*ФИАН, г. Москва, Россия)* 119
ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ ДВУХДЛИННОВОЛНОВОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Митрофанов К.Н., Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Олейник Г.М. (*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия*) 120
ПРОФИЛИРОВАНИЕ И ОБОСТРЕНИЕ ИМПУЛЬСА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИМПЛОЗИИ ДВУХКАСКАДНЫХ СБОРОК СМЕШАННОГО СОСТАВА

[1]Александров В.В., [1]Браницкий А.В., [1]Грабовский Е.В., [1]Грицук А.Н., [1]Митрофанов К.Н., [1]Олейник Г.М., [1]Фролов И.Н., [2]Баско М.М., [2]Сасоров П.В., [2]Соломянная А.Д., [2]Вичев И.Ю., [2]Грушин Ф.С., [2]Ким Д.А., [1]Родионов Н.Б., [3]Родионова В.П. ([1]*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия;* [2]*ИПМ РАН, г. Москва, Россия;* [3]*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*) 121
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ПЛАЗМЫ НИКЕЛЯ, СОЗДАННОЙ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ АБЛЯЦИИ ТОНКИХ ФОЛЬГ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧА

Громов А.И., Акунец А.А., Борисенко Н.Г, Пастухов А.В., Толоконников С.М. (*ФИАН, г. Москва, Россия*) 122
ПРОДОЛЖЕНИЕ РАБОТ И ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МАЛОПЛОТНЫМ НАНОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ СЛОЯМ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ ИТС

Панфилов Д.Г., Грабовский Е.В., Ефремов Н.М., Ильичева М.В., Крылов М.К., Лаухин Я.Н., Лотоцкий А.П., Николашин А.А., Серяков А.Г., Сулимин Ю.Н. (*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия*) 123
ДИНАМИКА ПОСТУПЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ПЛАЗМУ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

[1]Галанин М.П., [2]Грабовский Е.В., [2]Ефремов Н.М., [2]Крылов М.К., [2]Лаухин Я.Н., 124

[2]Лотоцкий А.П., [1]Лукин В.В., [2]Николашин А.А., [2]Серяков А.Г., [2]Сулимин Ю.Н., [2]Панфилов Д. Г. (*[1]ИПМ РАН, г. Москва, Россия; [2]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия*)
РАСЧЕТЫ ПРОФИЛЯ ПЛОТНОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ИНЖЕКЦИИ РАБОЧЕГО ГАЗА В КАМЕРУ ПФ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

[1]Фролов А.Ю., [2]Вихрев В.В. (*[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, [2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 125
МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ИОНОВ В Z-ПИНЧАХ НА ОСНОВЕ МГД-НЕУСТОЙЧИВОСТИ

[1]Гуськов С.Ю., [1,2]Кучугов П.А., [1]Яхин Р.А. (*[1]ФИАН, г. Москва, Россия; [2]ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 126
ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ УДАРНАЯ ВОЛНА В ПЛАЗМЕ С ДОКРИТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

[1]Гожев Д.А., [1,2]Бочкарев С.Г., [1,2]Брантов А.В., [1,2]Быченков В.Ю. 127
(*[1]ФИАН, г. Москва, Россия; [2]ВНИИА им. Н.Л. Духова, г. Москва, Россия*)
КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ МИКРОКЛАСТЕРНОЙ МИШЕНИ, ОБЛУЧАЕМОЙ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Лешов Н.В., Мирнов С.В., Щербак А.Н. (*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, Россия, e-mail: leshov@triniti.ru)* 128
ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ТИПИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ТОКАМАКА Т-11М

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ» 131-164

Апфельбаум Е.М. (*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*) 131
РАСЧЁТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ВИСМУТА

Шпатаковская Г.В. (*ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 132
ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУППЫ ЖЕЛЕЗА

Сироткин Н.А., Хлюстова А.В., Титов В.А. (*ИХР РАН, г. Иваново, Россия*) 133
СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТОВ ПВС С ОКСИДАМИ МОЛИБДЕНА И ТИТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ПОДВОДНОГО РАЗРЯДА, И ИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Векленко Б.А. (*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*) 134
Γ -ПРЕДСТАВЛЕНИЕ В КВАНТОВОЙ ОПТИКЕ И АНОМАЛЬНЫЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ОПЕРАТОРЫ

[1]Лебедев Ю.А., [1,2]Крашевская Г.В., [1]Батукаев Т.С., [2]Михайлюк А.В. 135
(*[1]ИНХС РАН, г. Москва, Россия; [2]НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия*)
НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ РАЗВИТИЯ СВЧ РАЗРЯДА В ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДАХ

Кузнецов В.Е., Дудник Ю.Д., Сафронов А.А., Ширяев В.Н, Васильева О.Б. 136
(*[1]ИЭЭ РАН, г. Санкт-Петербург*)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМОТРОНА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю. (*КФУ, г. Казань, Россия*) 137
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ: ТВЕРДОЕ ТЕЛО-ЖИДКИЙ ЭЛЕКТРОЛИТ

Елисеев С.И. (*СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 138
ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРЫХ ИОНИЗАЦИОННЫХ ВОЛН В НЕРАВНОМЕРНО ЗАПОЛНЕННЫХ ГАЗОМ ПРОТЯЖЕННЫХ КАПИЛЛЯРАХ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Елисеев С.И. (*СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 139
АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Лосева Т.В., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. 140
(*ИДГ РАН, г. Москва, Россия*)
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В АКТИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ «ФЛАКСУС» И "СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА"

[1]Гавриков М.Б., [1]Таюрский А.А. (*ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 141
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ БЕГУЩИХ ВОЛН В МГД С УЧЁТОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

[1,2]Бардаков В.М., [2]Строкин Н.А., [2,3]Ступин А.Н. [2]Ригин А.В. 142
([1]*ИрГУПС, г. Иркутск, Россия;* [2]*ИрНИТУ, г. Иркутск, Россия;* [3]*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*)
ПЛОТНОСТЬ ИОНОВ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО *E×B* РАЗРЯДА

[1]Вагин К.Ю., [1,2]Мамонтова Т.В., [1,2]Урюпин С.А. ([1]*ФИАН, г. Москва, Россия;* 143
[2]*НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия*)
ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗОВАННОЙ ПРИ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ ИНЕРТНОГО ГАЗА, НА ПРОНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Выбин С.С., Изотов И.В., Миронов Е.А., Палашов О.В., Скалыга В.А. 144
(*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*)
РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ПРОТОННОГО ИНЖЕКТОРА ПРОЕКТА DARIA

Выбин С.С., Изотов И.В., Миронов Е.А., Палашов О.В., Скалыга В.А. 145
(*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*)
МОДЕРНИЗАЦИЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ИПФ РАН

Лапин Р.Л., Скалыга В.А., Изотов И.В., Голубев С.В., Боханов А.Ф., Киселёва Е.М., 146
Выбин С.С. (*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*)
ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ГЕНЕРАЦИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР РАЗРЯДА НА УСТАНОВКЕ GISMO

Шуровский Д.О., Кутузов Д.С., Сухов А.Е., Бунин Е.А., Брагин Е.Ю. 147

(*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*)
ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ГЕЛИКОННОМ РАЗРЯДЕ

Лебедев Ю.А., Татаринов А.В., Эпштейн И.Л., Титов А.Ю. (*ИНХС РАН, г. Москва, Россия*) 148
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ РАЗРЯДА В СМЕСЯХ ЭТАНОЛА И ВОДЫ

[1]Киселёва Е.М., [1]Викторов М.Е., [1]Скалыга В.А., [1]Изотов И.В., [2]Боханов А.Ф. 149
([1]*НГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия; ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*)
ДИАГНОСТИКА ГОРЯЧЕЙ КОМПОНЕНТЫ ПЛОТНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР РАЗРЯДА

Мельников А.Д., Усманов Р.А., Полищук В.П., Антонов Н.Н., Гавриков А.В., Ворона Н.А. (*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*) 150
ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОЙ ДУГИ С ПОДОГРЕВАЕМЫМ КАТОДОМ ИЗ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ

[1,2]Самохвалов А.А., [2]Сергушичев К.А., [1,3]Елисеев С.И., [2]Смирнов А.А., 151
[2]Бронзов Т.П., [2]Гетман Д.В., [2]Большаков Е.П., [2]Бурцев В.А. ([1]*Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия; [2]ООО «Лаборатория им. Бурцева В.А.», г. Санкт-Петербург, Россия; [3]СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия*)
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ В ПЛАЗМЕ НАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

[1,2]Мартынова И.А., [1,2]Иосилевский И.Л. ([1]*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия;* 152
[2]*МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*)
ЭФФЕКТИВНЫЙ ЗАРЯД МАКРОИОНА В КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ

Андреев В.В., Новицкий А.А. (*РУДН, г. Москва, Россия*) 153
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАХВАТА ЧАСТИЦ В РЕЖИМ АВТОРЕЗОНАНСА В ДЛИННОМ ПРОБКОТРОНЕ

Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Кутузов Д.С., Сухов А.Е., Шуровский Д.О., Янченков С.В. 154
(*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*)
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕНЫХ ПРОЦЕССОВ В МОЩНЫХ БЕЗЭЛЕКТРОДНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

[1,2]Чиннов В.Ф., [1,2]Кавыршин Д.И., [1]Федорович С.Д., [1,2]Муравьева Е.В., [1,2]Мязин А.С., 155
[1]Чан К.В., [1]Карпов А.В., [1]Будаев В.П. ([1]*НИУ «МЭИ, г. Москва, Россия;* [2]*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*)
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МАЛЫХ ПРИМЕСЕЙ В РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЕ ГЕЛИЯ

[1,2]Кавыршин Д.И., [1]Федорович С.Д., [1,2]Муравьева Е.В., [1,2]Чиннов В.Ф., 156
[1,2]Мязин А.С., [1]Чан К.В., [1]Карпов А.В., [1]Будаев В.П. ([1]*НИУ «МЭИ, г. Москва, Россия;* [2]*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*)
СПЕКТРАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАМАГНИЧЕННОМ ГЕЛИЕВОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

[1,2]Майстренко Д.А., [1]Шагайда А.А., [1,2]Ловцов А.С. ([1]*АО ГНЦ "Центр* 157
Келдыша", г. Москва, Россия; [2]*МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*)
РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ НОВОГО ЗОНДА ЗАДЕРЖИВАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ЭРД

Шашков А.С. (*[1]АО ГНЦ "Центр Келдыша", г. Москва, Россия*) 158
МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ АНОМАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Шашков А.С. (*[1]АО ГНЦ "Центр Келдыша", г. Москва, Россия*) 159
2D3V ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ПЛАЗМЫ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЧИСЛЕННО ВОССТАНОВЛЕННЫМ ПРОФИЛЕМ АНОМАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Франк А.Г. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 160
ОСОБЕННОСТИ ТОКОВЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ В МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ С *X*-ЛИНИЕЙ В ПРИСУТСТВИИ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ (GUIDE FIELD)

Кирий Н.П., Франк А. Г. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 161
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКОВЫХ СЛОЕВ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ НЕЙТРАЛЬНОГО ГЕЛИЯ С ЗАПРЕЩЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Жуков В.И., Карфидов Д.М. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 162
ВОЗБУЖДЕНИЕ ДИПОЛЬНОЙ И АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ МОДЫ СВЧ СТОЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ПЛАЗМЫ

Малютин А.Ю., Ярошевская А.Д., Подковыров В.Л., Гуторов К.М. 163
(*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия*)
СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

Ярошевская А.Д., Малютин А.Ю., Подковыров В.Л., Гуторов К.М., Карташева А.А. 164
(*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия*)
ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА ПЛАЗМЫ КСПУ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ» **167-203**

[1]Пискарев И.М., [2]Аристова Н.А., [3]Иванова И.П. (*[1]НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, [2]Уральский федеральный университет, Нижнетагильский технологический институт, г. Нижний Тагил, Россия, [3]НГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*) 167
МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА НА ФЕНОЛ

Шавелкина М.Б., Кавыршин Д.И. (*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*) 168
ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ ПЛАЗМОТРОНА ПОСТОЯННОГО ТОКА В ОБЛАСТИ НУКЛЕАЦИИ НАНОКОМПОЗИТА МЕДЬ/ ГРАФЕН

[1,2,3]Казаков Е.Д., [1]Крутиков Д.И., [1]Орлов М.Ю., [4]Павленко М.И, 169
[1,2]Смирнова А.Р., [1]Стрижаков М.Г., [4]Сунчугашев К.А. (*[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; [2]МФТИ (НИУ),г. Долгопрудный, Россия: [3]НИУ*

"МЭИ", г. Москва, Россия; [4]РУДН, г. Москва, Россия)
РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ "КАЛЬМАР"

[1,2,3]Казаков Е.Д., [1]Крутиков Д.И.,.[1]Орлов М.Ю.,[4]Павленко М.И, [5]Садовничий Д.Н., [1,5]Смирнова А.Р., [1]Стрижаков М.Г., [5]Шереметьев К.Ю. (*[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; [2]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; [3]НИУ "МЭИ", г. Москва, Россия; [4]РУДН, г. Москва, Россия; [5]ФГУП «ФЦДТ Союз», г. Дзержинский, Россия*) 170
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНОТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

[1,2,3]Казаков Е.Д., [1]Бобырь Н.П., [1]Крутиков Д.И.,.[1]Орлов М.Ю., [1,2]Смирнова А.Р., [1]Спицын А.В., [1]Стрижаков М.Г., [4]Сунчугашев К.А. (*[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; [2]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия: [3]НИУ "МЭИ", г. Москва, Россия; [4]РУДН, г. Москва, Россия*) 171
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК, СИЛЬНОТОЧНЫМ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. (*НИИ механики МГУ, г. Москва, Россия*) 172
ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНЫХ ФАКТОРОВ РАЗРЯДНОЙ СИСТЕМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Белозеров О.С., Бакшаев Ю.Л., Хромов С.А., Данько С.А. (*НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия*) 173
ОБНАРУЖЕНИЕ В СИЛЬНОТОЧНОМ ГЕНЕРАТОРЕ РЭП СВЕРХЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

[1]Бишаев А.М., [1]Буш А., [2]Гавриков М.Б., [1]Каменцев Е.К., [2]Савельев В.В. (*[1]РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, [2]ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 174
МАГНИТНАЯ СИСТЕМА СПД ИЗ ВТСП 2 ЛЕНТЫ

[1]Бишаев А.М., [2]Гавриков М.Б. (*[1]РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, [2]ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 175
ОБ АНОМАЛЬНОЙ ЭРОЗИИ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ СПД

Бычков В.Л., Сороковых Д.Е., Мухамадиев А.И.., Шваров А.П., Михайловская Т.О., Горячкин П.А., Малютин И.С., Черников В.А., Изотов А.М. (*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*) 176
ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ДИСПЕРСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЖИДКИЕ ЭЛЕКТРОДЫ

[1]Бычков В.Л., [1]Кралькина Е.А., [2]Кочетов И.В., [3]Голубков М.Г., [1]Смирнов Д.И. (*[1]МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; [2]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия; [3]ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН, г. Москва, Россия*) 177
ОСНОВНЫЕ ИОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ ВОЗДУХА В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

[1]Бычков В.Л., [1]Кралькина Е.А., [2]Степанов И.Г., [2]Голубков М.Г., [1]Смирнов Д.И. 178
([1]*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия;* [2]*ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН, г. Москва, Россия*)
ОСНОВНЫЕ ИОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ ВОЗДУХА В ТРОПОСФЕРЕ

Мурсенкова И.В., Иванов И.Э., Ляо Ю. (*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*) 179
НАНОСЕКУНДНЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ СКОЛЬЗЯЩИЙ РАЗРЯД В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА С НАКЛОННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

[1]Мурсенкова И.В., [1]Милицина А.А., [1]Кузнецов А.Ю., [2]Уланов П.Ю. 180
([1]*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,* [2]*АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва, Россия*)
ДИНАМИКА ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПЛОСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю., Обрезков О.И. (*НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия*) 181
ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОДОВ КАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ

Змиевская Г.И. (*ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 182
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ В НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ ИОНОВ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

[1,2]Аржанников А.В., [1,2]Синицкий С.Л., [1]Самцов Д.А., [1,2]Сандалов Е.С., [1,2]Попов С.С., 183
[1]Атлуханов М.Г. , [1]Макаров М.А., [1,2]Калинин П.В., [1]Куклин К.Н., [1]Ровенских А.Ф., [1,2]Степанов В.Д. ([1]*ИЯФ СО РАН, г. Новосибтрск, Россия,* [2]*НГУ, г. Новосибирск, Россия*)
ЭНЕРГОСОДЕРЖАНИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ГЕНЕРИРУЕМОГО В ПЛАЗМЕ ПОТОКА СУБММИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ РЭП С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 5 МКС

Черкез Д.И., Степанов Н.О., Ананьев С.С., Спицын А.В (*НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия*) 184
УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

[1]Рогозин К.А., [1]Федорович С.Д, [1,2]Карпов А.В., [1,3]Кавыршин Д.И., [1,2]Будаев В.П., 185
[1]Лукашевский М.В., [1]Чан К.В., [1]Кваскоов В.С., [1]Коньков А.А., [1]Белоусов С.В., [1]Васильев Г.Б. ([1]*НИУ МЭИ, г. Москва, Россия,* [2]*НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия;* [3]*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*)
ДИАГНОСТИКА ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КОМПОНЕНТОВ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА

[1]Двинин С.А., [2,3]Корнеева М.А. ([1]*МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;* [2]*РУДН, г. Москва, Россия;* [3]*ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, г. Москва, Россия*) 186
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА СВЧ ПОЛЯ РЕЗОНАНСНОГО

РАЗРЯДА В ПРОБКОТРОНЕ

Бычков В.Л., Вавилин К.В., Кралькина Е.А., Двинин С.А., Задириев И.И., Никонов А.М., Смирнов Д.И. (*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*) 187
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА ПРИ РАБОТЕ НА ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ И НА ВОЗДУХЕ

[1]Двинин С.А., [2]Солихов Д.К., [2]Хобилов Д.У. ([1]*МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;* [2]*Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан*)) 188
ВРМБ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ ДВУМЕРНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЛНЫ НАКАЧКИ В ПРИБЛИЖЕНИИ СИЛЬНОЙ ДИССИПАЦИИ

[1,2]Ахмадуллина Н.С., [2]Батанов Г.М., [2]Борзосеков В.Д., [2]Воронова Е.В., [2]Гусейн-заде Н.Г., [2]Заклецкий З.А., [2]Качмар В.В., [2]Князев А.В., [2]Козак А.К., [2]Колик Л.В., [2]Кончеков Е.М., [2]Летунов А.А., [2]Логвиненко В.П., [2]Малахов Д.В., [2]Мошкина К.Г., [2,3]Образцова Е.А., [2]Петров А.Е., [2]Скворцова Н.Н., [2]Соколов А.С., [2]Степахин В.Д., [2]Харчев Н.К., [2,4]Шишилов О.Н. ([1]*ИММ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия;* [2]*ИОФ РАН, г. Москва, Россия;* [3]*ИБХ РАН, г. Москва, Россия;* [4]*РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия*) 189
ВОЗМОЖНОСТЬ СИНТЕЗА ПЛАТИНОВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ПОДПОРОГОВОМ РАЗРЯДЕ

[1]Воронова Е.В., [1]Летунов А.А., [1,2]Логвиненко В.П., [1]Князев А.В. ([1]*ИОФ РАН, г. Москва, Россия;* [2]*РУДН, г. Москва, Россия*) 190
ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПОРОШКОВ ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ПРИ СИНТЕЗЕ КАТАЛИЗАТОРОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

Иванов В.А., Коныжев М.Е., Камолова Т.И., Дорофеюк А.А. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 191
ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРНОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ КАТОДНЫХ ПЯТЕН, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ МИКРОПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА, ПОКРЫТОГО ТОНКОЙ ОКСИДНОЙ ПЛЁНКОЙ

[1]Скворцова Н.Н., [1]Степахин В.Д., [2]Сорокин А.А., [1]Малахов Д.В., [1]Качмар В.В., [1]Гусейн-заде Н.Г., [1,3]Ахмадуллина Н.С., [1]Борзосеков В.Д., [1]Воронова Е.В., [1,4]Шишилов О.Н. ([1]*ИОФ РАН, г. Москва, Россия;* [2]*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия;* [3]*ИММ им. А.А. Байкова РАН, г Москва, Россия;* [4]*РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия*) 192
МИКРОВОЛНОВЫЕ ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОСАЖДЕНИЮ РЕГОЛИТА (ЛУННОЙ ПЫЛИ) НА ПЛАСТИНЫ МЕТАЛЛОВ

Иванов И.Е. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 193
ШИРОКОПОЛОСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЕННЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Заклецкий З.А., Малахов Д.В., Скворцова Н.Н., Борзосеков В.Д., Степахин В.Д., Гусейн-заде Н.Г. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 194
ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ СВЧ-ИМПУЛЬСА ИЗЛУЧЕНИЯ ГИРОТРОНА В СМЕСЯХ ПОРОШКОВ AL_2O_3/PT

Диас Михайлова Д.Е., Иванов И.Е., Стрелков П.С. (*ИОФ РАН, г. Москва,* 195

Россия)
ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В ПЛАЗМЕННОМ РЕЛЯТИВИСТСКОМ СВЧ УСИЛИТЕЛЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

[1]Асанина С.Г., [1,2]Булейко А.Б., [1]Бахтин В.П., [1,2]Лоза О.Т., [1]Раваев А.А. (*[1]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия; [2]РУДН, г. Москва, Россия*) 196
ПЛАЗМЕННЫЙ МАЗЕР В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ УСИЛЕНИЯ ШУМА

[1]Карташева А.А., [1]Подковыров В.Л., [1]Гуторов К.М., [1]Васильев Г.Б., [1]Коваленко Д.В. (*[1]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия*) 197
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ СИЛЬНОТОЧНОМ ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

[1]Анпилов А.М., [1]Бархударов Э.М., [1]Коссый И.А., [1]Кузнецов С.В., [2]Мисакян М.А., [1]Моряков И.В., [3]Петухов Д.И., [1]Тактакишвили И.М. (*[1]ИОФ РАН, г. Москва, Россия; [2]НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия; [3]МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*) 198
ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА

Давыдов А.М., Артемьев К.В. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 199
ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО КОМПОНЕНТА В МИКРОВОЛНОВОМ ФАКЕЛЕ

Артемьев К.В., Давыдов А.М., Колик Л.В. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 200
ПРЯМОЙ ПЬЕЗОРАЗРЯД КАК ИСТОЧНИК ОКИСЛОВ АЗОТА И АЗОТИСТОЙ КИСЛОТЫ

[1]Заклецкий З.А., [1]Малахов Д.В., [1]Петров А.Е., [1]Скворцова Н.Н. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 201
ПАРАМЕТРЫ РАЗЛЕТА ЧАСТИЦ ПРИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ МАТЕРИАЛОВ В РЕАКТОРЕ ГР-1

[1]Князев А.В., [1]Летунов А.А., [1]Воронова Е.В., [1,2]Логвиненко В.П. (*[1]ИОФ РАН, г. Москва, Россия;[2]РУДН, г. Москва, Россия*) 202
ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ПО СПЕКТРАМ ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНОГО СВЧ-ИМПУЛЬСА ГИРОТРОНА СО СМЕСЬЮ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛА И ДИЭЛЕКТРИКА

[1,2]Логвиненко В.П., [1]Летунов А.А., [1]Воронова Е.В., [1]Князев А.В. (*[1]ИОФ РАН, г. Москва, Россия;[2]РУДН, г. Москва, Россия*) 203
ОЦЕНКИ ГАЗОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗРЯДА ПО СПЕКТРАМ ИЗЛУЧЕНИЯ γ - СИСТЕМЫ TiO ПРИ СИНТЕЗЕ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПЛАТИНЫ

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ПРОЕКТ ИТЭР: ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО» **207-221**

[1,2]Новоселова З.И.,[1,2]Позняк И.М.,[1,2]Топорков Д.А.,[1,2,3]Сафронов В.М., [1]Кочнев Д.М.,[1]Карелов С.В.,[1,2]Федулаев Е.Д., [1]Цыбенко В.Ю. (*[1]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия;[2]НИУ МФТИ, г. Долгопрудный, Россия; [3]ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*) ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА И ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ С ВОЛЬФРАМОМ, В УСЛОВИЯХ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ БЫСТРЫХ ПРОЦЕССОВ В ИТЭР — 207

[1,2]Шошин А.А., [1,3]Бурдаков А.В., [1]Иванцивский М.В., [1,2]Полосаткин С.В., [1,2]Суляев Ю.С., [1,3]Семенов А.М., [4]Овсиенко А.И. (*[1]ИЯФ СО РАН, г. Новосибтрск, Россия, [2]НГУ, г. Новосибирск, Россия; [3]НГТУ, г. Новосибирск, Россия; [4]ООО Вириал, г. Санкт-Петербург, Россия*) СВОЙСТВА ПОСТАВОЧНОЙ ПАРТИИ КЕРАМИКИ КАРБИДА БОРА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПОРТОВ ИТЭР — 208

[1]Коваленко Д.В., [1]Карташева А.А., [1]Петраков М.В., [1]Подковыров В.Л., [1]Сергеечев А.А., [1]Гуторов К.М., [1]Ярошевская А.Д., [1]Панин С.Е., [1]Барсук В.А. (*[1]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия*) МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ — 209

[1]ТаскаевА.С., [1]Иванцивский М.В., [1,2]Бурдаков А.В., [1]Шиянков С.В., [1]Селезнев П.А., [1]Грехова М.В., [1,3]Шошин А.А., [4]Немцев Г.Е., [5]Смирнов А.Б., [5]Пожилов А.А., [5]Кириенко И.Д., [5]Модестов В.С. (*[1]ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; [2]НГТУ, г. Новосибирск, Россия; [3]НГТУ, г. Новосибирск, Россия; [4]СПбГТУ, г. Санкт-Петербург, Россия; [5]ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*) РАЗВИТИЕ ДИЗАЙНА ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ВНК — 210

[1]Иванцивский М.В., [1,3]Бурдаков А.В., [1]Гавриленко Д.Е. [1]Грехова М.В. [1]Золотухина Н.А. [1]Константинов В.М. [2]Кравцов Д.Э. [1]Листопад А.А. [1]Манаенкова Ю.А. [1]Рыжанков И.С. [1]Селезнев П.А. [1]Серемин В.В. [2]Сорокина Н.В., [1,4]Суляев Ю.С. [1]Таскаев А.С. [1]Шабунин Е.В. [1]Шарафеева С.Р. [1]Шиянков С.В. [1,4]Шошин А.А. (*[1]ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, [2]ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; [3]НГТУ, г. Новосибирск, Россия; [4]НГТУ, г. Новосибирск, Россия*) СТАТУС РАБОТ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР В ИЯФ СО РАН — 211

[1,2]Федулаев Е.Д., [1,2]Позняк И.М., [2]Топорков Д.А., [1,2]Сафронов В.М., [2]Кочнев Д.М., [1,2]Новоселова З.И, [2]Карелов С.В., [2]Иванов А.И. (*[1]НИУ МФТИ, г. Долгопрудный, Россия, [2]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, г. Москва, Россия*) ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВКИ МК-200UG ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ НА ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ИТЭР — 212

Сотников О.З., Бельченко Ю.И., Иванов А.А., Санин А.Л., Горбовский А.И. — 213

(*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*)
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА ИНЖЕКТОРА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ НЕЙТРАЛОВ С УСКОРЕНИЕМ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА

[1,2]Будаев В.П., [3]Житлухин А.М., [1]Мартыненко Ю.В., [3,4]Подковыров В.Л., [3,4]Позняк И.М., [3]Коваленко Д.В., [3]Цыбенко В.Ю, [3,4]Новоселова З.И., [3,4]Федулаев Е.Д., [2,3]Бурмистров Д.А., [3,4]Лиджигоряев С.Д., [3]Исмагилов О.Р. (*[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; [2]НИУ МЭИ, г. Москва, Россия; [3]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия; [4]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*) 214
ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ КУПОЛА ДИВЕРТОРА ИТЭР ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ В КСПУ-Т: РЕЗУЛЬТАТЫ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ НА УСЛОВИЯ ИТЭР

Ханаева Р.А., [1]Хайрутдинов Р.Р. (*МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; [1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 215
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ, ЧАСТИЦ И ВВОДА ТОКА В ТОКАМАКЕ ИТЭР

Скопинцев Д.А., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р. (*[1]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия*) 216
ТЕХНОЛОГИИ УСКОРЕНИЯ РАСЧЁТОВ В ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ ТОКАМАКА

Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семенов О.И., Ежова З.В., Семенов Е.В., Миронов А.Ю., Ларионов А.С., Нагорный Н.В., Семенов И.Б., Звонарева А.А., Григорян Л.А., Гужев Д.И. Журавлев М.К., Николаев А.И. (*[1]ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*) 217
РАЗВИТИЕ АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА (АИП ИКП) КАК ИНСТРУМЕНТА ИНТЕГРАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ УТС

[1]Афанасьев В.И.,[2]Гончаров П.Р., [2]Мельник А.Д., [2]Миронов М.И., [2]Наволоцкий А.С., [2]Несеневич В.Г., [2]Петров М.П., [2]Петров С.Я., [2]Чернышев Ф.В. (*[1]СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия, [2]ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 218
ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ НА ТОКАМАКЕ С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Мухин Е.Е. (*ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 219
ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ В ДИВЕРТОРЕ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА

[1]Семенов О., [1]Звонарева А., [1]Ларионов А., [2]Лобес Л., [1]Миронова Е., [1]Потапов А.,[1]Нагорный Н., [1]Портоне С., [3]Степанов Д., [1]Семенов И.. ([1]*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, [2]НИ ТПУ, Томск, Россия; Организация ИТЭР, Сен-Поль-ле-Дюранс, Франция*) 220
ОПЫТ РОССИИ В РАЗРАБОТКЕ И ТЕСТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УДАЛЕННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ИТЭР

Нагорный Н.В., Звонарева А.А., Миронов А.Ю., Миронова Е.Ю., Журавлёв М.К., Гужев Д.И., Николаев А.И., Нестеренко В.М., Портоне С.С. (*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», support@iterrf.ru*) 221

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ НАУЧНЫХ ДАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УТС ЭКСПЕРИМЕНТАХ

СПИСОК АВТОРОВ 222-229

ОБЗОРНЫЕ ДОКЛАДЫ

REVIEWS

К 90-ЛЕТИЮ ЛЬВА МИХАЙЛОВИЧА КОВРИЖНЫХ (1931-2021)

Иванов В.А.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: ivanov@fpl.gpi.ru



5 июля 2021 года на 90-м году жизни скончался доктор физико-математических наук, профессор ЛЕВ МИХАЙЛОВИЧ КОВРИЖНЫХ.

Л.М. Коврижных родился 12 сентября 1931 года. В 1955 году после окончания Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Л.М. Коврижных поступил на работу в Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН), в лабораторию ускорителей, которой руководил академик В.И. Векслер, и включился в разработку теории новых ускорителей. За 4 года работы им был выполнен цикл исследований, и уже в 1959 году он защищает кандидатскую диссертацию. Сразу после защиты он переключился на изучение физики плазмы, и в 1967 году защитил докторскую диссертацию по статистической теории взаимодействия волн в плазме. В 1970-1976 гг. в составе коллектива учеников Коврижных Л.М. внес значительный вклад в развитие теории взаимодействия мощных электромагнитных волн с неоднородной плазмой и ускорение заряженных частиц в усиленном поле в области плазменного резонанса. Одновременно интересы Льва Михайловича устремились в сторону физики высокотемпературной плазмы и ее удержания в замкнутых магнитных конфигурациях, в первую очередь, в стеллараторах. Исследования по УТС велись под руководством Л.М. Коврижных сначала в секторе физики плазмы ФИАН, а с 1983 года в лаборатории образованного в 1982 г. Института общей физики АН СССР (ныне ИОФ РАН). Им были выполнены пионерские работы по устойчивости структуры винтовых магнитных полей с учетом давления удерживаемой плазмы и компенсации резонансных возмущений в тороидальных магнитных ловушках. Эти исследования привели к разработке новой концепции построения стеллараторных магнитных конфигураций, и эти результаты в настоящее время применяются во многих лабораториях мира, в которых работают современные стеллараторы.

Л.М. Коврижных являлся одним из создателей неоклассической теории переноса заряженных частиц и энергии плазмы в тороидальных магнитных системах. За цикл работ «Теория термоядерной тороидальной плазмы», выполненных в 1959–1980 гг. в составе коллектива ученых он был награжден Ленинской премией в 1984 году.

С 1982 года после смерти М.С.Рабиновича Л.М. Коврижных руководил научным советом РАН по физике плазмы вплоть до 2020 года. Проводимая с 1973 г. Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, ставшая ныне международной, являлась важным делом Л.М. Коврижных. С 1982 г. Лев Михайлович возглавлял Программный комитет этой конференции и оставался сопредседателем этого форума ученых, работающих в физике плазмы, до 2020 года.

Научные и научно-организаторские работы Л.М. Коврижных получили общественное признание, – за большой вклад в развитие международных связей в области физике плазмы и УТС в 2002 году Л.М. Коврижных был награжден российским орденом «Дружбы».

С 1975 г. Лев Михайлович работал в составе редколлегии журнала «Физика плазмы», в качестве автора регулярно публиковал оригинальные статьи по физике плазмы, а также ежегодные обзоры о состоянии исследований в области физики плазмы и плазменных технологий в России. Он был прекрасным лектором, умным собеседником, способным просто объяснить сложные физические проблемы, и благодаря этому Лев Михайлович привлекал молодых специалистов в физику плазмы.

Сообщество ученых, работающих в области физики плазмы, высоко ценит вклад в науку Льва Михайловича Коврижных, будет помнить его как прямого и доброжелательного человека в общении с коллегами и друзьями.

К 90-ЛЕТИЮ ВЛАДИСЛАВА БОРИСОВИЧА РОЗАНОВА (1932-2019)

Вергунова Г.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия, e-mail: vergunovaga@lebedev.ru



11 декабря 2022 года исполнилось бы 90 лет Владиславу Борисовичу Розанову, выдающемуся ученому в области ядерной физики и физики плазмы, одному из основоположников теории лазерного термоядерного синтеза.

В 1956 г. В.Б. Розанов закончил Отделение строения вещества Физического факультета МГУ и был направлен в НИИ-1011 (ныне РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск Челябинской области), где с 1956 по 1966 г. работал в направлении реализации Атомного проекта СССР. Работы В.Б. Розанова этого периода в области прикладной физики внесли большой вклад в укрепление обороноспособности нашей страны и в 1966 г. были удостоены Ленинской премии.

Последующая трудовая и творческая деятельность В.Б. Розанова неразрывно связана с Отделением квантовой радиофизики Физического института им.П.Н.Лебедева РАН, в котором он работал с 1966 г до последних дней жизни. В.Б. Розанов внёс значительный вклад в развитие работ в области физики мощных лазеров. Ему принадлежит одна из первых схем рентгеновского лазера, основанного на накачке активной среды за счет фотоионизации электронов из внутренних оболочек. Исследования В.Б. Розанова по изучению спектров излучения газовых разрядов, методов управления ими составили основу разработки эффективных источников накачки мощных лазеров различного типа. В 1981 г. эти работы были удостоены Государственной премии СССР.

В.Б. Розанов внёс большой вклад в становлении и развитии исследований в области лазерного термоядерного синтеза. При его основополагающем участии были созданы модели основных физических процессов лазерного термоядерного синтеза, которые составили основу развития алгоритмов математических программ для численного моделирования сжатия и горения лазерных термоядерных мишеней, созданных в творческом содружестве с учёными Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. В.Б. Розанов внес решающий вклад в разработку современной концепции мишени лазерного термоядерного синтеза в виде многослойной сферической оболочки и исследования устойчивости сжатия такой мишени. В.Б. Розанов – автор «эволюционной» теории развития гидродинамических неустойчивостей. Ему принадлежит ряд важных предложений, относящихся к концепции непрямого сжатия термоядерной мишени импульсом лазерно-индуцированного рентгеновского излучения и направленных на повышение устойчивости сжатия.

В.Б. Розанов внёс значительный вклад в развитие физики гибридного энергетического реактора синтез-деление при контролируемом инициировании ядерной реакции термоядерными нейтронами. Он является одним из пионеров в этой области, автором нескольких перспективных схем реакторов такого типа.

В течение 40 лет В.Б. Розанов читал лекции в Московском инженерно-физическом институте, воспитав целую плеяду специалистов в области высокотемпературной плазмы и лазерного термоядерного синтеза. Им написано несколько книг, посвященных физике плазмы и лазерного термоядерного синтеза, учебных пособий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ГОЛУБЫХ СТРУЙ И КРАСНЫХ СПРАЙТОВ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЯДОВ

Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Белоплотов Д.В., Виноградов Н.П., Ломаев М.И., Сорокин Д.А.

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия,
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.001

Высотные разряды в атмосфере Земли изучаются большим числом научных групп, см., например, [1-6]. Последние годы получению новых результатов способствует совершенствование приборов для регистрации различных видов излучения, а также проведение съёмок с самолётов и Международной космической станции [3, 6]. В интернете появилось большое число цветных фотографий высотных атмосферных разрядов, в том числе, красных спрайтов, голубых струй и аналогов голубых струй (стартеров, гигантских струй), которые относятся к скоротечные световые явления (ССЯ). В научных лабораториях проводится моделирование этих явлений как экспериментальное, так теоретическое. Однако многие вопросы на настоящее время остаются не выясненными. К ним относится механизмы появления различных ССЯ и их влияние друг на друга, а также природа цвета наблюдаемых высотных разрядов.

В данном докладе будут приведены результаты экспериментальных исследований влияние паров различных металлов из электродов на цвет импульсных и импульсно-периодических разрядов. В экспериментах использовались промежутки с неоднородным распределением электрического поля. Цветные мини струи регистрировались в воздухе, азоте, аргоне при диффузных и искровых разрядах, а также сопровождались генерацией убегающих электронов [7, 8]. Было установлено, что на цвет мини струй, которые появляются при возникновении ярких пятен на электродах, существенное влияние оказывает материал электродов в независимости от полярности импульса напряжения. Показано, что цвет плазмы в области мини струи более соответствует цвету атмосферных разрядов (красных спрайтов и голубых струй), наблюдаемых на больших высотах, чем свечение диффузных разрядов в воздухе и азоте при том же давлении. Подтверждено, что использование электродов из алюминия окрашивает мини струи в красный цвет, из меди в зелёный, а из железа в голубой. Проведено сравнение свойств голубых струй и красных спрайтов с формированием стримеров при диффузном, коронном и апокампическом [9] разрядах.

Литература

[1]. Sentman D.D., Wescott E.M. Phys. Plasmas **2**, 2514-2522 (1995).
[2]. Pasko V.P., Inan U.S., Bell T.F., Taranenko Y.N., J. Geophys. Res. **102**, 4529–4561 (1997).
[3]. Jehl A., Farges T., Blanc E. J. Geophys. Res.: Space Phys. **118**(1), 454-461 (2013).
[4]. Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Stendel M., Singh R., Siingh D., Geophys. Res. Lett. **44**, 496–503 (2017).
[5]. Heumesser M., Chanrion O., Neubert T., Christian H.J., Dimitriadou K., Gordillo-Vazquez F.J., Luque A., Pérez-Invernón F.J., Blakeslee R.J., Østgaard N., Reglero V., Geophys. Res. Lett. **48**(4), 2020GL090700 (2021).
[6]. Neubert T., Chanrion O., Heumesser M., Dimitriadou K., Husbjerg L., Rasmussen I.L., Østgaard N., Reglero V., Nature **589**(7842), 371-375 (2021).
[7]. Tarasenko V. Plasma Sources Sci. Technol. **29**, 034001 (2020).
[8]. Tarasenko V.F., Beloplotov D.V., Lomaev M.I., IEEE Trans. Plasma Sci. **44**, 386-392 (2016).
[9]. Sosnin E.A., Babaeva N.Y., Kozhevnikov V.Y., Kozyrev A.V., Naidis G.V., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Phys.-Usp. **64**(2), 191–210 (2021).

О РЕКОРДНЫХ ДОСТИЖЕНИЯХ ЛИВЕРМОРСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ (США) В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Гуськов С.Ю.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: guskovsy@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.002

Обсуждается достижение рекордного выхода энергии дейтерий-тритиевой реакции в недавнем эксперименте по облучению термоядерной капсулы импульсом лазерно-индуцированного рентгеновского излучения, проведённом в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (США) в августе 2021 года. О результатах этого эксперимента сообщалось в сигнальной информации Ливерморской лаборатории и в докладе этой лаборатории на совещании в рамках международной конференции IFSA (Inertial Fusion Scinces and Applications), проходившем в виртуальном формате 22 сентября 2021 года. Ливерморская лаборатория ведёт исследования, направленные на достижение термоядерного зажигания – получение энергии реакций синтеза, превышающей энергию воздействующего лазерного импульса – около десяти лет, в течение которых выход термоядерной энергии последовательно увеличивался. Выдающее значение августовского эксперимента состоит в том, что достигнутый выход термоядерной энергии не только значительно превысил прежние результаты, но и вплотную приблизился к затраченной лазерной энергии – энергия реакций синтеза составила 1.35 МДж, т.е. 70% от энергии лазерного импульса, которая в этом эксперимента была равна 1.93 МДж.

Эксперименты Ливерморской лаборатории проводятся на крупнейшей в мире лазерной установке NIF [1], которая обеспечивает генерацию импульса 3-ей гармоники излучения Nd-лазера (длина волны 351 нм) с энергией около 1.8 МДж (в штатном режиме) в 192 пучках. Основное направление экспериментов состоит в, так называемом, непрямом облучении термоядерной капсулы лазерно-индуцированным рентгеновским импульсом. Термоядерная капсула в виде многослойной сферической оболочки помещается в геометрическом центре конвертора лазерного излучения в рентгеновское излучение цилиндрической формы. Лазерные пучки вводятся в конвертор через отверстия на его торцах, проходят через зазор, отделяющий конвертор от термоядерной капсулы, и фокусируются на внутренней поверхности конвертора. Непрямое облучение является более энергозатратным, чем прямое облучение термоядерной капсулы непосредственно лазерными пучками – энергия рентгеновского импульса, воздействующего в конечном итоге на капсулу, составляет всего лишь около 10% от энергии лазерного импульса. В первую очередь это связано с ограничением минимальных размеров конвертора и его вводных отверстий. При этом, однако, непрямое облучение способно обеспечить более благоприятные условия сжатия термоядерной капсулы за счёт снижения негативного влияния развития гидродинамических неустойчивостей. В условиях энергодефицита увеличение энергии лазерного импульса на 8-10 % по сравнению со штатным режимом работы лазера, а также увеличение доли рентгеновского излучения, воздействующего на термоядерную капсулу, за счёт оптимизации параметров конвертора стали, по-видимому, основными факторами достижения рекордного результата.

Литература

[1]. E. I. Moses and C. R. Wuest, Fusion Sci. Technol. **47**, 314 (2005).

РАБОТЫ ПО РАЗВИТИЮ ПРОЕКТА ГДМЛ В ИЯФ СО РАН

Багрянский П.А.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: p.a.bagryansky@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.004

Доклад представляет собой обзор ключевых проблем удержания плазмы с термоядерными параметрами в магнитных ловушках открытого типа с линейной осесимметричной конфигурацией. Эти проблемы адресованы программе исследований на установке газодинамическая многопробочная ловушка (ГДМЛ) [1,2], проект которой в настоящее время разрабатывается в ИЯФ СО РАН в сотрудничестве с рядом российских и зарубежных организаций. Проект ГДМЛ основан на достижениях установок ГДЛ [3] и ГОЛ-3 [4], и вместе со специально сконструированными устройствами СМОЛА [5], ГОЛ-NB [6] и КОТ [7] этот проект должен обеспечить физическую основу для термоядерных систем: источника нейтронов на базе газодинамической ловушки и будущего термоядерного реактора. ГДМЛ будет состоять из центральной секции, многопробочных секций и торцевых расширителей плазменного потока. Проект будет реализован в два этапа. Первый этап включает центральную часть с магнитными пробками и расширителями. Многопробочные секции заменят магнитные пробки на втором этапе строительства ГДМЛ. Основная часть доклада посвящена программе исследований на установке ГДМЛ первого этапа: подавление кинетических неустойчивостей, связанных с анизотропией горячих ионов, продольное удержание и роль газовых условий в расширителе, подавление МГД-неустойчивостей в линейных устройствах осесимметричной конфигурацией, проблема ограничения радиуса плазмы и тепловых нагрузок на лимитеры. В заключительной части отчета доклада будет представлена краткая информация о поддерживающих проект экспериментах на установках ГДЛ, ГОЛ-NB, СМОЛА и КОТ. Кроме того, обсуждается возможность реализации и исследования диамагнитного удержания.

Литература

[1]. A. Beklemishev *et al.*, Novosibirsk Project of Gas-Dynamic Multiple-Mirror Trap, *Fusion Sci. Technol.* **63**, 46-51 (2013).

[2]. P. A. Bagryansky, A. D. Beklemishev & V. V. Postupaev. Encouraging Results and New Ideas for Fusion in Linear Traps. *Journal of Fusion Energy* **38**, 162-81 (2019).

[3]. А.А. Иванов, В.В. Приходько, Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы, *УФН*. 1**87**, № 5, с. 547-574 (2017).

[4]. A.Burdakov, A.Azhannikov, V.Astrelin *et al.*, Plasma heating and confinement in GOL-3 Multi Mirror Trap, *Fusion Sci. Technol.* **51** (2T), 106-111 (2007).

[5]. Sudnikov, A. V., Beklemishev, A. D., Inzhevatkina *et al*., Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness, *J. Plasma Phys.* **86** (5), 905860515 (2020).

[6]. V.V. Postupaev, V.I. Batkin, A.D. Beklemishev *et al.*, The GOL-NB program: further step in multiple-mirror confinement research, *Nucl. Fusion* **57**, 036012 (2017).

[7]. Yu.A. Tsidulko, I.S. Chernoshtanov, *AIP Conf. Proc.* **1771**, 040005, (2016).

НАСТОЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ АБЛЯЦИОННОЙ ПЛАЗМЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ: НОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ПРИМЕНЕНИЯ

Кудряшов С.И.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН г. Москва, Россия,
e-mail: kudryashovsi@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.005

Представляется обзор мультимасштабных динамических эффектов настольного взаимодействия субрелятивистских ультракоротких лазерных импульсов с поверхностью материалов в режиме фемтосекундной лазерной абляции (ФЛА) – сверхбыстрой термоэлектронной эмиссии с заряжением поверхности и эмиссией двойного плазменного слоя, сверхбыстрого транспорта горячих электронов и электрон-фононной релаксации, генерации мегабарных ударных волн и выброса сверхкритического флюида [1]. Рассматриваются применения ФЛА для ударно-волнового упрочнения материалов, формирования функциональных нано и микроструктурных поверхностных покрытий.

Литература

[1]. А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Самохин, Абляция поверхности материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов, УФН **187** (2), 159-172 (2017).

ЭЛЕКТРОСТАТИКА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ В РАВНОВЕСНЫХ КУЛОНОВСКИХ СИСТЕМАХ

Иосилевский И.Л.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия
Московский физико-технический институт (Нацональный исследовательский университет), г. Москва, Россия, e-mail: ilios@ihed.ras.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.006

Обсуждаются два фундаментальных отличительных свойств, присущих всем межфазным границам в равновесных кулоновских системах, и в принципе, отсутствующих в многофазных системах с короткодействующим потенциалом: (*i*) – существование на межфазной границе сосуществующих фаз стационарной разности среднего электростатического потенциала (*потенциал Гальвани*), и (*ii*) – возможность локализации макроскопического заряда на такой границе в случае, когда эта фазовая граница находится в гравитационном поле массивного астрофизического объекта. Дается краткое описание теоретической основы обоих эффектов и исторический комментарий. Рассмотрены принципиальные отличия потенциала Гальвани от другой электрофизической характеристики плазменных систем – работы выхода электрона.

В приложении к кулоновским системам рассмотрены типичные примеры реализации эффекта межфазной разности потенциала: в частности, «электростатическая диаграмма» границы вигнеровской кристаллизации в однокомпонентной модели плазмы (OCP), включая зоны её классического и квантового плавления; потенциал межфазной границы перехода газ-жидкость в металлах, и неконгруэнтного испарения в оксидах (UO_2, SiO_2) и ионных жидкостях, включая как общую структуру указанной температурной зависимости, так и её асимптотики в пределе $T \to 0$ и $T \to T_{кр}$ (вдоль границы сосуществования). На примере популярной версии т. наз. «плазменного фазового перехода» в водороде (Saumon – Chabrier) оценен знак и величина потенциала межфазной границы для этого типа гипотетического перехода. Наконец, обсуждается знак и величина межфазного потенциала в экзотических условиях – для границы гипотетического кварк-адронного перехода в экстремально сжатом веществе ультравысокой плотности в недрах компактных звезд.

Второе из обсуждаемых свойств – возможность локализации макроскопического заряда на межфазной границе – обсуждается на идеализированном примере термодинамически равновесной звезды без релятивистских эффектов и влияния магнитного поля. Локализация заряда в такой ситуации является следствием сочетания обсуждавшейся ранее гравитационной поляризации плазмы компактных звезд и скачка термодинамических характеристик (в частности, величины кулоновской неидеальности) присущего любой межфазной границе в равновесных кулоновских системах.

СИНТЕЗ КАТАЛИЗАТОРОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЕМ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ГИРОТРОНА

Гусейн-заде Н.Г.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: ngus@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.007

Поиск новых эффективных способов приготовления и модификации катализаторов Pt/оксидный носитель остаётся актуальной задачей в свете расширения применения процессов гидрирования и дегидрирования в промышленности – в частности, для транспортировки водорода в форме т.н. жидких органических гидридов. Другой проблемой является снижение активности катализаторов во времени за счёт отложения углеродных соединений на их поверхности, что требует разработки методов реактивации для раскоксовывания катализаторов.

Впервые созданы керамические микрочастицы (носители для катализаторов) с нанесенными на них наночастицами платины (Pt) в условиях плазмохимического процесса, при его инициации микроволновым излучением мощного импульсного гиротрона в смесях порошков металла и диэлектрика (Pt/Al_2O_3, Pt/SiO_2). Опыты по дегидрированию циклоалканов в присутствии полученных образцов показали возможность из использования в качестве катализаторов. На рисунке 1 приведены микрофотографии микрочастиц оксидов с наночастицами платины для образцов, полученных из смесей порошков Al_2O_3/Pt с содержанием платины 5 и 10 % масс. Образцы показали очень низкую цитотоксичность.

Впервые показана возможность реактивации отработанных катализаторов Pt/Al_2O_3 с помощью микроволнового излучения мощного импульсного гиротрона.

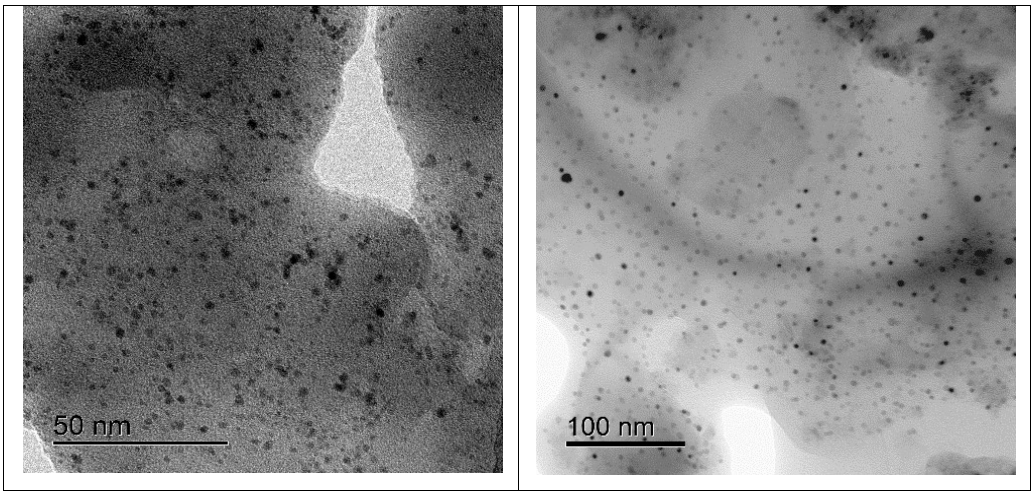


Рисунок 1 – Микрофотографии катализаторов типа «металл на оксидном носителе» – микрочастиц оксидов с нанесенными на их поверхность наночастицами платины для образцов, полученных из смесей порошков Al2O3/Pt с содержанием платины 5% и 10 % масс (справа).

Работа выполнена в рамках госзадания ГЗ БВ10–2021 «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

TECHNOLOGICAL PLATFORMS OF ITER AND TRT FOR FUSION ENERGY DEVELOPMENT

Anatoly V. Krasilnikov

Institution "Project Center ITER", Moscow, Russia

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.009

The tokamak plasma configuration was invented and researches at several first tokamaks were started in "Kurchatov institute" at the beginning of 1950-th. More than 200 tokamaks were constructed in scientific and technology developed countries up to now. 11 and 17 MW of fusion power were produced at TFTR (USA) and JET (EU) in 1994 and 1997, respectively. In 1986 following proposal of the Soviet Union design of the International Thermonuclear Experimental Reactor ITER having project value of fusion power of 500 MW was started. At the moment all ITER systems including 25 of RF responsibility are manufacturing in scientific centers and industrial plants of 7 ITER Partners and ITER machine assembling is in progress.

ITER fusion technologic platform includes: water cooling vacuum vessal, Be first wall, W divertor, Nb_3Sn and Nb-Ti coils of the electromagnetic system, 1 MeV and 16 MW neutral beam injectors, 40-55 MHz and 20MW ion cyclotron heating system, 170 GHz and 1 MW gyrotrons, highest power cryopumps and cryogenic system, tritium breading experimental blanket modules, reactor relevant diagnostics, control systems and remote handling systems and IT technologies. ITER project created would-wide fusion industry.

In frame of the ITER project in Russia were created: manufacture of superconductors (JSC «TVEL», JSC «ChMZ», JSC VNIIKP, JSC "Bochvar institute", IPHE, NRC «Kurchatov institute», JSC «Efremov institute", JSC «SNSC»); technologies and semi-industrial plants for first wall in divertor manufacture (JSC "Efremov institute" and JSC "Dollezhal institute"); experimental benches and technologies to perform first wall and divertor components tests (JSC "Efremov institute", JSC "Dollezhal institute", and JSC SRC RF TRINITI); gyrotrons (invented and successfully manufacturing in IAP RAS and JSC "Gykom"**);** port-plugs (INP SB RAS) and Port plug test facilities (JSC «GKMP»); methods and equipment for plasma diagnostics (NRC «Kurchatov institute», "Ioffe institute" INP SB RAS, Institution "Project center ITER", "Fusion-center", JSC SRC RF TRINITI).

In accordance with Joint Implementation Agreement for creation of the ITER organization Russian Federation have right for free licenses for application in national fusion program for all technology created in frame of ITER project and also information about world fusion industry. But ITER technologic platform does not include all technologies required for fusion reactor creation, namely Li first wall, methods of noninductive plasma current generation, HTSC coils, radiation hardness test technologies of reactor components, etc.

To provide successful creation of fusion reactor in Russia it is necessary to arrange efficient participation of Russian scientists and specialists in ITER construction and experiments in 2025-2045 and to create in Russia experimental scientific-technological basis (technological platform) – Tokamak with Reactor Technologies (TRT) – prototype of the plasma part of hybrid (fusion-fission) reactor. Main technical decisions and technologies that could be created by Russian scientific centers and industrial companies today were integrated in TRT conceptual design [1].

References

[1]. A.V. Krasilnikov, S.V. Konovalov, E.N. Bondarchuck, et al., Plasma Phys. Rep. 47, 1092-1106 (2021). Russian text in Fizyka Plasmy, 2021, Vol.47, №.11, pp. 970-985.

ИТЭР. СБОРКА ТОКАМАКА И ДАЛЬНЕЙШАЯ ИНТЕГРАЦИЯ В ТЕРМОЯДЕРНОЕ СООБЩЕСТВО

Химченко Л.Н., Красильников А.В.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: l.khimchenko@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.010

Очевидно, что развитие цивилизации определяется уровнем потребления энергии. В последнее время в мире развернулась масштабная дискуссия о соотношении энергетики на ископаемом топливе и так называемой «зеленой» энергетики. Но как показали события последнего года, «зеленая» энергетика начала давать сбои. Опять потребовались газ и уголь. Опять заговорили о развитии атомной энергетики для достижения целей устойчивого развития, и особенно о термоядерной энергетике, как неисчерпаемом источнике энергии. Тем самым, подтвердив правильность стратегической линии на строительство физической установки, которой является ИТЭР, на которой должны быть решены все задачи, необходимые для принятия решения о строительстве термоядерной электростанции.

На данном этапе ИТЭР вступил в наиболее сложную фазу строительства – сборку токамака. Это потребовало перестроить систему управления. В прошлые года, график работ по проекту «собирался» из графиков работ домашних агентств, характеризующимися различными ресурсными возможностями и темпом создания систем. Теперь за основу приняли график поставок оборудования на ИТЭР с требованием беспрекословного выполнения этих поставок. При этом, глобальный характер пандемии Covid-19 внёс коррективы в темп строительства установки. К настоящему моменту МО ИТЭР полностью ввело в строй здание ИТЭР и шахту, где будет собрана установка. В шахте установлен механизм юстировки и закреплены две нижних катушки полоидального поля – PF-6 и PF-5. Был собран первый, из девяти, сектор, состоящий из сектора вакуумной камеры, на котором закреплены две сверхпроводящие катушки тороидального поля и тепловая защита. Точность сборки – 1.5 мм. В докладе также представлено выполнение обязательств РФ по изготовлению и поставкам оборудования для устойчивой сборки токамака.

Особенностью данного этапа строительства является консолидация большинства токамаков в мире для выполнения задач ИТЭР. И подготовка к выполнению физической программы ИТЭР. Например, токамак WEST взялся за тепловые нагрузки ИТЭРовского уровня на первую стенку и в диверторе, JET проверит физику альфа-частиц в DT эксперименте, EAST – длинный импульс при предельных параметрах, DTT – работу дивертора. А на вновь построенном и запущенном, самом крупном в мире, токамаке JT-60SA основная программа – оптимизация предельных параметров. Темп создания различных систем и исследования на таких токамаках очень высокий, т.к. уже они используют наработки ИТЭР. В России разрабатывается проект токамака ТРТ на основе опыта, полученного при проектировании и строительстве ИТЭР.

Работа выполнена по государственному контракту с ГК «Росатом» от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038

АКТУАЛЬНЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НАРАБОТКИ ТОПЛИВНЫХ НУКЛИДОВ

[1,2]Кутеев Б.В., [1,2]Шленский М.Н.

[1]НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия, e-mail: shlenskiy_mn@nrcki.ru
[2]НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия, e-mail: Kuteev_BV@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.011

Вопрос обеспечения человечества электроэнергией является ключевым для его устойчивого развития и поддержания достигнутого уровня. Можно констатировать, что в мире наблюдается потенциал роста потребления электроэнергии (по некоторым оценкам установленная мощность энергетики должна составить 40 ТВт к 2050 году). Это связано и с ростом населения, и с наращиванием производственных мощностей в развивающихся странах. При этом существует запрос на устойчивые источники энергии, то есть такие, которые смогут обеспечивать энергией на протяжении длительного времени (тысячи лет) и без перебоев. Критическим является и запрос на уменьшение вредного влияния на окружающую среду при выработке электроэнергии. Также безусловно энергия не должна быть слишком дорогой: в некоторых работах отмечается, что расходы на энергию не должны превышать 10% ВВП страны.

Углеродное топливо плохо удовлетворяет критерию экологичности, а возобновляемые источники энергии зачастую не могут удовлетворить запрос на устойчивость и экономичность. Из существующих источников остаётся ядерная энергетика. Однако и в этой отрасли есть серьезные проблемы. Если рассматривать систему с открытым топливным циклом, то возникает проблема ограниченности ресурсной базы, а также накопления большого количества высокорадиоактивных материалов. Если рассматривать создание системы с замкнутым ядерным топливным циклом, то препятствием для построения крупномасштабной энергетики здесь является низкое значение коэффициента воспроизводства топлива, которое достижимо в современных и будущих энергетических реакторах на быстрых нейтронах. Также некоторые авторы выделяют проблему образования безвозвратных потерь при переработке высокорадиоактивного отработавшего топлива. Впрочем, обоснованность этих опасений находится пока что под вопросом.

Возможным решением проблем ядерной энергетики, связанных как с ресурсной базой, так и с распространением радиоактивности, может стать применение термоядерного источника нейтронов для наработки топлива из сырьевых изотопов (U-238, Th-232). Данная работа имеет обзорный характер, однако приводятся также и некоторые мысли самих авторов, подкреплённые расчётами. Целью работы является определение актуального состояния исследований по вопросу наработки топлива в гибридных системах синтез-деление (ГССД).

Для задачи наработки ядерного топлива в ГССД важными являются следующие вопросы. 1) В какой энергетической системе будет работать ГССД и для каких реакторов деления будет нарабатываться топливо? 2) Где будет нарабатываться тритий? 3) Какой топливный цикл предпочтителен (U-Pu или U-Th) и в каких условиях? 4) Какие материалы предпочтительно использовать в бланкете? 5) Как можно увеличить наработку топлива в бланкете?

На основе проведённого обзора можно сказать, что для системы ядерной энергетики, состоящей из тепловых реакторов и ГССД, предпочтительнее использовать U–Th топливный цикл. В этом случае стоит протестировать новые составы ядерного топлива, содержащие Pa-231. В случае наработки стартовых загрузок для быстрых реакторов, предпочтительнее использовать U-Pu топливный цикл, в рамках которого можно нарабатывать в 2-3 раза больше топливных нуклидов, чем в случае U-Th цикла. Добавление в бланкет ГССД минорных актинидов позволяет в несколько раз увеличить наработку топлива.

СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР

[1]Семенов И.Б., [1]Голачев В.М., [1]Ларионов А.С., [1]Лазарева С.Г., [1]Миронова Е.Ю., [1]Миронов А.Ю., [1]Нагорный Н.В., [1]Портоне С.С., [1]Семенов О.И., [1]Звонарева А.А., [1]Гужев Д.И., [1]Журавлев М.К., [1]Николаев А.И.

[1]ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия
e-mails: i.semenov@iterrf.ru, v.golachev@iterrf.ru, s.lazareva.@iterrf.ru, a.larionov@iterrf.ru, e.mironova@iterrf.ru, f.vironov@iterrf.ru, n.nagornyi@iterrf.ru, s.portone@iterrf.ru, o.semenov@iterrf.ru, a.zvonareva@iterrf.ru, m.zhuravlev@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.012

Система управления установкой ИТЭР - CODAC (Control, Data Acquisition and Communication) разделена два уровня управления - на центральный супервайзор, за создание которого отвечает Международная Организация ИТЭР и нижний локальный уровень управления, за который отвечают Национальные Агентства. Супервайзер включает в себя центральное ядро системы управления (CODAC Core System), систему ядерной безопасности, систему блокировок и защит, систему управления плазмой и центральное вычислительное ядро, обеспечивающее работу установки в реальном времени. На нижнем уровне находятся более 130 технологических и диагностических подсистем установки. CODAC использует SCADA (**S**upervisory **Co**ntrol and **D**ata **A**cquisition) EPICS, построенной на идеологии сервер-клиент и в настоящее время базирущейся на компьютерных сетях с пропускной способностью 10-40 Гбит/сек.

В докладе дан обзор состояния дел на февраль 2022 года по системе управления верхнего уровня, а также по системам управления технологических и диагностических систем за которые отвечает Российское Национальное Агентство ИТЭР *(DIVERTOR NEUTRON FLUX MONITORS, DIVERTOR THOMSON SCATTERING, NEUTRAL PARTICLE ANALYZER, CXRS BASED ON DNB (EDGE), VERTICAL NEUTRON CAMERA, HIGH FIELD SIDE REFLICTOMETRY, PORT PLUG TEST FACILITY, EC RF GYROTRONS, REMOTE PARTICIPFTION CENTER)*. На конференции состояние дел по данным системам будет подробно доложено в докладах авторами, непосредственно отвечающими за эти направления. Также рассмотрены проблемы, которые решались по мере создания систем управления в 2021 году. В частности, вопросы, связанные с интеграцией технологических и диагностических систем в центральную систему управления на стадиях приемосдаточных испытаний на предприятиях изготовителях, на площадке ИТЭР, во время запуска установки и работа во время получения первой плазмы, проблемы электромагнитной и радиационной совместимости. Отдельно рассмотрены вопросы интеграции и управления диагностическими комплексами установки в режиме удаленного доступа в рамках созданного в Проектном центре ИТЭР «Центра удаленного доступа».

Доклад представляет интерес для физиков и инженеров, работающих в области управляемого термоядерного синтеза.

Работа выполнялась по Контракту с Государственной Корпорацией РОСАТОМ №Н.4а.241.19.21.1038

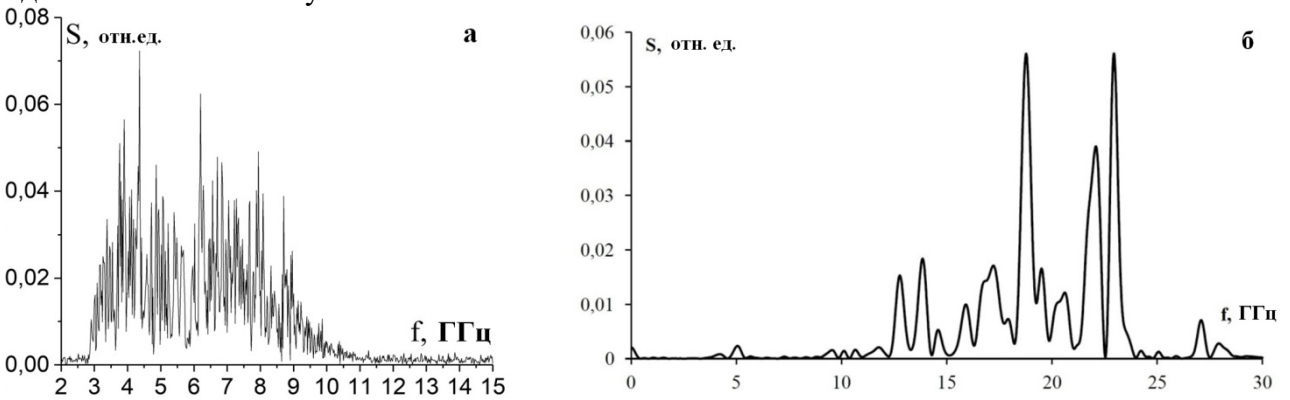
ПЛАЗМЕННЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ ШУМА С ИНВЕРСНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ. ЭКСПЕРИМЕНТ

Пономарев А.В., Ульянов Д.К.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.013

Экспериментально был изучен плазменный мазер с инверсной геометрией без обратной связи в режиме усиления. Для разрыва обратной связи использовались два различных механизма. Первые результаты были получены в работах [1, 2]. При работе на ускорителе с длинной импульса РЭП 50 нс (1.2 кА, 270 кВ) в пространство взаимодействия помещался поглотитель, а при длине импульса РЭП 2 нс обратная связь была невозможно в связи с тем, что отраженная волна уже не могла усиливаться, так как импульс РЭП завершался до прихода отраженной волны. Был экспериментально получен режим усиления в сверхширокополосном режиме в обоих случаях с широкой перестройкой частоты излучения от 3 до 24 ГГц при мощности излучения около 10 МВт в длинноимпульсном режиме и порядка 100 МВт в короткоимпульсном. Ток и ускоряющее напряжение РЭП были примерно одинаковы в обоих случаях.



(а) низкая плотность плазмы, длинноимпульсный режим, (б) высокая плотность плазмы, короткоимпульсный режим

На рисунке видно, что в обоих случаях импульс является сверхширокополосным. Разные плотности плазмы даны, чтобы показать диапазон перестройки по частоте, который был достигнут как в длинномпульсном [3], так и в короткоимпульсном [4] режимах.

Было показано, что получен режим усиления. В короткоимпульсном режиме оценки показывают, что мощность излучения не менее 100 МВт (электронный КПД порядка 25%).

Литература

[1]. E. Ernyleva and O. T. Loza, Phys. Wave Phenom. **25** (1), 56 (2017).
[2]. С. Е. Ернылева, А. Б. Булейко, Д. К. Ульянов, О. Т. Лоза, Прикладная физика, 2017, №2, с.9-12
[3]. A. Buleyko, A. Ponomarev, O. Loza, D. Ulyanov, and S. Andreev, Phys. Plasmas **28**, 023303 (2021)
[4]. A. Buleyko, A. Ponomarev, O. Loza, D. Ulyanov, et al., Phys. Plasmas **28**, 023304 (2021)

СЕКЦИЯ
«МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»

SECTION
«MAGNETIC CONFINEMENT OF HIGH - TEMPERATURE PLASMAS»

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОНФИГУРАЦИЙ В ТОРОИДАЛЬНЫХ ЛОВУШКАХ С ВЫТЯНУТЫМ ПО Z СЕЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ МОРОЗОВА-СОЛОВЬЕВА

Савельев В.В.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия
e-mail: ssvvvv@rambler.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.014

Стационарные и двумерные (в цилиндрической системе координат r,z) конфигурации квазинейтральной плазмы изучаются численно на основе уравнений Морозова-Соловьева [1 – 4]. Эти уравнения есть записанная в специальной форме общая система уравнений гидродинамики двухкомпонентной идеальной плазмы для случая стационарного течения. В ловушке добавляется условие покоя плазмы. Основные уравнения записаны в терминах двух функций - функции магнитного потока $\Psi(r,z)$ и функции полного тока $J(r,z)$

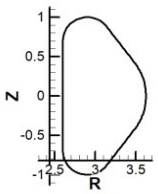
$$\frac{cm_e}{8\pi^2 en}\Delta^*\Psi-[\frac{1}{2\pi}\frac{e}{c}(\Psi+\pi r^2 H_z)+K(J)]=0\ ,\ \Delta^*\Psi=\frac{\partial^2\Psi}{\partial r^2}-\frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial r}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}$$

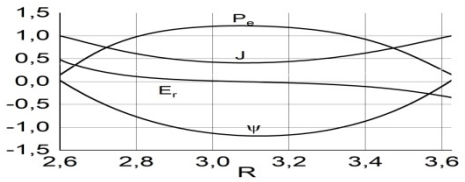
$$\frac{m_e}{4\pi^2e^2}[\frac{\partial}{\partial z}(\frac{1}{rn}\frac{\partial J}{\partial z})+\frac{\partial}{\partial r}(\frac{1}{rn}\frac{\partial J}{\partial r})]-rn(\frac{dF}{dJ}-m_eT_e\frac{ds_e}{dJ})-\frac{j_\varphi}{e}\frac{dK}{dJ}-\frac{1}{\pi c^2}\frac{J}{r}=0$$

$$F(J)=\frac{m_e}{2e^2}\frac{\mathbf{j}^2}{n^2}+m_iW_i(n)+m_eW_e\quad,\quad K(J)=-\frac{m_e}{en}rj_\varphi-\frac{e}{2\pi c}(\Psi+\pi r^2H_z)$$

Здесь $F(J)$ интеграл энергии (интеграл Бернулли) электронов, $K(J)$ - интеграл углового момента электронов, а $s_e(J)$ - энтропия электронов. При переходе к естественной системы единиц измерения выясняется, что малый параметр $\mu=m_e/m_i$ вообще не входит в задачу. Величиной характеризующей влияние конечной массы электронов является параметр $\xi^2=c^2m_e/(4\pi e^2L_0^2n_0)$, где n_0, L_0 - характерные значения плотности и линейного размера. В настоящем докладе будут представлены результаты численного решения соответствующей краевой задачи для ловушек с параметрами близкими к параметрам установок JET или JT. Особое внимание уделяется выбору $F(J), K(J), s_e(J)$. Результаты экспериментов часто представляются для сечения $z=0$. В качестве примера приведем некоторые результаты решения двумерных задач - распределения некоторых величин по радиусу в этом сечении.

Представлены распределения $J(r.0), \Psi(r,0), P_e(r,0),\ E_r(r,0)$.





Автор благодарен М.Б. Гаврикову за полезные обсуждения.

Литература

[1]. A. I. Morozov and L. S. Solovyev, in Reviews of Plasma Physics, Ed. by M. A. Leontovich (Consultants Bureau, New York, 1980), Vol. 8, p. 1.
[2]. A. I. Morozov, Introduction to Plasma Dynamics (Fizmatlit, Moscow, 2006; CRC, Boca Raton, FL, 2012).
[3]. Savelyev V.V. Plasma Physics Reports, 2019, Vol. 45, No. 1, pp. 63–68.
[4]. V.V.Savelyev 2020 *J.Phys:Conf.Ser.***1647** 012006

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИРОКИНЕТИЧЕСКИХ ПЕРЕНОСОВ С ITG В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10 С ОМИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ

[1,2]Исаев М.Ю., [2]Ануарулы О., [3]Брюннер С., [4]Герлер Т., [1]Нургалиев М.Р., [1]Смирнов Д.В., [5]Pueshel M.J.

[1] НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: isaev_my@nrcki.ru
[2]Московский физико-технический институт, г. Долгопроудный, Россия
[3]Швейцарский плазменный центр, Федеральная политехническая школа Лозанны, Швейцария
[4]Институт физики плазмы Макса Планка, Гаршинг, Германия
[5]Dutch Institute for Fundamental Energy Research, Eindhoven, The Netherlands

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.015

Разряд токамака Т-10#71568 с омическим нагревом был выбран для первого численного анализа гирокинетических переносов с большими градиентами ионной температуры (ITG) с использованием оборудования центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса» НИЦ «Курчатовский институт».

Экспериментально полученные данные включают профили электронной плотности и температуры, профили ионной температуры с большим градиентом, приводящим к ITG турбулентности, профили примесей кислорода и углерода, измеренные с помощью активной спектроскопии [1]. Радиальные потоки ионов и электронов определены с помощью транспортного кода ASTRA [2].

Трехмерные квазилинейные и нелинейные тепловые потоки электронов и ионов вычислены с помощью гирокинетического кода GENE [3]. Сравнение результатов численных расчетов, полученных с помощью кода GENE, с результатами скейлинга LLNL GK для тестового разряда токамака DIII-D с учетом различных моделей равновесия, проведено в работе [4]. Хорошее совпадение между результатами гирокинетических расчетов, найденных кодом GENE, и потоков, найденных кодом ASTRA на основе экспериментальных данных, получено при уменьшении плотности примесей.

Литература

[1]. Krupin V.A. et al, Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 115003 (2018).
[2]. Pereverzev G. V. and Yushmanov P. N., Preprint IPP 5/98 (2002).
[3]. Jenko F. et al, Phys. Plasmas **7**, 1904 (2000).
[4]. Lapillonne X. et al, Phys. Plasmas **16**, 032308 (2009).

ВЛОЖЕННЫЕ КОРОТКОЗАМКНУТЫЕ КАТУШКИ ИЗ ВТСП 2 ЛЕНТЫ ДЛЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЛОВУШКИ - ГАЛАТЕИ

[1]Бишаев А.М., [1]Буш А.А., [2]Гавриков М.Б., [1]Каменцев Е.К., [1]Козинцева М.В., [2]Савельев В.В.

[1]РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, e-mails: bishaev@mirea.ru, bush@mirea.ru, kamentsev@mirea.ru, kozintseva@mirea.ru
[2]ИПМ РАН, г. Москва, Россия, mbgavrikov@yandex.ru, ssvvvv@rambler.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.016

В докладе рассмотрены преимущества применения вложенных магнитных катушек, изготовленных из ВТСП 2 ленты для создания магнитных систем с левитирующими катушками типа ловушек-Галатей [1]. Такие катушки работают при температуре жидкого азота. Вложенная магнитная катушка состоит из нескольких, не менее двух, вложенных соосно друг в друга короткозамкнутых катушек, каждая из которых выполнена из ВТСП 2 ленты [2]. Эксперименты проводились на вложенных катушках, в которых использовались короткозамкнутые одиночные катушки диаметром 80, 60 и 50 мм. Электрическое сопротивление отдельных катушек составляет величину (20–50) нОм. Пространство между этими катушками заполнялось лентой из пластика, намотанной на внутреннюю катушку. Проведенные эксперименты показали, что величина магнитного потока, захваченного при зарядке вложенной катушки, близка к сумме потока, захваченного отдельными катушками. Время релаксации магнитного поля тоже близко к сумме времени релаксации каждой отдельной катушки. Такое устройство магнитной катушки позволяет изменять величину максимального потока, захваченного катушкой. Релаксация магнитного поля происходит по экспоненте. Это указывает на то, что отношение токов в каждой отдельной катушке при их зарядке остается постоянным. Во вложенной катушке можно изменять профиль - распределение величины магнитного поля по радиусу катушки, с помощью изменения величины и направления тока во вложенных катушках. Были проведены опыты по исследованию левитации как отдельных катушек над системой постоянных магнитов, так и вложенных катушек. Отдельные катушки левитируют наклонно по отношению к вертикали, которая соответствует оси магнитной системы, составленной из постоянных магнитов. Это свидетельствует об отклонении оси магнитного поля, созданного током в левитирующей катушке, от геометрической оси катушки. Вложенная катушка, состоящая из отдельных катушек, левитирует без наклона к вертикали. Ось магнитного поля вложенной катушки совпадает с геометрической осью вложенной катушки. Использование вложенных катушек позволяет увеличить максимальный магнитный поток, захваченный катушкой при возбуждении в ней тока, изменять профиль распределения величины магнитного поля по радиусу катушки с помощью изменения величины и направления тока во вложенных катушках, ликвидировать отклонение оси магнитного поля катушки от геометрической оси катушки.

Литература

[1]. A.M. Bishaev, A.A, Bush, M.B. Gavrikov, et al. Probl. At. Sci. Technol., Ser.: Plasma Phys., No. 1, 16 (2015).
[2]. М.В. Козинцева, А.М. Бишаев, А.А. Буш, А.В. Десятсков, К.Е. Каменцев, Патент на полезную модель № 205644.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ БЫСТРЫХ ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ В ВОДОРОДНОЙ МИШЕННОЙ ПЛАЗМЕ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ

[1]Приходько В.В., [1]Черноштанов И.С., [1,2]Шмигельский Е.А., [1]Яковлев Д.В.

[1]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия,
[2]Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия,
e-mail: e.shmigelskii@g.nsu.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.017

Плазма в открытой магнитной ловушке ГДЛ (ИЯФ СО РАН) состоит из двух компонент: в мишенную изотропную плазму инжектируются пучки нейтральных атомов дейтерия, и в результате резонансной перезарядки формируется популяция быстрых анизотропных ионов. Анизотропия функции распределения частиц плазмы служит причиной возбуждения кинетических неустойчивостей различных типов, которые могут приводить к потерям быстрых ионов. Известно, что наличие в плазме теплых изотропных ионов того же вида, что и быстрые, стабилизирует дрейфово-конусную неустойчивость (ДКН) [1]. Кроме того, из теории следует, что присутствие теплых ионов, чьи циклотронные гармоники совпадают по частоте с некоторыми гармониками быстрых ионов также может подавлять ДКН на этих гармониках [2].

Работа посвящена изучению модовой структуры и определению характерных видов неустойчивостей быстрых ионов, возбуждающихся в водородной мишенной плазме с примесью ионов дейтерия. Сигналы, полученные с помощью высокочастотных магнитных зондов и быстрого АЦП (500 МГц) были обработаны кросс-спектральным методом, в результате чего были определены азимутальное и продольное волновые числа для неустойчивостей в диапазоне частот от 1 до 10 МГц. Величины частот и номера азимутальных мод позволяют предполагать, что наблюдается дрейфово-конусная неустойчивость. Неустойчивость сопровождается скачкообразным изменением диамагнитных сигналов, что свидетельствует о рассеянии быстрых ионов. Серия экспериментов позволила проследить за изменением характеристик неустойчивостей и их последствий в виде рассеяния быстрых ионов при добавлении дейтерия в водородную мишенную плазму.

Литература

[1]. B.I. Kanaev. Nucl. Fusion **19**, 347 (1979).
[2]. I.A. Kotelnikov, I.S. Chernoshtanov. Phys. Plasmas **25**, 082501 (2018).

РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Ильясова М.В., Киселев Е.О., Курскиев Г.С., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Щёголев П.Б.

Физико-пехнический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: fosa97@gmail.com

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.018

Завершенная в 2018 году модернизация компактного сферического токамака Глобус-М2 [1, 2] позволила существенно повысь нейтронный выход из плазмы [3] за счет уменьшения потерь быстрых частиц, возникающих при инжекционном нагреве плазмы. Помимо этого, в эксплуатацию был введен второй инжектор нейтральных частиц с большими длительностью и энергией инжекции. Таким образом возникла необходимость реконструировать имеющийся на данный момент на токамаке Глобус-М2 комплекс нейтронной диагностики, в который входят два коронных счетчика (СНМ-11 с использованием изотопа 10B) и два нейтронных спектрометра (BC-501A основанные на жидком сцинтилляторе), под новые условия работы и задачи.

За 2021 год в рамках развития направления нейтронной диагностики токамака Глобус-М2 был реализован алгоритм вычисления пространственной функции нейтронного источника, что позволило решить задачу модельного расчёта выхода нейтронов из плазмы токамака при её инжекционном нагреве. Проведенная при помощи AmBe источника *in situ* калибровка комплекса нейтронной диагностики определила связь результатов моделирования с результатами экспериментов [4]. Оценка влияния поля рассеянных на элементах установки и экспериментального зала нейтронов на величину измеряемого сигнала доказала необходимость коллимации нейтронных счетчиков и спектрометров. В связи с этим была разработана и установлена полиэтиленовая защита для основных элементов комплекса нейтронной диагностики токамака Глобус-М2, а также была проведена перекалибровка детекторов.

На токамаках малых и средних размеров рождение нейтронов в основном обусловлено протеканием ядерных реакций DD синтеза при взаимодействиях быстрых частиц с частицами основной плазмы (beam-target) и друг с другом (beam-beam). Следовательно, наибольший интерес с точки зрения исследования нейтронного выхода на установке Глобус-М2 представляют разряды с инжекцией D-пучка в D-плазму. Однако для получения достоверных сведений о доли beam-beam компонента в суммарном нейтронном выходе была проведена серия плазменных разрядов с инжекцией D-пучка в H-плазму. Полученные экспериментальные результаты были сравнены с рассчитанными значениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21–72–20007).

Литература

[1]. Gusev V.K. et al. Nucl. Fusion **53**, 093013 (2013).
[2]. Minaev V.B. et al. Nucl. Fusion **57**, 066047 (2017).
[3]. Бахарев Н.Н. и др. Физика плазмы, 2020, Т. 46, № 7, с. 1–10.
[4]. Скрекель О.М. и др. ЖТФ, 2021, Т. 92, №1. с. 32–35.

ПОТЕРИ БЫСТРЫХ ИОНОВ, ВЫЗВАННЫЕ ТОРОИДАЛЬНЫМИ АЛЬФВЕНОВСКИМИ МОДАМИ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Ильясова М.В., Курскиев Г.С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Щеголев П.Б.

ФТИ им. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: balachenkov@mail.ioffe.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.019

Тороидальные альфвеновские моды (TAE) оказывают влияние на удержание быстрых ионов в токамаках, так как возбуждение TAE обычно происходит за счет резонанса с быстрыми ионами со скоростями порядка альфвеновской, в областях пространства, где в тороидальной геометрии происходит перезамыкание ветвей альфвеновского континуума для соседних полоидальных гармоник [1]. Потери, связанные с распространением TAE, оказываются достаточно высоки: так, в работе [2] на установке DIII-D сообщается о потерях до 70% инжектированных в плазму ионов. В сферических токамаках именно TAE являются наиболее опасными из альфвеновских неустойчивостей, так как на ширину частотного зазора, в котором могут существовать TAE влияет аспектное отношение токамака [3], вследствие чего эта неустойчивость наблюдалась практически на всех сферических токамаках, и также приводила к потерям.

При этом, достаточно важной является задача предсказания потерь в тех или иных режимах работы токамака. Для этого исследовалась зависимость потерь быстрых ионов от амплитуды возмущения, от тока по плазме и тороидального магнитного поля. Потери оценивались по данным различных диагностик: анализатора атомов перезарядки (NPA), нейтронного спектрометра, и широкополосного SPD болометра, а также быстродействующей матрицы SPD-фотодиодов. Ранее, по данным диагностики NPA была получена [4] регрессионная зависимость величины кратковременного снижения интенсивности сигнала анализатора dN/N во время отдельных вспышек TAE в токамаке Глобус-М2 [5]. Показана достаточно сильная зависимость величины dN/N от тока по плазме в степени порядка -1, и слабая зависимость от магнитного поля. Полученная зависимость от амплитуды возмущения δB в степени порядка 0.5 не объясняет характер потерь, главным образом по причине того, что изменение сигнала NPA не свидетельствует об окончательных потерях частиц, а только об их перераспределении в фазовом пространстве. Для исследования величины потерь от амплитуды возмущения использовались данные широкополосного SPD болометра, регистрирующего в том числе отдельные частицы. Полученная зависимость имеет линейный характер, что свидетельствует [6] о преимущественно когерентном характере потерь. Это также подтверждается присутствием ярко выраженной гармоники на частоте альфвеновской моды на спектрах некоторых сигналов быстродействующей матрицы SPD-фотодиодов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 21-72-20007).

Литература

[1]. *W.W. Heidbrink*., Phys. Plasmas **15**, 055501 (2008).
[2]. *H. H. Duong et al.,* Nucl. Fusion **33**, 749 (1993)
[3]. *N.F. Cramer,* in *The Physics of Alfven Waves* (Willey-VCH, Weinheim, 2001), p. 201.
[4]. *И. М. Балаченков, Н. Н. Бахарев, В. И. Варфоломеев, В. К. Гусев, М. В. Ильясова, Г. С. Курскиев, В. Б. Минаев, М. И. Патров, Ю. В. Петров, Н. В. Сахаров, О. М. Скрекель, А. Ю. Тельнова, Е. М. Хилькевич, А. Е. Шевелев, П. Б. Щеголев //* ЖТФ **92**, №1, 45 (2022).
[5]. *V. B. Minaev et al.,* Nucl. Fusion **57**, 066047 (2017).
[6]. M. García-Muñoz et al., Nucl. Fusion 50, 084004 (2010).

РЕЖИМЫ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

[1]Чан К.В., [1,2]Будаев В.П., [1]Дедов А.В., [1]Федорович С.Д., [1,3]Кавыршин Д.И., [1,2]Карпов А.В., [2]Мартыненко Ю.В., [1]Комов А.Т., [1]Лубенченко А.В., [1]Лукашевский М.В., [1]Захаренков А.В., [1]Губкин М.К., [1]Васильев Г.Б., [1]Рогозин К.А., [1]Коньков А.А., [1]Кваскov В.С.

[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
[2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
[3]Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.020

Плазменная линейная магнитная ловушка ПЛМ-М [1] построена на базе имеющейся установки ПЛМ (НИУ «МЭИ») [2] с целью полномасштабных испытаний материалов, макетов и прототипов стенки и дивертора будущих термоядерных реакторов. Установка позволяет получить плазму с параметрами, способными обеспечить соответствующие реакторным плазменные нагрузки на материалы.

Для формирования плазменного разряда в установке ПЛМ-М использован танталовый катод. Анод цилиндрической формы с внутренним отверстием 35 мм изготовлен из меди и закреплен на стальном кольце, обеспечивающем теплоотвод на водоохлаждаемую камеру. Нагрев плазмы осуществляется за счет процесса ступенчатой ионизации электронным ударом атомов плазмообразующего газа (гелия). Необходимая для процесса ступенчатой ионизации плотность тока электронов достигается за счет электронной термоэмиссии с катода. Мощность нагрева катода – до 2 кВт. Ток эмиссии катода достигает до 30 А. Важной особенностью разряда является генерация плазмы вблизи оси плазменной камеры, что позволяет минимизировать потери плазмы, снизить тепловые нагрузки на стенки камеры и использовать источники в непрерывном режиме. Проведены спектроскопические измерения интенсивности спектральных линий атомарного гелия. Полученные оценки температуры электронов составили 1 ÷ 3 эВ. Плотность электронов достигала 5×10^{18} м$^{-3}$. Оцененная плотность теплового потока на поверхность, обращенную к плазме составляет 2 ÷ 4 МВт/м^2.

С целью повышения плазменных параметров в установке ПЛМ-М была разработана и изготовлена система стационарного дополнительного ВЧ-нагрева с использованием геликонной антенны. Система дополнительного ВЧ-нагрева состоит из геликонной антенны, источника ВЧ-питания, системы согласования, системы охлаждения. Конструкция геликонной антенны была предложена для обеспечения стационарного режима работы. Максимальная входная мощность – 4 кВт, частота – 27,12 МГц. Кварцевое стекло помещается внутрь антенны, чтобы избежать прямого контакта между антенной и плазмой. Изготовлена система согласования, состоящая из двух вакуумных переменных конденсаторов номинальной емкостью от 20 до 1000 пФ. Эта система может обеспечить гарантированную работу в широком диапазоне сопротивлений нагрузки. Ожидается, что с помощью системы дополнительного ВЧ-нагрева можно получить температуру электронов выше 10 эВ, плотность электронов (1 – 10) $\times 10^{19}$ м$^{-3}$ при величине магнитного поля на оси до 0,03 Тл.

Спектроскопическое исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 21-79-10281, испытания материалов на установке ПЛМ - при поддержке проекта № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д ГК «Росатом» ЧУ «Наука и инновации», анализ поверхности материалов проведен при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023), оценки радиационных эффектов проведены при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020.

Литература

[1]. V. P. Budaev et al., J. Phys.: Conf. Ser. **1383**, 012016 (2019).
[2]. Будаев В.П. и др., Ядерная физика и инжиниринг, 2018, том 9, № 3, с. 127.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

[1,2]Сандомирский А.В., [1,2]Лизунов А.А.

[1]Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2]Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия, e-mail: A.V.Sandomirsky@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.021

Измерение электростатического потенциала плазмы в линейных магнитных системах важно для изучения процессов продольного переноса частиц и энергии. Именно уменьшение продольных потерь является критическим условием осуществления УТС в открытой магнитной ловушке. В представленном исследовании был использован спектроскопический метод, который имеет ряд преимуществ по сравнению с альтернативными.

Эксперименты проводились в газодинамической ловушке (ГДЛ) [1], которая представляет собой линейную систему для удержания плазмы с аксиально-симметричной конфигурацией магнитного поля. При создании и нагреве плазмы в ГДЛ, формируется положительный электростатический потенциал, называемый амбиполярным, спадающий вдоль каждой силовой линии от максимума в центре до нуля на стенке [2]. Такой потенциал определяется квазинейтральностью плазмы в каждой точке, а также равенством продольных токов электронов и ионов на торцевую стенку. Потенциал формирует барьер для покидающих ловушку электронов, а также ускоряет ионы, вытекающие в потоке плазмы через магнитную пробку.

В данной работе был использован спектроскопический метод CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy) [3], основанный на перезарядке ионов плазмы на пучке инжектируемых атомов, представляющем собой искусственную мишень. Чтобы конвертировать ускоренные ионы плазмы в возбуждённые атомы с последующим излучением света, использовалась водородная газовая мишень. Излучение при перезарядке на мишени собиралось оптической системой, поступало в спектрометр схемы Черни-Тёрнера с дифракционной решёткой и регистрировалось быстродействующей ПЗС-камерой. Перед измерениями в плазме ГДЛ была произведена калибровка спектральной дисперсии и аппаратной функции прибора при помощи лабораторных газоразрядных ламп H и Ne.

Были проведены измерения потенциала и ионной температуры различных компонент плазмы: основной (водородной и дейтериевой) и примеси гелия. Форма измеренного спектра соответствует функции распределения ионов по скорости в соответствии с эффектом Доплера. В работе представлены спектры излучения линий H_α (656.28 нм) He I (667.8 нм). Получены зависимости потенциала плазмы и ионной температуры от времени. Впервые были проведены измерения пространственного профиля амбиполярного потенциала в ГДЛ. Построена зависимость потенциала плазмы от электронной температуры.

Литература

[1]. Иванов А.А., Приходько В.В. Газодинамическая ловушка: обзор концепции и экспериментальных результатов //Физика плазмы и управляемый синтез, 2013, Т. 55, №. 6, с. 063001.

[2]. Мирнов В.В., Ткаченко О.А. Распределение потенциала в газодинамической ловушке //Препринт ИЯФ. – 1986. – С. 86-28.

[3]. Sandomirsky A.V., Lizunov A.A. Charge exchange radiation diagnostic with gas jet target for measurement of plasma flow velocity in the linear magnetic trap, J. Phys.: Conf. Ser. **2036**, 012032 (2021).

ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ МАКЕТОВ ОХЛАЖДАЕМОЙ ЛИТИЕВОЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМОЙ В ПЛМ

[1,2]Карпов А.В., [1]Федорович С.Д., [1,2]Будаев В.П., [1]Дедов А.В.,[1,2]Мартыненко Ю.В., [1]Губкин М.К., [1]Лукашевский М.В., [1]Комов А.Т., [1]Захаренков А.В., [1]Варава А.Н., [1]Лубенченко А.В., [1]Марченков А.Ю., [1]Чан Куанг В., [1]Рогозин К.А., [1]Коньков А.А., [1]Васильев Г.Б.,[1]Штелинг В.С.

[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: budaev@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.022

Проблема взаимодействия плазма-стенка в токамаках и других термоядерных установках включает задачи исследования стойкости литиевых жидкометаллических компонентов, обращённых к плазме, сформулированные в работах С.В. Мирнова, см. [1]. В работе проведены испытания опытных макетов охлаждаемой литиевой жидкометаллической капиллярно-пористой системы (КПС) в стационарной плазме плазменной установки ПЛМ (плазменный линейный мультикасп) [2]. Опытные макеты охлаждаемых литиевых КПС изготовлены в АО «Красная Звезда» из молибдена в форме охлаждаемого контейнера, заполненного литием в молибденово сетке, площадь литиевой поверхности, обращенной к плазме, была 4 x 2 $см^2$. Опытный макет литиевой КПС устанавливался в плазменный разряд, плазменный поток был направлен нормально к поверхности КПС, диаметр горячей плазмы – 35 мм. Параметры гелиевой плазмы при испытаниях: магнитное поле на оси – 0,01 Тл, в каспах – до 0,2 Тл температура электронов ~2 эВ с фракцией горячих электронов до 50 эВ и более, концентрация плазмы более 1 x 10^{12} $см^{-3}$, плазменно тепловая нагрузка на поверхность литиевой КПС достигала 1,8 $МВт/м^2$. Температура поверхности лития в КПС контролировалась с помощью пирометра-тепловизора.

В экспериментах без охлаждения в течение 120 минут плазменного облучения температура обращенной к плазме поверхности лития достигала 464°С. После двух часов испарения лития на поверхности КПС осталась овальная область с относительно большой толщиной расплава лития.

В экспериментах с охлаждением при плазменном облучении в течение 145 минут опытного макета литиевой КПС с охлаждением водо-воздушным дисперсионным потоком значимых изменений температуры охлаждающей жидкости на выходе из системы охлаждения не зарегистрировано. При увеличении тепловой нагрузки на поверхность литиевой КПС с ~0,05 до 1,8 $МВт/м^2$ температура охлаждающей смеси увеличилась всего на 1°С. При нагрузках от 1,0 до 1,8 $МВт/м^2$ разница температур охлаждающего потока на входе и выходе не превышала 2°С. Температура модуля не поднималась выше 50°С, система охлаждения обеспечивала интенсивное охлаждение модуля. Температура поверхности КПС, обращенной к плазме, превышала 400°С. После плазменного облучения на поверхности макетов, формируются композиты из соединений лития с кислородом, углеродом и азотом, формируется высокопористая поверхность с развитым рельефом.

Плазменные испытания выполнены в рамках проекта 223-ЕОТП-УТП ГК «РОСАТОМ», анализ материалов проведен при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023.

Литература

[1]. S.V. Mirnov, J. Nucl. Mater. **390** (1), 876-885 (2009).
[2]. В.П. Будаев и др., ВАНТ, сер. Термоядерный синтез **40** (3), 35 (2017).

ИСПЫТАНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМОЙ В ПЛМ

[1]Федорович С.Д., [1,2]Будаев В.П., [1]Дедов А.В., [1]Карпов А.В., [1,2]Мартыненко Ю.В., [1]Губкин М.К., [1]Лукашевский М.В., [1]Комов А.Т., [1]Захаренков А.В., [1]Варава А.Н., [1]Лубенченко А.В., [1]Слива А.П., [1]Марченков А.Ю., [1]Чан Куанг В., [1]Рогозин К.А., [1]Коньков А.А., [1]Кваскov В.С., [1]Васильев Г.Б., [1]Штелинг В.С.

[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: fedorovichsd@mail.ru DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.023

Для термоядерного реактора-токамака необходимы исследования взаимодействия плазма-стенка при мощной стационарной плазменной нагрузке на диверторные пластины теплозащитной облицовки [1]. В работе проведены испытания охлаждаемых опытных макетов вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора в стационарной плазме плазменной установки ПЛМ (плазменный линейный мультикасп) [2]. Опытные макеты изготовлены в АО «НИИЭФА», использовалась технология и материалы, применяемые для создания вольфрамовой теплозащитной облицовки дивертора ИТЭР. Вольфрамовый модуль устанавливался в плазменный разряд, плазменный поток был направлен нормально к вольфрамовой поверхности, диаметр плазмы - 35 мм. Параметры гелиевой плазмы в ПЛМ: магнитное поле на оси - 0,01 Тл, в каспах - до 0,2 Тл температура электронов ~2 эВ с фракцией горячих электронов до 50 эВ и более, концентрация плазмы более 1 х 10^{12} $см^{-3}$. Разработанная система охлаждение модуля дисперсным водо-воздушным потоком, генерируемым специальной форсункой, обеспечивала эффективное охлаждение модуля, не допуская эффектов разрушения компонентов модуля, которые наступают при плазменной нагрузке без охлаждения модуля. Давление воды в потоке охлаждения 3,6 атм, давление воздуха 8 атм, расход воды 1 л/мин, расход воздуха 45 л/мин. Суммарное время плазменного облучения вольфрамового модуля - 160 минут. Плазменно-тепловая нагрузка на вольфрамовую поверхность достигала 1,2 $МВт/м^2$. Не наблюдалось значительных изменений поверхности (изначально гладкой) после плазменных испытаний в ПЛМ, Рис. 1. Для создания условий при интенсивном дугообразовании в стационарном плазменном разряде при мощной плазменной нагрузке в усовершенствованной установке ПЛМ использовался лазерный стенд на основе мощного лазерного комплекса для генерации дуг. На поверхности вольфрамовых модулей наблюдались кратеры в результате взаимодействия с плазмой и действия дуговых процессов, возникала рекристаллизация поверхности вольфрама под действием мощной нагрузки.

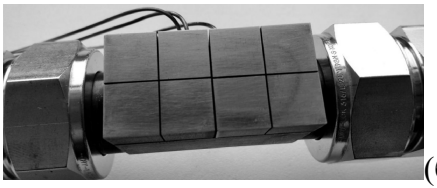

(а)

(б)

Рисунок 1 − Охлаждаемый вольфрамовый диверторный модуль во время (а) и после (б) облучения в ПЛМ.

Плазменные испытания выполнены в рамках проекта 223 ЕОТП-УТП ГК «Росатом», анализ материалов проведен при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023, оценки радиационных эффектов проведены при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020.

Литература

[1]. В.П. Будаев, ВАНТ, сер. Термоядерный синтез **38** (4), 5 (2015).
[2]. В.П. Будаев и др. ВАНТ сер. Термоядерный синтез **40** (3), 35 (2017).

РАДИАЦИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫЙ ВОЛЬФРАМ В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

[1]Хрипунов Б.И., [1]Койдан В.С., [1]Семенов Е.В., [1]Муравьев С.В., [1]Унежев В.Н., [1]Гуреев В.М., [1]Цветков А.А.

[1]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.024

Экспериментально моделируется эффект радиационного повреждения материалов и воздействия на них плазмы в термоядерном реакторе. Основным исследуемым материалом является вольфрам (Plansee, Австрия, и ПОЛЕМА, Россия), как материал, который будет использован в дивертор международного реактора ИТЭР.

С помощью облучения вольфрама тяжелыми ионами высоких энергий МэВ-ного диапазона на циклотроне У-150 моделируется нейтронный эффект и получаются образцы с высоким уровнем радиационных повреждений в поверхностном слое, который прогнозируется для термоядерного реактора (до 100 смещений на атом (сна)) при его длительной непрерывной работе. Экспозиция облученных образцов вольфрама в стационарной дейтериевой и гелиевой плазме проводилась на установке ЛЕНТА, на которой плазменный столб генерируется с помощью электронного пучка (пучково-плазменный разряд) в продольном магнитном поле 0,15 Т. Основные параметры облучения плазмой: энергия плазменных ионов бомбардирующих поверхность 250 эВ, температура образцов 1000ºС, ионный ток на мишень (30-80) мА/см^2, полный поток ионов дейтерия (1,7 – 4,1)·10^{21} D_{ion}/см^2. На облученных образцах изучены изменения микроструктуры поверхности (СЭМ), измерены скорость и коэффициент эрозии материалов.

Выполнено расчетное исследование генерации радиационных повреждений в вольфраме ионами высокой энергии и проведен сравнительный анализ характеристик образования дефектов при облучении материала ионами азота и ионами гелия при равных значениях ионного флюенса 10^{17} ион/см$^{-2}$. Показано, что в поверхностном слое глубиной до 8 мкм средний уровень повреждения составляет <D> = 1,5 сна (D_{max} = 10 сна) при использовании ионов азота 30 МэВ и <D> = 0,13 сна (D_{max} = 1 сна) при использовании гелия с энергией до 5 МэВ.

Впервые проведены облучения образцов вольфрама пучком ионов азота N^{3+} энергией 28 МэВ до 10^{17} ион/см^2. Исследование облученных материалов в плазме показало, что непосредственно облучение быстрыми ионами азота не приводит к видимым изменениям в структуре поверхности. Напротив, после экспозиции повреждённых материалов в дейтериевой плазме обнаруживается существенное изменение микроструктуры. Эффект связан главным образом с изменением кристаллической структуры материала - под воздействием плазмы происходит протравливание поверхности по границам зерен, на поверхности образуются глубокие каверны, также привязанные к этим границам.

Температурный эффект изучался на образцах вольфрама после их облучения ионами гелия He^+ с энергией 4 МэВ до полного флюенса 2,5·10^{16} см$^{-2}$, которое проводилось при температуре 600ºС. Получены образцы с уровнем концентрации дефектов до 0,16 сна в максимуме. Облучения выполнены при температуре материала 600 С. Экспозиция в дейтериевой плазме проводилась при температуре материала около 1000 С. Коэффициенты эрозии вольфрама в D-плазме составили 8,4·10^{-3} ат/ион (Plansee) и 6,2·10^{-3} ат/ион (ПОЛЕМА). Увеличения скорости эрозии облученных материалов при повышенных температурах не наблюдалось.

Литература

[1]. B. I. Khripunov, V. S. Koidan, and E. V. Semenov, Symmetry **13** (11), 2081 (2021).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ Т-15МД ИЗ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

[1]Андреев В.Ф., [1,2]Недбайлов К.О.

[1]НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, e-mail: vfandreev@gmail.com
[2]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия, e-mail: nedbaijlov.ko@phystech.edu

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.025

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» идет подготовка к пуску Т-15МД. Вакуумная камера (ВК) токамака толстая с малым омическим сопротивлением, поэтому в ней наводятся большие индукционные токи. Эти токи влияют на равновесие плазмы и, соответственно, на работу алгоритмов управления разрядом. Учет токов с максимальной точностью, является важной задачей для успешного проведения экспериментов на Т-15МД.

При расчете сценариев разряда и в системах управления плазменным разрядом используется двумерная модель ВК токамака Т-15МД. Однако она может сильно отличаться от реальной трехмерной вакуумной камеры. Поэтому использованием такой модели может приводить к большим ошибкам при расчете наведенных токов в ВК токамака. Возникает задача, улучшения и оптимизации двумерной модели ВК токамака Т-15МД.

Двумерная модель ВК заключается в следующем. ВК разбивается на N тороидальных витков, для определения наведенных токов в них записываются уравнения Кирхгофа:

$$\sum_{j=1}^{N} L_{ij}\, dI_j/dt + R_i I_i = -L_{im}\, dI_m/dt, \quad i = 1,...,N, \tag{1}$$

где L_{ij} – коэффициенты взаимной индукции тороидальных витков ВК между собой, I_j – ток в j-ом витке, R_i – сопротивление i-го витка, L_{im} – коэффициент взаимной индукции i-го тороидального витка и полоидальной обмотки с током, I_m – ток в полоидальной обмотке.

Отметим, что одним из наиболее чувствительных элементов модели ВК является сопротивления отдельных тороидальных витков, на которые она разбивается в двумерной модели. Для оптимизации модели ВК используются магнитные измерения в специально поставленных экспериментах, для анализа которых формулируется обратная задача.

Зададим в одной из полоидальных обмоток нарастающий ток с фиксированной производной по времени. Тогда спустя резистивное время ток в i-ом тороидальной витке ВК выйдет на стационарное значение, т.е. первый член в уравнении (1) обратится в ноль. В этом случае из (1) можно найти ток в каждом i-ом тороидальном витке

$$I_i = -\overline{R}_i \cdot L_{ij} \cdot dI_j/dt, \quad i = 1,...,N. \tag{2}$$

Зная токи в каждом тороидальном витке ВК, можно вычислить магнитное поле в местах расположения магнитных датчиков

$$B^i_{nk} = -b^i_{nk} \cdot \overline{R_i} \cdot L_{ij} \cdot dI_j/dt, \quad i = 1,...,N. \tag{3}$$

Зная магнитное поле $B_k^{\exp}$, которое измеряют датчики, запишем функционал невязки

$$J = \sum_{k=1}^{K} \left[\left(B_k^{\exp} - b_k^j \cdot I_j \right) - \sum_{i=1}^{N} b_k^i \cdot \overline{R_i} \cdot (-L_{ij}\, dI_j/dt) \right]^2 \to \min. \tag{4}$$

Минимум функционала (4) дает решение задачи, т.е. сопротивление каждого тороидального витка ВК токамака Т-15МД.

На основе «квазиреального» эксперимента были проведены следующие исследования: а) определен оптимальный сценарий эксперимента, т.е. скорость нарастания тока в полоидальной обмотке; б) исследована зависимость точности восстановления сопротивления ВК от погрешности в измерениях магнитными датчиками; в) исследована зависимость точности восстановления сопротивления ВК в зависимости от количества используемых магнитных датчиков. По результатам «квазиреальных» экспериментов даны рекомендации по проведению реального эксперимента на токамаке Т-15МД.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В УСТАНОВКУ ГДЛ

Пинженин Е.И., Багрянский П.А., Солдаткина Е.И., Коробейникова О.А., Яковлев Д.В., Анненков В.В., Волчок Е.П., Тимофеев И.В

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: e.i.pinzhenin@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.026

На установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ) в 2020 - 2021 годах проводилась экспериментальная кампания по изучению взаимодействия электронного пучка с плазмой в открытой магнитной системе. Для экспериментов была специально разработана электронная пушка с параметрами: энергия электронов 20 - 30 кэВ, ток 5 - 10 А, длительность до 15 мс. Пушка была установлена в одном из расширителей ГДЛ и позволяла вести инжекцию электронного пучка вдоль магнитного поля. В экспериментах использовались специально разработанная диагностика рентгеновского излучения на основе CsI(Tl) сцинтиллятора; спектрометр нейтронов и гамма квантов на основе стильбена. Использовались стандартные для ГДЛ диагностики: система томсоновского рассеяния для измерения электронной температуры и концентрации плазмы, дисперсионный интерферометр, диамагнитные петли, ленгмюровские зонды.

В докладе будут представлены результаты экспериментов по наработке мишенной плазмы с параметрами, достаточными для захвата нейтральных пучков. Таким образом на ГДЛ отработан еще один способ создания мишенной плазмы (наряду с плазменным дуговым генератором, и СВЧ пробоем газа).

В экспериментах с инжекцией электронного пучка в плазме может возникать популяция “горячих” электронов с энергией, на порядок превышающей энергию электронов исходного пучка. Проводилось экспериментальное и теоретическое изучение механизма генерации перегретых электронов в плазме ГДЛ в таких экспериментах. Была локализована область в которой происходит генерация “горячих” электронов и предложен механизм генерации таких электронов. Эти данные так же будут представлены в докладе.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛМ-М

[1,4]Васильев Г.Б., [1,2]Будаев В.П., [1]Федорович С.Д., [1,3]Кавыршин Д.И., [1,2]Карпов А.В., [1]Чан Куанг В., [1,2]Мартыненко Ю.В., [1]Комов А.Т., [1]Лубенченко А.В., [1]Лукашевский М.В., [1]Захаренков А.В., [1]Губкин М.К., [1]Рогозин К.А., [1]Коньков А.А., [1,4]Бурмистров Д.А.

[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
[2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
[3]Объединённый институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
[4] АО "ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", г. Москва, Россия.

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.027

Плазменное экранирование или режим «детачмента» может играть важную роль при взаимодействии плазмы с диверторными пластинами и обращенными к плазме компонентами стенки в токамаке-реакторе. Возрастающие радиационные потери в результате поступления примесей с поверхности в результате трехчастичной рекомбинации приводят к образованию большого количества нейтралов в области пристеночной плазмы, что означает понижение температуры пристеночной плазмы и температуры материальной поверхности. В режиме «детачмента» наблюдается понижение ионного потока из плазмы на поверхность, рост концентрации в области экранирования, см., например, [1]. При плазменных испытаниях материалов стационарной плазмой в установке ПЛМ-М [2] (линейная магнитная ловушка-плазменный линейный мультикасп) зарегистрированы эффекты плазменного экранирования поверхности. В экспериментах на ПЛМ-М со стационарной гелиевой плазмой при повышении расхода рабочего газа наблюдается рост температуры образца, затем регистрируется резкое падение его температуры, что указывает на эффект экранирования поверхности плотной плазмой и эффектами «детачмента». Параметры гелиевого плазменного разряда: ускоряющее напряжение на катоде – 180В, давление потока гелия в разрядную камеру достигало 1 Па. Для исследования плазменного экранирования создан диагностический комплекс на основе электрических зондов Ленгмюра и спектрометра. Спектрометрические измерения параметров приповерхностной плазмы проведены с использованием спектрометра AvaSpec-ULS2048. Контроль температуры образца выполняется термопарами. Планируется проведение экспериментов по исследованию плазменного экранирования мишени продуктами эрозии при взаимодействии плазмы с пористой наноструктурированной поверхностью.

Плазменные испытания выполнены при поддержке ГК «РОСАТОМ» проект 223 ЕОТП-УТП, анализ поверхности материалов проведен при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023, оценки радиационных эффектов проведены при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020.

Литература

[1]. S. I. Krasheninnikov, et al, Phys. Plasmas **23**, 055602 (2016).
[2]. V. P. Budaev, et al, J. Phys.: Conf. Ser. **1383**, 012016 (2019).

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА В ПЛАЗМЕ С ЭЦР-НАГРЕВОМ В СТЕЛЛАРАТОРЕ TJ-II И В ТОКАМАКЕ Т-10

[1]Днестровский Ю.Н., [1,2]Мельников А.В., [3]Лопес-Бруна Д., [3]Пастор И.,
[1]Днестровский А.Ю., [1]Черкасов С.В., [1]Данилов А.В., [1]Елисеев Л.Г., [1]Хабанов Ф.О.,
[1]Лысенко С.Е., [4]Сычугов Д.Ю.

[1]НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: Dnestrovskiy_YN@nrcki.ru
[2]НИЯУ МИФИ", Москва, Россия
[3]Laboratorio Nacional de Fusion, CIEMAT, Madrid, Spain
[4]МГУ им. М.В. Ломоносова, ВМК, г, Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.028

Концепция эквивалентных разрядов токамака и стелларатора, имеющих одинаковые температуры электронов и ионов, введенная в [1] при одной и той же полностью поглощенной мощности ЭЦРН (нагрева на электронно-циклотронном резонансе), расширена на случай частичного поглощения ЭЦ-мощности. Сформулированы условия эквивалентности разрядов для этого случая. Рассмотрены примеры эквивалентных экспериментальных разрядов стелларатора TJ-II и смоделированных разрядов токамака Т-10 для частичного поглощения ЭЦ-мощности, и определено значение поглощенной мощности. Показано, что температура электронов и поглощенная мощность в эквивалентных разрядах совпадают. Для серии разрядов TJ-II с низкой плотностью и чистым ЭЦР-нагревом найдена поглощенная мощность и время удержания энергии.

На рис.1 показана зависимость эффективности поглощения $\eta = Q_{ab}/Q_{EC}$ (Q_{ab} и Q_{EC} – поглощенная и введенная мощность) в Т-10 и TJ-II как функция отношения плотности n к основному магнитному полю B, что позволяет привести данные Т-10 (сплошная линия и квадраты, поле B=2.5 Тл) к TJ-II (B=1 Тл). Тонким штрих-пунктиром показаны расчеты эффективности в TJ-II по формулам, выведенным в [1], толстым пунктиром – по новым формулам. Видно, что расчеты хорошо согласуются с экспериментами.

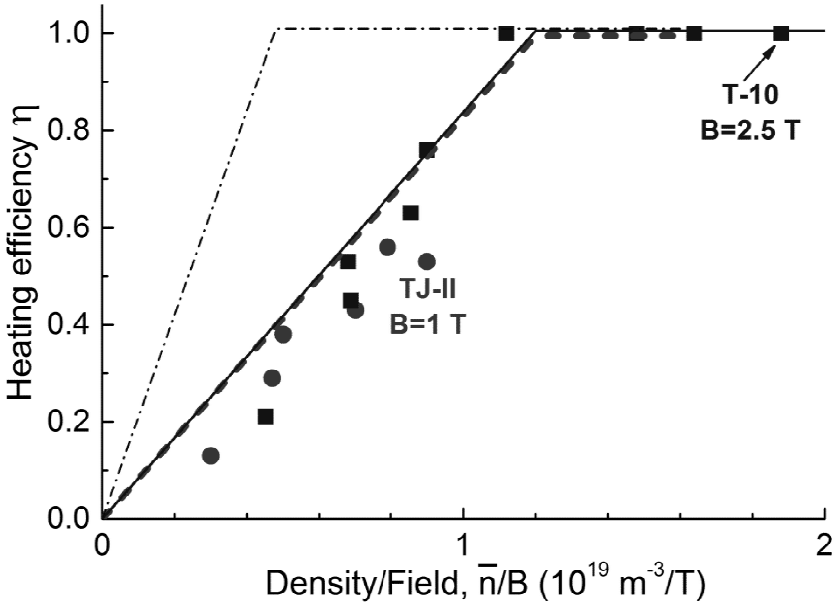


Рис. 1. Зависимость эффективности ЭЦР-нагрева от приведенной плотности в токамаке Т-10 (сплошная линия) и в стеллараторе TJ-II. Точки – эксперименты, тонкий штрих-пунктир – расчеты для TJ-II по формулам из [1], толстый пунктир – расчеты по новым формулам.

Работа Курчатовской группа поддержана РНФ, проект 19-22-00312, ЮНД и ДЮС поддержаны РФФИ, грант 20-07-00391.

Литература

[1]. Dnestrovskij Yu. N. et al. Plasma Phys. Control. Fusion 63 (2021) 055012.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СБОРА ЛИТИЯ МНОГОСЛОЙНЫМ КОЛЛЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ КПС С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ЭМИТТЕРОМ НА ТОКАМАКЕ Т-11М

Васина Я.А., Пришвицын А.С, Джурик А.С., Щербак А.Н., Джигайло Н.Т., Лазарев В.Б., Мирнов С.В.

АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, округ Троицк, г. Москва, Россия, e-mail: ian.vasina@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.029

Основной целью будущих токамаков является работа в стационарном режиме. В связи с этим актуальной является проблема выбора материала первой стенки. Одним из перспективных решений является использование жидких металлов, в частности, лития. Это позволит создать возобновляемое покрытие, которое, с одной стороны, практически не загрязняет центральную, реакторную область плазмы, а с другой – охлаждает за счет излучения периферийную плазму и снижает тепловую нагрузку на лимитер или дивертор.

Литиевая программа токамака Т-11М ориентирована на создание замкнутого контура циркуляции лития, основными элементами которого являются эмиттер лития и коллекторы лития [1]. Для создания такого контура чрезвычайно важно обеспечить внешнюю подпитку литием эмиттера без выноса его на атмосферу.

Основным источником (эмиттером) лития на токамаке Т-11М является вертикальный лимитер на основе КПС (капиллярно-пористой системы). На токамаке Т-11М установлен и протестирован новый вертикальный лимитер с внешней подпиткой литием.

В предыдущей работе исследовался сбор лития на продольный коллектор с различным количеством сеток. В данной работе представлены результаты сбора лития на продольный КПС коллектор с 4-мя слоями сетки с новым вертикальным лимитером в качестве основного источника лития. Исследовано распределение сбора каждым из слоёв сетки. Проведены экспериментальные серии с одним продольным коллектором, а также с двумя симметрично расположенными коллекторами, один из которых предварительно заполнен литием.

Количество лития, собранного коллектором, определялось методом пламенного анализа [2]. Получено радиальное распределение собранного лития вдоль коллектора для каждого из четырех слоев сетки с ионной и электронной стороны в экспериментальных сериях со старым и новым вертикальным лимитером.

Литература

[1]. Mirnov S. Plasma-wall interactions and plasma behaviour in fusion devices with liquid lithium plasma facing components, J. Nucl. Mater. **390–391**, 876–885 (2009).

[2]. Мирнов С.В., Джигайло Н.Т., Щербак А.Н. Физико - химический метод определения абсолютного количества лития в плёнках на диагностических мишенях // Вопросы атомной науки и техники. Серия термоядерный синтез. 2018, Т. 41, № 1. с. 53–56.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ T_e И n_e В РЕЖИМАХ С НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2.

Жильцов Н.С., Курскиев Г.С., Баженов А.Н., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Ермаков Н.В., Ильясова М.В., Киселёв Е.О., Коваль А.Н., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М. Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Щёголев П.Б.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: nisovru@gmail.com

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.030

Доклад посвящён результатам изучения нагрева электронного компонента плазмы токамака Глобус-М2 (1). Исследованы режимы с инжекцией нейтральных частиц, которые сравнивались с омическим режимом нагрева плазмы. Эксперименты проведены при следующих условиях: $B_T \leq 0.8$ Тл, $I_p \leq 0.4$ МА, $P_{NBI} > 390$ кВт, $E_{NBI} = 30 - 50$ кВ. Инжекция дейтерия проводилась в дейтериевую плазму на протяжении всего разряда, начиная со стадии роста тока $I_p > 0.2$ МА. Дополнительный нагрев методом нейтральной инжекции приводил к переходу в режим улучшенного удержания (H-mode).

Основным инструментом исследования в данной работе являлась диагностика томсоновского рассеяния (2). Данным методом измерена динамика профилей температуры T_e и концентрации n_e электронов как в центральной плазме, так и на периферии. В частности, изучены градиенты T_e и n_e в области крайней замкнутой магнитной поверхности в экваториальной плоскости со стороны слабого поля, включая $R \geq R_{sep}$, где R – большой радиус точки измерения диагностики томсоновского рассеяния, R_{sep} – положение крайней замкнутой поверхности в момент измерения.

Информация о пространственном распределении T_e и n_e позволила определить энергозапас электронного компонента плазмы W_e. Таким образом была измерена и проанализирована зависимость W_e от средней концентрации электронов в плазме. Произведено сравнение W_e в разрядах с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции относительно режима исключительно с омическим нагревом.

Исследована динамика и пространственная локализация пилообразных колебаний плазменного шнура. При помощи анализа W_e произведена количественная оценка влияния пилообразных колебаний на удержание энергии. Проведён анализ энергобаланса плазмы, сделана оценка времени удержания энергии, а также электронной и ионной температуропроводности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-72-20076).

Литература

[1]. Minaev V. B., et.al. Nucl. Fusion **57,** 066047 (2017).
[2]. Zhiltsov N.S., et.al. ICPAF-2021, Book of Abstracts, p. 62.

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА ДИВЕРТОРНЫЕ ПЛАСТИНЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ ИНЖЕКЦИИ АЗОТА И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ПРЕДСКАЗАНИЯМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

[1]Хромов Н.А., [1]Бахарев Н.Н., [2]Векшина Е.О., [1]Гусев В.К., [2]Долгова К.В., [1]Жильцов Н.С., [1]Киселев Е.О., [1]Курскиев Г.С., [1]Минаев В.Б., [2]Молчанов П.А., [1]Петров Ю.В., [2]Рожанский В.А., [1]Сахаров Н.В., [1]Тельнова А.Ю., [2]Тимохин В.М., [1]Токарев В.А., [1]Тюхменева Е.А., [1]Щеголев П.Б.

[1]ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Nikolay.Khromov@mail.ioffe.ru
[2]СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vekshina_eo@spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.031

Значения плотности потока тепла на диверторные пластины в современных и проектируемых токамаках могут превышать 10 МВт/м^2. Такие тепловые нагрузки на обращенные к плазме компоненты делают невозможной стационарную работу установки. Наиболее перспективным путем решения данной проблемы считается режим с отрывом дивертора (divertor detachment) [1]. В таком режиме большая часть энергии, которую выносят заряженные частицы из зоны удержания, переходит в излучение, что предотвращает чрезмерной нагрев диверторных пластин. В этих условиях наблюдаются значительные градиенты давления вдоль силовых линий магнитного поля в пристеночной плазме, и температура электронов около диверторных пластин снижается вплоть до величины порядка эВ. Отрыв дивертора обычно достигается либо увеличением плотности плазмы, либо напуском сильно излучающей примеси. Для токамаков с открытым дивертором, к которым относится Глобус-М2 [2], более надежным представляется второй способ [3].

Предварительное моделирование [4] показало возможность снижения тепловой нагрузки на диверторные пластины токамака Глобус-М2 при напуске азота. Порядка 65% мощности разряда излучилось в расчётной области кода, величина плотности потока энергии на нижнюю наружную диверторную пластину упала в несколько раз, при этом величина эффективного заряда внутри сепаратрисы не превышала 4.

Эксперименты проводились в дейтериевых разрядах с активной нижней X точкой при тороидальном магнитном поле 0.7 Т, ток плазмы был в диапазоне 200 - 250 кА. Дополнительный нагрев осуществлялся пучком нейтрального дейтерия с энергией 28 кэВ. Параметры диверторной плазмы определялись с помощью массива встроенных ленгмюровских зондов [5]. Интенсивность напуска азота подбиралась таким образом, что его влияние на параметры плазмы в центральной области было несущественным. При этом электронная температура и плотность теплового потока вблизи пересечения внешней ветви сепаратрисы с диверторной пластиной (т.е. вблизи strike-point) уменьшались в несколько раз.

Эксперименты проведены на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях». Работа сотрудников СПбПУ была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту №0784-2020-0020.

Литература

[1]. Loarte A. et al, Nucl. Fusion **47,** S203–S263 (2007).
[2]. Minaev V.B. et al., Nucl. Fusion, **57,** 066047 (2017).
[3]. Leonard A.W., Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 044001 (2018).
[4]. Sorokina D.S. et al., Phys. Plasmas **25,** 122514 (2018).
[5]. Khromov N.A. et al., Tech. Phys. **66**, 409 (2021).

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТОКА В ПЛАЗМЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ

Длугач Е.Д., Кутеев Б.В.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: edlougach@gmail.com

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.032

Инжекция нейтральных пучков обеспечивает максимальную эффективность генерации тока среди всех систем нагрева и поддержания тока. Для стационарной работы термоядерных источников нейтронов (ТИН) генерация безындукционного тока и возможность управления профилями тока и нейтронным выходом с помощью пучков атомов высокой энергии представляет особый интерес. Синтез на пучке является основным источником нейтронов в плазме ТИН, поскольку реакции на высокоэнергетических «хвостах» вносят наибольший вклад в скорость генерации нейтронов. Это предъявляет особые требования к функции распределения быстрых частиц, а именно к относительной доле горячих ионов в спектре.

Для достижения максимального эффекта от инжекции необходимо согласование параметров пучка (состав, энергия, прицеливание, наклон) с магнитной конфигурацией плазмы и кинетическими профилями. С учетом особенностей геометрии ТИН, как правило, более компактных по сравнению с классическими токамаками, параметры инжекции должны быть оптимизированы таким образом, чтобы обеспечить по всему сечению пучка эффективный захват быстрых ионов, а также высокую генерацию тока и максимальный нейтронный выход. Поиск оптимальных условий необходимо учитывает ограничения на уровень сквозных потерь атомов, чтобы гарантировать умеренный уровень нагрузок на первую стенку.

Размер и форма пучка в сочетании с тороидальными эффектами оказывают существенное влияние на распределение быстрых ионов в фазовом пространстве и на результирующие профили тока и генерации нейтронов синтеза. В наибольшей степени влияние геометрических факторов проявляется в системах с низким аспектным отношением (с высоким пробочным отношением) и при поперечных размерах пучка сопоставимых с сечением плазменного шнура. Внутренняя структура пучка и топология магнитных поверхностей используются для расчета объемного распределения ионизации, сквозных потерь атомов и начальных потерь ионов, это позволяет скорректировать результирующие профили генерации тока.

Код BTOR (*Beam in TORoids*), создан для моделирования инжекции в плазму компакных и сферических токамаков с учетом тороидальных эффектов. Он используется для расчета захвата пучка в плазме, его ионизации и термализации быстрых ионов вдоль магнитных силовых линий. Магнитная конфигурация плазмы и кинетические профили задаются аналитически, предполагается, что в стационарном режиме пучок не вносит возмущение в параметры плазменной мишени. Благодаря высокой статистике, проникновение пучка в плазму и распределение ионов в объеме и по скоростям моделируются с высокой точностью. Функции распределения быстрых ионов по энергии рассчитываются по классическим аналитическим формулам торможения ионов в плазме [2]. Показаны радиальные профили тока от пучка, проведены оценки скорости пучкового синтеза и общего выхода нейтронов. Анализ подтверждает исходное предположение о чувствительности тока и нейтронного выхода к пространственно-угловой структуре пучка, к параметрам прицеливания и к детальной геометрии магнитного поля плазмы.

Работа поддержана НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия.

Литература

[1]. Kuteev et al., Nucl. Fusion **57**, 076039 (2017).
[2]. J. Wesson, *Tokamaks, 4th ed.* (Oxford Univ. Press, Oxford, 2011).

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ДИНАМИКУ ИОНОВ В ВИНТОВОЙ МАГНИТНОЙ ПРОБКЕ

Черноштанов И.С.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: I.S.Chernoshtanov@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.033

Одним из методов подавления продольных потерь из открытых ловушек является использование винтовых магнитных пробок, предложенных в работе [1]. Идея метода заключается в том, что на плазму, помещенную в магнитное поле с винтовой симметрией и вращающуюся вокруг оси (из-за радиального электрического поля), действует сила, направленная вдоль магнитного поля. Винтовые пробки могут использоваться либо для активного подавления продольных потерь из открытых ловушек, либо для ускорения потоков плазмы. В рамках МГД-приближения предсказана экспоненциальная зависимость эффективности запирания потока плазмы от длины винтовой пробки [2]. Напряженность магнитного поля вдоль силовой линии модулирована с периодом, равным шагу винта; важную роль играет обмен импульсом между пролетными ионами и ионами, запертыми между максимумами магнитного поля.

На установке СМОЛа экспериментально продемонстрировано подавление потока плазмы, протекающего через винтовую пробку, в режимах плотной плазмой, когда длина свободного пробега иона сравнима с шагом винта и обмен импульсом между пролетными и запертыми ионами эффективно осуществляется за счет кулоновских столкновений [3]. В то же время, эффективность запирания не снижалась в режимах с пониженной концентрацией плазмы, когда длина свободного пробега (посчитанная по частоте кулоновских столкновений) превышала несколько шагов винта. В этих режимах наблюдалось возбуждение колебаний с частотой порядка нескольких килогерц, которые, по-видимому, и приводили к аномально малой длине свободного пробега ионов [4].

В настоящей работе численно и аналитически исследуется влияние низкочастотных колебаний на динамику ионов в винтовой пробке. Колебания представляются в виде стоячих волн, локализованных в винтовой пробке с длиной волны порядка длины пробки. Электростатический потенциал плазмы предполагается примерно квадратично возрастающим с радиусом; электрический дрейф приводит к вращению плазмы с не зависящей от радиуса частотой. Колебания с фазовой скоростью, близкой к скорости винтовых пробок во вращающейся системе отсчета, могут эффективно отбирать энергию у запертых ионов. С другой стороны, если скорость пробок близка к тепловой скорости протекающих ионов, колебания могут эффективно влиять на продольную скорость ионов. В докладе рассмотрена зависимость доли ионов с максвелловским распределением по скоростям, пролетевших через винтовую пробку, от величины винтовой компоненты магнитного поля, напряженности радиального электрического поля, структуры колебаний и частоты кулоновских столкновений.

Литература

[1]. A.D. Beklemishev, Fusion Sci. Technol. **63**, 355 (2013), doi: 10.13182/FST13-A16953
[2]. A.D. Beklemishev, AIP Conf. Proc. **1771**, 040006 (2016), doi: 10.1063/1.4964191
[3]. A.V. Sudnikov et al., J. Plasma Phys. **86**, 905860515 (2020), doi: 10.1017/S0022377820001245
[4]. A.V. Sudnikov et al., J. Plasma Phys., in press.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДА В ДИАМАГНИТНЫЙ РЕЖИМ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ

[1,2]Черноштанов И.С.,[2]Дудникова Г.И.,[2]Вшивков В.А.,[2]Боронина М.А.,
[2]Соловьев А.А.

[1]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: I.S.Chernoshtanov@inp.nsk.su
[2]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.034

Важное преимущество линейных магнитных систем для удержания термоядерной плазмы заключается в возможности достижения высокого давления удерживаемой плазмы, сравнимого с давлением магнитного поля ловушки. При достижении предельно высокого давления, равного давлению поля ловушки, происходит перестройка магнитного поля: формируется область, заполненная плотной плазмой, из которой вытеснено магнитное поле (т.н. диамагнитный пузырь), в переходном слое на границе области давление плазмы резко падает, а магнитное поле – резко возрастает [1, 2]. Магнитогидродинамические модели предсказывают существенное увеличение времени удержания плазмы при переходе в данный режим [1, 2]. Экспериментальная демонстрация режима диамагнитного удержания планируется на установке КОТ в ИЯФ СО РАН [3].

Помимо теоретического анализа и экспериментов для исследования режима диамагнитного удержания может использоваться численное моделирование на суперкомпьютерах. В ИВМиМГ разработан 2D3V (две координаты и три компоненты скорости) численный код, нацеленный на моделирование методом частиц-в-ячейках удержания плазмы с высоким относительным давлением в осесимметричных линейных ловушках [4]. Чтобы избежать сложностей, связанных с отслеживанием быстрых электронных движений, используется гибридная модель, в рамках которой электронная компонента моделируется как безмассовая заряженная жидкость. Для моделирования кулоновских столкновений вместо разыгрывания парных столкновений (как в методе Такидзуки-Абе) используется т.н. null collisions метод, когда разыгрывается рассеяние частиц на максвелловской плазме с параметрами, определяющимися из плотности, средней скорости и дисперсии по скоростям макрочастиц.

В докладе представлены результаты моделирования перехода в режим диамагнитного удержания в осесимметричном пробкотроне с атомарной инжекцией. Обсуждается структура магнитного поля и электростатического потенциала в стационарном состоянии, формирование сдвиговых азимутальных течений в переходном слое, траектории отдельных ионов, влияние функции распределения инжектируемых атомов на форму диамагнитного пузыря и т.п.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-29-21025).

Литература

[1]. A.D. Beklemishev, Phys. Plasmas **23**, 082506 (2016), doi: 10.1063/1.4960129
[2]. A.D. Beklemishev and M.S. Khristo, Plasma Fusion Res. **14**, 2403007 (2019), doi: 10.1585/pfr.14.2403007
[3]. P.A. Bagryansky et. al., J. Fusion Energy **38**, 162 (2019), doi: 10.1007/s10894-018-0174-1
[4]. M.A. Boronina et. al., J. Phys.: Conf. Ser. **1336**, 012017 (2019).
[5]. T. Takizuka and H. Abe, J. Comp. Phys. **25**, 205 (1977), doi: 10.1016/0021-9991(77)90099-7
[6]. V.A. Vshivkov et. al., J. Phys.: Conf. Ser. **2028**, 012005 (2021), doi: 10.1088/1742-6596/2028/1/012005

.

3Д МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСА ТОКАМАКА Т-15МД

[1]Драбинский М.А., [1]Субботин Г.Ф., [1,2]Земцов И.А., [1,3]Панфилов Д.С., [1]Сушков А.В., [1]Анашкин И.О., [1]Рой И.Н., [1,3,4]Мельников А.В., [1]Баркалов Е.Е.

[1]НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия
[3]НИУ Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия
[4]НИЯУ Московский инженерно-физический институт, г. Москва, Россия DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.035

В НИЦ «Курчатовский институт» ведутся работы по созданию систем диагностики и дополнительного нагрева плазмы (инжекция нейтральных атомов, ЭЦРН, ИЦРН) [1-3] токамака Т-15МД (R = 1.48 м, r = 0.67 м, $B_t \leq 2$ Тл, $I_{pl} \leq 2$ МА) [4]. Диагностический комплекс включает в себя оптические (CXRS, томсоновское рассеяние) [5, 6], электромагнитные (ЭМ-зонды, пояс Роговского, диамагнитные петли) [7-9], СВЧ диагностики [10] и двойная диагностика плазмы пучком тяжёлых ионов [11].

Системы дополнительного нагрева плазмы, линии питания и охлаждения установки и другие технологические системы, обеспечивающие работу токамака, располагаются в зале установки, что существенно ограничивает пространство, доступное для размещения диагностик плазмы. Для оптимального расположения оборудования с учётом всех ограничений и требований безопасности создана трехмерная модель токамака и зала установки. Её спользование позволяет обеспечить согласованное размещение необходимого оборудования, подведение технологических коммуникаций, а также реалистично оценивать возможности установки, ввода в эксплуатацию и последующего обслуживания данного оборудования и облегчить проектирование новых элементов. Трёхмерная модель позволяет оптимизировать взаимодействие между различными системами при проектировании общих электрических и водных сетей нескольких диагностик и диагностических патрубков токамака.

Модель включает в себя токамак Т-15МД, расположенный в зале установки на первом этаже здания, подвальное помещение, диагностическую антресоль, инжекторы нейтральных атомов, линии волноводов СВЧ-нагрева, оборудование рефлектометрии, диагностический инжектор нейтральных атомов, двойной диагностический комплекс зондирования пучком тяжёлых ионов, диагностика электрон-циклотронного излучения, томсоновское рассеяние и лазерный интерферометр. Модель создана на основе конструкторской документации, уточненной по фактическому положению объектов.

В ближайшее время планируется включение в модель систем управления и питания инжекторов нейтральных частиц и гиротронов, включение дополнительных диагностик и уточнение моделей вакуумного оборудования в подвальном помещении.

Литература

[1]. A.V. Melnikov, et al., Fusion Eng. Des. **96**, 306-310 (2015).
[2]. I.N. Roy, et al., EPJ Web Conf. **149**, 03021 (2017).
[3]. A.V. Melnikov, et al., AIP Conf. Proc. **2254**, 070007 (2020).
[4]. П.П. Хвостенко и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **42** (1), 15-38 (2019).
[5]. V. Krupin, et al., J. Instrum. **15**, C02027 (2020).
[6]. Г.М. Асадулин и др., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез 39 (2), 15-38 (2016).
[7]. A.V. Sushkov, et al., Fusion Eng. Des. **146**, 383–387 (2019).
[8]. M.L. Dubrov et al Plasma Phys. Control. Fusion **61**(6), 9 (2019).
[9]. В. Д. Пустовитов и др. Физика Плазмы, 2020, том 46, № 8, с. 675–684.
[10]. Субботин Г.Ф. и др. Сборник тезисов докладов XLVIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Москва, 2021, стр. 94;
[11]. M.A. Drabinskiy et al J. Instrum. **14**, C11027 (2019).

ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ДВОЙНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД

[1]Хабанов Ф.О., [1]Драбинский М.А., [1]Елисеев Л.Г., [1,2,3] Мельников А.В., [1,4]Харчев Н.К., [1]Лысенко С.Е., [1,2]Саранча Г.А., [1]Вадимов Н.А., [1,2]Горбун М.С., [1,2]Крохалев О.Д., [1]Гуцевич Е.И., [1]Прокофьева Т.Ю., [1,5]Норов С.А., [1,5]Аммосов Я.М., [1,6]Шелегеда И.А.

[1]НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия
[2]НИУ Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия
[3]НИЯУ Московский инженерно-физический институт, г. Москва, Россия
[4]Институт общей физики им. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия
[5]Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия
[6]МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.036

Изучение электрических полей, возникающих в плазме в установках с магнитным удержанием, и их влияния на процессы удержания тепла и частиц является актуальной задачей физики УТС. Зондирование плазмы пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ, Heavy Ion Beam Probe – HIBP) позволяет измерять электрический потенциал и, как следствие, радиальное электрическое поле, как на периферии, так и в центре плазменного шнура в токамаках и стеллараторах [1, 2]. Кроме того, диагностика HIBP позволяет измерять локальные колебания электрического потенциала и концентрации электронов одновременно и независимо в разных пространственных областях, что открывает возможности для изучения широкополосной турбулентности, зональных течений [3] и альфвеновских мод [4].

На крупнейшем в России токамаке Т-15МД, запущенном в НИЦ «Курчатовский институт» (R = 1,48 м, a = 0,67 м, A = 2,2, $B_{tor} \leq 2$ Тл, $I_{pl} \leq 2$ МА) [5], планируется установка двойной диагностики HIBP: две аналогичные системы будут установлены в разных полоидальных сечениях, разнесённых на 90° по обходу тора [6]. Такое расположение позволит изучать как полоидальные, так и тороидальные корреляции электрического потенциала плазмы и концентрации электронов [7]. Разработка и проектирование диагностики HIBP требует предварительных расчетов траекторий зондирующих частиц в магнитном поле токамака. Уравнение движения зондирующих ионов в магнитном поле Т-15МД решались методом Рунге-Кутты 4-го порядка с помощью кода HIBP SOLVER [8]. По результатам расчётов были построены детекторные сетки – области в плазме, в которых возможно проведение измерений, оценены коэффициенты ослабления зондирующего пучка при прохождении через плазму. Предложена концепция двойного вторичного ионопровода, позволяющая регистрировать вторичные ионы как из периферийных, так и из центральных областей плазменного шнура. Также проведено моделирование формирования диагностического пучка в инжекторе и его фокусировки, определены величины фокусирующих и экстракторных напряжений для получения квазипараллельного пучка. Результаты моделирования будут проверены на экспериментальном стенде, который готовится к запуску [9]. Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 19-12-00312.

Литература

[1]. Dnestrovskij Yu., et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **22** (4), 310-331 (1994).
[2]. Melnikov A.V., et al., Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 084008 (2018).
[3]. Melnikov A.V., et al., Nucl. Fusion **55** (6), 063001 (2015).
[4]. Melnikov A.V. Nature Physics **12** (5), 386-390 (2016).
[5]. Хвостенко П.П. и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **42** (1), 15-38 (2019).
[6]. Drabinskiy M.A., et al., J. Instrum. **14**, C11027 (2019).
[7]. Chmyga O.O., et al., Probl. At. Sci. Technol., No.1 (119), 248-251 (2019).
[8]. Ilin A.M., Khabanov P.O., Melnikov A.V. J. Phys.: Con. Ser. **1383**, 012006 (2019).
[9]. Vadimov N.A., et al., Probl. At. Sci. Technol., No. 6 (130), 200-203 (2020).

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ С НАИЛУЧШИМ УДЕРЖАНИЕМ ЭНЕРГИИ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА

[1,2]Касьянова Н.В., [1]Разумова К.А., [1]Андреев В.Ф.

[1]НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия,
e-mail: Kasyanova_NV@nrcki.ru
[2]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.037

К настоящему времени накоплено много экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что для описания явлений переноса в турбулентной плазме токамака не применимы соотношения Фика, в которых потоки тепла и частиц выражаются через локальные параметры плазмы и их градиенты. Из экспериментов известно, что нормированный профиль давления не зависит от параметров плазмы, способа ее нагрева и размера установки [1]. Поэтому для описания энергобаланса плазмы необходимо использовать уравнение, которое сохраняло бы нормированный профиль давления.

В работе [2] для описания эволюции плазмы предложен подход неравновесной термодинамики. В рамках этого подхода динамика релаксации системы при вынужденном отклонении от равновесного состояния описывается уравнением подобным уравнению Смолуховского с коэффициентом теплопроводности $\kappa = \theta(\chi_0 + \chi_1)$ [2]. Если профиль давления близок к самосогласованному профилю, то коэффициент $\kappa = \theta\chi_0$ минимален (т.е. $\chi_1 = 0$), энергосодержание достигает максимального значения. В противоположном случае возникает дополнительный поток тепла, направленный на то, чтобы приблизить профиль давления к самосогласованному профилю, и коэффициент теплопроводности увеличивается $\kappa = \theta(\chi_0 + \chi_1)$.

Режимы с насыщенным омическим удержанием (SOC), в которых достигается максимальное энергосодержание плазмы, соответствуют минимальному отклонению профиля давления от самосогласованного профиля. Поэтому анализ режимов SOC позволяет оценить коэффициент теплопроводности χ_0. Эксперименты, проведенные на токамаке Т-10, показали, что в пределах экспериментальной погрешности коэффициент χ_0 постоянен по радиусу, и его величина не зависит от мощности нагрева плазмы. Используя найденный коэффициент χ_0, проведены оценки максимального удержания энергии для токамаков DIII-D (в гибридном режиме, I- и H- моде, супер H-моде); JET (в гибридном режиме); ASDEX Upgrade (в гибридном режиме и I-моде); JT-60U и KSTAR (в гибридных режимах). Показано, что экспериментально измеренное энергосодержание плазмы близко к расчетным максимальным значениям или не превышает их (рис. 1). Проведены оценки удержания энергии для двух базовых режимов работы токамака ITER.

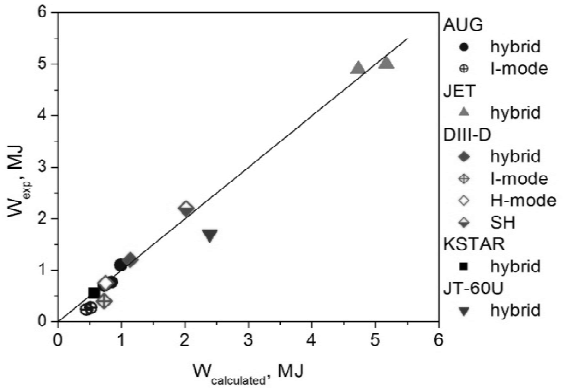


Рис. 1. Рассчитанное и экспериментальное энергосодержание плазмы.

Литература

[1]. Razumova K.A., et al Nucl. Fusion **49**, 065011 (2009).
[2]. Дябилин К.С., Разумова К.А. Физика плазмы, 2015, т. 41, с. 747.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПИЛИНГ-БАЛЛОННОЙ МОДЫ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

[1]Солоха В.В., [1] Курскиев Г.С., [1,2]Яшин А.Ю., [1]Гусев В.К., [1]Жильцов Н.С., [1]Киселев Е.О., [1]Минаев В.Б., [1]Мирошников И.В., [1]Петров Ю.В., [2]Петров А.В., [2]Пономаренко А.М., [1]Сахаров Н.В., [1]Ткаченко Е.Е., [1]Толстяков С.Ю., [1]Тюхменева Е.А.

[1]ФТИ им. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vladimir.soloha@gmail.com
[2]ФГАОУ ВО "СПбПУ", г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.038

Плазма сферического токамака Глобус-М2 [1] в режиме улучшенного удержания демонстрирует развитие краевой неустойчивости в двух сценариях: синхронизировано и десинхронизированно с внутренними перезамыканиями. Предыдущий анализ синхронизации срывов краевых неустойчивостей и перезамыканий на токамаке Глобус-М указал на механизм дестабилизации посредством появления дополнительного токового возмущения в области пьедестала [2]. Эффективность данного механизма зависит от глубины проникновения токового возмущения, которая является функцией от температуры и запаса устойчивости.

В представленной работе проанализирована устойчивость пилинг-баллонной моды в разрядах токамака Глобус-М2. Анализ устойчивости производился с помощью трёхмерного МГД кода, реализованного в фреймворке BOUT++ [3]. Экспериментальные значения, используемые для симуляций: ток плазмы I_P до 500 кА и тороидальное магнитное поле B_T до 1 Тл. Большой радиус камеры Глобус-М2 R = 0.36 м и малый радиус a = 0.24 м. При анализе устойчивости использовалась форма профилей концентрации электронов и температуры, полученная диагностикой томсоновского рассеяния с разрешением около 1 см вблизи сепаратрисы [4, 5]. Предварительные результаты показали, что эффективность дестабилизации краевых неустойчивостей посредством перезамыканий имеет обратную зависимость от тока по плазме и температуры, согласно модели [2]. При температуре электронов более 300 эВ вблизи поверхности ψ_{norm}=0.9, проникновение токового возмущения ограничено и не вызывает дестабилизации пилинг-баллонной неустойчивости. В то же время, для дестабилизации неустойчивостей требуется превышение критической величины баллонного параметра. Отдельное внимание в работе уделено ряду разрядов, в которых наблюдается переход в режим улучшенного удержания без возбуждения краевых неустойчивостей [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект №18-72-10028. Эксперименты проведены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Литература

[1]. Minaev V.B., et al., Nucl. Fusion **57**, 066047 (2017).
[2]. Bulanin, V.V., et al., Plasma Phys. Control. Fusion **63**, 122001 (2021).
[3]. Dudson B., et al, Comput. Phys. Commun. **180**, 1467–1480 (2009).
[4]. Tolstyakov S., et al., Tech. Phys. **51** (7), 846–852 (2006).
[5]. Kurskiev G., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **963**, 163734 (2020).
[6]. Yashin, A.Y., et al., Plasma Phys. Rep. **46**, 683–688 (2020).

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТОКОВОГО СЛОЯ В КОАКСИАЛЬНОМ УСКОРИТЕЛЕ ПЛАЗМЫ

[1,2]Горяинов В.Ю., [1]Воронин А.В.

[1]ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vgoryainov@mail.ioffe.ru
[2]СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.039

Плазменные ускорители в настоящее время успешно применяются для различных задач управляемого термоядерного синтеза, таких как подпитка топливом установок с магнитным удержанием плазмы во время разряда, предионизация плазменных установок, в которых индукционный пробой затруднен [1], облучение материалов первой стенки токамака. В данной работе рассматривался плазменный ускоритель с коаксиальной геометрией электродов, с емкостью накопительных конденсаторов 160 мкФ, напряжением на электродах до 5 кВ [1]. Плотность струи на выходе из ускорителя составляла 10^{16} $см^{-3}$, скорость 80 - 100 км/с.

Теоретическая модель для описания процесса в импульсном ускорителе была сформулирована в работе [2]. Рассматривалась электродинамическая модель ускорения, в которой плазма представлялась в виде токопроводящей перемычки с сосредоточенной массой, ускоряющейся под действием электродинамической силы. Однако такая модель не всегда реализуется на практике. Как правило, после начальной фазы разряда токовая перемычка расслаивается, локализуется на входе и на выходе ускорителя, что препятствует эффективному ускорению плазмы [3]. Зная положение токового слоя во время разряда, возможно увеличение таких характеристик плазменной струи, как скорость. Увеличение направленной кинетической энергии струи, свободной от примесей, лучше всего осуществлять через увеличение ее скорости. Кроме того, наклон токовой перемычки относительно электродов позволит определить механизм ускорения плазмы в канале ускорителя. Увеличение вытянутости перемычки ухудшает тяговые характеристики струи. Увеличение скорости плазменной струи возможно при поддержании режима и условий в коаксиальном ускорителе, при которых разряд будет перпендикулярен к магнитному полю, создаваемым электрическим током.

Ранее [3] для регистрации движения токового слоя использовались магнитные зонды, установленные внутри ускорителя. Однако расположение зондов в ускорительном канале могло приводить к возмущению плазмы и искажению измерений. Определение угла наклона токового слоя относительно силовых линий магнитного поля производилось диагностикой, основанной на светодиодных датчиках тока. Датчики располагались на поверхности внешнего электрода, а также внутри центрального электрода ускорителя. Этот способ оказался простым, надежным и не влиял на протекание разрядного тока по электродам.

Работа выполнена на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» ФТИ им. А.Ф. Иоффе Министерством науки и высшего образования РФ в рамках госзадания. Также работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках госзадания в сфере науки по проекту № 0784-2020-0020.

Литература

[1]. А.В. Воронин, В.Ю. Горяинов, и др. //Физика плазмы, том 47, № 8, с. 675 – 683.
[2]. Л.А. Арцимович, С.Ю. Лукьянов, И.М. Подгорный // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. Вып. 1. с. 1–8.
[3]. А.В. Воронин, В.К. Гусев, С.В. Кобяков // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 63 – 68.

О ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ДАЛЬНИХ КОРРЕЛЯЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В ПЛАЗМЕ СТЕЛЛАРАТОРА TJ-II

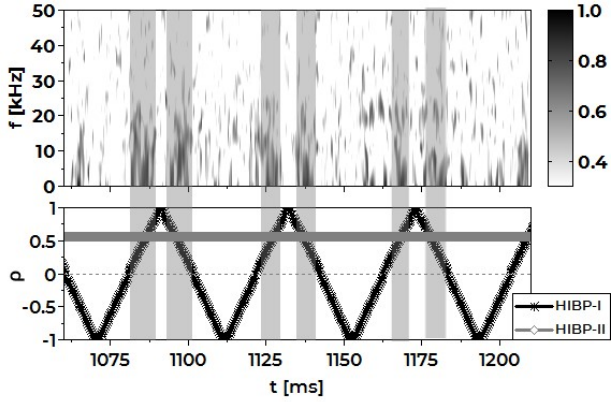
[1,2]Саранча Г.А., [1,2,3]Мельников А.В., [1]Елисеев Л.Г., [1]Хабанов Ф.О., [1,4]Харчев Н.К.

[1]*НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия*
[2]*Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*
[3]*НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия*
[4]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.040

В настоящее время зональным течениям отводится важная роль в исследованиях удержания тороидальной плазмы, поскольку они рассматриваются как механизм саморегуляции плазменной турбулентности, переводящий радиальные потери частиц и энергии в крутильные колебания [1]. ГАМ (геодезическия акустическая мода) – высокочастотная ветвь зональных течений, исследуется на многих токамаках и стеллараторах [2 – 4]. Низкочастотная ветвь, или собственно зональные течения, проявляют себя в виде низкочастотного непрерывного спектра колебаний электрического потенциала, симметричных в тороидальном и полоидальном направлениях ($m = n = 0$). Доклад посвящён исследованию таких колебаний в плазме стелларатора TJ-II (Мадрид, Испания) с помощью двойной диагностики пуском тяжёлых ионов (ЗПТИ, англ. Heavy Ion Beam Probe – HIBP).

HIBP – локальная диагностика, позволяющая проводить измерения электрического потенциала плазмы как на периферии, так и в центральных зонах плазменного шнура. Диагностический комплекс HIBP стелларатора TJ-II оснащён двумя зондирующими пучками, расположенными на 90° тороидального угла друг относительно друга (точки измерения удалены на расстояние порядка 2,5 м), и позволяет проводить корреляционные измерения колебаний электрического потенциала. Каждый пучок способен работать как в режиме измерения в точке, так и выполнять широкое сканирование по всему плазменному шнуру от стороны слабого поля до стороны сильного поля.



В докладе представлены результаты исследования распределения коэффициента когерентности дальних корреляций электрического потенциала по сечению плазменного шнура в различных режимах работы стелларатора (например, рис. 1).

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 19-12-00312.

Рис. 1 Спектрограмма квадратичного коэффициента когерентности между сигналами потенциала плазмы HIBP-I и HIBP-II (сверху), положение точек измерения пучков (снизу). Вертикальными серыми полосами отмечены промежутки времени с заметно большим коэффициентом когерентности (>0,4).

Литература

[1]. A. Fujisawa, A review of zonal flow experiments, Nucl. Fusion **49**, 013001 (2008).
[2]. A.V. Melnikov et al, Heavy ion beam probing diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas, Nucl. Fusion **57**, 072004 (2017).
[3]. Y.Xu et al. Long-distance correlation and zonal flow structures induced by mean E × B shear flows in the biasing H-mode at TEXTOR, Phys. Plasmas **16**, 110704 (2009).
[4]. Л.Г. Аскинази и др. Эволюция колебаний геодезической акустической моды в разряде с омическим переходом в режим хорошего удержания в токамаке ТУМАН-3М // Письма в ЖТФ т. 38 № 6 с. 29 - 36 (2012).

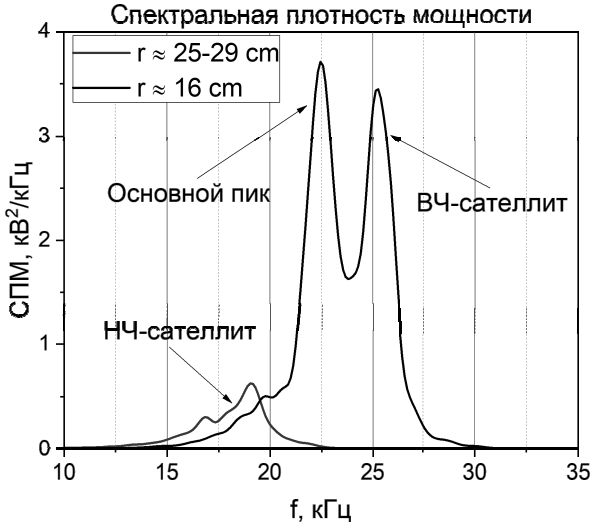
ГАМ НА ПЕРИФЕРИИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-10

[1]Крохалев О.Д., [1,2,]Мельников А.В., [3]Драбинский М.А., [3]Елисеев Л.Г., [3]Хабанов Ф.О.

[1]*Московский физико-технический институт (НИУ), Москва, Россия*
[2]*НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия*
[3]*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.041

Зональные потоки и геодезические акустические моды (ГАМ), как их высокочастотная ветвь, влияют на транспортные процессы в плазме через взаимодействие с широкополосной турбулентностью [1]. ГАМ в плазме токамака Т-10 имеет три частотных пика: низкочастотный (НЧ) сателлит, основной пик и высокочастотный (ВЧ) сателлит [2]. Каждый пик взаимодействует с индивидуальным диапазоном частот широкополосной турбулентности по трёхволновому механизму [3]. Известно, что в токамаке Т-10 на периферии ($\rho > 0{,}87$) плазменного шнура амплитуда основного пика ГАМ снижается вплоть до уровня шума [4].



В работе исследована частотная структура ГАМ на периферии ($\rho \sim 0{,}9$) плазменного шнура методами спектрального и биспектрального анализа данных диагностики пучком тяжёлых ионов [5] в режиме ($I_{pl} = 230$ кА, $B_t = 2.3$ Тл, $n_e \sim 0.6 - 0.7 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$). На рисунке 1 приведено сравнение спектров колебаний электрического потенциала, измеренных на различных радиусах.

Показано, что на периферии плазмы НЧ-сателлит ГАМ может наблюдаться отдельно от основного пика и ВЧ-сателлита.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 19-12-00312.

Литература

[1]. Fujisawa A., et al., Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas, Nucl. Fusion **47**, S718-S726 (2007).
[2]. Крохалев О.Д., Мельников А.В. Исследование частотной структуры геодезической акустической моды в плазме токамака Т-10. // Труды 63 всероссийской научной конференции МФТИ – 2020 – с. 215-217.
[3]. Крохалев О.Д, Мельников А.В. Взаимодействие ГАМ с широкополосной турбулентностью в плазме токамака Т-10 – 48 Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, сборник тезисов докладов, с. 84 (2021).
[4]. Melnikov A.V., et al., GAM and Broadband Turbulence Structure in OH and ECRH Plasmas in the T-10 Tokamak, Plasma Fusion Res. **13**, 3402109 (2018).
[5]. Melnikov A.V. et al. Heavy ion beam probing – diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas, Nucl. Fusion **57**, 072004 (2017).

ГЕНЕРАЦИЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА С ГАЗОВОЙ И ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНЯМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

[1,2]Топорков Д.А., [1,5]Бурмистров Д.А., [1]Гаврилов В.В., [1]Житлухин А.М., [1]Костюшин В.А., [1,2]Лиджигоряев С.Д., [1,4]Пушина А.В., [3,4]Пикуз С.А., [3,4]Рязанцев С.Н., [3,4]Скобелев И.Ю.

[1]ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия, e-mail: toporkov@triniti.ru
[2]НИУ Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия
[3]Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия
[4]НИУ Московский инженерно-физический институт, г. Москва, Россия
[5]НИУ Московский энергетический институт, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.042

В докладе представлены результаты исследования взаимодействия мощного потока водородной плазмы с импульсной азотной струей и вольфрамовой мишенью. Экспериментальные данные могут быть полезны как с фундаментальной точки зрения, так и при решении ряда прикладных задач (например, для разработки концепции диссипативного дивертора ИТЭР и лабораторного моделирования звездных струй, проникающих в межгалактический газ).

Плазменный поток со скоростью $(4 \div 6) \times 10^7$ см·с$^{-1}$ и энергосодержанием до 40 кДж создавался импульсным электродинамическим ускорителем МКТ (ГНЦ РФ ТРИНИТИ). Плотность ионов в потоке плазмы составляла $(2 \div 4) \times 10^{15}$ см$^{-3}$. Плазменный поток транспортировался в продольном магнитном поле с индукцией 1 ÷ 2 Тл и взаимодействовал с плоской сверхзвуковой струей азота, за которой на расстоянии 1 ÷ 3 см располагалась вольфрамовая мишень. Максимальная плотность в газовой струе достигала 10^{17} см$^{-3}$ при толщине струи ≈5 см и ширине ≈15 см.

Рентгеновские изображения области взаимодействия плазмы с газом и мишенью, а также спектры излучения примишенной плазмы в диапазоне 1 ÷ 30 нм регистрировались с помощью многокадровой МКП-камеры. Для измерения абсолютной мощности рентгеновского излучения плазмы использовались фотодиоды ФДУК-8УВС. Электронная температура плазмы определялась с пространно-временным разрешением путем сопоставления экспериментальных спектров со спектрами, полученными в результате детальных кинетических расчетов линейчатого излучения плазмы, и находилась в диапазоне 40 ÷ 50 эВ на расстояниях ≥4 мм от поверхности мишени. При этом характерные спектры вольфрама, наблюдавшиеся в отсутствии азотной струи на расстояниях от мишени до 5 ÷ 6 см, были значительно меньшей интенсивности при наличии газа перед поверхностью вольфрама уже на расстоянии ≈1 см.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках научных проектов РФФИ № 18-29-21013 и № 20-21-00153.

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ПО КОРРЕЛЯЦИОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

[1,2]Кукушкин А.Б., [1]Куличенко А.А.

[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
[2]НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.043

Одним из важнейших свойств стохастических нелинейных процессов, включая турбулентность гидродинамического движения непрерывных сред, являются далекие пространственные корреляции. Для их описания был предложен подход [1], основанный на линейном интегро-дифференциальном уравнении с медленно спадающим ядром, что соответствует супердиффузионному (нелокальному) переносу в режиме «прогулок Леви» (т.е. полетов Леви с учетом конечной скорости переносчиков). Полученные законы подобия позволили на качественном уровне установить связь с законом Ричардсона $r \sim t^{3/2}$ для пространственно-временной корреляционной функции гидродинамической турбулентности и законом Колмогорова для однородной изотропной турбулентности.

Здесь сформулирован близкий подход, основанный на применении концепции прогулок Леви к описанию нелокальных свойств флуктуаций плотности турбулентной среды. Такой подход позволяет сформулировать задачу определения этих свойств по спектрам рассеяния электромагнитных (ЭМ) волн и кросс-корреляционной рефлектометрии. Предложена система уравнений для флуктуаций плотности, сводящаяся в частных случаях к интегральному уравнению для парной корреляционной функции флуктуаций плотности плазмы. Это уравнение выражается через функционал Холстейна, характерный для широкого круга процессов нелокального переноса, включая перенос резонансного излучения в плазме и газах в модели Бибермана-Холстейна (см, напр., [2, 3]). Получено универсальное описание связи наблюдаемой квази-когерентной компоненты в спектре рассеянных ЭМ волн в плазме с процессом типа рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Показано, что нелокальность пространственных корреляций в турбулентной среде, соответствующая отклонению парной корреляционной функции флуктуаций плотности плазмы от гауссовской, обусловлена длиннопробежными переносчиками флуктуаций плотности среды, для которых функция распределения по длине свободного пробега описывается распределением Леви.

Эффективность предлагаемого метода показана на примере интерпретации данных кросс-корреляционной рефлектометрии ЭМ волн радиочастотного диапазона для диагностики турбулентной плазмы в установках магнитного удержания термоядерной плазмы, включая данные экспериментов на токамаке Т-10 [4,5]. Использована степенная модель функции Холстейна и соответствующие решения уравнения переноса для прогулок Леви [6-8].

Литература

[1]. M.F. Shlesinger, B.J. West, J. Klafter, Phys. Rev. Lett. **58**, 11 (1987).
[2]. Л.М. Биберман, В.С. Воробьев, И.Т. Якубов, Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы, М: Наука, 1982.
[3]. В.А. Абрамов, В.И. Коган, В.С. Лисица, Перенос излучения в плазме, в сб. Вопросы теории плазмы (М: Энергоатомиздат, 1982), вып. 12, с. 114.
[4]. V.A. Vershkov, D.V. Sarychev, G.E. Notkin, *et al.,* Nucl. Fusion **57** 102017 (2017).
[5]. A.O. Urazbaev, V.A. Vershkov, S.V. Soldatov, *et al.,* Plasma Phys. Rep. **32**, 443–460 (2006).
[6]. А.А. Куличенко, А.Б. Кукушкин, 2020 ЖЭТФ, т. 157, с. 1036–1050.
[7]. А.Б. Кукушкин, А.А. Куличенко, А.В. Соколов, 2021 ЖЭТФ, т. 159, с. 978–996.
[8]. A.B. Kukushkin, A.A. Kulichenko, V.S. Neverov, P.A. Sdvizhenskii; A.V. Sokolov, V.V. Voloshinov, Symmetry **13**, 394 (2021).

ПРИНЦИПЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОДОБИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА

[1,2]Кукушкин А.Б., [1]Сдвиженский П.А., [1]Неверов В.С.

[1]*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*
[2]*НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия* DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.044

Явление самоорганизации плазмы в токамаках, заключающееся в стремлении плазмы сохранить форму пространственных профилей плотности, температуры при внешних воздействиях (включении и выключении сильного дополнительного нагрева плазмы в процессе разряда) ведет свою историю от работы Б. Коппи [1], где высказана идея об универсальных, «канонических» распределениях параметров плазмы как функциях нормированного малого радиуса плазменного шнура («profile consistency»). Эта идея получила подтверждение в последующем анализе экспериментальных данных с различных установок. Так, детальное сравнение экспериментальных профилей с разных установок с круглым сечением плазмы, подтвердившее идеи [1], было проведено в [2] (см. также последующие работы [3, 4]). В литературе приведен ряд решений задачи о МГД-равновесии при конечном градиенте давления для случая гладкого профиля давления и электрического тока плазмы, т.е. для плазмы без внутренних транспортных барьеров. В случае токамака обоснование феномена «самосогласованности профиля» [1] независимо дано в [5 – 7]. Современное состояние подхода, основанного на развитии идей [1, 5 6] с учетом экспериментальных данных с различных установок, представлено в монографии [8]. Однако задача массового статистического анализа экспериментальных данных отнюдь не исчерпана, и ее дополнение и расширение представляет, на наш взгляд, интерес для дальнейшего развития теоретических подходов, использующих в своей аксиоматике концепцию самоорганизации плазмы.

Здесь сформулированы основные принципы статистического анализа пространственных профилей параметров плазмы f (температуры, плотности, давления и др.) на стадии квазистационарного плазменного тока (т.н. стадия flat-top). Для всех указанных параметров можно найти универсальные профили $\bar{G}_f(\rho, \rho_{\max}, k)$ (ρ – нормированный малый радиус плазменного шнура, являющийся меткой магнитной поверхности и определяемый относительно полоидального или тороидального магнитного потока, k – номер разряда), получаемых делением профиля на его значение в центре плазменного шнура ($\rho_{\max} = 0$) или на среднее значение этого параметра в области $\rho \le \rho_{\max} = 0.5—1$ и последующим усреднением по времени t на flat-top стадии каждого разряда. При усреднении по t всех разрядов получаются профили $\bar{\bar{G}}_f(\rho, \rho_{\max})$. Для каждого разряда можно найти относительное среднеквадратичное (по $\rho \le \rho_{\max}$ или t) отклонение σ нормированного профиля от $\bar{G}_f(\rho, \rho_{\max}, k)$, а для всей совокупности разрядов найти среднеквадратичное (по t) отклонение от $\bar{\bar{G}}_f(\rho, \rho_{\max})$. Можно исследовать влияние включения допнагрева на автомодельность профиля. Обсуждается применимость такой программы к существующим базам данных.

Литература

[1]. Coppi B., Comments Plasma Phys. Control. Fusion **5** (6), 261-270 (1980).
[2]. Esiptchuk Yu.V., Razumova K.A. Plasma Phys. Control. Fusion **28**, 1253 (1986).
[3]. Dnestrovskij Yu.N., *et al*., Plasma Phys. Rep. **31**, 529 (2005).
[4]. Razumova K.A., *et al*., Plasma Phys. Control. Fusion **50**, 105004 (2008).
[5]. Kadomtsev B.B. Sov. J. Plasma Phys. **13**, 443 (1987).
[6]. Biskamp D., Comments Plasma Phys. Control. Fusion **10**, 165 (1986).
[7]. Hsu J.Y., Chu M.S. Phys. Fluids **30**, 1221 (1987).
[8]. Dnestrovskij Yu.N. *Self-Organization of Hot Plasmas. The Canonical Profile Transport Model.* Springer, 2015.

МЕТОД БЫСТРОЙ ОЦЕНКИ ПОТОКА СМЕСИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА СО СТЕНКИ В ПЛАЗМУ ТОКАМАКА ПО Н-АЛЬФА СПЕКТРОСКОПИИ

[1,2]Кукушкин А.Б., [1,2]Хуснутдинов Р.И.

[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Kukushkin_AB@nrcki.ru
[2]НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.045

В [1] была предложена модификация известного метода SXB, используемого для оценки потока атомов/ионов с первой стенки токамака в плазму с использованием наблюдаемой интенсивности спектральной линии Н-альфа, интегральной по длине волны. Метод позволяет заменить уравнение, соответствующее методу DXB для молекулярных спектров, на другое уравнение, использующее соотношение между асимметрией контура линии спектральной интенсивности и плотностью потока атомов. В методе используются пространственные профили плотности атомарного и молекулярного потоков, смоделированные с помощью модифицированной баллистической модели [2]. Метод [1] позволил, используя данные спектроскопии высокого разрешения, оценивать – в режиме реального времени – потоки атомарного и молекулярного водорода с первой стенки основной камеры токамака в плазму без измерения молекулярных спектров. Модифицированный метод SXB был протестирован сравнением результатов с кодом SOLPS для расчетных шести типов профилей параметров плазмы в пристеночной плазме ИТЭР. Актуальность предложенной модификации обусловлена тем, что молекулярные спектры водорода не будут использоваться для диагностики работы ИТЭР из-за трудностей их интерпретации. Метод [1] позволяет найти потоки атомов и молекул одного сорта изотопов водорода вблизи стенки только по порядку величины в некотором диапазоне режимов работы ИТЭР (невысокий фон от рассеянного диверторного света, преобладание вклада одного участка СОЛ на хорде наблюдения в основной камере).

В настоящей работе метод [1] обобщен на случай смеси изотопов водорода. В результате удалось получить систему уравнений, которые учитывают интенсивность излучения, интегральную по длине волны, и асимметрию спектрального контура линии и имеют такие неизвестные: т.н. конверсионные плотности потока атомов каждого сорта (т.е. атомов, образованных путем рекомбинации уходящих из плазмы ионов без превращения образованных атомов в молекулы на стенке с температурой стенки) и плотности потока разных сортов молекул со стенки (напр., молекул DT).

Связь асимметрии спектральных линий с плотностью потока атомов может быть добавлена в набор уравнений, решаемых в многопараметрических обратных задачах [3 – 5], которые в режиме реального времени пока не решаются.

Авторы благодарны В.С. Неверову за расчеты по модифицированной баллистической модели [6].

Литература

[1]. Khusnutdinov R.I., Kukushkin A.B., *Phys. At. Nucl.* **82**, 1392 (2019).
[2]. Kadomtsev M.B., Kotov V., Lisitsa V.S., Shurygin V.A. 2012 *Proc. 39th EPS Conf. 16th Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2–6 July 2012)*, P. 4.093.
[3]. Kukushkin A.B., Neverov V.S., Alekseev A.G., Lisgo S.W., Kukushkin A.S., *Fusion Sci. Technol.* **69**, 628 (2016).
[4]. Neverov V.S., Kukushkin A.B., Stamp M.F., Alekseev A.G., Von Hellermann M. and JET Contributors, *Nucl. Fusion* **57**, 016031 (2017).
[5]. Neverov V.S., Kukushkin A.B., Kruezi U., Stamp M.F., Weisen H. and JET Contributors, *Nucl. Fusion* **59**, 046011 (2019).
[6]. Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Lisitsa V.S., Neverov V.S., Pshenov A.A., Shurygin V.A., *Plasma Phys. Control. Fusion* **63**, 035025 (2021).

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛАЗМЫ В ВИНТОВОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

[1]Толкачев М.С., [1]Инжеваткина А.А., [2]Ларичкин М.В., [2]Ломов К.А., [1]Судников А.В., [2]Устюжанин В.О., [1]Черноштанов И.С.

[1]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, email: M.S.Tolkachev@inp.nsk.su
[2]Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.046

Для достижения открытыми ловушками параметров удержания, необходимых для термоядерных применений, требуются новые методы подавления потока плазмы, направленного вдоль силовых линий магнитного поля. В ИЯФ СО РАН был предложен [1] и проходит экспериментальную проверку на установке СМОЛА [2] метод винтового удержания, заключающийся в создании динамической многопробочной системы путем помещения вращающейся плазмы в гелекоидальное магнитное поле. В результате запертые частицы, двигаясь вместе с максимумами поля, создают обратный поток в направлении зоны удержания. Полученные на установке результаты согласуются [3] с теоретическими оценками.

Для эффективного удержания в многопробочной ловушке необходимо, чтобы длина свободного пробега частиц была приблизительно равна длине одной ячейки. Однако при учете только кулоновских столкновений и высоких температурах, характерных для термоядерных применений, это условие не выполняется на практике. Возникновение аномальной столкновительности в этом случае может способствовать улучшению удержания. Так, в экспериментах на установке ГОЛ-3 баунс-колебания привели к увеличению энергетического времени жизни плазмы [4]. На установке СМОЛА развитие неустойчивостей может вызывать наличие потока запертых частиц.

В докладе будут представлены результаты изучения длинноволновых колебаний в плазме, полученные в последних экспериментальных сериях. В результате обработки данных экспериментальной серии, проводившейся при различных напряженностях магнитного поля и плотностях плазмы, при помощи метода главных компонент было обнаружено скоррелированное на всей длине установки колебание, характерное для режима удержания. В диапазоне полей 40 70 мТл частота колебаний лежит в пределах 20 – 50 кГц, линейно завися от параметра $B/\sqrt{\rho}$, пропорционального альфеновской скорости. Также были установлено условие на соотношение напряженности поля и степени гофрировки, необходимое для наблюдения данного колебания. Обсуждается вопрос связи данных колебаний с аномальной столкновительностью.

Литература

[1]. Beklemishev A.D., Helicoidal system for axial plasma pumping in linear traps, Fusion Sci. Technol. **63** (1T), 355–357 (2013).
[2]. Sudnikov A.V. et al., SMOLA device for helical mirror concept exploration, Fusion Eng. Des. **122**, 86-93 (2017).
[3]. Sudnikov A.V. et al., Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness, J. Plasma Phys. **86**, 905860515 (2020).
[4]. Koidan V.S. et al., Progress on the multimirror trap GOL-3, Fusion Sci. Technol. **47**, 35-42 (2005).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ELM НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДОППЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

[1]Пономаренко А.М., [2]Гусев В.К., [2]Жильцов Н.С., [2]Киселев Е.О., [2]Курскиев Г.С., [2]Минаев В.Б, [1]Петров А.В., [2]Петров Ю.В., [2]Сахаров Н.В., [2]Щеголев П.Б., [1,2]Яшин А.Ю.

[1]СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: annap2000dreeonn@gmail.com
[2]ФТИ им. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.047

Переход в режим улучшенного удержания в токамаках сопровождается развитием краевых неустойчивостей (ELMs) [1], которые ограничивают величину давления плазмы на пьедестале. Возникновение ELMs сопровождается существенным увеличением потока частиц из области удержания на обращённые к плазме элементы конструкции токамака, что может приводить к их повреждению. Поэтому изучение их свойств и характеристик является важной задачей для будущего развития управляемого термоядерного синтеза.

На сферическом токамаке Глобус-М было обнаружено, что большие пилообразные колебания в режиме улучшенного удержания сопровождаются возникновением ELMs [2]. В работе [3] был предложен механизм, описывающий инициирование ELMs избыточной продольной плотностью тока, возникающей при срыве пилообразных колебаний и переводящей пилинг-баллонную неустойчивость в нестабильное состояние. Связь наблюдающихся на токамаке Глобус-М ELMs с пилинг-баллонной неустойчивостью была экспериментально показана методом допплеровского обратного рассеяния (ДОР), с помощью которого было определено, что краевые неустойчивости представляли из себя серию вытянутых вдоль магнитных линий филаментов, расположенных на периферии разряда, имеющих тороидальное модовое число порядка 10 и распространяющихся в полоидальном направлении [4].

Исследование инициированных пилообразными колебаниями ELMs было выполнено в экспериментах с переходом в режим улучшенного удержания с использованием метода ДОР на новом токамаке Глобус-М2 с увеличенными значениями магнитного поля и плазменного тока. Благодаря новой и улучшенной многочастотной системе ДОР, получилось более детально изучить свойства ELMs. Определена радиальная локализация ELMs, исследована динамика их развития. Одновременное использование восьми частот зондирования позволило определить характерные скорости радиального распространения ELMs. Проведено сравнение параметров ELM-филаментов с старом (Глобус-М) и новом (Глобус-М2) токамаках.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект №18-72-10028. Эксперименты проведены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Литература

[1]. Zohm H., Plasma Phys. Control. Fusion **38**, 105–128 (1996).
[2]. Yashin A.Y., et al., Plasma Phys. Rep. **46**, 683–688 (2020).
[3]. Bulanin V.V., et al., Plasma Phys. Control. Fusion **63**, 122001 (2021).
[4]. Bulanin V.V., et al., Nucl. Fusion **59**, 096026 (2019).

ФИЗИЧЕСКИЙ ЗАПУСК МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКИ ГОЛ-NB

Поступаев В.В., Баткин В.И., Бурдаков А.В., Бурмасов В.С., Иванов И.А., Куклин К.Н., Лыкова Ю.А., Мельников Н.А., Меклер К.И., Никишин А.В., Полосаткин С.В., Ровенских А.Ф., Сидоров Е.Н., Скляров В.Ф., Сковородин Д.И.

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: V.V.Postupaev@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.048

Решение задачи получения плазмы с реакторными параметрами в открытой ловушке требует разработки физики и технологии существенного подавления потерь частиц и энергии вдоль магнитного поля на торцы установки. Одним из возможных способов достижения данной цели является использование специализированных многопробочных секций магнитной системы, имеющих периодическую модуляцию магнитной индукции вдоль оси [1,2]. При достаточно высокой столкновительности $\nu^* \sim 1$ (где $\nu^* = \lambda/l$ – отношение длины свободного пробега ионов к периоду гофрировки) в такой системе возникает сила трения между популяциями локально-запертых и пролётных частиц, уменьшающая потери из ловушки. Теория многопробочного удержания разработана достаточно хорошо, однако существует необходимость экспериментальной верификации данной схемы удержания [3].

Установка ГОЛ-NB [4] была предложена как элемент физической программы создания открытой ловушки следующего поколения ГДМЛ [5]. Магнитная система ловушки с полной длиной около 10 м включает центральную ловушку газодинамического типа длиной 2,5 м с полем в центре B(z=0) = 0,3 Тл; прилегающие секции сильного поля с Bmax = 4,5 Тл, которые могут включаться либо в соленоидальном режиме, либо как многопробочные системы с 13 периодами гофрировки с l = 22 см и её глубиной Rmm = 1,4; а также баки расширителей магнитного потока, содержащие торцевые плазмоприёмники. Низкотемпературная стартовая плазма с $n \sim (1 – 10)\times10^{19}$ м$^{-3}$ и $T \approx 5$ эВ создаётся при помощи дугового источника, расположенного в одном из торцевых баков. Нагрев плазмы в центральной ловушке должен осуществляться при помощи нейтральной инжекции (два инжектора по 25 кэВ, 0,75 МВт). Длительность существования плазмы 3 – 5 мс определяется энергетикой питания магнитной системы. ГОЛ-NB использует часть инфраструктуры и катушек сильного поля от установки ГОЛ-3. Установка сконструирована так, что основным является канал потерь вдоль магнитного поля. Расчёты энергобаланса предсказывают рост давления плазмы в ловушке в несколько раз при переходе от соленоидальной к многопробочной конфигурации секций сильного поля, демонстрация этого и является основной научной задачей ГОЛ-NB.

Модульная конструкция магнитной системы ГОЛ-NB позволила начать физические эксперименты в неполной конфигурации без центральной ловушки. На этом этапе отрабатывалась технология транспортировки сильностолкновительного потока холодной плазмы через секции сильного поля. Впервые было экспериментально продемонстрировано [6], что при $\nu^* << 1$ гофрировка магнитного поля не оказывает влияния на течение плазмы, как и предсказывалось теорией. В начале 2020 г. установка была собрана в полной конфигурации. В докладе будут обсуждаться параметры стартовой плазмы в центральной ловушке, методы её стабилизации и первые результаты по инжекции нейтральных пучков в соленоидальной конфигурации.

Литература

[1]. Будкер Г.И., Мирнов В.В., Рютов Д.Д., Письма в ЖЭТФ **14**, 320 (1971).
[2]. Logan B.G., et al., Phys. Rev. Lett. **28**, 144 (1972).
[3]. Бурдаков А.В., Поступаев В.В., УФН **188**, 651 (2018).
[4]. Postupaev V.V., et al., Nucl. Fusion **57**, 036012 (2017).
[5]. Bagryansky P.A., Beklemishev A.D., Postupaev V.V., J. Fusion Energy **38**, 162 (2019).
[6]. Postupaev V.V., et al., Plasma Phys. Control. Fusion **62**, 025008 (2020).

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫХ ПОТЕРЬ В ТОКАМАКАХ С СИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ (ТРТ, ИГНИТОР И ДР.)

[1]Минашин П.В., [1,2]Кукушкин А.Б.

[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Minashin_PV@nrcki.ru
[2]НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.049

Прогресс в разработке коммерческого термоядерного реактора на основе тороидальных магнитных ловушек связан с необходимостью увеличения размеров установок и напряженности удерживающего магнитного поля [1]. Это необходимо для достижения условий зажигания плазмы, когда потери энергии из плазмы за счет переноса тепла компенсируется энергией, выделяемой альфа-частицами при термоядерной реакции. Создание таких условий, согласно критерию Лоусона, требует того, чтобы тройное произведение плотности плазмы, энергетического времени жизни плазмы и ее температуры было больше некоторого порогового значения для того, чтобы частота реакций термоядерного синтеза обеспечивала условие возникновения самоподдерживающейся термоядерной реакции в высокотемпературной плазме. Преодоление этого порогового значения возможно при увеличении размеров установки, величины магнитного поля и температуры плазмы. Вместе с тем с ростом электронной температуры и величины удерживающего магнитного поля резко возрастают потери на электронное циклотронное (ЭЦ) излучение.

Для строящегося токамака ИТЭР увеличение (по сравнению с действующими установками) большого радиуса тора, величины магнитного поля на оси тора и температуры плазмы в т.н. стационарных сценариях работы приводит к тому, что, как ожидается, в локальном электронном энергобалансе плазмы возрастает роль потерь на ЭЦ-излучение [2, 3]. Достижение условий зажигания плазмы в относительно компактных токамаках возможно только при существенном увеличении напряженности магнитного поля (2 - 4 раза больше магнитного поля в современных установках и в ИТЭР). Эта идея лежит в основе таких токамаков как ALCATOR и проект ИГНИТОР [4], а также будет реализована в Токамаке с Реакторными Технологиями (ТРТ) [5, 6]. Существенное увеличение напряженности магнитного поля в этих установках требует детального анализа влияния этого эффекта на выбор рабочих режимов работы этих установок.

Проведён сравнительный анализ роли энергетических потерь на ЭЦ-излучение в токамаках с сильным магнитным полем ТРТ, ИГНИТОР и других проектах. Показано, что несмотря на сильное магнитное поле потери на ЭЦ-излучение в токамаках ИГНИТОР и ТРТ не сильно влияют на локальный электронный энергобаланс и не создают препятствий для поддержания термоядерного горения.

Литература

[1]. Zohm H., Philos. Trans. R. Soc., A **377**, 20170437 (2019).
[2]. Albajar F., Bornatici M., Cortes G., Dies J., et al., Nucl. Fusion **45**, 642-648 (2005).
[3]. Kukushkin A.B., Minashin P.V., Polevoi A.R., Plasma Phys. Rep. **38**, 211-220 (2012).
[4]. Coppi B., Airoldi A., Bombarda F., Genacchi G., et al., Nucl. Fusion **41**, 1253-1257 (2001).
[5]. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В. и др., Физика плазмы **47**, 970-985 (2021).
[6]. Леонов В.М., Коновалов С.В., Жоголев В.Е., Кавин А.А. и др., Физика плазмы **47**, 986–997 (2021).

ПРОЕКТ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ НА УСТАНОВКАХ ГДЛ И КОТ

Горенков И.А., Приходько В.В., Мурахтин С.В., Багрянский П.А., Савкин В.Я.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: i.gorenkov@g.nsu.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.050

В рамках исследования магнитного удержания плазмы работа в Институте ядерной физики ведётся в нескольких независимых направлениях: помимо значительных успехов в достижении высоких параметров плазмы на установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ) [1], ведутся эксперименты по изучению обращения магнитного поля на новой установке Компактный осесимметричный тороид (КОТ) [2].

Установка ГДЛ – линейная магнитная ловушка с высоким пробочным отношением. Ионы плазмы в ней делятся на холодную компоненту с температурой ~100 эВ и горячую (~20 кэВ) анизотропную компоненту, которую генерируют 8 атомарных инжекторов (625 кВт, 5 мс), расположенных под углом 45° к продольной оси.

Установка КОТ – осесимметричная магнитная ловушка, обращение магнитного поля которой будет достигнуто за счёт накопления азимутального тока горячих ионов (~15 кэВ): два сфокусированных атомарных инжектора (2 МВт, 5 мс) направлены перпендикулярно магнитной оси с прицельным параметром 10 см [3].

В данной работе представлены разработанные диагностические приборы на основе анализа нейтралов перезарядки для определения параметров горячей компоненты на перечисленных установках: 45-градусный электростатический анализатор с угловым разрешением для определения радиального распределения плотности плазмы на установке ГДЛ и 45-градусный электростатический анализатор с энергетическим разрешением для установки КОТ. Представлены первые результаты, полученные в ходе эксперимента на установке ГДЛ.

Литература

[1]. Bagryansky P.A., Gospodchikov E.D., Lizunov A.A., Maximov V.V., Prikhodko V.V., Shalashov A. G., and Yakovlev D.V., Achievement of a record electron temperature for a magnetic mirror device, arXiv preprint arXiv:1411.6288, (2014).

[2]. Bagryansky P.A., Akhmetov T.D., Chernoshtanov I.S., Deichuli P.P., Ivanov A.A., Lizunov A.A., and Oreshonok V.V., Status of the experiment on magnetic field reversal at BINP, AIP Conf. Proc. **1771**, 030015 (2016).

[3]. Davydenko V.I., Deichuli P.P., Ivanov A.A., and Murakhtin S.V., Neutral beam injection system for the CAT experiment. Plasma Fusion Res. **14**, 2402024 (2019).

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА "МИФИСТ" НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОДИННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

[1]Белов А.С., [1]Губский К.Л., [1]Крат С.А., [1]Алиева А.И., [1]Ефимов Н.Е.,
[1]Пришвицын А.С., [1]Кузнецов А.П.

[1]Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.051

Электронная плотность является одним из основных параметров, использующихся для контроля режимов работы токамаков. Внесение зондов в долгоживущую высокотемпературную плазму не представляется возможным, поэтому для измерения электронной плотности используются дистанционные оптические методы. Для измерения электронной плотности плазмы на малом сферическом токамаке «МИФИСТ-0» разработан гетеродинный интерферометр на длине волны 10,6 мкм.

После запуска в рабочем режиме, в токамаке «МИФИСТ-0» ожидаются следующие параметры плазмы: электронная плотность $10^{12} \div 10^{14}$ см$^{-3}$, время жизни плазмы до 30 мс [1].

Геометрия токамака позволяет реализовать режим работы интерферометра на просвет, при этом, длина диагностической хорды составляет ~45 см. Это означает, что при длине волны излучения 10,6 мкм фазовый сдвиг, вносимый плазмой плотностью 10^{13} см$^{-3}$, составляет ~0,12 радиан. Частотное смещение в интерферометре обеспечивается акустооптическим модулятором, сдвигающим излучение на частоту 40 МГц. Сигнал регистрируется CdHgTe фотодиодом, работающим при криогенных температурах. Интерферометр смонтирован на раме из немагнитных материалов и виброразвязан от несущих конструкций токамака.

Проведены испытания гетеродинного интерферометра на токамаке «МИФИСТ-0» при различных режимах установки: в состоянии покоя; с запуском всех удерживающих катушек, но без напуска рабочего газа, что препятствует образованию плазмы; при штатной работе установки. Испытания показали, что интерферометр не чувствителен к электромагнитным паводкам при работе токамака. По результатам первых экспериментов, максимально измеренная плотность плазмы составляет $7{,}9 \times 10^{13}$ см$^{-2}$, что соответствует объемной плотности плазмы 3×10^{12} см$^{-3}$ в предположении параболического профиля распределения плотности плазмы вдоль диагностической хорды. Максимальная погрешность измерения составляет $1{,}3 \times 10^{13}$ см$^{-2}$ и обусловлена главным образом шумами фотоприема и фликкер-шумом задающего генератора.

Литература

[1]. Gornostaeva O. et al. Two-color CO2/HeNe laser interferometer for C-2 experiment, Rev. Sci. Instrum. **81**, 10D516 (2010).

[2]. Kurnaev V.A., et al., The Project of MEPhIST Tokamak, Phys. At. Nucl. **82**, 1329–1331 (2019).

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МИШЕННОЙ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА УСТАНОВКЕ КОТ

Колесниченко К.С., Воскобойников Р.В, Иванов Р.С., Коробейникова О.А., Мурахтин С.В., Савкин В.Я.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: k.kolesnichenko@g.nsu.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.052

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН введена в строй новая установка КОТ (Компактный Осесимметричный Тороид), которая представляет собой аксиально-симметричный пробкотрон с мощной атомарной инжекцией. Цель планируемого эксперимента на этой установке состоит в создании и исследовании удержания популяции горячих ионов с предельно высоким относительным давлением $\beta \to 1$. Рассматривается также возможность перехода к конфигурации с обращенным магнитным полем. Предполагается, что атомарные пучки водорода или дейтерия с энергией частиц 15 кэВ и суммарной мощностью более 2 МВт будут инжектироваться в предварительно созданную в пробкотроне мишенную плазму. Согласно результатам ранее проведенных расчетов [1], для эффективного накопления горячих ионов, образующихся в результате захвата атомарных пучков, необходимо, чтобы электронная температура мишенной плазмы находилась в диапазоне нескольких десятков электрон-вольт, а линейная плотность была достаточной для эффективного захвата пучков. Для генерации мишенной плазмы с требуемыми параметрами используется методика, разработанная в свое время для инжекции плазмы в амбиполярную ловушку [2]. Суть методики заключается в использовании источника плазмы дугового типа, который имеет разрядный канал с кольцевой конфигурацией и работает в магнитном поле. Возникающее за счет $E \times B$-дрейфа дифференциальное вращение плазмы приводит к развитию неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, что в свою очередь вызывает нагрев ионов генерируемой плазменной струи до 200 - 300 эВ. За счет кулоновских столкновений ионы передают энергию электронам плазмы. Для подавления электронной теплопроводности между пробкотроном и генератором плазмы с помощью специальной магнитной катушки формируется термобарьер.

В докладе будут представлены результаты детальных исследований параметров генерируемой таким способом мишенной плазмы и описаны результаты поиска оптимального для захвата и удержания горячих ионов соотношения между ее линейной плотностью и электронной температурой.

Литература

[1]. Yu.A. Tsidulko, I.S. Chernoshtanov, AIP Conf. Proc. **1771**, 040005 (2016), doi: 10.1063/1.4964190/

[2]. А.А. Кабанцев, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Неустойчивости струи мишенной плазмы», Новосибирск, 1991 г.

ТЕЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ С ВИНТОВЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Судников А.В., Иванов И.А., Инжеваткина А.А., [1]Ларичкин М.В., [1]Ломов К.А., Поступаев В.В., Толкачёв М.С., [1]Устюжанин В.О.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия
e-mail: A.V.Sudnikov@inp.nsk.su
[1]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.053

В настоящее время исследования в области открытых ловушек получили новый импульс развития. На различных этапах создания находится ряд новых экспериментальных установок, основанных на схеме газодинамической ловушки с дополнительными методами улучшенного удержания. Существенный интерес для исследований в области открытых ловушек представляет снижение продольных потерь частиц и энергии. Одним из новых методов подавления продольных потерь является динамическое многопробочное удержание вращающейся плазмы в магнитном поле с геликоидальной симметрией [1]. Теоретически предсказана экспоненциальная зависимость эффективности подавления потерь от длины участка с винтовым полем, приводящая к существенному повышению эффективного пробочного отношения в открытой ловушке [2].

Проверка данной концепции проводится на установке СМОЛА в ИЯФ СО РАН. Детальное описание установки приведено в [3]. Ранее была показана принципиальная возможность подавления потока плазмы винтовой магнитной пробкой и соответствие экспериментальных скейлингов теоретическим оценкам при ведущем магнитном поле $B_{max} \approx 0.7$ Т в области малой глубины гофрировки ($R_{mean} < 1.5$) и низкой скорости вращения плазмы [4]. При высокой скорости вращения и глубине гофрировки до $R_{mean} = 1.7$ показано существенное улучшение удержания, проявляющееся в 1,6-кратном повышении плотности плазмы в области удержания [5]. Эффективное пробочное отношение секции с винтовой гофрировкой превышало $R_{eff} > 10$. В эксперименте наблюдалось формирование обратного потока ионов в приосевой области плазмы в винтовом магнитном поле. При сильной гофрировке направление потока вблизи оси и на периферии было различным. Указанные эффекты были обнаружены как при плотности, соответствующей длине свободного пробега ионов $\lambda \sim h$, так и при существенном росте длины свободного пробега ионов относительно кулоновских столкновений. Наличие эффекта винтового удержания при низкой плотности плазмы может отвечать возникновению аномальной столкновительности, вызванной двухпотоковой неустойчивостью.

В докладе приведены последние результаты экспериментов по изучению течения плазмы в винтовом магнитном поле, в том числе при низкой плотности и высокой скорости вращения.

Литература

[1]. A.D. Beklemishev, Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps, Fusion Sci. Technol. **63**, 355 (2013).
[2]. A.D. Beklemishev, Radial and axial transport in trap sections with helical corrugation, AIP Conf. Proc. **1771**, 040006 (2016), doi: 10.1063/1.4964191.
[3]. A.V. Sudnikov et al., SMOLA device for helical mirror concept exploration, Fusion Eng. Des. **122C**, 86-93 (2017), doi: 10.1016/j.fusengdes.2017.09.005.
[4]. A.V. Sudnikov et al., Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness, J. Plasma Phys. **86** (5), 905860515 (2020).
[5]. A.V. Sudnikov et al., Plasma flow suppression by the linear helical mirror system, J. Plasma Phys., in press.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕКЦИИ КАПЕЛЬ ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ НА ТОКАМАКЕ Т-11М

Джурик А.С., Васина Я.А., Лазарев В.Б., Лешов Н.В., Мирнов С.В., Пришвицын А.С.

АО "ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", г. Москва, округ Троицк, Россия, e-mail: adzhurik@triniti.ru,

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.054

Разработка защиты первой стенки токамака-реактора от разрушительного воздействия высокотемпературной плазмы - важнейшая задача. Одним из перспективных подходов к решению этой сложной проблемы является создание возобновляемого защитного покрытия для внутрикамерных элементов токамака на основе жидкого металла (лития).

В работе представлены первые результаты, полученные в результате инжекции капель лития с помощью ультразвукового инжектора, являющегося управляемым эмиттером лития в пристеночную и периферийную область плазмы (SOL).

Цель работы заключается в определении основных параметров ультразвукового инжектора лития в условиях работы действующего токамака, а именно определение скоростей инжекции лития, производительность инжектора в условиях токамака (магнитных полей ~1 Тл) и других особенности работы условиях токамака.

Исследования процесса инжекции проводились с помощью скоростной видеокамеры Baumer HXG 20C. Съемка проводилась как без светового фильтра, так и с использованием фильтров: LiI (671 нм) и LiII (549 нм) [1].

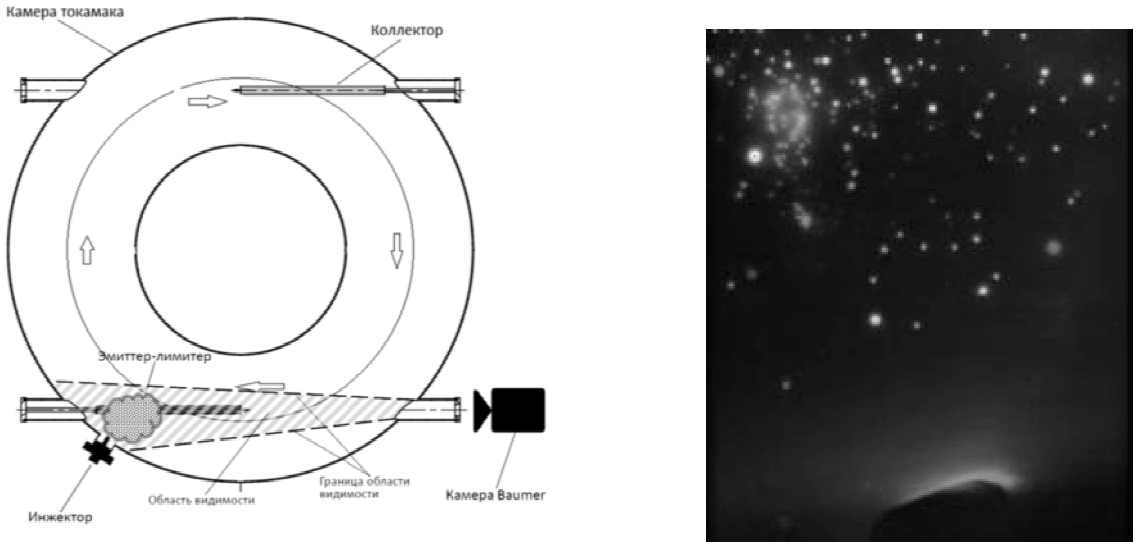


Рис 1. Схема расположения инжектора лития, видеокамеры и внутрикамерных элементов на токамаке Т-11М и изображение инжекции лития в начальной стадии разряда

Литература

[1]. Джурик А.С., Лазарев В.Б., Пришвицын А.С., Махов Н.С. Материалы XLV международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. г. Звенигород, 2018 г.

ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В РЕЖИМЕ УДЕРЖАНИЯ И УСКОРЕНИЯ В ВИНТОВОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

[1]Инжеваткина А.А., [1]Судников А.В., [1]Иванов И.А., [2]Устюжанин В.О.

[1]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: anna.inzhevatkina@gmail.com

[2]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.055

На открытой ловушке СМОЛА в ИЯФ СО РАН ведутся исследования физики подавления продольных потерь плазмы из системы, в которой вращающаяся плазма удерживается в магнитном поле с винтовой симметрией. Плазма вращается из-за E×B дрейфа, и во вращающейся системе отсчета плазмы продольная скорость магнитных пробок равна сопоставима с продольной скоростью течения плазмы. Направление скорости движения зависит от направлений электрического и магнитного полей. В режиме улучшенного удержания скорость плазменного потока направлена по градиенту плотности плазмы, в режиме ускорения – против.

Измерение радиального распределение угловой скорости вращения плазмы по всей длине установки осуществляется путем определения доплеровского сдвига собственного излучения плазмы с помощью спектрометров с высоким пространственным разрешением на базе монохроматоров МДР-12 и МДР-23 [1].

Для измерения продольной скорости движения плазмы в транспортной секции использовался плоский зонд Маха. Данная диагностика позволяет регистрировать ток ионного насыщения в диапазоне плотностей плазмы от $0{,}8\cdot10^{2}$ см$^{-3}$ до $5\cdot10^{12}$ см$^{-3}$ при электронной температуре ~ 30 эВ. Плоская форма зонда позволяет одновременно регистрировать поток ионов, летящих по направлению градиента плотности плазмы, и поток ионов, летящих в противоположном направлении.

Полученные ранее результаты уже демонстрируют улучшенное удержание в винтовой открытой ловушке [2]. Важным эффектом является рост плотности потока ионов, движущихся в транспортной секции в направлении, противоположном направлению потока плазмы, что согласуется с моделью радиального переноса частиц в винтовом магнитном поле [3].

В докладе будут представлены экспериментально полученные зависимости азимутальной и продольной скоростей от плотности, температуры плазмы и величины магнитного поля в режиме удержания и укореняя плазменного потока.

Литература

[1]. A.V. Sudnikov et al. Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness // J. Plasma Phys. **86**, 905860515, (2020). DOI:10.1017/S0022377820001245

[2]. А.А. Инжеваткина и др., Исследование вращения плазмы в открытой винтовой ловушке СМОЛА // Физика плазмы, Т. 47. № 8. С. 706-715 (2021). DOI:10.31857/S0367292121080059

[3]. Beklemishev A.D., AIP Conf. Proc. **1771**, 040006 (2016). DOI: 10.1063/1.4964191

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЖНЕГИБРИДНОГО ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДИНАМИЧЕСКОГО КОДА FRTC И КОДА ASTRA

[1,2]Хавин В.Э., [1]Трошин Г.А., [1]Теплова Н.В., [1]Гусаков Е.З., [1]Лашкул С.И.

[1]Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.056

Численное моделирование генерации тока увлечения в токамаке с помощью волн нижнегибридного (НГ) диапазона вызывает большой интерес и активно ведется в течение последних двух декад [1 - 4]. Параметры, по которому можно сравнить экспериментальные и теоретические данные, – напряжение на обходе, синхротронное, SXR и HXR излечение. Моделирование этих параметров довольно сложная задача. Численные коды позволяют рассчитать НГ ток, который генерируется в плазме, распределение его плотности по малому радиусу, распределение вводимой мощности и ее поглощение, отслеживание лучевых траекторий для волн НГ диапазона, напряжение на обходе плазмы в зависимости от времени.

В данной работе мы сравниваем экспериментальные и расчетные значения напряжения на обходе, полученные в результате нестационарного моделирования НГ тока. Равновесие плазмы рассчитывалось с использованием транспортного кода ASTRA [5], трассировка лучей рассчитывалась с помощью кода FRTC [4, 6], ток увлечения был рассчитан с помощью функции распределения, полученной в ходе решения уравнения Фоккера-Планка с учетом электрического поля. Для расчета спектра продольного показателя преломления НГ волны была использована программа Grill3D [7].

Моделирование с использованием неявной разностной схемы показало, что рассчитанное напряжение на обходе падает медленнее, чем в эксперименте, вследствие недостаточной точности данного численного метода. В данной работе впервые показаны результаты моделирования НГ тока увлечения с использованием схемы Ченга-Купера [8] для неявной дискретизации второго порядка по пространству и первого порядка по времени с добавлением специальных весовых коэффициентов, которые не допускают возникновения отрицательных значений функции распределения и с высокой точностью сохраняют консервативность системы в отличие от метода Кранка-Николсона [9] и обычной разностной неявной схемы второго порядка. Моделирование выполнялось для параметров разрядов в токамаках ФТ-2 и Глобус-М2.

Литература

[1]. Smirnov A.P., Harvey R.W. The GENRAY Ray Tracing Code - 2003.
[2]. Xie H.S., PDRF: A general dispersion relation solver for magnetized multi-fluid plasma // Comput. Phys. Commun. **185**, 670 (2014).
[3]. Harvey R. W. and McCoy M. G., The CQL3D Fokker–Planck code, Presented at the IAEA Technical Committee Meeting on Advances in Simulation and Modeling of Thermonuclear Plasmas, Montreal, 1992, pp 489–526.
[4]. A.R. Esterkin and A.D. Piliya, Nucl. Fusion **36**, 1501 (1996).
[5]. G.V. Pereverzev and P.N. Yushmanov, Automated System for Transport Analysis, IPP-Report IPP 5/98, (2002).
[6]. A.N. Saveliev, EPJ Web Conf. **157**, 03045 (2017).
[7]. M. A. Irzak and O. N. Shcherbinin, Nucl. Fusion **35**, 1341 (1995)
[8]. S. Chang, G. Cooper. A practical difference scheme for Fokker–Planck equations, J. Comput. Phys. **6** (1), 1–16 (1970).
[9]. Crank J., Nicolson P., A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat conduction type, Proc. Cambridge Philos. Soc. **43** (1), 50–67 (1947).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМА ДИАМАГНИТНОГО УДЕРЖАНИЯ В ГДМЛ С ИНЖЕКЦИЕЙ БЫСТРЫХ ИОНОВ

Христо М.С., Беклемишев А.Д.

Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: khristo.mikhail@gmail.com
Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.057

Режим диамагнитного удержания, или диамагнитный пузырь, – новый режим удержания плазмы в открытых ловушках, предложенный Беклемишевым А.Д. теоретически в 2016 году [1]. Основная идея заключается в том, чтобы создать в центре открытой ловушки область, где давление плазмы достигает предельного значения $\beta = 8\pi p / B_v^2 \sim 1$, а магнитное поле, соответственно, близко к нулю, поскольку практически полностью вытеснено диамагнитной плазмой. Теоретические оценки, проведенные в рамках МГД [1, 2], предсказывают значительное улучшение удержания плазмы в этом режиме за счёт увеличения времени жизни частиц. Исследование режимов близких диамагнитному удержанию планируется на установках ГДЛ [3] и КОТ [4], а также данный режим является частью проекта ловушки нового поколения ГДМЛ [5].

Ранее были построены МГД модели равновесия диамагнитного пузыря [1, 2], однако значительные градиенты магнитного поля, а также наличие области, где магнитное поле близко к нулю, строго говоря, не позволяют применять МГД и требуют кинетического подхода. Бесстолкновительная динамика частиц в пузыре исследовалась в [6], также полностью кинетическая модель равновесия пузыря представлена в [7]. Тем не менее отличительной особенностью равновесия плазмы в режиме диамагнитного удержания является то, что оно существенным образом определяется процессами переноса.

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию равновесия плазмы в режиме диамагнитного удержания в ГДМЛ с инжекцией горячих ионов. Считаем, что плазма состоит из двух фракций: горячих ионов, возникающих в результате атомарной инжекции, для их описания применяется кинетический подход, и теплой фоновой плазмы, которую мы рассматриваем в рамках МГД. Предполагается, что атомарная инжекция ведется в область абсолютного удержания [8, 9], причем учитывается, что захват атомов в плазме происходит с конечной эффективностью [10]. Энергия горячих ионов предполагается достаточно большой, чтобы можно было учитывать столкновения только с электронами, пренебрегая ион-ионными столкновениями. Для описания теплой плазмы используются уравнения переноса энергии и вещества, где также учитываются специфические для диамагнитного режима бесстолкновительные потери [6]. Построены численные равновесия диамагнитного пузыря в ГДМЛ с атомарной инжекцией. Анализ полученных решений позволяет определить оптимальные параметры работы установки в режиме диамагнитного удержания.

Литература

[1]. Beklemishev A. D., Phys. Plasmas **23**, 082506 (2016).
[2]. Khristo M. S. and Beklemishev A. D., Plasma Fusion Res. **14**, 2403007–2403007 (2019).
[3]. Ivanov A. A. and Prikhodko V. V., Phys.-Usp. **60** (5), 509–533 (2017).
[4]. Bagryansky P. A., et al., AIP Conf. Proc. **1771**, 030015 (2016).
[5]. Beklemishev A., et al., Fusion Sci. Technol. **63** (1T), 46–51 (2013).
[6]. Chernoshtanov I., arXiv preprint arXiv:2002.03535, (2020).
[7]. Kotelnikov I., Plasma Phys. Control. Fusion **62** (7), 075002 (2020).
[8]. Морозов А., Соловьев Л. С. Вопросы теории плазмы, Т. 2, стр. 177, (1963).
[9]. Hsiao M.-Y., Miley G. H., Phys. Fluids **28**, 1440 (1985).
[10]. Janev R. K., et al., Nucl. Fusion **29**, 2125–2140 (1989).

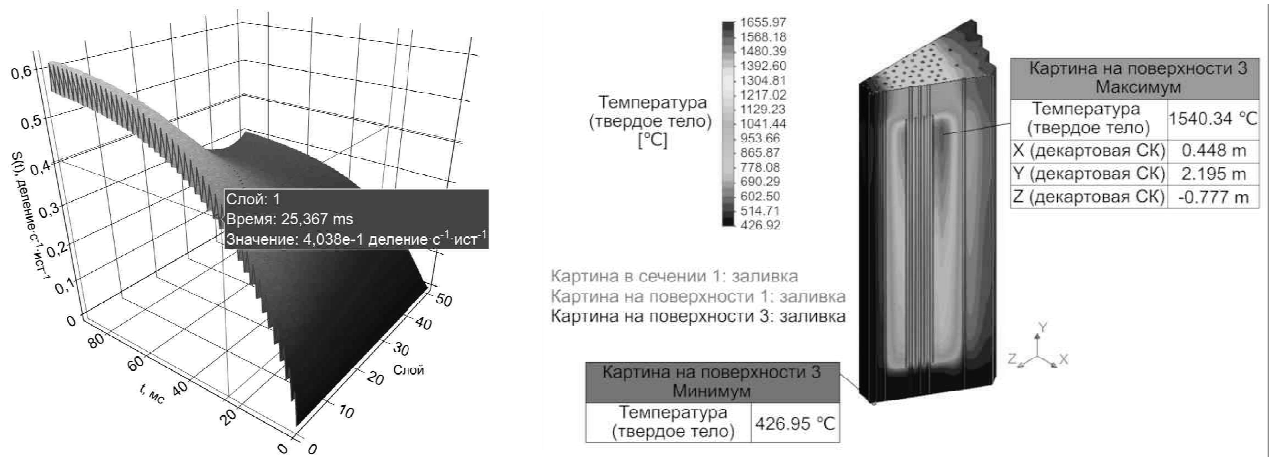
ГИБРИДНАЯ “СИНТЕЗ-ДЕЛЕНИЕ” РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА: CFD-ИССЛЕДОВАНИЯ

[1]Беденко С.В., [1]Луцик И.О., [1]Полозков С.Д.,[2]Матюшин А.А.,
[3]Аржанников А.В., [3]Приходько В.В., [4]Модестов Д.Г., [4]Шмаков В.М.

[1] НИ ТПУ, г. Томск, Россия
[2]АО “ОКБ Гидропресс”, г. Подольск, Россия
[3]ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[4]РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.058

Ранее, для исследования трехмерных нейтронных полей и тепловыделения в гибридной установке “синтез-деление”, разработаны расчетные модели бланкета и плазменного источника нейтронов (ПИН). Выполненные исследования позволили повысить “яркость” источника D-T нейтронов [1], проанализировать ядерную и технологическую безопасность системы при работе в импульсно-периодическом режиме [2]. В ходе моделирования установлено, что, когда ПИН в режиме постоянной эмиссии D-T нейтронов создает поток на уровне $2{,}6 \times 10^{17}$ н×с$^{-1}$, в бланкетной части установки при $k_{\text{eff}} = 0{,}95$, этот поток возрастет до величины $\sim 10^{20}$ н×с$^{-1}$. При переходе в импульсно периодический режим работы установки, такой поток неизбежно ведет к формированию неоднородностей поля энерговыделения в бланкетной части. Вследствие этого импульсный режим работы ПИН формирует градиент температурного поля, что может привести к снижению эксплуатационного ресурса топливной части бланкета.



(а) (б)

Рис. 1. Результаты моделирования (а) интенсивности ядерного деления в объеме первого, прилегающего к ПИН, слоя бланкета и (б) поля энерговыделения в секторе бланкета

В данном исследовании создана CFD-модель (Computational Fluid Dynamics Model) бланкета для нивелирования возникающих офсетов радиального и осевого поля энерговыделения. Результаты исследования (см. Рис. 1) позволили настроить работу ПИН (1) для безопасного пуска установки и (2) для управления уровнем её мощности в режиме длительной эксплуатации.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках проекта 19-29-02005.

Литература

[1]. Prikhodko V.V. and Arzhannikov A.V., Simulations of fusion neutron source based on the axially symmetric mirror trap for the thorium hybrid reactor, J. Phys.: Conf. Ser. **1647**, 012004 (2020).
[2]. Shamanin I.V., et al. Neutron data field in a fission reactor core with fusion neutron source at pulse-periodic operation, J. Phys.: Conf. Ser. **1647**, 012007 (2020).

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ПРИ СИЛЬНОМ ЭЦРН НА ТОКАМАКЕ Т-10

Неудачин С.В.

НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, e-mail: sneudat@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.059

В плазме Т-10 с вольфрамовым лимитером, литиевым покрытием и Pэц = 1.5 Мвт, недавно обнаружен новый тип L–H переходов, названный «полуглобальным» [1]. Некоторые транспортные процессы зависят от величины ЭЦ-мощности почти пороговым образом. В работе [2] показано, что при высокой удельной ЭЦ-мощности на электрон (P^* > 10 - 13 Вт внутри поверхности q = 1 (при чисто поперечном вводе мощности и нагреве на 1-й гармонике ЭЦР), пилообразные колебания становятся “насыщенными”. То есть после кратковременной стадии сильного роста температуры в центральной части шнура рост просто прекращается. Это можно трактовать как скачок теплопроводности внутри поверхности q = 1. По-видимому, подобное происходит и при поперечном вводе мощности и нагреве на 2-й гармонике ЭЦР, хотя анализ данных и не закончен на данный момент. На качественном уровне, от величины P^* зависит отклонение функции распределения от максвелловской. Даже в горящем ИТЕРЕ величина P^* не достигает указанного выше значения 10-13 Вт на электрон.

При не поперечном вводе ЭЦ-волн генерируется ток что может влиять на пилообразные колебания [3 - 5]. Анализ переноса плотности при пилообразных колебаниях ранее был исследован лишь в одном омическом режиме Т-10 [6] и подъем плотности был объяснен наличием неоклассической скорости пинчевания (направлена внутрь) частиц $V_{\text{p neo}}$. Анализ переноса плотности при пилообразных колебаниях [7] показал, что и при центральном ЭЦРН и при ЭЦР-генерации тока (PECRH <0,7 МВт), скорость пинчевания частиц V_{p} в центральной части шнура близка к неоклассической, а при большой мощности ЭЦ-нагрева V_{p} меняет знак (направлена наружу) и в несколько раз превышает величину $V_{\text{p neo}}$ по абсолютной величине. Это прямым образом подтверждает существование немонотонных профилей плотности при большой ЭЦ-мощности, что обсуждалось коллективом Т-10 с середины 80-х годов (плоскость или немонотонность профиля лежит в пределах ошибок решения обратной задачи для сигналов интерферометра). Анализ переноса плотности при пилообразных колебаниях, приведенный в данном докладе, показывает почти пороговую зависимость от ЭЦ-мощности появления пилообразных колебаниях с обратной фазой (вынос частиц из центра между пилообразными колебаниями). Величина P^* близка к приведенному выше значению (анализ большего количества импульсов проводится в настоящий момент). При дальнейшем повышении мощности абсолютное значение V_{p} (направлена наружу) возрастает.

Автор благодарен Н.А. Кирневой за полезные дискуссии.

Литература

[1]. A. Borschegovskiy, S. Neudatchin, I. Pimenov et al., EPJ Web Conf. **203**, 02004 (2019).
[2]. Bagdasarov A.A., Neudatchin S.V., in *Proc. 18th European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Berlin 1991, Vol. 5C, Part* II, p. 101.
[3]. Kislov D. A., et al., in *Proc. 22th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Bornemouth, 1995,* P2.032.
[4]. Kirneva N. A., et al., in *Proc. 27th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Budapest, 2000,* P2.031.
[5]. Razumova K. A., et al., Plasma Phys. Control. Fusion **42**, 94 (2000).
[6]. Yu.N. Dnestrovskij, S.V. Neudachin, G.V. Pereverzev, Sov. J. Plasma Phys. **10**, 137 (1984).
[7]. S.V. Neudatchin, D.A. Shelukhin, A.A. Borshegovskii, S.G. Maltzev, T.B. Myalton, N.A. Mustafin, D.S. Sergeev, in *Proc. 25th Fusion Energy Conference, St. Petersburg, 2014,* EX/P1-43

РАЗРАБОТКА АНАЛИЗАТОРА НЕЙТРАЛОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ ТОКАМАКА МИФИСТ

Ефимов Н.Е., Синельников Д.Н., Булгадарян Д.Г.

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, e-mail: NEEfimov@mephi.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.060

Температура ионной компоненты плазмы является важным параметром, характеризующим эффективность удержания и нагрева плазмы в термоядерных установках. Одним из наиболее распространённых средств определения температуры ионов горячей плазмы служит анализ энергетического распределения нейтралов перезарядки, покидающих область плазменного шнура. Измерение данных распределений осуществляется, как правило, путём ионизации потока частиц и его последующего пространственного разделения в электрических или магнитных полях по энергиям/импульсам.

МИФИСТ – малый учебно-исследовательский сферомак (a = 13 см, R = 25 см) с тороидальным полем до 0,8 Тл, током плазмы порядка 8 кА и ожидаемой температурой ионов 200 эВ [1]. Для анализа энергоспектров нейтралов перезарядки в подобных малых токамаках применяют комбинацию газовой мишени для обдирки атомов и энергоанализатор с плоскопараллельными пластинами и тормозящим полем [2].

В данной работе представлена конструкция 7-канального анализатора нейтралов перезарядки токамака МИФИСТ и его калибровка в диапазоне энергий 0,5 – 5 кэВ. Одной из особенностей создаваемой диагностики является применение в качестве обдирочного газа гексафторида серы (SF_6). Показано (рис. 1), что данный газ, во-первых, даёт максимум коэффициента обдирки при меньших давлениях по сравнению с типичными рабочими газами (H_2, N_2), а во-вторых, позволяет достичь большего коэффициента обдирки атомов водорода (до 0,1). Получена зависимость коэффициента обдирки элегазом от энергии налетающих атомов водорода. Также определено энергетическое разрешение каналов энергоанализатора.

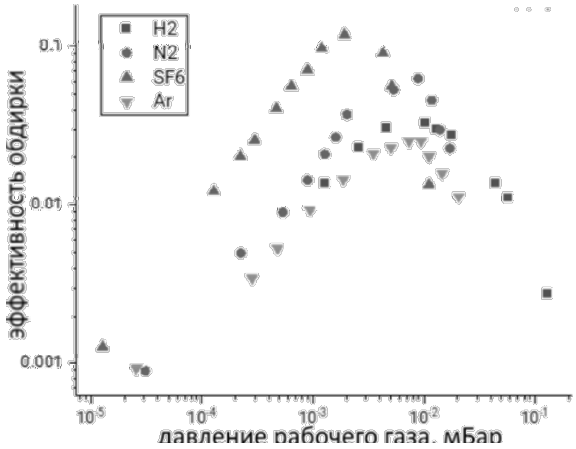


Рисунок 1. Зависимость коэффициента обдирки атомов водорода с энергией 3 кэВ от давления при различных рабочих газах.

Литература

[1]. Кирнева Н. А., Воробьев Г. М., Ганин С. А., и др., Область рабочих параметров токамака МИФИСТ: предварительная оценка, Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез, 2020, Т. 43., № 3, С. 90–100.

[2]. Ajay K., Pandya S. P., and Aggarwal S., Experimental Results of Core Ion Temperature and Neutral Density Measurements on ADITYA Tokamak using Four Channels Neutral Particle Analyzer, J. Fusion Energy **39** (3), 111–121 (2020).

ТОКАМАК МИФИСТ-0: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

[1]Крат С.А., [1]Пришвицын А.С., [1]Алиева А.И., [1]Ефимов Н.Е., [1]Виницкий Е.А., [1,2]Уласевич Д.Л., [1]Изарова А.Д., [1]Подоляко Ф.С., [1]Перевозчикова О.А., [1,3]Мещеряков А.И., [1,4]Сорокин И.А., [1,2]Мельников А.В., [1]Грунин А.В., [1]Беграмбеков Л.Б., [1]Казиев А.В., [1,4]Колодко Д.В., [1]Исакова А.С., [1]Белов А.С., [1]Губский К.Л., [1]Онгена Дж.

[1]НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия
[2]НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия
[3]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия
[4]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.061

Токамак МИФИСТ-0 [1] – учебно-демонстрационный сферический токамак, созданный в НИЯУ МИФИ в 2019 - 2021 годах. Большой радиус – 25 см, малый – 13 см, вертикальная вытянутость разрядной камеры ~2. Ожидаемая длительность разряда ~10 - 30 мс. Расчётные операционные пределы описаны в работе [2]

Основные задачи токамака – подготовка научных кадров, апробация диагностик в малом масштабе для дальнейших работ на крупных установках и проведение исследований в области взаимодействия плазмы с поверхностью. Для достижения этих целей, проводятся работы по улучшению характеристик токамака, оснащению токамака дополнительными диагностиками.

За период 2021 года была в ~30 раз увеличена энергетика токамака. Достигнуто максимальное значение тороидального поля ~0,8 Тл. Проведён ряд работ по магнитометрии систем токамака, оптимизирован с точки зрения рассеянных полей индуктор токамака. Разработана и создана ВЧ антенна для ИЦР нагрева плазмы, осуществлён ввод дополнительной ВЧ мощности в разрядную камеру токамака. Токамак оснащён системой удалённого управления, реализована отдельная пультовая.

Для определения параметров плазмы в разрядной камере установлены магнитные датчики Мирнова, пояс Роговского. Снаружи камеры установлена диамагнитная петля, дополнительный пояс Роговского. Установлены спектроскопические стёкла и реализовано измерение хордовой плотности плазмы по средствам гетеродинного интерферометра. Также осуществлена регистрация сигнала линии H альфа в зависимости от времени, видеосъёмка разряда со скоростью 10000 кадров в секунду. Создан универсальный механизированный подвижный ввод со сменными головками, позволяющий проводить зондовые измерения, а также эксперименты по взаимодействию плазмы с поверхностью. Реализована возможность смены головок ввода с использованием шлюзовой камеры

При помощи зондов Ленгмюра определены параметры СВЧ предплазмы в пристеночной области. Плотность ~5×10^{10} см$^{-3}$, электронная температура ~8 эВ.

Создан токонесущий разряд (осуществлён пробой). Время жизни разряда ~0,4 мс, достигнутый ток плазмы ~3 кА, плотность плазмы ~3×10^{12} см$^{-3}$. Во время разряда зарегистрировано рентгеновское излучение.

Литература

[1]. V.A. Kurnaev, G.M. Vorobyov, V.E. Nikolaeva, S.A. Krat, A. V Melnikov, D.P. Ivanov, Y.M. Gasparyan, The Project of MEPhIST Tokamak, Phys. At. Nucl. **82**, 1329–1331 (2019). doi:10.1134/S1063778819100144.

[2]. N.A. Kirneva, G.M. Vorobjev, S.A. Ganin, A.S. Drozd, I.S. Kudashev, V.V. Kulagin, V.A. Kurnaev, WORKING AREA OF THE MEPHIST TOKAMAK: PRELIMINAR ESTIMATION, Vopr. At. Nauki Tekh., Ser.: Termoyad. Sint. **43** (3), 90–100 (2020). doi:10.21517/0202-3822-2020-43-3-90-100.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОКЛАССИЧЕСКОЙ ТИРИНГ-МОДЫ МЕТОДОМ ДОППЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

[1,2]Яшин А.Ю., [2]Гусев В.К., [2]Жильцов Н.С., [2]Киселев Е.О., [2]Курскиев Г.С., [2]Минаев В.Б, [2]Патров М.И., [1]Петров А.В., [2]Петров Ю.В., [1]Пономаренко А.М., [2]Сахаров Н.В.

[1]ФГАОУ ВО "СПбПУ", г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: alex_yashin@list.ru
[2]ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.062

В токамаках магнитные острова, возникшие в результате роста неоклассической тиринг-моды (НТМ), привлекли большое внимание из-за ограничений, которые они накладывают на давление плазмы. Даже когда они занимают лишь небольшую часть объема удержания, магнитные острова оказывают значительное влияние не только на профили температуры, но и на профили тока и скорости вращения. Ключевыми параметрами, определяющими влияние острова на удержание, являются ширина и частота вращения образующихся островов [1]. Если частота магнитных островов хорошо определяется с помощью магнитных зондов, расположенных вне области удержания плазмы, то для определения их ширины и локализации необходимо использовать иные диагностические методы. В работе [2] было показано, что в качестве такого метода может быть использовано допплеровское обратное рассеяние (ДОР), также называемое допплеровской рефлектометрией.

На сферическом токамаке Глобус-М2 метод ДОР совместно с массивами магнитных зондов [3] был применён для исследования характеристик НТМ. Одновременно было использовано две многочастотные системы ДОР с частотами зондирования от 20 до 48 ГГц и от 50 до 75 ГГц. Применение таких систем позволило проводить измерения в широкой области пространства от сепаратрисы до половины малого радиуса плазмы. Тиринг-мода с модовым составом 2/1 наблюдаемая с помощью магнитных зондов во время фазы плато плазменного тока как колебания на частоте порядка 10 кГц была также обнаружена и в сигналах диагностики ДОР в те же моменты времени и на тех же частотах. При этом такие колебания проявлялись не на всех каналах системы ДОР, а только на тех, положения отсечек которых находились вблизи поверхности $q = 2$. Оценка размеров области наблюдения НТМ с помощью ДОР даёт значения порядка трёх сантиметров, что и полагается принять за ширину магнитного острова. Помимо результатов по измерению параметров НТМ в докладе анализируются причины возникновения колебаний в сигналах ДОР, а также приводится сравнение измеренной ширины магнитного острова с предсказаниями моделирования [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 18-72-10028. Эксперименты проведены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Литература

[1]. Waelbroeck F.L., Nucl. Fusion **49**, 104025 (2009).
[2]. Estrada T. et al., Nucl. Fusion **52**, 082002 (2012).
[3]. Patrov M.I. et al., Plasma Phys. Rep. **33**, 81–90 (2007).
[4]. Dudkovskaya A.V. et al., Phys. At. Nucl. **81**, 1033–1036 (2018).

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ КОЛЛЕКТИВНОГО ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИРОТРОНОВ

Пименов И.С.

НИЦ «Курчатовский Институт », г. Москва, Россия
e-mail: pimenowigor@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.063

На токамаке Т-15МД планируется использование восьми гиротронов для электронно-циклотронного нагрева (ЭЦН) плазмы. Помимо своей основной задачи, гиротроны можно использовать в диагностических целях. Диагностика коллективного Томсоновского рассеяния (CTS – Collective Thomson Scattering) в токамаках и стеллараторах использует излучение гиротрона для получения физических данных об ионной составляющей плазмы. В отличие от стандартной диагностики Томсоновского рассеяния, где рассеяние происходит на отдельно взятых электронах, в случае CTS, рассеяние возникает на флуктуациях электронной плотности, вызванные движением ионов. Данная диагностика позволяет получить одномерную функцию распределения ионов, температуру ионов и изотопный состав. CTS применяется на токамаках JET [1], TEXTOR [2], Asdex Upgrade [3], а также на стеллараторах LHD [4] и W-7X [5]. Целью работы является обоснование реализации диагностики коллективного Томсоновского рассеяния на токамаке Т-15МД. В работе будут отображены следующие моменты, касающиеся данной диагностики:

1. Сравнительный анализ с другими диагностиками
2. Диапазон параметров плазмы, определяющие область применимости диагностики
3. Пространственно-временное разрешение
4. Различные схемы ввода излучения
5. Выбор оптимальной частоты гиротрона

Литература

[1]. H. Bindslev, J.A. Hoekzema, J. Egedal et al, Phys. Rev. Lett. **83**, 3206 (1999).
[2]. H. Bindslev, S.K. Nielsen, L. Porte et al, Phys. Rev. Lett. **97**, 205005 (2006).
[3]. M. Stejner, J. Rasmussen, S.K. Nielsen et al, Plasma Phys. Control. Fusion **59**, 075009 (2017).
[4]. S. Kubo, M. Nishiura, K. Tanaka et al, Plasma Fusion Res. **5**, S1038 (2010).
[5]. D. Moseev, M. Stejner, T. Stange, et al, Rev. Sci. Instrum. **90**, 013503 (2019).

СОСТОЯНИЕ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМОЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ГССД В РФ

[1]Ананьев С.С., [1]Иванов Б.В., [1,2]Кутеев Б.В., [3]Юхимчук А.А.

[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Ananyev_SS@nrcki.ru
[2]НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия
[3]РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.064

В рамках реализации федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» (РТТН) в НИЦ «Курчатовский институт» запланировано проведение прикладных научных исследований и разработок. Задачи текущего периода включают обоснование выбора технологий топливного цикла и гибридного бланкета, а также техническое проектирование источника термоядерных нейтронов ТИН-К и гибридной реакторной установки (ГРУ) для тестирования технологий, материалов и компонент гибридных систем [1].

Программа развития гибридных систем синтез-деление (ГССД), предлагаемая НИЦ «Курчатовский институт», предусматривает создание стендовой базы для отработки технологий и их взаимной интеграции. Своевременное обеспечение специализированными стендами и квалифицированным персоналом позволит эффективно реализовать проект строительства ГРУ с тепловой мощностью до 500 МВт.

В результате работ по программе РТТН ГК Росатом и планам НИОКР НИЦ «Курчатовский институт» до 2024 года должна быть спроектирована, разработана и запущена в эксплуатацию физическая модель (стенд) тритий-дейтериевого топливного цикла (ТЦ) для исследований, направленных на определение или уточнение эксплуатационных параметров, производительности, количества трития и др. параметров систем ТЦ с использованием проектов ДЕМО-ТИН [2] и ТИН-СТ [3] как основы проектирования ТИН-К и ГРУ. Планируются обоснование безопасности технологических систем и обучение персонала для эксплуатации этих систем в ГССД с запасом трития на площадке от 0,1 до 2,0 кг. На более поздних этапах должны быть разработаны технические проекты систем ТЦ [4 - 6] для ТИН-К и ГРУ, изготовлены макеты и проведена их совместная эксплуатация, в соответствии с исследовательской программой, включающей исследования и выбор оптимальной технологии воспроизводства трития в бланкете и его экстракции, совершенствование и оптимизацию отдельных технологий топливного цикла, обоснование радиационной безопасности установки.

Описанию всех этапов составленной дорожной карты и промежуточных результатов проводимой работы посвящен данный доклад.

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт».

Литература

[1]. *Kuteev B.V. and Goncharov P.R.,* Fusion Sci. Technol. **76**, 836–847 (2020).
[2]. *Kuteev B.V., Shpanskiy Yu.S. and DEMO-FNS Team* // ВАНТ. Сер. Терм. синтез, т. 44, вып. 2, с. 7-14, 2021.
[3]. *B.V. Kuteev, E.A. Azizov et al*., Nucl. Fusion **51**, 073013 (2011).
[4]. *Ananyev S.S., Ivanov B.V., Kuteev B.V.,* Fusion Eng. Des. **161**, 111940 (2020).
[5]. *Ananyev S.S., B.V. Ivanov, et al.,* Nucl. Fusion **61**, 116062 (2021).
[6]. *Веденеев А.И. и др.* Экспериментальный замкнутый контур для динамического моделирования вакуумно - тритиевого комплекса термоядерных реакторов // препринт, Саров, 1997.

СОСТОЯНИЕ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА И ТОПЛИВНОЙ ИНЖЕКЦИИ В ВИДЕ ПУЧКА БЫСТРЫХ АТОМОВ ДЛЯ ГССД В РФ

[1]Ананьев С.С., [1]Панасенков А.А., [1,2]Кутеев Б.В.

[1]НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, e-mail: Ananyev_SS@nrcki.ru
[2]НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.065

Программа развития гибридных систем синтез-деление (ГССД), предлагаемая НИЦ «Курчатовский институт», предусматривает создание стендовой базы для отработки технологий и их взаимной интеграции. Своевременное обеспечение специализированными стендами и квалифицированным персоналом позволит эффективно реализовать проект строительства ГРУ с тепловой мощностью до 500 МВт [1].

Задачи текущего периода включают обоснование выбора технологий топливного цикла (ТЦ) и гибридного бланкета, а также техническое проектирование источника термоядерных нейтронов ТИН-К и гибридной реакторной установки (ГРУ) для тестирования технологий, материалов и компонент ГССД. Работы координируются с федеральным проектом комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» (РТТН) ГК Росатом.

В результате работ до 2024 года планируется подготовить эскизный и технический проекты мульти-изотопного комплекса нейтральной инжекции с характеристиками ТИН-К и ГРУ, разработать и запустить в эксплуатацию физическую модель (стенд) системы формирования и транспортировки пучков быстрых атомов для исследований, направленных на определение эксплуатационных параметров, производительности вспомогательных подсистем, количества изотопов водорода в них и др. параметров системы нейтральной инжекции (СНИ) с использованием проектов ДЕМО-ТИН [2] и ТИН-СТ [3] как основы проектирования ТИН-К и ГРУ. Планируются анализ и обоснование безопасности технологических систем, а также обучение персонала для эксплуатации ГССД с запасом трития на площадке от 0,1 до 2,0 кг. Разрабатываемые системы инжекции нейтралов ориентированы на использование положительных ионов для ТИН-К с суммарной мощностью до 10 МВт и отрицательных ионов с мощностью до 40 МВт для ГРУ. Соответствующие потоки нейтральных атомов достигают от $3{,}7\cdot10^{19}$ до $4{,}6\cdot10^{19}$ 1/с.

На более поздних этапах должны быть разработаны технические проекты СНИ [4 - 6] для ТИН-К и ГРУ, изготовлены макеты и проведена их совместная эксплуатация, в соответствии с исследовательской программой, нацеленной на эффективный отвод тепловых нагрузок с взаимодействующими с пучками и плазмой конструкций токамака, выбор оптимальной технологии формирования ионного пучка и разделение заряженных и нейтральных компонент пучка, оптимизацию архитектуры газового цикла, обоснование радиационной безопасности установки. Будут также описаны основные этапы составленной дорожной карты, ориентированной на запуск ТИН-К в 2030 и ГРУ в 2040 годах, и планируемые результаты совместного развития технологий СНИ как активного участника ТЦ ГССД.

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт».

Литература

[1]. *Kuteev B.V. and Goncharov P.R.,* Fusion Sci. Technol. **76**, 836–847 (2020).
[2]. *Kuteev B.V., Shpanskiy Yu.S. and DEMO-FNS Team* // ВАНТ. Сер. Терм. синтез, т. 44, вып. 2, с. 7-14, 2021.
[3]. *B.V. Kuteev, E.A. Azizov et al*., Nucl. Fusion **51**, 073013 (2011).
[4]. *Ананьев С.С., Длугач Е.Д. и др.,* ВАНТ. Сер. Терм. Синтез **41** (1), 5 (2018).
[5]. *Ananyev S.S., Dlougach E.D., et al.,* Fusion Eng. Des. **161**, 112064 (2020).
[6]. *Panasenkov A.A., Ananyev S.S., и др.* // ВАНТ. Сер. Терм. синтез, **44** (2), 86–99 (2021).

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА ОБМОТКИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ ТОКАМАКА Т-11М В СРЕДЕ "MICRO-CAP 11"

Агеев А.В., Степанов С.Ю.

АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», г. Москва, г. Троицк, e-mail: ageev@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.066

В настоящее время в системе питания обмотки тороидального поля (ОТП) токамака Т-11М применяются емкостной накопитель энергии и однократно коммутируемый тиристорный ключ с диодным кроубаром. В этих условиях величина тока ОТП и, как следствие, величина тороидального магнитного поля непостоянны на интервале разрядного импульса токамака. Непостоянство тороидального магнитного поля затрудняет получение режимов токамака с заданными интегральными параметрами плазмы. Чтобы обеспечить необходимые параметры плазмы на всем интервале разрядного импульса токамака необходимо стабилизировать ток ОТП.

В работе представлены два варианта систем стабилизации тока ОТП для токамака Т-11М:

- с секционированием емкостного накопителя;
- с управляемым тиристорным ключом.

Принцип работы схемы с секционированием емкостного накопителя основан на последовательном разряде секций конденсаторных батарей на ОТП. Работа второго варианта системы стабилизации (с управляемым тиристорным ключом) основана на многократных переключениях основного тиристора посредством подключения к нему коммутирующей цепи.

Проведено моделирование этих систем стабилизации тока ОТП в среде компьютерного моделирования «Micro-Cap 11». При моделировании учитывались реальные параметры системы питания и параметры ОТП токамака Т-11М. Для управления схемами были разработаны специализированные управляющие устройства с обратной связью по току ОТП.

В качестве результата моделирования был проведен сравнительный анализ предложенных систем: были представлены оценочные значения временного интервала стабилизации тока ОТП, пульсации тока ОТП при различных уставках тока ОТП и различных значениях начального напряжения емкостного накопителя энергии.

Литература

[1]. Мирнов С.В., Физические процессы в плазме токамака, М.: Энергоатомиздат, 1983.
[2]. Розанов Ю.К., Основы силовой электроники, М.: Энергоатомиздат, 1992.
[3]. Хоровиц П., Хилл У., Искусство схемотехники, Пер. с англ. Б.Н. Бронина, А.И. Коротова, М.Н. Микшиса, О.А. Соболевой, М.: Мир, 1986.
[4]. Кнопфель Г., Сверхсильные импульсные магнитные поля, Пер. с англ. Ф.А. Николаева и Ю.П. Свириденко, М.: Мир, 1972.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ДУГОРАЗРЯДНОГО ГЕНЕРАТОРА ПЛАЗМЫ ДЛЯ МОЩНЫХ АТОМАРНЫХ ИНЖЕКТОРОВ СЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

Дейчули П.П., Бруль А.В., Вахрушев Р.В., Дейчули Н.П., Иванов А.А., Ступишин Н.В., Колмогоров В.В.

Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: pdeichuli@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.067

Дугоразрядные генераторы плазмы с холодным катодом нашли широкое применение как источники плазмы для диагностических и нагревных атомарных инжекторов. Большим преимуществом таких генераторов плазмы является простота и дешевизна системы питания, кроме того такие генераторы плазмы обеспечивают самое низкое содержание молекулярных ионов в извлеченном пучке и имеют высокую газовую эффективность.

Недостатком таких генераторов плазмы является значительная эрозия катода и прикатодных элементов конструкции, что ограничивает ресурс работы и приводит к необходимости периодической чистки и замены элементов, что особенно неудобно для систем атомарной инжекции с параллельной работой многих инжекторов.

Для диагностических инжекторов с током пучка несколько ампер созданы генераторы плазмы с холодным катодом с длительностью импульса несколько секунд и ресурсом ~1 год [1, 2], однако, для мощных нагревных инжекторов, где требуется ток пучка десятки и сотни ампер, их длительность ограничена величиной порядка сотен миллисекунд [3, 4].

В данной работе описываются тестовые испытания нескольких модификаций конструкции дуговых генераторов с целью увеличения длительности. В технологических приложениях тепловые нагрузки на прикатодные элементы генератора могут быть снижены за счет повышенного потока рабочего газа, уносящего тепло. Поскольку в приложениях для УТС это обычно неприемлемо, сделан упор на применение изоляторов и электродов повышенной термостойкости и теплопроводности. Для предотвращения металлизации поверхностей изоляторов из-за распыления материала катода испытаны изоляторы различной формы, опробована геометрия плавающего прикатодного электрода, препятствующая напылению металла, и конфигурация межэлектродных зазоров с дугогасящими свойствами.

Базовая конструкция генератора плазмы для мощного инжектора с извлеченным током в ионах 150 А [3, 4] имела ресурс работы ~2 года активных экспериментов при длительности импульса 30 мс и токе разряда ~600А. Полный инжектируемый ток системы нейтральных пучков установки С-2W составил около 1 кА при мощности до 20 МВт [3].

Модернизация генераторов плазмы и проведенные ресурсные испытания позволяют рассчитывать на работу при на порядок большей длительности импульсов - от 300 мс до 1 с при приемлемом снижении ресурса до ~1 года эксплуатации.

Литература

[1]. Deichuli P.P., Ivanov A.A., Stupishin N.V., Long-pulse arc-discharge plasma source with cold cathode for diagnostic neutral beam injector. Rev. Sci. Instrum. **79**, 02C106 (2008).

[2]. Stupishin N.V., Deichuli P.P., Ivanov A.A. et al., Multi-Second Neutral Beam Injector (60kV, 6A) for Plasma Diagnostics in the Upgraded T-15 Device. AIP Conf. Proc. **1771**, 50012 (2016).

[3]. P. Deichuli, V. Davydenko, A. Ivanov, S. Korepanov, V. Mishagin, A. Smirnov, A. Sorokin, and N. Stupishin, Low energy, high power hydrogen neutral beam for plasma heating. Rev. Sci. Instrum. **86**, 113509 (2015); doi: 10.1063/1.4936292.

[4]. А. В. Бруль, А. Г. Абдрашитов, В. Х. Амиров и др., Мощный атомарный инжектор с перестраиваемой энергией пучка для нагрева и стабилизации плазмы. Физика плазмы, 2021, том 47, № 6, с. 499-506.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОЩНОГО АТОМАРНОГО ПУЧКА С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Бруль А.В., Дейчули П.П., Давыденко В.И., Иванов А.А., Сорокин А.В., Ступишин Н.В.

Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: brul999@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.068

Инжекторы мощных пучков быстрых атомов водорода широко применяется для нагрева и стабилизации плазмы в установках с магнитным удержанием [1], в обзоре [2] приведен многолетний опыт ИЯФ СО РАН в создании мощных атомарных инжекторов на основе положительных и отрицательных ионов. Данный доклад посвящён исследованию проблем формирования мощных ионных пучков в ионно-оптических системах (ИОС) с перестраиваемой энергией. Ранее для установки C-2W компании TAE (США) были разработаны инжекторы атомарного пучка в которых энергия частиц во время импульса может изменяться по произвольному временному сценарию от 15 до 40 кэВ при неизменном извлеченном токе ИОС [3].

Для реализации такого сценария использовалась четырехэлектродная ИОС в которой пучок 15 кэВ с требуемым током 150 А формируется в первом зазоре, затем увеличивается до 40 кэВ путем доускорения частиц во втором ускоряющем зазоре (схема ускорение-доускорение). Хотя такая схема позволяет сохранять ток ИОС, однако, для некоторых значений ускоряющего напряжения нарушаются оптимальные условия формирования и заметно возрастает угловая расходимость, что подтверждается моделирующими расчетами [3]. При дальнейшем росте энергии пучка угловая расходимость монотонно уменьшается и становиться равной либо меньше начальной.

Чтобы избежать данного явления роста угловой расходимости на участке неоптимальных значений ускоряющего напряжения была проведена оптимизация сценария работы ИОС путем моделирования формирования пучка в различных режимах ускорения. В расчетах было найдена возможность перераспределения напряжения на зазорах ИОС таким образом, чтобы избежать ухудшения угловых характеристик пучка. Такие режимы доускорения получили экспериментальное подтверждение.

Литература

[1]. H. Gota, M.W. Binderbauer, T. Tajima, S. Putvinski et.al. Achievement of field-reversed configuration plasma sustainment via 10 MW neutral-beam injection on the C-2U device, Nucl. Fusion **57**, 116021 (2017).

[2]. Ю.И. Бельченко, В.И. Давыденко, П.П. Дейчули, И.С. Емелев, А.А. Иванов, В.В. Колмогоров, С.Г. Константинов, А.А. Краснов, С.С. Попов, А.Л. Санин, А.В. Сорокин, Н.В. Ступишин, И.В. Шиховцев, А.В. Колмогоров, М.Г. Атлуханов, Г.Ф. Абдрашитов, А.Н. Драничников, В.А. Капитонов, А.А. Кондаков. Исследование по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН, УФН, т.188, № 6, с. 595-650, 2018.

[3]. А.В. Бруль, А.Г. Абдрашитов, В.Х. Амиров, В.П. Белов, Р.В. Вахрушев, А.И. Горбовский, А.Н. Драничников, В.И. Давыденко, П.П. Дейчули, Н.П. Дейчули, А.С. Донин, А.А. Иванов, И. А. Иванов, В. А. Капитонов, В. В. Колмогоров, С. Корепанов, В. В. Мишагин, В. В. Ращенко, А. В. Сорокин, Н. В. Ступишин, Мощный атомарный инжектор с перестраиваемой энергией пучка для нагрева и стабилизации плазмы. Физика плазмы, 2021, том 47, № 6, с. 499-506.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ВОСПРОИЗВОДСТВА ТРИТИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРИТИЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РОССИИ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА ДЕМО-ТИН

Иванов Б.В., Ананьев С.С.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: kapjicohh@gmail.com

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.069

В докладе авторы продолжают анализ технологий тритиевого топливного цикла (ТЦ) в России и мире начатый ранее [1, 2]. Анализ дополнен обзором технологий: получения трития в бланкете термоядерного реактора; получения и подготовки бридерных материалов; извлечения трития из бланкета; хранения трития в топливном цикле; обеспечения тритиевой безопасности и анализа тритийсодержащих веществ, а также технологий инжекции топлива в плазму и откачки камеры токамака. С учетом ранее полученных результатов, проведена полная оценка тритиевых технологий для всех систем топливного цикла проектируемого гибридного (синтез -деление) реактора ДЕМО-ТИН [3, 4].

Анализ был проведен с помощью методики оценки уровня технологической готовности (Technology readiness level, TRL), разработанный Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства США (анг. NASA). Методика позволяет на основе объективных и системных критериев количественно оценить зрелость конкретной технологии в целевой сфере применения. Шкала оценки включает 9 уровней, которые соответствуют: демонстрации базовых принципов технологии (TRL 1), проведению проверки компонентов/макетов технологии в лабораторных условиях (TRL 4), проверке технологии в целевом состоянии успешной работой (TRL 9) и т.д. Уровни сгруппированы по стадиям: Исследования (TRL 1–3), Разработки (TRL 4–6) и Демонстрации (TRL 7–9).

Авторами показано, что в настоящее время в России ведутся работы по развитию и освоению технологий тритиевого топливного цикла. Тритиевые технологии активно используют в различных сферах деятельности, для адаптации и отработки специфических параметров и режимов ТЦ необходимы дополнительные исследования и развитие технологий. Большинство технологий достаточно развиты для применения в ТЦ ДЕМО-ТИН. Некоторые технологии, например, хроматографическое разделение изотопов водорода и криоадсорбционная очистка тритийсодержащих смесей находятся на стадии Исследования и для применения в ТЦ ДЕМО-ТИН должны быть развиты и отработаны. Для повышения уровня готовности технологий в России целесообразно создавать специализированные стендовые базы или исследовательские установки.

Сопоставление развития технологий с мировым уровнем показывает отставание некоторых ключевых технологий, например, очистки водородсодержащих смесей в реакторах на основе палладиевых мембран и извлечение трития из бланкета. Целесообразно проводить работу по усилению международного сотрудничества в сфере применения тритиевых технологий в термоядерных исследованиях.

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт».

Литература

[1]. S.S. Ananyev et al., *Nucl. Fusion* **61**, 116062 (2021).
[2]. Б.В. Иванов, С.С. Ананьев, *XLVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу*, 2021, http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVIII/Mu/ru/AE-I.
[3]. B.V. Kuteev et al., *Nucl. Fusion* **55**, 073035 (2015).
[4]. E.A. Azizov *et al.*, *Phys. At. Nucl.* **79**, 1125–1136 (2016).

КОМПЛЕКС ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ УВЛЕЧЕНИЯ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Мещеряков А.И., Гришина И.А., Вафин И.Ю.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: meshch@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.070

ВЧ нагрев в диапазоне ионных циклотронных частот с помощью быстрых магнитозвуковых волн (БМЗВ) является распространенным методом дополнительного нагрева плазмы в тороидальных магнитных ловушках. Наилучшие результаты с точки зрения эффективности возбуждения БМЗВ и нагрева продемонстрировали квадрупольные антенны [1, 2]. Это связано с тем, что такие антенны позволяют возбуждать БМЗВ с нужными тороидальными и полоидальными волновыми числами, и значительно уменьшить амплитуду возбуждения паразитных поверхностных волн и цилиндрических мод с низкими продольными волновыми числами. При этом значительно уменьшается нагрев области вне сепаратрисы (scrape-off-layer) и периферийных слоев плазмы и соответственно уменьшается поступление примесей в плазму.

Для экспериментов по ИЦР нагреву плазмы и генерации токов увлечения в стеллараторе Л-2М была создана квадрупольная антенна. Она состоит из 4-х токовых витков, расположенных в двух соседних сечениях вакуумной камеры стелларатора, отстоящих друг от друга на расстояние 22,5 см по оси плазменного шнура. Ширина каждого токового витка составляет 7.5 см, а площадь поверхности – 2,5 кв. дм. Поверхность каждого витка, обращенная к плазме, повторяет форму поверхности сепаратрисы и отстоит от нее на 1см. Токовые витки не защищены электростатическим экраном. Каждый виток питается от генератора отдельным ВЧ фидером. Благодаря этому, в зависимости от сдвига фаз напряжения, поданного на отдельные витки антенны, имеется возможность возбуждать БМЗВ с различными тороидальными и азимутальными модами. В докладе рассмотрены варианты питания антенной системы, приведены тороидальные и азимутальные спектры для этих случаев и выбран оптимальный вариант для нагрева плазмы и генерации токов увлечения в стеллараторе Л-2М. На основании опыта предыдущих экспериментов [2], ожидается, что в экспериментах по ИЦР нагреву D+H плазмы мощность, излучаемая квадрупольной антенной, составит около P = 200 кВт.

Также рассматривается диагностический комплекс системы ионного циклотронного нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М, состоящий из измерителя падающей и отраженной волн в ВЧ фидере и системы магнитных зондов. Представленный диагностический комплекс позволит измерять фазовые скорости и спектральный состав возбуждаемых БМЗВ, а также определять условия, в которых эффекты нагрева и генерации токов увлечения будут максимальными.

Представлены результаты измерения сопротивления излучения одного из витков квадрупольной антенны в режиме ЭЦР нагрева (P_{ECRH} = 200 кВт, $n_e = 1{,}8 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$).

Литература

[1]. Bobkov V., Aguiam D., Baruzzoetet M. et al., Nucl. Mater. Energy **12**, 1194 (2017).

[2]. В.А. Батюк, Г.С. Воронов, Е.Ф. Гиппиус, С.Е. Гребенщиков, Н.П. Донская, К.С. Дябилин, Б.И. Илюхин, И.А. Кован, Л.М. Коврижных, А.И. Мещеряков, И.Е. Мороз, И.С. Сбитникова, В.Н. Суходольский, И.С. Шпигель, Физика плазмы **13**, 259 (1987).

ДИНАМИКА УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ И НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА САМОСОГЛАСОВАННОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕЖИМЕ ЭЦР НАГРЕВА В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Мещеряков А.И., Гришина И.А.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: meshch@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.071

Исследована динамика удержания плазмы в стеллараторе Л-2М в режиме ЭЦР нагрева на стадиях начального нагрева плазмы, ее квазистационарного удержания и остывания после выключения СВЧ излучения. При этом также рассмотрены свойства самосогласованности плазмы на различных стадиях ЭЦР нагрева. В процессе ЭЦР нагрева было выделено четыре фазы, в каждой из которых удержание плазмы имеет свои особенности.

В первой фазе происходит нагрев плазмы, ее энергосодержание растет, при этом край плазмы остается холодным. Фактически, плазма не контактирует со стенкой (detachment regime), что обеспечивает низкий уровень теплопроводностных и диффузионных потерь. Измерения показали, что в первой фазе ЭЦР нагрева в отсутствие взаимодействия со стенкой профили давления электронной компоненты плазмы не являются самосогласованными.

Далее происходит быстрый переход (менее чем за 400 мкс) в квазистационарную фазу разряда (фаза 2). В фазе 2 в плазме открывается дополнительный канал потерь, связанный с появлением интенсивного потока частиц и энергии на стенку (теплопроводность и диффузия). В результате включаются механизмы самосогласования плазмы, и она стремится к установлению канонических профилей давления [1]. Однако внешнее воздействие ЭЦР нагрева препятствует установлению в точности канонических профилей давления. Поэтому в фазе 2 профили давления близки к каноническим (но не совпадают с ними) [2].

После выключения импульса СВЧ нагрева плазма остывает при постоянной плотности. При остывании плазмы можно выделить еще две фазы. В фазе 3 механизмы самосогласования продолжают действовать, и, в отсутствие внешних воздействий на плазму, она релаксирует к каноническим профилям давления электронной компоненты. Из экспериментальных данных, полученных на токамаках, известно, что канонические профили устанавливаются за времена меньшие десятой доли энергетических времен жизни ($\Delta t < 0{,}1\ \tau_E$) [3]. А падение энергосодержания в фазе 3 происходит за времена порядка энергетического времени жизни. Поэтому при остывании в фазе 3 можно считать, что плазма проходит через последовательность состояний, характеризуемых каноническими профилями давления. При этом мощность энергетических потерь минимальна для данной установки [3]. На основании экспериментальных данных для стелларатора Л-2М получена следующая зависимость минимальной мощности потерь в фазе 3 от энергосодержания и плотности: $P_{\text{loss}}(W) \sim W^3 \cdot n_e^{-2}$. Отметим, что полученная экспериментально зависимость $P_{\text{loss}}(W,\ n_e)$ для фазы 3 является фундаментальной для стелларатора Л-2М, поскольку она характеризует удержание плазмы с помощью магнитной системы данной установки.

Когда край плазмы остывает, третья фаза плавно переходит в четвертую, когда периферия плазмы охлаждается и плазма вновь перестает контактировать со стенкой. Вследствие этого потери за счет теплопроводности значительно уменьшаются. В фазе 4 радиационные потери становятся основными.

Литература

[1]. Ю.Н. Днестровский. Самоорганизация горячей плазмы, М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013.
[2]. A.I. Meshcheryakov, I.A. Grishina, I.Yu. Vafin, Bull. Lebedev. Phys. Inst. **48**, 101 (2021).
[3]. K.A. Razumova, V.F. Andreev, L.G. Eliseev, et al., Nucl. Fusion **51**, 083024 (2011).

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЛАЗМЕ СТЕЛЛАРАТОРА Л-2М

[1,2]Васильков Д.Г., [1]Хольнов Ю.В.

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: lhdlhd81@mail.ru;
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.072

Рассматривается структура плазменного шнура в стеллараторе Л-2М при различных условиях разряда. Анализ структуры возмущений производится с помощью набора электростатических (ленгмюровских) и магнитных зондов, расположенных в различных фланцах вакуумной камеры установки и разнесенных в тороидальном и полоидальном направлениях. Анализируется эволюция возмущений магнитного (B_{fl}) и электрического полей (измеряется плавающий потенциал плазмы V_f) в импульсах с кратковременными транспортными переходами (длительностью ~200 мкс) [1], проводится сравнение данных до и после переходных процессов.

На основании анализа спектров B_{fl} и $V_{f,}$ а также спектров корреляций между ними можно сделать вывод, что при переходном процессе в плазме происходит транформация МГД-мод (в диапазоне частот 20 - 40 кГц на краю плазмы наблюдается мода m/n = 2/1, при частотах 80 - 110 кГц на краю плазмы развиваются высокие моды m/n = 3/2, 4/3); в момент перехода частотная и пространственная структура мод меняется [2].

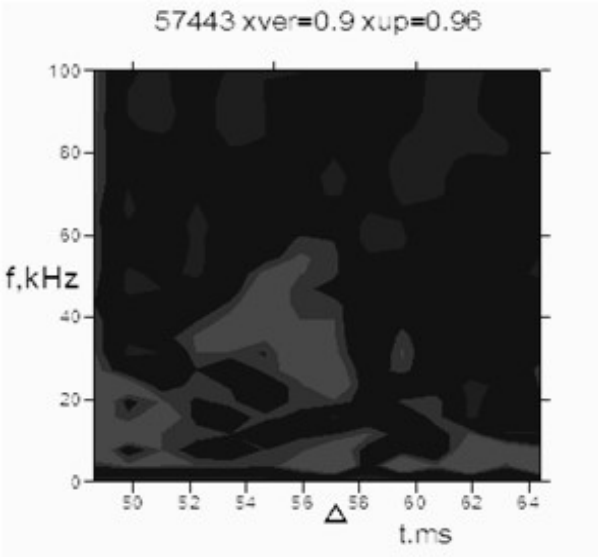


Рис. 1. Вейвлет-спектр корреляции между сигналами V_f с зондов, разнесенных на π/2 в тороидальном и на π в полоидальном направлениях. Треугольником отмечен момент транспортного перехода.

Наблюдаемая до перехода высокая когерентность между B_{fl} и V_f, а также между сигналами V_f с разных зондов, позволяют предположить, что до перехода токи, возбуждаемые на крайних рациональных магнитных поверхностях в диапазоне частот 20 - 40 кГц, возбуждают флуктуации плазмы, что приводит к уходу электронов и к положительному плазменному потенциалу V_p. Уменьшение турбулентности после перехода приводит к уменьшению ухода электронов, т.е. падению положительного потенциала [3].

Установлено, что разряд характеризуется положительным потенциалом V_f, что соответствует положительному V_p, при транспортном переходе наблюдается уменьшение амплитуды V_f. Поскольку положительный плазменный потенциал означает преимущественный по сравнению с ионами уход электронов, после перехода возможно два эффекта - улучшение удержания электронов и резкие потери ионов на краю. Если улучшение удержания электронов может быть связано с уменьшением флуктуаций, то быстрый уход ионов может быть связан с эффектом взаимодействия плазмы со стенкой.

Литература

[1]. Shchepetov S.V. et al., Plasma Phys. Control. Fusion **50**, 045001 (2008).
[2]. Щепетов С.В. и др. Физика плазмы, 2018, Т. 44, № 6, с. 469–474.
[3]. Васильков Д.Г. и др. Физика плазмы 2013, Т. 39, № 8, с. 694-703.

СОЗДАНИЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-11М ДЕЙСТВУЮЩЕЙ МОДЕЛИ ПОЛУЗАМКНУТОГО КОНТУРА ЦИРКУЛЯЦИИ ЛИТИЯ ДЛЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТОКАМАКА

[1]Мирнов С.В., [2]Вертков А.В., [2]Жарков М.Ю., [2]Курячий А.В., [2]Люблинский И.Е., [1]Джурик А.С, [1]Мурачев М.М., [1]Лазарев В.Б., [1]Джигайло Н.Т., [1]Лешов Н.В., [1]Чекушин Р.В., [1]Кравчук С.И., [1]Морозов В.А., [1]Антонов П.А., [1]Зорин А.В., [1]Васина Я.А., [1]Петрова Н.П.

[1]АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", г. Москва, округ Троицк, Россия, e-mail: mirnov@triniti.ru
[2]АО «Красная Звезда», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.073

Использование лития для защиты внутрикамерных элементов токамака капиллярно-пористыми системами (КПС) с жидким литием впервые примененное нами на российском токамаке Т-11М (1999 г), продемонстрировало важные эффекты: существенное снижение уровня тяжелых примесей в горячей водородной плазме и, соответственно, уменьшение ее эффективного заряда $Z_{эфф}$ до значений близких к 1, что, как известно, принципиально необходимо для нормального функционирования токамака-реактора. Эта литиевая технология, развитая в результате совместной деятельности АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» и АО «Красная Звезда» на токамаке Т-11М в период 1999-2010 гг, получила продолжение - она была успешно использована: на токамаках Т-10, FTU (Италия), испанском стеллараторе TJ-II и предполагает в дальнейшем использование на токамаках Т-15МД и КТМ (Казахстан). Однако по мере этого движения и нарастающего расхода лития одно из главных технологических преимуществ принятой нами схемы – автономное литиевое питание КПС-элементов, ограничивающих контакт плазма- стенка, потребовало нового решения. А именно, замену их питающих бачков, изготовляемых с ними заодно, и заполняемых литием до постановки в камеру, на некое устройство, позволяющее в ходе эксперимента их дозаправку извне разрядной камеры без нарушения вакуума. Тем самым снялось бы ограничение на длительность литиевого эксперимента. Соединение такого устройства с системой сбора «лишнего лития», позволяющее его периодическое удаление без нарушения в камере вакуумных условий, могла бы обеспечить квазистационарный режим работы токамака-реактора с относительно короткими перерывами для дозаправки его литием и разгрузки. Действующая модель такого устройства была создана на базе токамака Т-11М и успешно прошла плазменные испытания. В представленной работе обсуждаются детали этого эксперимента и результаты проведенных испытаний.

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ»

SECTION «INERTIAL FUSION»

САМОСОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА БЕЗ ЭМПИРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ДЛЯ МНОГОПУЧКОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ МИШЕНИ

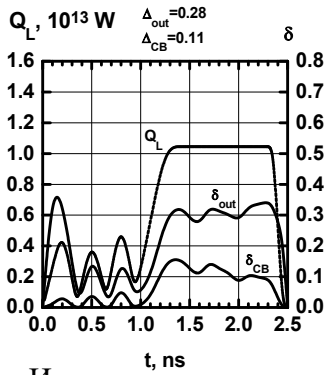
Демченко Н.Н.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: demchenkonn@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.074

Одной из разновидностей вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) является рассеяние во встречных электромагнитных волнах [1]. При наклонном падении встречной волной является волна рефрагировавшего в плазме излучения, в том числе излучения от других лазерных пучков при многопучковом облучении сферической мишени. Такой вид ВРМБ был назван СВЕТ (crossed-beam energy transfer) [2]. В [2] предложена модель расчета СВЕТ где вместо полей суммируются интенсивности излучения и вводится эмпирический фактор. Такие факторы универсальностью не обладают. Это создает проблему для использования модели при различных экспериментальных условиях.

В настоящей работе предлагается модель СВЕТ без эмпирических факторов. Основным в модели является выделение областей в плазме и лазерном пучке, которые приводят к эффективному трехволновому взаимодействию. Акустическая волна при этом должна быть близкой к плоской волне, т.е. размер возмущения плотности в поперечном к акустическому волновому вектору $\boldsymbol{k}_a$ направлении должен значительно превосходить длину акустической волны. При многопучковом облучении сферически симметричной плазмы единственным видом возмущений плазмы, удовлетворяющим этому требованию, являются возмущения с $k_{ar} >> k_{an}$ (k_{ar} – радиальная компонента вектора $\boldsymbol{k}_a$, k_{an} – компонента в перпендикулярном к радиусу направлении). К такому виду возмущений приводит сложение полей от частей пучков, расположенных вблизи оптической оси: $0 < p < p_k$, где p – прицельный параметр луча, p_k выбирается из условия $dr_t/r_t d\alpha_t = 1$, где $r_t(p)$ и $\alpha_t(p)$ – сферические координаты точки поворота луча с прицельным параметром p, угол α_t отсчитывается от оптической оси пучка. При $k_{ar}>>k_{an}$ основной вклад в рассеяние дает небольшая окрестность точки $M = 1$, где $M = (u\text{-}dr_c/dt)/c_s$ – число Маха, u – скорость плазмы, $r_c(t)$ – зависимость от времени радиуса критической поверхности, c_s – скорость звука. Возникает второе ограничение на область прицельных параметров: $0 < p < p_M$, где p_M – прицельный параметр луча, у которого в точке поворота $M = 1$. В остальной области плазмы возмущения плотности будут иметь вид ячеек с размером около половины длины электромагнитной волны. Из-за фазовых сдвигов между волнами уровень возмущений будет значительно меньше, чем при суммировании интенсивностей. Можно говорить лишь о слабом диффузном рассеянии излучения на такой структуре. Модель использована в программе RAPID [3]. Расчет энергетического баланса для условий эксперимента OMEGA [2] (мишень – сферическая оболочка из CH толщиной 25 мкм при внешнем радиусе 430 мкм, импульс $Q_L(t)$ показан на рисунке) дал результаты близкие к экспериментальным значениям. На рисунке: δ_{out} – общая доля вышедшего из плазмы излучения, δ_{CB} – доля СВЕТ-рассеяния, Δ_{out} и Δ_{CB} – интегральные по импульсу значения.



Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-02-00299а).

Литература

[1]. Н.Н. Демченко, В.Б. Розанов. ЖЭТФ, т. 103, с. 2008 (1993).
[2]. I.V. Igumenshchev, W. Seka, D.H. Edgell, et al., Phys. Plasmas, v. 19, 056314 (2012).
[3]. Ю.В. Афанасьев, Е.Г. Гамалий, Н.Н. Демченко и др. ЖЭТФ, т. 79, с. 837 (1980).

ГЕНЕРАЦИЯ УЗКОНАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В ПЛАЗМОФОКУСНОМ РАЗРЯДЕ - ОТКРЫТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аблесимов В.Е., Малькин А.Г., Пашарина О.Ю.

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия,
e-mail: ablesimov@elph.vniief.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.075

Результаты обработки зависимостей от времени сигналов сцинтилляционных детекторов в условиях измерений в помещении ограниченных размеров и моделирование этих временных зависимостей методом Монте-Карло свидетельствуют о наличии в плазмофокусном разряде особого процесса генерации узконаправленного по оси плазмофокусного устройства пучка ДД-нейтронов, дополняющего два общеизвестных процесса – термоядерный и ускорительный «луч-мишень».

Моделирование методом Монте-Карло формирования сигнала сцинтилляционного детектора для конкретных условий эксперимента позволило воспроизвести временную картину зависимости сигнала, совпадающую с соответствующими особенностями экспериментальной осциллограммы. При моделировании рассматривалась суперпозиция двух независимых источников нейтронов – анизотропного по модели «луч-мишень», генерирующего нейтроны во всех направлениях, и узконаправленного (narrowly focused) нейтронного пучка с угловой расходимостью 3^{o} между осью устройства и образующей конуса.

Анализ результатов измерений и моделирования сигнала детектора позволил оценить количественные характеристики узконаправленного по оси плазмофокусного устройства пучка нейтронов. Интегральный выход узконаправленного пучка может быть сравним с интегральным выходом за счет других механизмов генерации нейтронов в ПФ и оценивается в рассмотренных измерениях величиной $\sim 10^{10}$ нейтрон/разряд. Длительность генерации узконаправленного пучка нейтронов не превышает нескольких десятков наносекунд. Угловое расхождение пучка оценивается величиной $\pm(3^{o} - 5^{o})$ от оси плазмофокусного устройства.

Моделирование особенностей экспериментальных осциллограмм не привязано к описанию результатов в конкретном разряде, а демонстрирует и объясняет единственно возможную причину возникновения (формирования) зарегистрированных результатов измерений.

Рассматриваются возможности других методик измерений в исследовании характеристик процесса генерации узконаправленного пучка нейтронов.

О РАБОТАХ В.Б. РОЗАНОВА ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ УСТОЙЧИВОСТИ СЖАТИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ МИШЕНЕЙ ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА (К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

Змитренко Н.В.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.076

В этом году (11 декабря) исполнилось бы 90 лет выдающемуся учёному, физику, заложившему одним из первых основные принципы осуществления «инерционного термоядерного синтеза», ИТС или ICF (Inertial Confinement Fusion). Сама идея осуществления УТС (управляемого термоядерного синтеза) на основе использования энергетики мощных лазеров (Когерентное излучение! Высокая интенсивность!) была высказана в 1964 году Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным. Технически обоснованная и принципиальная (!) возможность реализации этой фундаментальной идеи требовала детального анализа всех физических процессов, обеспечивающих выделение энергии за счёт осуществления реакций термоядерного синтеза, превышающей вложенную лазером в рассматриваемую систему. Принципиальным шагом в осуществлении этой идеи явился переход от концепции одного только нагрева термоядерного топлива к концепции его существенного сжатия. Это потребовало построения конструкции мишени, имеющей вид тонкой (1% толщины) оболочки, подвергаемой воздействию облучения лазера (по возможности, сферически симметричного). Кумуляция такой тонкой оболочки к центру симметрии представляет собой заведомо неустойчивый процесс, любые, сколь бы они ни были малыми вначале, нарушения симметрии будут развиваться, и, теоретически это можно предположить, исключат возможность высокого сжатия вещества в центре мишени. Наряду со всеми другими важными проблемами воздействия лазерного излучения непосредственно на сферическую оболочечную мишень, такими, как эффективность поглощения энергии лазера в мишени, её преобразования в тепловую энергию создаваемой плазмы или в энергию быстрых ускоренных, благодаря лазерным механизмам передачи энергии, частиц (в первую очередь, электронам) ключевую роль играют вопросы развития гидродинамических неустойчивостей. Характерный в то время для рассматриваемых ситуаций и определяющий принципиальные постановки задач математического моделирования подход был сформулирован В. Б. Розановым. В докладе представлены исходные положения и основные результаты этих исследований, приведших к формулировке принципиальной и оригинальной теории развития гидродинамических неустойчивостей в процессе имплозии лазерных мишеней.

ПОРИСТАЯ СТРУКТУРА МАЛОПЛОТНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ - ПОЛИМЕР-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХСШИТОГО ПОЛИ-АЛЬФА-МЕТИЛСТИРОЛА

Пастухов А.В., Акунец А.А., Перваков К.С., Кувшинов И.Р., Громов А.И., Борисенко Н.Г.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: avpast@gmail.com

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.077

В настоящее время критически важным для мировой промышленной энергетики является создание новых экологически чистых источников электроэнергии большой мощности. Одним из таких ожидаемых источников энергии является инерциальный термоядерный синтез. В связи с этим исследования, связанные с разработкой новых материалов для инерциального термоядерного синтеза (ИТС) важны как для фундаментальной науки, так и перспективных задач энергетики России. В данной работе описаны новые малоплотные композитные материалы для лазерных мишеней. Наноструктурированные материалы получены по методике синтеза сверхсшитых полимеров при введении в реакционную массу углеродных наноматериалов - терморасширенного графита (ТРГ) (4,5 масс. %) и углеродных нанотрубок (0,4 масс.%). Синтез полимерных сеток проведен по реакции Фриделя-Крафтса при сшивании в 1 % растворе дихлорэтана макроцепей поли-альфа-метилстирола бис-хлорметилдифенилом. Проведены подробные структурные исследования синтезированных композитов методами электронной микроскопии и сорбции инертных газов, азота и диоксида углерода. Установлено, что плотность и пористая структура получаемых композитов зависит от состава реакционной смеси и главным образом, от используемого метода высушивания (термодесорбция воды, лиофильная сушка от бензола, высушивание в сверхкритическом диоксиде углерода). Полученные при сверхкритической сушке из CO_2 образцы-блоки имеют плотность около 80 - 100 мг/см^3 благодаря развитой пористой структуре с удельной поверхностью нанопор до 1000 м^2/г. Микро-мезопоры размером 1,4 - 5,3 нм (рис. 1а) занимают от 17 до 82%, а ультрамикропоры размером 0,5 - 0,8 нм (рис. 1б) 2 - 3% от суммарного объема всех пор до 150 нм в малоплотных композитных материалах. В результате исследований полученных композитов методами СЭМ и сорбции газов обнаружен эффект образования полимер-углеродной фазы в композитном материале на основе сверхсшитого поли-альфа-метилстирола и терморасширенного графита. Эффект обусловлен формированием наноструктурированной полимерной сетки в результате внедрения мономера и хлорида олова в частицы терморасширенного графита.

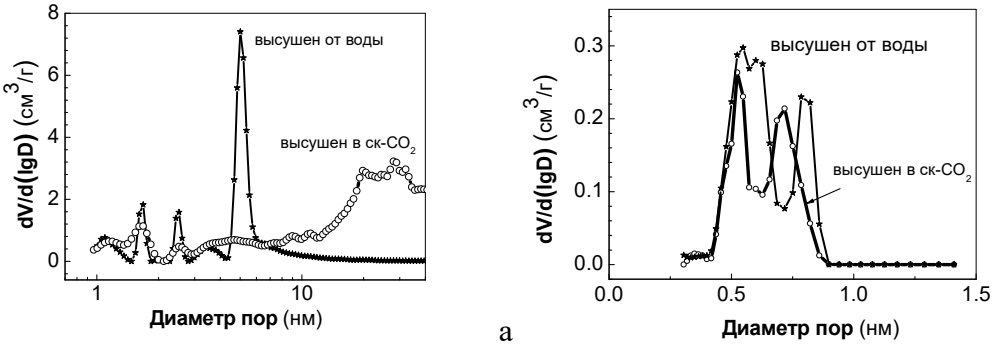


Рис. 1. Дифференциальное распределение пор по размерам. Композит с ТРГ: (а) - по данным сорбции N_2 (QSDFT, slit/cyl., equ.), (б) - по данным сорбции CO_2 (NLDFT, ads.).

КОЛЬЦЕВАЯ СИСТЕМА ВТСП-МАГЛЕВ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО УСКОРЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ МИШЕНЕЙ: РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Александрова И.В., Акунец А.А., Гаврилкин С.Ю., Иваненко О.М., Корешева Е.Р., Кошелев Е.Л., Мицен К.В., Никитенко А.И., Тимашева Т.П., Цветков А.Ю.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: koreshevaer@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.078

В рамках программы инерциального термоядерного синтеза (ИТС) ранее была показана возможность построения линейного ускорителя ВТСП-МАГЛЕВ для реализации бесконтактной доставки топливных криогенных мишеней в фокус лазера [1, 2]. В данном докладе представлены результаты новых исследований по бесконтактному ускорению ВТСП-носителя мишени с помощью кольцевой системы ВТСП-МАГЛЕВ, в том числе:

1. Проведены измерения магнитного момента M высокотемпературных сверх-проводников (ВТСП) типа СуперОкс с температурой сверхпроводящего перехода Tc = 92 К. Измерения M проводились в полях 0,01; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; и 8,0 Тл на много-функциональной установке PPMS-9 в режиме ZFC («zero-field cooled» или «охлаждение в нулевом поле»). Показано, что величина модуля M увеличивается на 1 - 2 порядка в зависимости от значения магнитного поля при снижении температуры образца от 85 до 10 К. В частности, при B = 1 Тл и T = 83 К величина |M| = 0.0077 emu, а при T = 10 К |M| = 1.14 emu, что в 148 раз больше.
2. Построена ВТСП-МАГЛЕВ система, в состав которой входит кольцевой неодимовый магнит (размеры 100 x 50 x 5 мм^3, магнитное поле B = 0.13 Тл), укрепленный внутри ферромагнитной вставки (размеры 105x44x3 мм^3). ВТСП-носитель мишени выполнен из ленты СуперОкс в виде замкнутого параллелепипеда размером (30 x 4 x 4) мм^3. При T = 80 - 85 К ВТСП-носитель помещался над магнитной системой и приводился в движение под действием сил гравитации. Исследования показали, что ВТСП-носитель находится в состоянии устойчивого бесконтактного движения над поверхностью магнита вплоть до достижения некоторой скорости (скорость «срыва» с траектории, V_{out}), значение которой определяется параметрами ВТСП-МАГЛЕВ системы: величиной $K = B \times dB/dx$ и величиной модуля M, причем чем больше |M|, тем меньшие K требуются для удержания заданной скорости. При K = 3000 мТл^2/мм экспериментально измеренная скорость «срыва» ВТСП-носителя составила V_{out} = 1,2 м/с (T = 85 К).
3. Проведены расчеты скорости «срыва» ВТСП-носителя с круговой траектории при температурах 80 - 85 К, которые хорошо согласуются с экспериментом. Показано, что для значения K = 3000 мТл^2/мм величина V_{out} > 1,2 м/с (T = 85 К). Учитывая значительный рост |M| при понижении температуры, величина V_{out} для K = 3000 мТл^2/мм может достигать значений ~100 м/с при доставке мишеней в камеру ИТС ($T \simeq$ 18 К).

Полученные результаты уникальны и позволяют перейти от макетных экспериментов к созданию опытного образца кольцевого ускорителя, схема которого также обсуждается в докладе. Применение такого ускорителя позволит существенно снизить габариты системы бесконтактной доставки топливных мишеней в камеру ИТС.

Литература

[1]. Aleksandrova I.V., et al., J. Russ. Laser Res. **39** (2), 140-155 (2018).
[2]. Александрова И.В. и др. *Способ доставки криогенной топливной мишени для управляемого инерциального термоядерного синтеза, система и носитель.* Патент РФ № 2727925 от 27.07.2020 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПО ОТНОСТЕЛЬНЫМ ИНТЕНСИВНОСТЯМ ЛИНИЙ ArXVII МЕТОДАМИ ПОИСКА ПО СЕТКЕ

Баронова Е.О.

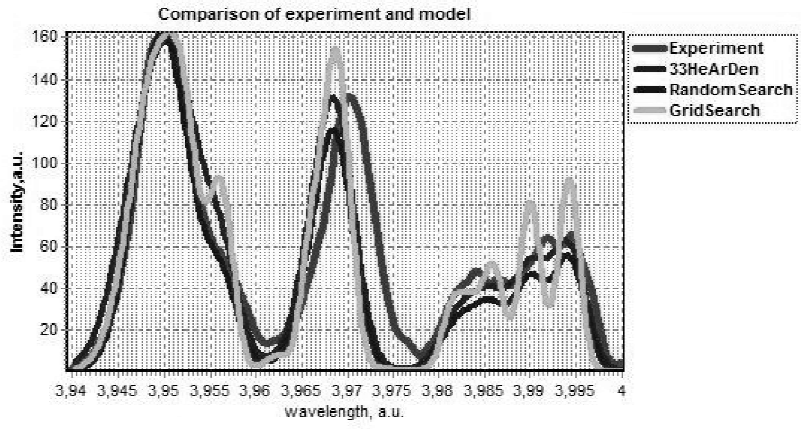
НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: baronova04@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.079

Относительные интенсивности линий гелиеподобных ионов используются для определения электронной плотности и электронной температуры плазмы. В таких установках как, например, токамак, плазменный фокус, стелларатор и т.д. в камеру, наполненную дейтерием, добавляется небольшое количество газа (неона, аргона, ксенона) в качестве диагностической добавки. Диагностический газ ионизуется в разряде, причем, чем выше его атомный номер, тем более высокая температура требуется для ионизации газа до гелиеподобного состояния и, следовательно, более горячую область плазмы можно диагностировать. Например, ионы ArXVII присутствуют в плазме с температурой 400 - 3000 эВ, что соответствует параметрам современных установок по исследованию возможности реализации термоядерного синтеза.

Метод оценки параметров плазмы основан на сравнении расчетного и экспериментально измеренного спектров. Как правило, оценка выполняется вручную: выбирается набор тестируемых значений параметров, для него строится расчетный спектр, графики расчетного и экспериментально измеренного спектров сравниваются на глаз, затем процедура повторяется для другого набора. Такой процесс требует времени, причем не всегда удается добиться оптимального совпадения расчетного и экспериментального спектров.

В данной работе разработан численный код, позволяющий автоматизировать процесс определения параметров плазмы. На основе существующего модуля расчета интенсивностей линий создан модуль, реализующий методы регулярного и случайного поиска параметров по сетке. Данный модуль минимизирует суммарное среднеквадратичное отклонение интенсивностей для контрольных значений длин волн, что субъективно соответствует степени похожести графиков спектров. В качестве примера на рис. 1 показан спектр Ar XVII, эмитированный плотной высокотемпературной плазмой установки плазменный фокус с током разряда 500 кА, а также расчетные спектры для параметров, полученных перебором вручную и с помощью численного кода.



Применение созданного кода позволило на два порядка снизить время поиска параметров плазмы. Предложенная методика особенно актуальна в случаях необходимости быстрой обработки результатов эксперимента в процессе эксплуатации установок. Алгоритм численного кода находится в процессе доработки, в том числе планируется создание интерфейса, удобного для экспериментаторов.

СРАВНЕНИЕВОЗМОЖНЫХ КОЛИЧЕСТВ И ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА В Z-ПИНЧАХ И УСТАНОВКАХ ТОКАМАК

[1]Вихрев В.В., [1]Баронова Е.О., [2]Фролов А.Ю.

[1]НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, e-mail: vikhrev@mail.ru
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, e-mail: alexeyfrolov92@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.080

В работе проведен теоретический анализ и дано сравнение методов нагрева плазмы до термоядерных значений в Z-пинчевых установках и установках типа токамак [1, 2]. Показано преимущество получения ядерных реакций синтеза в результате Z-пинчевого сжатия по сравнению с методами, используемыми на современных установках типа токамак.

Теоретическое сравнение возможных количеств и интенсивностей ядерных реакций синтеза этих систем стало возможным из-за того, что ранее токамаки имеют начало их происхождения от экспериментов с линейными Z-пинчами, на которых впервые было получено нейтронное излучение из плазменных систем [2, 3]. В дальнейшем развитие Z-пинчевых разрядов и создание тороидальных камер пошло в разных направлениях: исследования по токамакам были направлены на создание стационарного ядерного реактора, а Z-пинчи на создание мощного импульсного источника нейтронного излучения. В теоретическом же плане моделирование разрядов Z-пинчах и токамаках происходит в рамках одной и той же физики и с помощью одних и тех же уравнений. Отличие составляет только то, что при моделировании разрядов в токамаках часто пренебрегают нестационарными явлениями в плазме, а в Z-пинчах импульсные процессы в плазме составляют основу для этих систем. К таким явлениям относится пинчевой нагрев плазмы за счет сжатия ее магнитным полем разряда и возникновение при этом МГД–неустойчивости, приводящей к генерации высокоэнергичных ионов [4 – 6].

В настоящее время подтверждено то, что нейтроны в Z-пинчах происходят в результате термоядерной реакции синтеза и для них возникает только проблема использование этой плазмы для получения электрической энергии. Для токамаков эта же проблема также до конца не решена. Проблему же нагрева плазмы в токамаках можно решить таким же образом, как она решена в Z-пинчевых установках – т.е. нагреть плазму за счет использовании энергии магнитного поля, создаваемого наличием разрядного тока в плазме.

Нейтронный выход в Z-пинчах пропорционален току в четвертой степени и в экспериментах, выполненных на установке Z-пинч (США, лаборатории Сандиа) он составил 2×10^{12} термоядерных D-D нейтронов за импульс при токе 19 МА [7]. В современных установках токамак нейтронный выход за разряд значительно меньше. Это указывает на предпочтение использовать для создания УТР разряды типа Z-пинч по сравнению с разрядами типа токамак. (стабилизированными продольным магнитным полем).

Литература

[1]. Арцимович Л.А., Управляемые термоядерные реакции, М: Атомиздат, 1961.
[2]. Петров Д.П., Филиппов Н.В., Филиппова Т.И., Храбров В.А., Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, 1958, т. 4, с. 170.
[3]. Брагинский С.И., Шафранов В.Д., Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, 1958, т. 2, с. 126.
[4]. Schluter A., Zeitschrift fur Naturforschung **12a**, 822 (1957).
[5]. Вихрев В.В., Мариненко-Маренков А.Д., Физика плазмы 2012, т. 38, с. 251.
[6]. Vikhrev VV., Baronova E.O., Dodulat E.I., Frolov A.Yu. Chirkov A.Yu., in *Proc. of the 11th International Conference on Dense Z-Pinches, Beijing, 2019*, p. 82.
[7]. Gomez M.R., et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 155003 (2014).

КОЛЛАЙДЕР КОМПАКТНЫХ ТОРОВ

Мозговой А.Г.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия;
ООО «Знаю Как», г. Москва, Россия, e-mail: mozgovoy@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.081

Компактный тор – это осесимметричная конфигурация с замкнутым витком с током в плазме. Английское название FRC -- Field Reversed Configuration.

Основным преимуществом таких торов является возможность их ускорения и сжатия внешним магнитным полем для использования в инерциальном термоядерном синтезе, а также в электрических ракетных двигателях или для коллективного ускорения ионов.

Основная идея коллайдера на компактных торах в формировании двух торов с их последующим ускорением на встречу друг другу.

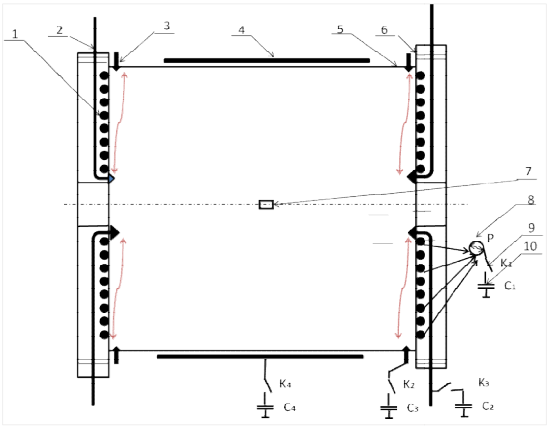
Компактные торы получали с помощью тета-пинчей в Новосибирском ИЯФе, позднее в ТРИНИТИ, Сухумском ФТИ. В США - в Ливерморе, Лос Аламосе. В настоящее время две частные компании Tri Alpha Energy (освоено 800 млн. дол. +50 млн. от Роснано) и Helion Energy (получено в 2021 г. 500 млн. дол.) ведут исследования по УТС с помощью FRC.

Используемый ими способ формирования FRC с помощью тета-пинча не эффективен-ток в компактном торе всегда мал, но к 2024 году обещано выдать энергию в сеть.

Нами предложен новый способ формирования компактных торов в индуктивных накопителях [1]. Энергия магнитного поля накапливалась в двух индуктивностях в виде многозаходных намоток, типа спирали Архимеда, размещенных на фланцах вакуумной камеры. Перед максимумом тока в накопителе плазма инжектировалась в этот объем и затем принудительно этот ток обрывался с помощью взрывающихся проволочек.

При обрыве тока в накопителе, в плазме возникает замкнутый токовый виток, захватывающий большую часть магнитного потока (более 70 процентов) и сохраняющий запасенную в магнитном поле энергию. Два формирующихся витка с одинаковым направлением тока начинают притягиваться друг к другу. При их столкновении происходит нагрев плазмы и вспышка мягкого рентгеновского излучения.

Использовалось семь независимых конденсаторных батарей и разрядников (всего 60 конденсаторов, К-5-40, зарядное напряжение 20 - 26 кВ, энергозапас до 100 кДж).



Ток в FRC по оценкам достигал несколько десятков килоампер, диаметр - 30 см. Температура плазмы в месте столкновения превысила несколько кэВ и длительность импульса мягкого рентгеновского излучения - около 1 микросекунды, т.е. на три порядка выше чем на знаменитой Z-machine. Подписи на рис: 1 – индуктивные накопители, 2 – высоковольтные электроды, 3 – плазменные пушки, 4 – витки для радиального сжатия плазмы, 5 – вакуумная камера диаметром 310 мм, 6 – торцевые фланцы с индуктивными накопителями, 7 – датчик магнитного поля в центре камеры, 8 – прерыватель тока на взрывающихся проволочках, 9 – разрядники К1-К4 (показана половина) 10 – конденсаторные батареи С1-С4. (половина)

Литература

[1]. A.G. Mozgovoy, I.V. Romadanov, and S.V. Ryzhkov, Formation of a compact toroid for enhanced efficiency, Phys. Plasmas **21**, 022501 (2014).

ИЗМЕРЕНИЕ ТОРМОЗНЫХ ПОТЕРЬ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА С ЭНЕРГИЕЙ 100 кэВ/а.е.м. В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

Гаврилин Р.О., Хурчиев А.О., Канцырев А.В., Высоцкий С.А., Колесников Д.С., Голубев А.А., Рудской И.В., Волков В.А., Дроздовский А.А., Куйбеда Р.П., Федин П.А., Савин С.М., Кузнецов А.П.

ИТЭФ, НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.082

Изучение процессов торможения тяжелых заряженных частиц в плазме относится к фундаментальным проблемам физики плазмы и физики высокой плотности энергии в веществе. Интерес, ввиду недостатка экспериментальных данных, представляет исследование взаимодействия тяжелых ионов с энергий от 40 до 500 кэВ/а.е.м. с сильно ионизованной низкотемпературной плазмой [1, 2]. В докладе представлены результаты экспериментов по торможению ионов Fe^{+2} с энергией 100 кэВ/а.е.м в водородной плазме. Для создания плазмы использована сильноточная газоразрядная мишень [3]. Данная мишень позволяет генерировать плазму с максимальной линейной плотностью свободных электронов $N_{fe} = (6{,}6 \pm 0{,}7) \times 10^{17}$ см$^{-2}$ и степенью ионизации $\alpha = 0{,}35 \pm 0{,}01$. Параметры плазмы определены методом лазерной интерферометрии с квадратурной фоторегистрацией [4]. Выполнены спектроскопические измерения свечения водородной плазмы сильноточного разряда с временным разрешением, которые показали, что примесные линии появляются через 10 мкс после начала разряда импульса тока и, следовательно, не влияют на процесс торможения ионов в водородной плазме в первые 1,5 мкс от начала разряда. Экспериментальная установка для определения тормозных потерь [5] создана на базе тяжелоионного линейного ускорителя ТИПр-1 в ИТЭФ. Для определения потерь энергии ионов в плазме применяется время-пролётная методика с базой 1,23 м, используется высокочастотная (27 МГц) микроструктуры ионного пучка ускорителя. В качестве детектора пучка ионов был использован сапфировый сцинтиллятор (Al_2O_3) совмещенный с фотоэлектронным умножителем. При помощи системы автоматизации сбора данных и созданного программного кода обработки были получены данные по торможению ионов в плазме для разрядного напряжения в диапазоне 2 - 5 кВ и начальных давлениях водорода 1 - 4 торр. Среднее значение тормозной способности свободных электронов составило S_{fe}= (546 ± 45) МэВ/(мг/см^2). Вклад связанных электронов был учтен исходя из ранее определенной степени ионизации плазмы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 18-02-00967 и гранта РФФИ 18-02-00967 А.

Литература

[1]. C. Deutsch, et al., Open Plasma Phys. J. **3**, 88-115 (2010).
[2]. R. Cheng, Y. Zhao, A. Golubev, R. Gavrilin, D. Hoffmann et al. Study of the slow ion beam penetrating the low density plasma target, J. Phys.: Conf. Ser. **488**, 092005 (2014).
[3]. A. Golubev, et al., Nucl. Instr. Methods Phys. Res., Sect. A **464**, 247 (2001).
[4]. A. Kuznetsov, O. Byalkovskii, K Gubskii, R. Gavrilin, et.al., Plasma Phys. Rep. 39, 248-254 (2013).
[5]. R.O. Gavrilin, et al., "Ion stopping in hydrogen plasma experiment at linear accelerator at ITEP", GSI Report 2018-2, p. 34

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ СЖАТИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ Z–ПИНЧЕЙ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ ПЛАЗМЫ

[1]Волков Г.С., [1]Грабовский Е.В., [1]Грицук А.Н., [1]Комаров Г.Л., [2]Рупасов А.А., [1]Фролов И.Н., [1]Хилько М.В.

[1]АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия, e-mail: volkov@triniti.ru
[2]ФИАН, г. Москва, Россия, e-mail: rupasov@sci.lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.083

В работе представлены результаты экспериментов по увеличению удельной концентрации энергии плазмы сильноточных Z-пинчей за счет использования различных режимов сжатия. Эксперименты проводились с каскадными многопроволочными цилиндрическими нагрузками на установке «Ангара-5-1» с током в нагрузке до 3 МА. В экспериментах использованы нагрузки, как с уменьшенной индуктивностью на финальной стадии сжатия пинча, так и нагрузки, позволяющие реализовать переходной режим сжатия от каскадной схемы к схеме композитного Z-пинча. При сжатии каскадных сборок, имеющих уменьшенную индуктивностью на конечной стадии сжатия, получена удельная мощность мягкого рентгеновского излучения порядка 5 ТВт/см, что соответствует мощности излучения с пинча стандартной длины 1,6 см на уровне 8 - 9 ТВт. Удельный выход мягкого рентгеновского излучения составил ~150 кДж/см. Динамика сжатия нагрузки и высокий выход полной излученной энергии позволяет сделать вывод о существенной роли во взаимодействии каскадов сборки магнитного поля внутреннего каскада. Показано, что в переходном режиме сжатия от каскадной сборки к композитному Z-пинчу, внешняя сборка из материала с относительно невысоким атомным номером (Al) обеспечивает высокую плотность потока кинетической энергии (~5 ТВт/см^2), а внутренняя сборка малого диаметра из материала с высоким атомным номером (W) позволяет существенно повысить мощность излучения. Получение высокой мощности излучения в таком режиме сжатия, во-первых, связано с уменьшением времени передачи энергии от более легких ионов алюминия, имеющих высокую температуру при термализации ускоренной внешней оболочки, к электронам. Во-вторых, увеличению мощности излучения способствует рост электронной концентрации в пинче, за счет высокой концентрации ионов алюминия.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20-02-00133.

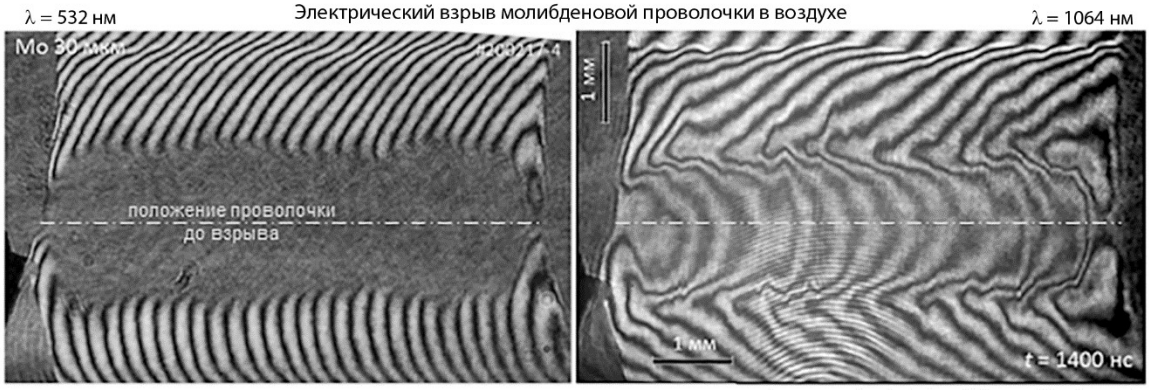
ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ ДВУХДЛИННОВОЛНОВОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Романова В.М., Тиликин И.Н., Тер-Оганесьян А.Е., Мингалеев А.Р., Шелковенко Т.А., Пикуз С.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: romanovavm@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.084

Исследование электрического взрыва тонких металлических проволочек в воздухе и в вакууме с помощью лазерного зондирования на двух длинах волн (λ_1 = 1064 нм и λ_2 = 532 нм) показало, что сценарий процесса может кардинально отличаться от широко распространённого, который часто связывают почти исключительно с быстрым испарением металла и с последующим пробоем образовавшегося пара. Основным механизмом ослабления просвечивающего излучения в продуктах взрыва считается при этом его поглощение или рефракция на границах плотности. В представленных экспериментах по взрыву микронных проволочек наблюдалось существенное возрастание прозрачности исследуемого объекта с увеличением длины волны зондирования, что может быть обусловлено только рассеянием зондирующего излучения [1, 2]. В результате было доказано, что продукты взрыва состоят не только из пара вещества проволочек, как это полагалось ранее многими авторами, но и содержат значительное количество малых, менее ста нанометров, частиц, рассеяние на которых подчиняется рэлеевской зависимости от длины волны ($\sim\lambda^{-4}$). Мелкодисперсная среда способна оказывать существенное влияние и на результаты интерферометрических измерений. Многократное рассеяние лазерного пучка при его прохождении через вещество, содержащее микронные частички, приводит к частичной или полной потере когерентности излучения, что неизбежно сказывается на качестве итоговой интерференционной картины. Контрастность полос при наличии данного эффекта может снизиться вплоть до их исчезновения. Чтобы избежать ошибочной интерпретации полученных результатов, фактор рассеяния должен обязательно приниматься в расчёт в исследованиях по электровзрыву тонких проволочек.



Литература

[1]. V. Romanova, G.V. Ivanenkov, E.V. Parkevich et al., Laser scattering by submicron droplets formed during the electrical explosion of thin metal wires, J. Phys. D: Appl. Phys. **54**, 175201 (2021).

[2]. В.М. Романова, И.Н. Тиликин, А.Р. Мингалеев и др., Наблюдение эффектов рассеяния лазерного излучения в продуктах взрыва тонких молибденовых проволочек, Физика плазмы, т. 48, № 2 (2022).

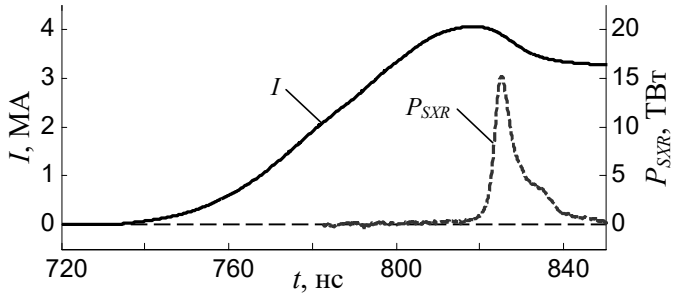
ПРОФИЛИРОВАНИЕ И ОБОСТРЕНИЕ ИМПУЛЬСА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИМПЛОЗИИ ДВУХКАСКАДНЫХ СБОРОК СМЕШАННОГО СОСТАВА

Митрофанов К.Н., Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Олейник Г.М.

АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия, e-mail: mitrofan@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.085

Представлены результаты экспериментов по исследованию сжатия плазмы двухкаскадных многопроволочных сборок смешанного состава и генерации мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ), проведенных на мощной электрофизической установке Ангара-5-1 при уровне разрядного тока до 4 МА. Основываясь на последних экспериментальных данных об интенсивности плазмообразования различных веществ $\dot{m}$ (в мкг/(см^2·нс)) [1] и об особенностях динамики сжатия плазмы во вложенных сборках [2], разработана конструкция двухкаскадного лайнера, позволяющая получать высокую пиковую мощность МРИ по сравнению с оптимальными (по мощности излучения) конструкциями одиночных и вложенных вольфрамовых проволочных сборок. За счет подбора веществ с различной величиной скорости плазмообразования удалось уменьшить уровень магнитогидродинамических неустойчивостей на финальной стадии сжатия внутренней сборки. Благодаря этому удалось сократить длительность импульса излучения и повысить мощность МРИ. При имплозии вложенных сборок смешанного состава, состоящих из пластиковых волокон и вольфрамовых проволок, получены более короткие и мощные импульсы МРИ с максимальным значением пиковой мощности $P_{SXR}^{max} \sim$ 10 ТВт длительностью на полувысоте $FWHM \sim 5$ нс по сравнению с параметрами импульсов МРИ при сжатии одиночных вольфрамовых сборок: $PSXR^{max} \sim 5$ ТВт и $FWHM \sim 10$ нс. Таким образом, в условиях наших экспериментов показана возможность двухкратного увеличения пиковой мощности МРИ при сжатии вложенных сборок путем оптимизации их конструкции [3]. Последние эксперименты показывают, что возможно достижение прогнозируемого предела пиковой мощности МРИ вплоть до 15 ТВт для вложенных сборок, представленной конструкции.



Временные зависимости полного тока I и импульса мощности МРИ P_{SXR}.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 20-02-00007, № 18-29-21005 и № 20-21-00082).

Литература

[1]. *Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В. и др.* // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 12. С. 1059-1093.

[2]. *Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грицук А.Н. и др.* // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 2. С. 157-192.

[3]. *Митрофанов К.Н., Александров В.В., Браницкий А.В. и др.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 10. С. 887–920.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ПЛАЗМЫ НИКЕЛЯ, СОЗДАННОЙ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ АБЛЯЦИИ ТОНКИХ ФОЛЬГ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧА

[1]Александров В.В., [1]Браницкий А.В., [1]Грабовский Е.В., [1]Грицук А.Н., [1]Митрофанов К.Н., [1]Олейник Г.М., [1]Фролов И.Н., [2]Баско М.М., [2]Сасоров П.В., [2]Соломянная А.Д., [2]Вичев И.Ю., [2]Грушин Ф.С., [2]Ким Д.А., [1]Родионов Н.Б., [3]Родионова В.П.

[1]АО ГНЦ РФ "ТРИНИТИ", г. Москва, Россия, e-mail: griar@triniti.ru
[2]ИПМ имени М.В. Келдыша, г. Москва, Россия, e-mail: pavel.sasorov@gmail.com
[3]ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, e-mail: V.Rodionova@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.086

Токовая имплозия в генераторах сверхвысокой электрической мощности позволяет получать высокотемпературную плотную плазму Z-пинчей, которая является источником мощного теплового излучения и широко применяется в экспериментах по физике высокой плотности энергии. Для создания высокотемпературной плазмы и исследования ее спектральных свойств в проведенных на установке Ангара-5-1 экспериментах как источник импульсного излучения используется Z-пинч мощностью 5 - 10 ТВт с длительностью 7 - 10 нс, образующийся при имплозии вольфрамовых многопроволочных сборок. При этом излучение Z-пинча нагревает мишень и превращает ее в горячую плазму в течение половины импульса. Во второй половине импульса излучение пинча зондирует плазму мишени для определения спектральной зависимости коэффициента пропускания этой плазмы. Предложена оригинальная схема измерения падающего на мишень излучения, прошедшего и собственного излучения мишени одновременно в одном эксперименте в кадровом режиме с помощью дифракционного спектрографа скользящего падения. С помощью лазерного теневого зондирования схема позволяет получить экспериментальные данные о скорости движения плазмы на облучаемой и тыльной сторонах мишени, которые достигали 100 км/с. Были исследованы мишени из тонких слоев Ni, напыленных на майларовую пленку. Наблюдалось индуцированное облучением многократное увеличение коэффициента пропускания мишени в ВУФ-диапазоне по сравнению с пропусканием мишени в твердом состоянии. Численное моделирование нагрева, расширения и собственного излучения мишени, облучаемой Z-пинчом, проводилось при помощи двумерного радиационного газодинамического кода RALEF-2D [1]. Код RALEF рассчитывает движение плазмы в рамках двумерной гидродинамики с учетом теплопроводности и спектрального переноса теплового излучения. Перенос излучения рассматривается в рамках стационарного уравнения переноса с рассчитанными по коду THERMOS спектральными пробегами фотонов, считая функцию источника планковской. Для описания уравнений состояния в коде RALEF используется модель FEOS [2]. Также была исследована зависимость спектра поглощения плазмы и сопутствующего собственного излучения мишени от мощности и формы падающего импульса. В диапазоне ~40 - 200 Å форма спектральной зависимости коэффициента пропускания в эксперименте и расчете аналогичны, но величина модельного коэффициента пропускания плазмы (~0,8 – 0,9) больше, чем полученная с помощью спектрографа и многокадрового рентгеновского регистратора (~0,5 – 0,6).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 18-29-21005 мк, № 20-02-00007, № 20-21-00082) и ЧУ «Наука и инновации».

Литература

[1]. M. M. Basko, J. Maruhn, and A. Tauschwitz, J. Comput. Phys. **228**, 2175 (2009).
[2]. S. Faik, M. M. Basko, A. Tauschwitz, I. Iosilevskiy, J. A. Maruhn, High Energy Density Phys. **8**, 349 (2012).

ПРОДОЛЖЕНИЕ РАБОТ И ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МАЛОПЛОТНЫМ НАНОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ СЛОЯМ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ ИТС

Громов А.И., Акунец А.А., Борисенко Н.Г, Пастухов А.В., Толоконников С.М.

Физический институт им П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия.
e-mail: gromovai@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.087

Исследуем ряд предложений по технологии изготовления мишеней для целей прямого и непрямого лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) и достижения по методам их изготовления и мониторинга. Интерес к работам определяется важностью подобных мишеней для современных лазерных установок. Проблема изготовления и измерений малоплотных нанометаллических слоёв с плотностью в несколько раз и даже на порядки меньше плотности сплошных материалов того же состава стала как востребованной, так и необходимой.

Использование мишеней с дополнительными слоями из наночастиц металла позволяет решить значительное количество задач в установках ИТС: таких как повышение устойчивости сжатия, Увеличение конверсии лазерного излучения в рентгеновское, повышения нейтронного выхода, а также в целях диагностики.

Данные слои используются и в виде конструкционных слоёв мишеней.

Технология изготовления и контроля подобных слоёв требует продолжительной разработки и осмысления полученных результатов [1.2]. Проводился анализ использования подобных слоёв по результатам экспериментов ИТС [3-5].

Для правильной интерпретации результатов экспериментов разработан комплексный прецизионный мониторинг подобных слоёв [3].

Почти всегда необходимо и можно проводить термическое упрочнение слоёв из наночастиц металла [4] для более удобной транспортировки и для работы в камере взаимодействия с лазерным излучением. Разрабатываются приёмы изменения плотности по толщине слоя, что является важным для ряда экспериментов.

Работы с малыми и микро-количествами используемых веществ в ограниченном пространстве составляют особенность и трудность представляемых методик.

Полученные результаты применяются в проводящихся экспериментах и дорабатываются для будущих исследовании ИТС.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-02-00875.

Литература

[1]. I.V. Akimova, A.A. Akunets, L.A. Borisenko, et al., Metal produced as nano-snow layers for converters of laser light into X-ray for indirect targets as intensive EUV sourses, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **299** (2), 955-960 (2014).

[2]. I.V. Akimova, A.A. Akunets, N.G. Borisenko. et al" Metal nano-particles modernized layers, including those with polymers, for laser thermonuclear fusion targets" *J. Phys.: Conf. Ser.* **907**, 012018 (2017).

[3]. N.G. Borisenko, S. Chaurasia, L.J. Dharishwar, et al., Comparison of laser light conversion efficiency into x-ray solid bismuth and in low-density bismuth, Preprint No. 29 (FIAN, Moscow, 2011).

[4]. Chanprint Kaur, S. Chaurasia, N.G. Borisenko, A.I. Gromov, A.A. Akunets, G.V. Sklizkov, G.A. Vergunova and S.Y. Gus'kov, Demonstration of gold plasma as bright x-ray source and slow ion emitters, *Plasma Phys. Control. Fusion* **61**, 084001 (2019).

[5]. N.G. Borisenko, A.A. Akunets, L.A. Borisenko, A.I. Gromov, A.S. Orekhov, A.V. Pastukhov, V.G. Pimenov, S.M. Tolokonnikov, G.V. Sklizkov, "Noisy" low-density targets that worked as bright emitters under laser illumination, J. Phys.: Conf. Ser. **1692**, 012026 (2020).

ДИНАМИКА ПОСТУПЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ПЛАЗМУ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

Панфилов Д.Г., Грабовский Е.В., Ефремов Н.М., Ильичева М.В., Крылов М.К., Лаухин Я.Н., Лотоцкий А.П., Николашин А.А., Серяков А.Г., Сулимин Ю.Н.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, Россия, e-mail: panfilov@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.088

Повышенный выход рентгеновского и нейтронного излучения при больших разрядных токах в установках плазменного фокуса возможен при согласовании источника питания и массовых характеристик токовой плазменной оболочки (ТПО), образующейся при первичном пробое по поверхности межэлектродного изолятора. Одним из препятствий термоядерному способу генерации нейтронов (адиабатическому сжатию) может быть присутствие в зоне сжатия плазмы элементов с большим зарядовым числом Z. Представляет интерес вопрос о возможном поступлении примесей в дейтериевую плазму с поверхности изолятора, а также с поверхности электродов при разгоне и кумуляции токовой оболочки.

На установке ПФ МОЛ (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») проведены исследования динамики поступления примесей в газовый разряд при зарядных напряжениях до 12 кВ и разрядных токах до 700 кА [1]. В спектроскопических измерениях использованы спектрограф с дифракционной решеткой 600 линий на мм и электронная видеокамера SDU3-250S с разрешением ПЗС матрицы 2,0 х 2,4 тыс. пикселей и минимальной экспозицией 1,5 мкс. В экспериментах применялись предварительное заполнение камеры дейтерием и импульсная инжекция дейтерия с помощью быстродействующего газового клапана [2]. Проведены съемки спектров в начальной стадии разряда (0 – 3 мкс) при наблюдении вдоль межэлектродного зазора через торцевое окно камеры. Спектры зоны фокусировки пинча фотографировались через боковое окно. При этом оптическая ось располагалась перпендикулярно оси системы на расстоянии 1 см от торца анода. Время наблюдения составляло от –1 до +1 мкс от момента пинчевания.

Результаты экспериментов выявили небольшое количество примесей, исходя из интенсивности спектральных линий относительно линий рабочего газа дейтерия. Основные из них по ступеням ионизации это C II – C IV, O II, N II, Al II, Cu I. При переходе от предварительного заполнения камеры к импульсному напуску дейтерия в полностью откачанную камеру элементный состав примесей не изменялся.

При наблюдении области у торца анода линии меди и других элементов появлялись в спектре плазмы через 1 мкс после особенности тока. Поэтому можно предположить, что примеси, захваченные на этапе ускорения плазмы, не попадают в зону пинчевания из-за меняющейся конфигурации ТПО на стадии сжатия.

Литература

[1]. Крылов М.К., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Ефремов Н.М., Лотоцкий А.П. и др. Магнитозондовые измерения параметров движущейся токовой оболочки на установке ПФ МОЛ. XLVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 16 – 20 марта 2020 г. с. 128.

[2]. Лотоцкий А.П., Грабовский Е.В., Лукин В.В. и др. Динамика токовой оболочки в самосжимающемся плазменном разряде с дополнительной инжекцией газа, ВАНТ, 2022 (в печати).

РАСЧЕТЫ ПРОФИЛЯ ПЛОТНОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ИНЖЕКЦИИ РАБОЧЕГО ГАЗА В КАМЕРУ ПФ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

[1]Галанин М.П., [2]Грабовский Е.В., [2]Ефремов Н.М., [2]Крылов М.К., [2]Лаухин Я.Н., [2]Лотоцкий А.П., [1]Лукин В.В., [2]Николашин А.А., [2]Серяков А.Г., [2]Сулимин Ю.Н., [2]Панфилов Д.Г.

[1]ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва, Россия, e-mail: lukin@keldysh.ru
[2]АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия, e-mail: lototsky@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.089

В электроразрядной системе Плазменный Фокус профилированное распределение плотности газа, заполняющего камеру, позволяет оптимизировать условия образования осесимметричной ТПО с условиями кумуляции плотного пинча при максимальной величине тока. Первичный пробой по поверхности межэлектродного изолятора происходит при ограниченных (1 - 5 торр) давлениях заполнения, в то время как при увеличении тока пропорционально квадрату его величины должна возрастать масса ТПО. Профилирование плотности по пространству камеры путем внешней импульсной инжекции газа неоднократно использовалось ранее, например, [1]; однако оптимизация режимов работы такой системы требует полной информации о формирующих потоках газа, геометрии течений, отражений от стенок и т.п. Большое значение при этом имеет характер истечения газа из рабочего объема клапана при изменении проходного сечения после подачи управляющего импульса. Проведены расчеты заполнения камеры установки ПФ-МОЛ [2] с разрядным током до 750 кА при использовании импульсного клапана с электродинамическим приводом, срабатывающим за время 300 мкс при давлениях 5 - 40 бар. Второй аспект решаемой задачи – расчет взаимодействия инжектированного дейтерия с инертным газом, стационарно заполняющим камеру. Полагалось, что осесимметричная ТПО организуется на газе малой плотности, который может обжимать дейтерий в пинче подобно тяжелому лайнеру. Показано, что при быстрой инжекции дейтерий может полностью вытеснять ксенон (или любой другой газ) из локальной зоны пинча. При этом граница перемешивания газов остается относительно тонкой, предотвращающей перемешивание газов до прихода ТПО. Такой расчетный режим был экспериментально смоделирован в камере установки ПФ-МОЛ с использованием гелия (вместо ксенона). При токе 550 кА получен нейтронный выход 2 10^9/имп. При обращении газов (инжекция гелия в дейтерий) нейтронный выход был близок к фоновому значению, что подтверждает выводы расчетов. А также дает надежду на реализацию установки ПФ с токами, превышающими 2,5 – 3,0 МА и нейтронным выходом более 10^{12} в Д-Д варианте.

Литература

[1]. Д.А. Войтенко, С.С. Ананьев, Г.И. Астапенко и др., Физика плазмы, 2017, т. 43, № 12, с. 967–982.

[2]. Е.В. Грабовский, А.Н. Грибов, М.К. Крылов и др. Динамика токовой оболочки в самосжимающемся плазменном разряде с дополнительной инжекцией газа, ВАНТ, 2022 (в печати).

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ИОНОВ В Z-ПИНЧАХ НА ОСНОВЕ МГД-НЕУСТОЙЧИВОСТИ

[1]Фролов А.Ю., [2]Вихрев В.В.

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, e-mail: alexeyfrolov92@yandex.ru
[2]НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия, e-mail: vikhrev@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.090

Генерируемые Z-пинчами ионные струи характеризуются энергетическим спектром, существенно отличающимся от Максвелловского. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют, что в плазме, вытекающей из перетяжки Z-пинча, спектр ионов dN/dE_d имеет обратную степенную зависимость с показателем степени $2 \div 4$ [1]. Причём с увеличением энергии этот показатель уменьшается.

Нейтроны, генерируемые в дейтериевых и дейтерий-тритиевых Z-пинчах, также имеют свои особенности. Энергетическая анизотропия, определяемая разностью энергий порядка долей МэВ, не может являться следствием гидродинамических процессов в плазме Z-пинча. Ширина энергетических спектров нейтронов для DT плазмы составляет сотни кэВ [2], что значительно больше ширины, соответствующей Максвелловскому распределению ионов в плазме - десятки кэВ [3]. Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют о наличии в Z-пинчах механизма увеличения энергии ионов.

Считается, что основным свойством, определяющим особенности Z-пинча, является наличие у него МГД-неустойчивости. Вследствие сильно развивающегося сжатия, в Z-пинче происходит уменьшение характерных времён гидродинамических процессов до времени, определяющего процесс термализации плазмы. Исходя из чего, в Z-пинче разделяют гидродинамическую и негидродинамическую стадию развития. Показано, что в негидродинамической стадии создаются условия для неравномерного ускорения ионов в зависимости от их энергии [4]. Моделирование упруго взаимодействующих частиц в быстро сжимающейся цилиндрической стенке также показало, что имеются предпосылки для формирования распределения, существенно отличающегося от Максвелловского в области высоких энергий [5]. В работе [6] описан гиро-релаксационный эффект, из которого следует, что в плазме можно создать условия, при которых будет происходить увеличение энергии преимущественно ионной компоненты, минуя электроны.

Данная работа посвящена исследованию механизмов ускорения ионов в Z-пинчах. Исследование проводилось на основе численного решения уравнения Фоккера - Планка для дейтериевой плазмы, сжимающейся магнитным полем. Условия задачи приближены к экспериментам. Из результатов следует, что увеличение длины пробега высокоэнергетических ионов в плазме приводит к тому, что они начинают взаимодействовать, преимущественно, с магнитным полем Z-пинча. Посредством этого, отдельно взятый ион ускоряется, не теряя энергию вследствие ион-ионных взаимодействий. В итоге справедливо, что в Z-пинче имеется механизм передачи энергии от магнитного поля напрямую к ионной компоненте, причём к её высокоэнергетической составляющей. Основой этого механизма является наличие в Z-пинче МГД-неустойчивости.

Литература

[1]. Вихрев В.В., Королёв В.Д., Физика плазмы, 2007, т. 33, № 5, с. 397-423;
[2]. Гаранин С.Ф., Долинский В.Ю., Макеев Н.Г. и др., Физика плазмы, 2020, т. 46, № 10, с. 890-903;
[3]. Усенко П.Л., Гаганов В.В., Молодцев Д.А., Физика плазмы, 2020, т. 46, № 1, с. 33-39;
[4]. Гуреев К.Г., Физика плазмы, 1979, том 5, №6, с. 1223-1230;
[5]. Фролов А.Ю., Дружинина О.В., Чирков А.Ю., Электромагнитные волны и электронные системы, 2021, т. 26, № 5, с. 5-14;
[6]. Шлютер А., Управляемые термоядерные реакции. М.: Атомиздат, 1960, с. 142-151.

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ УДАРНАЯ ВОЛНА В ПЛАЗМЕ С ДОКРИТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

[1]Гуськов С.Ю., [1,2]Кучугов П.А., [1]Яхин Р.А.

[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,*
e-mail: yakhin.rafael@gmail.com
[2]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.091

Представлены результаты расчётно-теоретического исследования генерации и распространения плоской лазерно-индуцированной ударной волны в веществе с плотностью меньшей критической плотности плазмы. Развита модель явления, суть которого состоит в формировании за фронтом волны ионизации давления, обеспечивающего сверхзвуковое движение вещества со скоростью, превышающей скорость фронта волны ионизации. Установлены зависимости длительности и дистанции формирования ударной волны от интенсивности и длины волны воздействующего лазерного импульса, а также плотности вещества мишени. Они демонстрируют сильное увеличение продолжительности и расстояния образования ударной волны с уменьшением плотности вещества и длины волны воздействующего лазерного импульса. Продолжительность и расстояние образования ударной волны увеличиваются с уменьшением плотности вещества, соответственно, как $\rho^{-8/3}$ и ρ^{-3}. С уменьшением длины волны оба значения увеличиваются как λ^{-2}. Важной и интересной особенностью является то, что продолжительность и расстояние образования ударной волны увеличивается с увеличением интенсивности лазера, соответственно, как $I^{2/3}$ и I. Результаты обсуждаются для условий облучения мишеней с плотностью вещества вплоть до 0,1 мг/см^3 лазерным импульсом коротковолнового излучения 1 - 3 гармоник Nd-лазера с интенсивностью 10^{12} - 10^{15} Вт/см^2.

Результаты теории, подтвержденные численными расчетами, обосновывают возможность повышения давления при переходе ударной волны от менее плотного вещества к более плотному, а также для выбора и оптимизации параметров малоплотного поглотителя лазерного излучения мишеней инерциального термоядерного синтеза, способного обеспечить выравнивание неоднородностей облучения мишени конечным числом лазерных пучков. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-11-00102).

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ МИКРОКЛАСТЕРНОЙ МИШЕНИ, ОБЛУЧАЕМОЙ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

[1]Гожев Д.А., [1,2]Бочкарев С.Г., [1,2]Брантов А.В., [1,2]Быченков В.Ю.

[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: bochkarevsg@lebedev.ru
[2]Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, РОСАТОМ, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.092

К настоящему времени показано, что плотная микроструктурированная среда, облучаемая мощным лазерным излучением, является уникальным источником заряженных частиц (электронов и ионов), а также нейтронов и вторичного электромагнитного излучения [1, 2]. Микроструктурированные мишени поглощают лазерное излучение более эффективно, чем сплошные твердотельные мишени, например, фольги. Такой эффект достигается из-за конечного малого размера микроструктур, который, как правило, меньше или порядка длины волны падающего излучения. Примером таких мишеней, используемых в экспериментах и в теоретических моделях, являются среды, состоящие из сферических кластеров и капель, включая CO_2-кластеры [3], микро-кластеры из тяжелых атомов, например, ксенона [4], сверхмелкодисперсные пылевые среды (например, из золотых пылинок) [5], микрокапли тяжелой воды [6] и др. Для целенаправленного проведения экспериментов необходимо полное понимание того, какие характеристики мишени, и, в частности, размеры микроструктур, могут обеспечить наиболее эффективное взаимодействие с лазерным импульсом, что еще недостаточно изучено.

В настоящей работе с использованием трехмерного численного моделирования методом ”частица в ячейке” представлены результаты оптимизационных расчетов по нахождению параметров облучаемой среды, обеспечивающих её наилучший нагрев релятивистски-интенсивным ультракоротким лазерным импульсом. Оптимизация включает нахождение параметров, при которых достигается максимальный выход горячих электронов при облучении микрокластеров тяжелых атомов, повышенный выход синхротронного излучения рециркулирующих вокруг кластеров и блуждающих между ними электронов. В работе также определен максимальных выход быстрых дейтронов, инициирующих DD реакции, при лазерном облучении капель тяжелой воды. Даны оценки выхода термоядерных нейтронов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 17-12-01283.

Литература

[1]. Faenov A. Ya., Pikuz T. A., Y. Fukuda, et al., Contrib. Plasma Phys. **53**, 148 (2013).
[2]. Purvis M.A., et al., Nat. Photonics **7**, 796 (2013).
[3]. Bochkarev S.G., Faenov A., Pikuz T., Brantov A.V., et al., Sci. Rep. **8**, 9404 (2018).
[4]. Fukuda Y., Yamakawa K., Y. Akahane, et al., JETP Lett. **78**, 115 (2003).
[5]. Gozhev D.A., Bochkarev S.G. and Bychenkov V.Yu., JETP Lett. **114**, 200 (2021).
[6]. Ter-Avetisyan S., Schnurer M., Hilscher, et al., Phys. Plasmas 2005, **12**, 012702.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ТИПИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ТОКАМАКА Т-11М

Лешов Н.В., Мирнов С.В., Щербак А.Н.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк, Россия, e-mail: leshov@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.177

В работе исследуется возможность использования искусственной нейронной сети (ИНС) для предсказания электронной плотности в типичных разрядах токамака Т-11М. Дальнейшее сравнение предсказанной плотности для конкретных параметров разряда и реально измеренной плотности позволит говорить о каких-либо особенностях поведения плазмы, таких как переход в другие режимы (Н-мода), проникновение в центр плазменного шнура примесей и т.д.

Ранее на других установках уже было продемонстрировано успешное использование ИНС для предсказания срывов в плазме [1] и моделирования различных параметров плазмы [2, 3], таким образом доказывая, что ИНС может описать зависимость между параметрами разряда (входными данными) и параметрами плазмы (выходными данными).

Для обучения ИНС, использовались данные экспериментальной кампании 2016 года, суммарно 851 разряд. Поскольку одним из основных параметров, непосредственно влияющих на плотность плазмы, является количество и временной сценарий напуска газа в вакуумную камеру токамака во время плазменного разряда, то в качестве входных данных для обучения ИНС использовались время открытия газового клапана, длительность его работы и давление газа перед клапанами. Выходные данные – это «сырой» сигнал электронной плотности, измеренный с помощью Коттон-Мутон поляриметра.

На рисунке 1 представлен пример сравнения средней электронной плотности для хорды -1 см во время разряда (разряд № 40246), рассчитанный по предсказанному и измеренному первичным сигналам интерферометра. В данном случае предсказанная плотность плазмы соответствует типичному разряду Т-11М для выбранных параметров разряда, при этом реально измеренная плотность плазмы демонстрирует спонтанный переход в Н-режим.

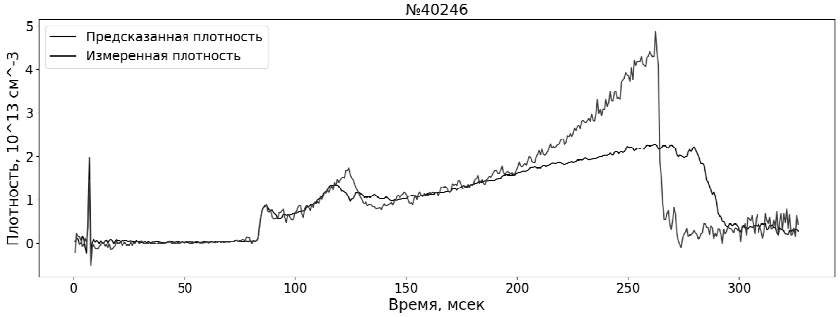


Рис. 1. Временная динамика предсказанной и измеренной средней электронной плотности для хорды -1 см в течение разряда (разряд № 40246)

В дальнейшем планируется применение более сложной модели, расширение данных, что позволит учесть и другие параметры разряда, влияющие на плотность плазмы, а также обеспечить вариативность состояния вакуумной камеры токамака (состояние стенки вакуумной камеры, наличие внутрикамерных устройств – лимитеров, инжекторов и т.п.).

Литература

[1]. Zheng W. et al. Nuclear Fusion, 2018, 58, 056016.
[2]. Hui L. I. et al. Plasma Science and Technology, 2021, 23, 115102.
[3]. Yang B. et al. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2020, 62, 075004.

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ»

SECTION «PHYSICAL PROCESSES IN LOW-TEMPERATURE PLASMAS»

РАСЧЁТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ВИСМУТА

Апфельбаум Е.М.

ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, e-mail: apfel_e@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.093

Уравнения состояния и электронные коэффициенты переноса необходимы для решения самых разных фундаментальных и прикладных задач физики плазмы, возникающих в процессах электровзрыва проводников или взаимодействия излучения или потоков частиц с веществом. Несмотря на сложности, которые возникают при проведении как экспериментов при высоких температурах, так и соответствующих им расчётов, в настоящий момент времени накоплено сравнительно много информации по этим свойствам для различных веществ при температуре выше 5 кК, что для металлов и полупроводников включает область низкотемпературной плазмы. Свидетельством тому являются обзоры [1 - 3], появившиеся недавно. Висмут, однако, стоит особняком среди остальных металлов, так как для этого элемента данные по теплофизическим свойствам в диапазоне температур $T \sim 10$ - 100 кК и плотностях ρ ниже нескольких г/см^3 практически отсутствуют.

Висмут обладает достаточно низкой температурой плавления T_m = 544,7 K, что обуславливает большое число измерений и расчётов для жидкого состояния, т. е. при $T > T_m$ и плотностях вблизи линии плавления (при T = 300 K плотность твёрдого Bi ρ_n = 9,79 г/см^3, а плотность жидкого Bi при $T = T_m$ составляет ρ_m = 10,05 г/см^3 , т.е. наблюдается обратное плавление). Это позволяет построить достаточно точные уравнения состояния [4] и даже оценить положение критической точки (~4 кК) [5]. При более высоких T уже более 60 лет проводятся ударно-волновые измерения [6], но они в большинстве своём, изучают сжатые состояния при $\rho > \rho_n$. При использовании пористых образцов можно попасть в область разряжения вплоть до $\rho \sim \rho_n/3$ [7], но таких работ существенно меньше и в них не измеряется напрямую температура. Современные первопринципные расчёты как уравнений состояния, так и электронных коэффициентов переноса так же ориентируются на области, соответствующие условиям ударно-волнового сжатия, т. е. при $\rho \sim \rho_m$ и выше [2, 3]. Таким образом, при сравнительно низких плотностях данные по рассматриваемым теплофизическим свойствам для Bi отсутствуют. Поэтому целью настоящей работы было рассмотреть именно эту область ($T \sim 10$ - 100 кК, $\rho < \rho_n/3$).

Ранее нами была разработана модель расчёта теплофизических свойств низкотемпературной частично ионизованной плазмы (с нейтральной компонентой) в указанной выше области. Она построена на химическом подходе и приближении времени релаксации и с успехом применялась к ряду металлов и полупроводников, см. [8, 9] и ссылки в этих работах. В настоящем исследовании она использовалась для аналогичных расчётов в плазме Bi. Сравнение с данными [7], которые находятся в рамках этой области, показало хорошее согласие между нашим расчётом и экспериментом.

Литература

[1]. Clerouin J., Noiret P. et. al., Phys. Plasmas **19**, 082702 (2012).
[2]. Grabowski P. E., Hansen S. B. et. al., High Energy Density Phys. **37**, 100905 (2020).
[3]. Militzer B., Gonzalez-Caltado F. et. al., Phys, Rev. E **103**, 013203 (2021).
[4]. Su C. et al., Physica B **524**, 154 (2017).
[5]. Апфельбаум Е. М., ТВТ, (2021) Т. 56, С. 507.
[6]. Al'tshuller L. V. et. al., Sov. Phys. JETP **24**, 614 (1958).
[7]. Glushak B. L., et al., Sov. Phys. JETP **69**, 729 (1989).
[8]. Apfelbaum E. M., Phys. Plasmas **27**, 042706 (2020).
[9]. Apfelbaum E. M., Contrib. Plasma Phys. **27**, 042706 (2021).

ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУППЫ ЖЕЛЕЗА

Шпатаковская Г.В.

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия, e-mail: shpagalya@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.094

Проанализированы имеющиеся данные [1] по потенциалам (энергиям) ионизации $I_{Ne}^{(Z)}$ (эВ) многозарядных ионов с числом электронов $Ne = 1-18$ для элементов группы железа с атомными номерами Z = 21, 25, 28. Анализ основан на квазиклассическом методе [2] выделения зависимости орбитальных энергий связи от атомного номера с помощью функции:

$$e_{Ne}(\sigma) = (I_{Ne}^{(Z)} / E_h) Z^{-4/3}, \quad \sigma = \pi Z^{-1/3}, \quad E_h = 27.211386\ eV. \qquad (1)$$

На рис. 1 в полулогарифмическом масштабе символами изображены эти данные, а линии соответствуют линейной аппроксимации для K и L оболочек ($i_{\max} = 1$) и квадратичной аппроксимации для M оболочки ($i_{\max} = 2$): $\lg e_{Ne} = \sum_{i=0}^{i_{\max}} a_i \sigma^i$. Таким образом оказывается возможно восстановить потенциалы ионизации остальных элементов группы железа по формуле $I_{Ne}^{(Z)} = Z^{4/3} 10^{\lg e_{Ne}(\sigma)} E_h$. Однако на практике более востребована информация о потенциалах ионизации ионов одного элемента в зависимости от числа электронов N_e в нем. Рис. 2 демонстрирует зависимость коэффициентов a_i от Ne в M оболочке. Аппроксимация монотонных фрагментов $a_i = \sum_{k=0}^{k_{\max}} b_{ik} Ne^k$, $\lg e_{Ne} = \sum_{i=0}^{i_{\max}} \sum_{k=0}^{k_{\max}} b_{ik} Ne^k \sigma^i$ и подобных зависимостей для K и L оболочек позволяет аналитическое описание энергий ионизаций 144 ионов с погрешностью порядка одного процента на основе небольшой таблицы коэффициентов b_{ik}.

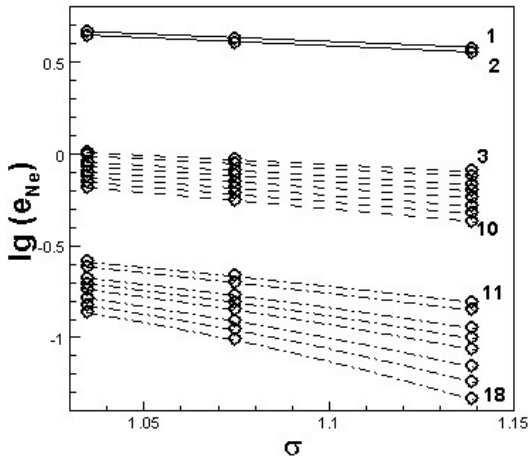


Рис.1

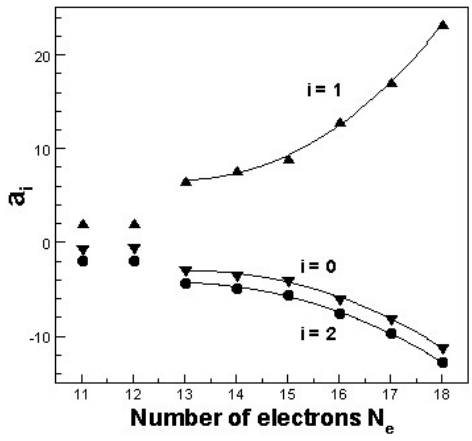


Рис.2

Литература

[1]. A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, and NIST ASD Team (2021). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.9), [Online]. Available: https://physics.nist.gov/asd [2021, November 6].

[2]. Г.В. Шпатаковская, УФН **189** 195 (2019).

СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТОВ ПВС С ОКСИДАМИ МОЛИБДЕНА И ТИТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ПОДВОДНОГО РАЗРЯДА, И ИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Сироткин Н.А., Хлюстова А.В., Титов В.А.

Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, г. Иваново, Россия, e-mail: alexsad8@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.095

Сенсибилизированные красителем солнечные элементы широко исследуются в настоящее время. Подобные элементы создаются в виде сэндвич-структур и содержат электролит, который играет роль восстановителя окисленных под действием света молекул красителя. При использовании солнечных элементов с жидкими электролитами возможны трудности, проявляемые в испарении и утечки электролита, что влияет на надежность ячеек. Эти проблемы могут быть решены с помощью квазитвердых электролитических полимеров. В последние годы изучается возможность создания для этих целей композиционных материалов на основе поливинилового спирта (ПВС).

В данной работе подводный импульсный разряд, инициируемый в водном растворе поливинилового спирта между металлическими (Mo или Ti) стержнями, применяется для получения наночастиц оксида металла и создания полимерных нанокомпозитов. Нанокомпозиты охарактеризованы методами атомно-силовой микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии, дифракции рентгеновских лучей. Детали эксперимента подробно описаны в [1].

Данные рентгеновского анализа показывают пики, относящиеся к ПВС, α-MoO_3 и TiO_2. В экспериментах по воздействию плазмы с титановыми электродами на раствор ПВС регистрируются пики, относящиеся к фазам анатаза и рутила. Смещение пика при 19.8º относительно исходного ПВС связано с сильным взаимодействием полимера с образовавшимися оксидными наноструктурами титана и молибдена. Наблюдения с помощью ПЭМ показали, что наночастицы равномерно диспергированы в матрице ПВС. Результаты ИК-спектроскопии демонстрируют наличие Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий между полимером и наночастицами. Показано существенное уменьшение значений ширины запрещенной зоны композитов для непрямых и прямых электронных переходов из-за наличия в нанокомпозитах областей с объемными гетеропереходами. Было обнаружено, что небольшая добавка (до 1.8%) наночастиц оксидов металлов в ПВС значительно улучшает его электропроводность. Для исследования фотоэлектрических свойств была создана солнечная ячейка, подобная описанной в работе [2]. Значения максимального фототока оказались несколько ниже по сравнению с данными, полученными для ячеек, не содержащих полимер. Это можно объяснить разным составом оксидных наночастиц и более низкой концентрацией допирующих наночастиц. Несмотря на это, значения плотностей тока короткого замыкания фотоэлементов с полимерными композитами выше, чем у фотоэлементов без ПВС. Таким образом, использование плазмы импульсного подводного разряда позволяет в одностадийном процессе получать нанокомпозиты, являющиеся перспективными материалами для изготовления солнечных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 21-73-00034).

Литература

[1]. Sirotkin N.A., Khlyustova A.V., Titov V.A., Krayev A.S., Nikitin D.I., Dmitrieva O.A., Agafonov A.V., Plasma Chem. Plasma Process. **40**, 571 (2020).

[2]. Khlyustova A.V., Sirotkin N.A., Titov V.A., Agafonov A.V., J. Alloys Compd. **858**, 157664 (2021).

Γ -ПРЕДСТАВЛЕНИЕ В КВАНТОВОЙ ОПТИКЕ И АНОМАЛЬНЫЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ОПЕРАТОРЫ

Векленко Б.А.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия, e-mail: VeklenkoBA@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.096

Рассматривается кинетика электромагнитного поля в протяженной среде из одновалентных атомов. Решение задачи методами полуклассической теории излучения, оперирующей с не квантованным электромагнитным полем и уравнениями Максвелла, в прикладных задачах часто оказывается достаточным. Полуклассическая теория излучения логически незамкнута, и потому поправки к ней получены быть не могут. Мы ставим целью обратить внимание на принципиально новые оптические процессы, предсказываемые последовательно квантовой теорией излучения.

Исследование, как обычно, проводится методом квантовых функций Грина с использованием формализма Л.В.Келдыша. В этом методе есть слабое место. В процессе вывода замкнутых уравнений для квантовых функций Грина корреляторы высших порядков путем использования термодинамического варианта теоремы Вика аппроксимируются комбинациями коррелляторов второго порядка. Это означает, что все физические процессы, определяемые высшими корреляторами, из рассмотрения выпадают, и мы получаем, как правило, результаты полуклассической теории излучения. Для исключения указанной проблемы нами предлагается метод Г-операторов, оперирующий не с отдельными фотонами, а с конгломератом $\mathbf{N} = ..., N_{\mathbf{k}\lambda}, ...$ фотонов в целом. Здесь $\mathbf{k}$ -волновой вектор, λ -индекс линейной поляризации, $N_{\mathbf{k}\lambda}$ -число фотонов в отдельной моде $(\mathbf{k}\lambda)$. Вектор $\mathbf{N}$ характеризует состояние фотонной подсистемы во многомерном фиктивном пространстве.

В указанном формализме удается выразить матрицу плотности фотонной подсистемы в виде $\rho = \mathrm{X}\mathrm{X}^{+} + \rho^{(n)}$, где $\mathrm{X}\mathrm{X}^{+}$ -часть матрицы плотности, допускающая представление через волновые функции X. Матрица $\rho^{(n)}$ описывает часть матрицы плотности, такого представления не допускающая. Функция X удовлетворяет уравнению $\mathrm{X} = \mathrm{X}^{0} + \hat{P}_r \mathrm{X}$, где X^{0} -волновая функция в отсутствие взаимодействия, $\hat{P}_r$ -запаздывающий во времени поляризационный оператор. Оказывается, что $\hat{P}_r = \hat{P}_r^{(n)} + \hat{P}_r^{(a)}$. Нормальный поляризационный оператор $\hat{P}_r^{(n)}$, с некоторыми поправками, отвечает за известные оптические процессы. Аномальный поляризационный оператор $\hat{P}_r^{(a)}$ отвечает за неизвестные оптические процессы, определяемые корреляторами высших порядков.

Определяющее функцию X уравнение имеет много решений. Эти решения зависят от функции X^{0}. Если в отсутствие взаимодействия $(\hat{P}_r^{(n)} = \hat{P}_r^{(a)} = 0)$ фотонная система состояла лишь из одной моды, то после включения взаимодействия в системе возникнет обладающая нулевой энергией и нулевой поляризацией связанная фотонная пара из противоположно направленных фотонов. Амплитуда этой пары определяется в первом приближении концентрацией возбужденных атомов и от концентрации атомов в нормальном состоянии не зависит. Если до включения взаимодействия в фотонной подсистеме были заполнены две противоположно направленные моды, то решение задачи принципиально меняется. Оно приобретает зависимость от концентрации атомов, находящемся в невозбужденном состоянии.

НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ РАЗВИТИЯ СВЧ РАЗРЯДА В ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДАХ

[1]Лебедев Ю.А., [1,2]Крашевская Г.В., [1]Батукаев Т.С., [2]Михайлюк А.В.

[1]Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва, Россия, e-mail: lebedev@ips.ac.ru
[2]Национальный ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.097

В последнее время интенсивно изучаются различные типы разрядов в жидкостях и, в частности, микроволновые разряды. Микроволновые разряды существуют в газовом пузыре в жидкостях и менее изучены. Эти разряды обладают свойствами, которые отличают их от широко используемых разрядов постоянного, высокочастотного и высокого напряжения. Их можно использовать для получения водорода, покрытий, наночастиц и нанотрубок, очистки воды и т. д. Микроволновая плазма в жидкостях представляет собой чрезвычайно интересный объект для исследования, поскольку она часто бывает неравновесной, неоднородной, с большими пространственными градиентами параметров. Плазма, как правило, нестационарна и существует в условиях постоянного обмена энергией и частицами с окружающей жидкой средой.

Настоящая работа является продолжением работ по изучению начальных стадий СВЧ-разряда в жидких углеводородах. Результаты первого этапа исследований опубликованы в [1]. Было показано, что СВЧ-разряд в жидких углеводородах нестационарен и представляет собой набор последовательных импульсных разрядов, распределенных случайным образом во времени. Форма и длительность импульсов различны. Длительность импульса в условиях эксперимента составляла от 0,5 до 1,0 мс, она уменьшается с увеличением падающей СВЧ мощности.

Приведены результаты исследования акустических явлений и изменения структуры СВЧ (2,45 ГГц) разряда в жидких углеводородах во времени. Разряд зажигался на конце антенны СВЧ с коническим или закругленным концом. Нефтяной растворитель Нефрас был выбран как представитель жидких углеводородов. Для исследования разряда использовались электретный микрофон и скоростная видеокамера. Было показано, что в случае конического конца антенны разряд все время прикреплен к острию конуса, тогда как в случае закругленного острия он движется вдоль острия антенны. Разряды в жидких углеводородах сопровождаются звуковыми эффектами, вызванными возбуждением ударной волны. При зажигании разряда, в газовой части реактора возникает совокупность акустических колебаний с частотами, соответствующими характерным колебаниям реактора.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНХС РАН.

Литература

[1]. Lebedev Y. A. et al. Light emission from microwave discharges in liquid hydrocarbons at the initial stages of their development, Plasma Processes Polym. **18**, 2100051 (2021).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМОТРОНА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Кузнецов В.Е., Дудник Ю.Д., Сафронов А.А., Ширяев В.Н, Васильева О.Б.

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.098

Особым преимуществом плазменных технологий является высокая скорость нагрева плазмообразующего газа и обрабатываемого материала, а также возможность достижения высоких значений энтальпии дуговой плазмы [1], что позволяет эффективно использовать их в ряде технических отраслей. Например, таких как получение новых материалов. Использование в плазмотроне различных плазмообразующих газов и их смесей существенно расширяет потенциальные возможности плазмохимической установки. Следует отметить, что смешивание различных газов в плазмотроне переменного тока, рассматриваемого в данной работе, возможно без его остановки и переналадки, что позволяет проводить широкий круг экспериментов без дополнительных затрат времени и ресурсов.

Так при добавлении в плазмообразующий газ (аргон) водорода или метана возможно увеличение эффективной мощности плазмотрона в несколько раз. Это может быть существенно для сокращения времени обработки и уменьшения дисперсии размеров частиц получаемого материала.

В работе рассматривается исследование конструкции плазмотрона переменного тока, основных рабочих параметров, их зависимостей и взаимовлияния. По опыту предыдущих экспериментов [2, 3] для успешного получения высокодисперсных тугоплавких материалов необходима мощность плазмотрона переменного тока порядка 5 кВт при изменении среднемассовой температуры плазменной струи в пределах от 1200К до 2200К и расходе рабочего газа до 1 г/сек. Изменение состава и использование смеси различных плазмообразующих газов позволит поддерживать оптимальные условия и температурные режимы в зоне реакции для получения частиц ультрадисперсного порошка (в том числе тугоплавкого) и регулировать уровень мощности установки в ходе эксперимента.

Конструкция экспериментальной установки включает в себя плазмотрон переменного тока, устройство подачи прекурсора (водный раствор солей металлов, порошок оксида вольфрама и др.), реакционный объем (плазмохимический реактор), сепаратор, узел закаливание и приемный контейнер. В реакционной камере нагретый плазмообразующий газ (смесь газов) смешивается с прекурсором, образуя целевой продукт, затем происходит его сепарирование, закалка и сбор.

Литература

[1]. Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н., Плазмотроны переменного тока. системы инициирования дуги. особенности конструкции и применения, Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 58-66.

[2]. Dudnik Y.D., Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Shiryaev V.N., Vasilieva O.B., Subbotin D.I., Popkov V.I., Plasma ways to obtain ultrafine oxides, J. Phys.: Conf. Ser. **1281**, 012127 (2019).

[3]. Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Dudnik Yu.D., Shiryaev V.N., Vasilieva O.B., Plasma way for oxide nanoparticles obtaining, J. Phys.: Conf. Ser. **1281**, 012066 (2019).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ: ТВЕРДОЕ ТЕЛО-ЖИДКИЙ ЭЛЕКТРОЛИТ

Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю.

Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия, e-mail; vchebakova@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.099

Низкотемпературная плазма разряда с жидкими электродами вызывает большой интерес в области фундаментальных и прикладных исследований. В силу большого разнообразия типов плазменных установок с жидкими электродами (это погруженные в жидкость 2 электрода; один электрод погружен в жидкость, второй над ее поверхностью; струйные электроды, и др.) возможен широкий диапазон их применения. Например, переход от углеводородной энергетики к водородной потребовал поиска рентабельных технологий производства водорода, одной из таких технологий стал метод плазменного электролиза. Также процесс горения газового разряда с жидкими электродами может служить новым методом получения металло-порошковых композиций.

В данной работе предложен метод решения обратных задач, возникающих при расчете констант скоростей приэлектродных стадийных реакций гетерогенных процессов в системах: твердое тело-жидкий электролит с выделением веществ как в газовой фазе, так и виде пористой пленки, порошка. Данный численный алгоритм позволяет находить скорости констант в приэлектродных процессах в соответствии с заданными экспериментальными данными по выходу, а также рассчитывать концентрации веществ, участвующих в приэлектродных процессах на конкретные моменты времени. Алгоритм реализующий обратную задачу базируется на численных методах оптимизации, тогда как решение системы кинетических уравнений, описывающих стадийные приэлектродные реакции в жидком электроде, решается методом Рунге - Кутта.

Проведена верификация данного метода путем сравнения результатов натурных экспериментов с расчетными данными полученными по математическое модели, описывающей выхода водорода в растворе гидроксида калия. Результаты численных исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными работы [1].

Так же для проверки численного алгоритма определения скорости осаждения твердого вещества на электроде на примере цинка, построена математическая модель осаждения цинка из раствора натрия в присутствии тетрагидроксоцинката натрия, данная математическая модель учитывает параллельные ветви стадийных реакций, это выделение водорода, и осаждение цинка. Цинк взят в приближении пористой пленки. Верификация данных проводилась по экспериментам работы [2].

Литература

[1]. Бабаев Р.К., Алиев С.А. Исследование кинетических закономерностей процесса получения водорода электролизом воды // Проблемы науки, 2018, № 4 (28), С. 31–33.

[2]. Yucheng Zhang, Jinxia Deng, Jun Chen, Ranbo Yu, Xianran Xing, The electrowinning of zinc from sodium hydroxide solutions, Hydrometallurgy, 2014, 146. pp. 59-63. ISSN 0304-386X.

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРЫХ ИОНИЗАЦИОННЫХ ВОЛН В НЕРАВНОМЕРНО ЗАПОЛНЕННЫХ ГАЗОМ ПРОТЯЖЕННЫХ КАПИЛЛЯРАХ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Елисеев С.И.

Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.100

Пробой газа в протяженных экранированных диэлектрических трубках под действием импульсов напряжения принимает форму волны ионизации, характеризующейся формированием локализованного фронта с высокой напряженностью электрического поля, распространяющегося от силового электрода к заземленному. Скорость распространения фронта зависит от скорости нарастания напряжения на силовом электроде, и может достигать значений порядка 10^9 см/с [1]. Последовательное описание волн ионизации может быть осуществлено с использованием одномерной аналитической модели, позволяющей получать автомодельные решения, описывающие структуры волны вдали от электродов [2]. Современные методы численного моделирования низкотемпературной плазмы и пробойных процессов позволяют существенно расширить возможности теоретического анализа волн ионизации, учитывать двумерный характер их распространения и многообразие сопутствующих элементарных процессов [3, 4].

В предлагаемой работе был осуществлен теоретический анализ прохождения волн ионизации при наличии продольного градиента плотности газа в трубке или капилляре. Интерес к подобной постановке задачи обусловлен исследованиями источников мягкого рентгеновского излучения на основе наносекундных капиллярных разрядов, в которых подобный градиент позволяет уменьшить долю поглощаемого в собственном газе излучения [5, 6]. Представлены результаты параметрического анализа влияния градиента плотности на динамику распространения волны ионизации и свойства плазмы, образующейся на стадии прохождения и после замыкания межэлектродного промежутка. Обсуждается применимость одномерной радиальной модели для описания параметров плазмы и газодинамики при умеренных амплитудах разрядного тока.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного фонда (грант № 20-72-00039).

Литература

[1]. Vasilyak L.M. et al. Fast ionisation waves under electrical breakdown conditions, Phys.-Usp. **37**, 247 (1994).

[2]. Asinovsky E.I., Lagarkov A.N., Markovets V.V., Rutkevich I.M., On the similarity of electric breakdown waves propagating in shielded discharge tubes, Plasma Sources Sci. Technol. **3**, 556 (1994).

[3]. Eliseev S.I. et al., Numerical investigation of dynamics and gas pressure effects in a nanosecond capillary sliding discharge, J. Appl. Phys. **125**, 143302 (2019).

[4]. Takashima K. et al., Experimental and modeling analysis of fast ionization wave discharge propagation in a rectangular geometry, Phys. Plasmas **18**, 083505 (2011).

[5]. Valdivia M.P. et al. Observations of the emission processes of a fast capillary discharge operated in nitrogen, Plasma Sources Sci. Technol. **21**, 025011 (2012).

[6]. Samokhvalov A. et al. Development of Gas-Discharge X-ray Sources for Nanotomography at “Burtsev Laboratory” LLC, in *Compact EUV & X-ray Light Sources, Washington, DC, 2020,* Paper JM3A.3.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Елисеев С.И.

Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.101

Отличительной особенностью тлеющих разрядов постоянного тока в протяженных трубках является их уникальная картина свечения, характеризующаяся чередованием темных и светлых областей [1]. Среди них обычно выделяют положительный столб, катодный и анодный слои, а также прикатодные плазменные области – отрицательное свечение и фарадеево темное пространство. Свойства прикатодных областей во многом определяются нелокальной ионизацией, производимой быстрыми электронами, поступающими из катодного слоя, и не зависящей от локальных параметров плазмы – концентрации и температуры медленных электронов или напряженности электрического поля [2]. По этой причине получение полной структуры тлеющего разряда постоянного тока в ходе самосогласованного расчета с неизбежностью требует то или иного способа учета нелокальной ионизации. Первоначально подобная задача была решена с использованием гибридного подхода, совмещающего гидродинамическое описание ионов и медленных электронов с процедурой Монте-Карло для расчета ионизации быстрыми [3]. Принципиальным недостатком такого подхода, остающимся актуальным и по сей день, является существенная сложность как в численной реализации модели, так и в непосредственном проведении расчетов. Перспективной альтернативой в этом смысле является использование в рамках гидродинамического подхода аналитической формулировки для источника нелокальной ионизации. Численная реализация такого подхода позволила получить надежные количественные оценки электрических и плазменных параметров короткого (без положительного столба) тлеющего разряда [4].

В данной работе мы показываем, что совмещение в рамках одной модели способов учета локальной и нелокальной ионизации позволяет быстро и эффективно воспроизводить полную структуру тлеющего разряда постоянного тока, включающую все основе области, а также получать надежные количественные оценки его параметров по всей длине разрядной трубки. Сопоставлением полученной таким образом структуры разряда с экспериментальной, по аналогии с вольт-амперными характеристиками, позволяет получать дополнительную информацию о ряде параметров, прямое измерение которых на эксперименте сопряжено с существенными техническими трудностями. Также обсуждается возможность использования аналитической формулировки источника нелокальной ионизации для построения полностью аналитической модели разряда.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант № 075-15-2021-374).

Литература

[1]. Райзер Ю.П., *Физика газового разряда* М: Наука, 1987.
[2]. Кудрявцев А.А., Морин А.В., Цендин Л.Д. Роль нелокальной ионизации в формировании коротких тлеющих разрядов, ЖТФ **78** (8), 71-82 (2008).
[3]. Fiala A., Pitchford L.C., Boeuf J. P. Two-dimensional, hybrid model of low-pressure glow discharges, Phys. Rev. E **49**, 5607 (1994).
[4]. Eliseev S.I., Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A. Slow electron energy balance for hybrid models of direct-current glow discharges, Phys. Plasmas **24**, 093503 (2017).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В АКТИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ «ФЛАКСУС» И "СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА"

Лосева Т.В., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И.

Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия, e-mail: losseva@idg.chph.ras.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.102

Активные геофизические ракетные эксперименты с инжекцией высокоскоростных плазменных струй в ионосферу Земли проводились с целью исследования процессов взаимодействия плазменных потоков с окружающей ионосферой, погруженной в геомагнитное поле. Инжекция плазменных струй с известными параметрами позволяет верифицировать теоретические модели взаимодействия потоков плазмы со средой в максимально контролируемых условиях эксперимента.

В экспериментах "Флаксус" (высота 140 км) и "Северная звезда" (выше 270 км) для инжекции алюминиевых струй использовались созданные в ИДГ РАН кумулятивные взрывные плазменные генераторы ВГПС, испытанные в наземных экспериментах.

Задача интерпретации данных наблюдений требует определения параметров плазмы. Вследствие недостаточной диагностики в ионосфере, особенно на начальной стадии динамики струи, была сформулирована обратная задача восстановления параметров плазмы – определение зависимостей от времени газодинамических параметров инжектируемой струи (скорости, плотности, температуры) при ее выходе из сопла генератора ("сценарий инжекции") – с помощью численного моделирования.

В настоящей работе представлены результаты расчетов по определению этих параметров и численному моделированию динамики струи на начальной стадии (~100 мкс) в рамках разработанной радиационно-газодинамической модели. Алгоритм расчета включает в себя: восстановление газодинамических параметров инжектируемой плазмы в выходном сечении сопла генератора с использованием результатов измерений этих параметров в ближней зоне в наземных экспериментах; коррекция полученных параметров по измерениям кривых светимости в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах на бортовом модуле в эксперименте "Флаксус". В последнем случае учтено прохождение излучения через фильтры фотодиодов. Дальнейшие шаги алгоритма: численное моделирование динамики плазмы струи после ее вылета из сопла генератора с восстановленным сценарием инжекции; расчет характеристик излучения горячей плазмы алюминия (спектров, плотностей потоков излучения); сравнение результатов расчетов с данными измерений в ракетных экспериментах на бортовом модуле, наблюдениях с Земли и спутником MSX.

Сравнение имеющихся данных наблюдений по зависимостям от времени (1 - 100 мкс) плотностей потоков излучения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах показало хорошее согласие с данными расчетов.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ БЕГУЩИХ ВОЛН В МГД С УЧЁТОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Гавриков М.Б., Таюрский А.А.

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: mbgavrikov@yandex.ru, tayurskiy2001@mail.ru.

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.103

В докладе исследованы бегущие вдоль постоянного магнитного поля с постоянной скоростью нелинейные волны в горячей плазме в приближении идеальной (бездиссипативной) холловской МГД. Показано, что в безразмерном виде для волны, бегущей вдоль оси x, параметры плазмы в волне подчиняются следующей системе уравнений, из которой они могут быть найдены:

$$-\Lambda\beta\xi\frac{dH_z}{d\tau}+p_y+f(u)H_y=0,\quad \Lambda\beta\xi\frac{dH_y}{d\tau}+p_z+f(u)H_z=0,$$
$$u+Ku^{-\gamma}+H_y^2+H_z^2=2,\quad f(u)=u/2-\beta^2$$

где u – продольная скорость плазмы в системе отсчёта бегущей волны, H_y, H_z – поперечное магнитное поле, β – безразмерное продольное магнитное поле, K – безразмерная внутренняя энергия идеальной политропной плазмы с показателем адиабаты γ, ξ – число Будкера, p_y, p_z – константы интегрирования, определяемые поперечным электрическим полем в системе отсчёта движущейся волны, $\Lambda=\sqrt{\lambda_+/\lambda_-}-\sqrt{\lambda_-/\lambda_+}$ – материальная константа, где $\lambda_\pm=m_\pm/e_\pm$, $m_\pm$, $e_\pm$ – массы и заряды электронов (-) и ионов (+), τ – лагранжева координата, $d/d\tau=|u|\,d/d\theta$, $\theta=x-at$ – фаза волны, a – скорость волны.

Численное и аналитическое исследование представленной системы уравнений позволило классифицировать нелинейные бегущие волны. Показано, что они делятся на три основных типа: нелинейные периодические колебания, уединённые волны и нелинейные волновые пакеты колебаний. Численно исследовано взаимодействие уединённых волн и установлено, что это взаимодействие подобно упругому взаимодействию материальных частиц, сохраняющий после взаимодействия свои характеристики. Кроме того, показано, что некоторые плазменные возмущения, локализованные в пространстве, могут распадаться на уединённые волны. Наконец, в докладе численно проанализировано взаимодействие волновых пакетов колебаний.

Литература

[1]. М.Б. Гавриков, А.А. Таюрский, Нелинейные бегущие волны в горячей плазме // Препринт № 92 (ИПМ им. М.В. Келдыша, Москва, 2018).
[2]. М.Б. Гавриков, А.А. Таюрский, Нелинейные бегущие волны и ускорение плазмы в квазистационарных плазменных ускорителях (КСПУ) с продольным полем // Вестник НИЯУ МИФИ. 2019. Т. 8. № 1. с. 34–39.
[3]. M.B. Gavrikov and A.A. Taiurskii Traveling waves and plasma acceleration in Quasi-Steady Plasma Accelerators (QSPAs) with longitudinal field, J. Phys.: Conf. Ser. **1205**, 012014 (2019).
[4]. V.V. Savelyev, Nonlinear waves in the Hall magnetic hydrodynamics, J. Phys.: Conf. Ser. **2055**, 012014 (2021).

ПЛОТНОСТЬ ИОНОВ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО $E \times B$ РАЗРЯДА

[1,2]Бардаков В.М., [2]Строкин Н.А., [2,3]Ступин А.Н., [2]Ригин А.В.

[1]*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия, e-mail: vmbardakov38@mail.ru*
[2]*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия, e-mail: strokin85@inbox.ru, arseniy.rigin@mail.ru*
[3]*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия, e-mail: al.stupin1@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.104

В рамках работ по развитию метода плазмооптической масс-сепарации [1, 2] предлагается одномерная стационарная модель самостоятельного $E \times B$ разряда в плазменном ускорителе с анодным слоем, основанная на включении в рассмотрение прикатодной области, размер которой совпадает с расстоянием от катода до магнетронной поверхности для электронов, которые возникают на катоде при ион-электронной эмиссии. В существующих моделях эта область не рассматривается; в них задается разрядная плотность тока J, которая на катоде, в основном, определяется ионной компонентой, электронная же компонента на катоде вычисляется по J в предположении, что катод является неограниченным резервуаром электронов [3, 4].

Рассматриваемая модель, во-первых, позволяет сформулировать условие зажигания $E \times B$ разряда, в котором завязываются все основные параметры разряда: разрядные промежуток и напряжение, плотность нейтралов, величина индукции магнитного поля, частота столкновения электронов с нейтралами, частота ионизации и коэффициент ион-электронной эмиссии. Во-вторых, J не задается, а определяется, причем она зависит от условий в области разрядного промежутка анод – магнетронная поверхность. Рассмотрение области анод – магнетронная поверхность в квазинейтральном приближении дает нереально большую J в сравнении с экспериментально наблюдаемой. Решение уравнения Пуассона (в отсутствии квазинейтральности) для названной области дает существенно более низкое значение разрядной плотности тока, которое согласуется с экспериментальными результатами. Такое стационарное решение как раз и должно реализовываться эволюционно с момента зажигания $E \times B$ разряда.

Литература

[1]. Морозов А.И., Савельев В.В., Физика плазмы, 2005, **31**, 458.
[2]. Бардаков В.М., Кичигин Г.Н., Строкин Н.А., Письма в ЖТФ, 2010, **36**, 75.
[3]. Морозов А.И., Савельев В.В., Физика плазмы, 2000, **26**, 219.
[4]. Ромаданов И.В., Смоляков А.И., Сорокина Е.А., Андреев В.В., Марусов Н.А., Физика плазмы, 2020, **46**, 318.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗОВАННОЙ ПРИ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ ИНЕРТНОГО ГАЗА, НА ПРОНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

[1]Вагин К.Ю., [1,2]Мамонтова Т.В., [1,2]Урюпин С.А.

[1]Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: mamontovatv@lebedev.ru
[2]Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.105

Изучено влияние неоднородности профиля электронной плотности плазмы, образованной при многофотонной ионизации инертного газа, на проникновение в нее электромагнитного излучения. Предполагалось, что в слое шириной L плотность фотоэлектронов линейно растет с увеличением расстояния до границы плазмы, а затем остается постоянной. Вид зависимости распределения фотоэлектронов от скорости, описывающий узкий пик без учета уширения, аппроксимирован дельта-функцией Дирака $\delta(v - v_0)$, где v_0 – средняя скорость фотоэлектронов, приобретаемая в процессе многофотонной ионизации [1]. Из кинетического уравнения для функции распределения и уравнений Максвелла найдены электрическое поле в плазме и коэффициент поглощения. Рассмотрены режимы высокочастотного и нормального скин-эффектов. Установлено, что при ширине неоднородного слоя, меньшей глубины скин-слоя δ в указанных режимах проникновения, поглощение и отражение пробного излучения описываются соотношениями, сводящимися к ранее полученным в предположении о скачкообразном изменении плотности электронов на границе плазмы (см. [2]). При увеличении L до значений, при которых расстояние до точки ρ критической плотности существенно меньше, чем длина волны падающего электромагнитного излучения, коэффициент поглощения и глубина проникновения поля растут как кубический корень из толщины неоднородного слоя $\sim(L/\delta)1/3$. Дальнейшее увеличение ширины слоя L приводит к тому, что поле проникает на расстояния порядка ρ, а коэффициент поглощения может достигать значений, близких к единице. Учет особенностей рассеяния фотоэлектронов на нейтральных атомах инертных газов, отвечающих эффекту Рамзауэра - Таунсенда, приводит к увеличению коэффициента поглощения. Степень такого увеличения зависит от средней энергии фотоэлектронов в плазме и выбора инертного газа. Так, в ксеноновой плазме со средней энергией фотоэлектронов 2,87 эВ коэффициент поглощения увеличивается в ~2,5 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90158.

Литература

[1]. K.Yu. Vagin, T.V. Mamontova, S.A. Uryupin. Phys. Rev. E **104**, 045203 (2021).
[2]. K.Yu. Vagin, T.V. Mamontova, S.A. Uryupin. Phys. Rev. A **102**, 023105 (2020).

РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ПРОТОННОГО ИНЖЕКТОРА ПРОЕКТА DARIA

Выбин С.С., Изотов И.В., Миронов Е.А., Палашов О.В., Скалыга В.А.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.106

Уменьшение количества доступных нейтронных источников (связанное с выводом из эксплуатации исследовательских ядерных реакторов) приводит к уменьшению объема исследований и повышает их стоимость. С другой стороны, для обучения специалистов по работе с нейтронными пучками, разработки новых методик и проверки идей необходимы относительно недорогие компактные источники. В связи с этим был разработан проект компактного источника нейтронов DARIA (Dedicated to Academic Research and Industrial Application) [1]. Источник построен на базе линейного ускорителя протонов.

В данной работе рассматривается протонный источник как составляющая проекта DARIA. Ранее были успешно проведены испытания источника протонных пучков GISMO [2], который является газодинамическим ЭЦР ионным источником для различных приложений. За счет высокого энерговклада в плазму (полная мощность до 10 кВт в непрерывном режиме, удельная мощность до 200 Вт/см^3) и высокой частоты нагрева (28 ГГц) обеспечивается формирование интенсивных ионных потоков с плотностью тока до 1,5 А/см^2. В работе проводится оптимизация протонного источника для использования его в проекте DARIA.

Изменение магнитной системы направлено на ослабление требований к системе формирования ионного пучка. Магнитная ловушка состоит из набора постоянных магнитов NdFeB(N48) с радиальным или аксиальным направлением вектора намагниченности. Её можно полностью описать геометрическими параметрами составляющих частей. Таким образом была поставлена и решена задача поиска оптимальных параметров магнитной ловушки.

Задачами оптимизации системы формирования ионного пучка являются: снижение потерь пучка в экстракторе, улучшение его качества на входе в линейный протонный ускоритель. Для формирования протонного пучка используется трехэлектродная система экстракции (с дополнительным экранирующим электродом), дополненная магнитной линзой, необходимой для формирования слабо расходящегося пучка. При расчетах предполагается наличие компенсации пространственного заряда пучка на уровне 90%. Поставлена и решена задача о формировании протонного пучка с полным током не менее 100 мА с энергией 40 кэВ и с полным (доля пучка 95%) нормализованным эмиттансом менее 1 π мм мрад. При этом производится расчет формирования протонного пучка с плотностью тока на уровне сотен мА/см^2. Расчеты формирования ионного пучка проводились с использованием пакета вычислительных программ IBSimu [3].

Литература

[1]. G. Kropachev, T. Kulevoy and A. Sitnikov, The Proton Linac for Compact Neutron Source Daria, *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **13**, 1126–1131 (2019).

[2]. С.В. Барабин, Г.Н. Кропачев, и др., Измерения эмиттанса газодинамического электронно-циклотронного резонансного источника ионов, *Письма в ЖТФ*, 2021, т. 47, вып. 10, с. 7

[3]. T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, et al., IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 02B703 (2010).

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ИПФ РАН

Выбин С.С., Изотов И.В., Миронов Е.А., Палашов О.В., Скалыга В.А.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.107

Развитие технологии бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) сдерживается нехваткой доступных нейтронных источников. Построение компактного и доступного нейтронного источника, удовлетворяющего требованиям для проведения БНЗТ, позволит решить эту проблему. В Институте прикладной физики РАН был создан компактный импульсный нейтронный генератор на базе газодинамического ЭЦР ионного источника [1], который состоит из ионного источника и нейтронообразующей мишени. Высокий нейтронный выход достигается за счет большего тока пучка (сотни мА) по сравнению с ускорителями (единицы - десятки мА).

В данной работе производится модернизация ионного источника нейтронного генератора, которая заключается в разработке новой магнитной системы и системы формирования пучка, позволяющих работать в непрерывном режиме и создавать ионные пучки с энергией до 100 кэВ при полном токе на уровне 500 мА.

В качестве основы для построения новой магнитной системы взята магнитная ловушка непрерывного ионного источника GISMO [2]. Было увеличен поперечный размер плазмы. Была использована плазменная камера с переменным внутренним диаметром, что позволило уменьшить массу магнита. Также пробка магнитной ловушки была смещена ближе к расширенной части магнита для размещения системы формирования пучка непосредственно в расширителе. Магнитное поле ловушки создается постоянными магнитами NdFeB(N48), имеющими аксиальную или радиальную намагниченность. Магнит состоит из двух половин, что определяется конструкцией плазменной камеры.

Используется 3-электродная система формирования ионного пучка (с дополнительным экранирующим электродом), которая дополнена магнитной линзой. При расчетах предполагалось наличие компенсации пространственного заряда пучка, равной 90%. Разработана система формирования ионного пучка, позволяющая извлекать пучок ионов дейтерия с энергией 100 кэВ и током 500 мА. При этом начальная плотность потока ионов, вылетающих из ловушки составляла сотни мА/см^2. Расчет формирования ионного пучка из плазмы и его распространения производился с помощью пакета вычислительных программ IBSimu [3].

Литература

[1]. V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, et al. High yield neutron generator based on a high-current gasdynamic electron cyclotron resonance ion source, *J. Appl. Phys.* **118**, 093301 (2015).

[2]. V.A. Skalyga, I.V. Izotov, S.V. Golubev, et al., Status of a new 28 GHz continuous wave gasdynamic electron cyclotron resonance ion source development at IAP RAS, *AIP Conf. Proc.* **2011**, 030013 (2018).

[3]. T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, et al. IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 02B703 (2010).

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ГЕНЕРАЦИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР РАЗРЯДА НА УСТАНОВКЕ GISMO

Лапин Р.Л., Скалыга В.А., Изотов И.В., Голубев С.В., Боханов А.Ф., Киселёва Е.М., Выбин С.С.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.108

Источники отрицательных ионов водорода (H^-) широко используются, например, для инжекции ионных пучков в циклотроны и накопительные кольца и являются составной частью инжекторов нейтрального пучка для нагрева плазмы в термоядерных установках. Настоящая работа посвящена двухстадийной генерации ионов H^- в плазменном объёме. Первая стадия состоит в возбуждении высоких колебательных уровней молекул водорода в результате взаимодействия с т.н. “горячими” электронами ($E \approx 30$ - 100 эВ), а вторая — в диссоциативном электронном прилипании “холодных” электронов ($E \leq$ нескольких эВ) к возбужденным молекулам. Проведённые исследования по объёмной генерации ионов H^- на базе квазигазодинамической плазмы импульсного ЭЦР разряда, поддерживаемого СВЧ излучением гиротрона, показали перспективность данного подхода и возможность получения пучков отрицательных ионов водорода с плотностью тока до 80 мА/см^2 [2]. Важным индикатором происходящих в низкотемпературной водородной плазме процессов является излучение вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) диапазона [3]. Его исследование позволяет оценивать характеристики плазмы и проводить оптимизацию плазменного источника отрицательных ионов. Были проведены первичные исследования ВУФ излучения плазмы импульсного ЭЦР разряда, продемонстрировавшие возможность применения метода для оптимизации генерации ионов H^- [4].

В работе представлены результаты первых экспериментов по исследованию объёмной генерации отрицательных ионов водорода с использованием непрерывного ЭЦР разряда с квазигазодинамическим режимом удержания плазмы, поддерживаемой излучением гиротрона (28 ГГц/10 кВт) и удерживаемой в системе из двух последовательно состыкованных магнитных ловушек: пробкотрона и каспа. Плазма зажигалась в первой ловушке в условиях ЭЦР резонанса и перетекала во вторую сквозь металлическую сетку, предотвращавшую распространение СВЧ излучения во вторую ловушку, что позволило реализовать две пространственно разнесённые стадии объёмного механизма генерации ионов H^-. Было проведено исследование ВУФ излучения плазмы вдоль оси системы в трёх диапазонах: линии Ly_α (122 ± 10 нм), полосе Лаймана (160 ± 10 нм) и молекулярном континууме (180 ± 20 нм).

Исследование ВУФ излучения плазмы позволило проанализировать параметры плазмы и оптимизировать условия генерации отрицательных ионов водорода. Была проведена оптимизация системы экстракции и объёма зоны генерации H^-. Были определен оптимум по параметрам системы: давления и мощности гиротрона, получена максимальная плотность тока отрицательных ионов водорода $j = 44$ мА/см^2 в непрерывном режиме.

Литература

[1]. R.L. Lapin, I.V. Izotov, V.A. Skalyga, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov and O. Tarvainen, J. Instrum, 13, C12007 (2018).

[2]. J. Komppula, O. Tarvainen, S. Lätti, T. Kalvas, H. Koivisto, V. Toivanen and P. Myllyperkiö, AIP Conf. Proc. **1515**, 66–73 (2013).

[3]. R.L. Lapin, V.A. Skalyga, I. Izotov, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov, S. S. Vybin, A.F. Bokhanov, M.Yu. Kazakov and O. Tarvainen, Rev. Sci. Instrum. **91**, 013517 (2020).

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ГЕЛИКОННОМ РАЗРЯДЕ

Шуровский Д.О., Кутузов Д.С., Сухов А.Е., Бунин Е.А., Брагин Е.Ю.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия.

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.109

К настоящему моменту использование геликонного разряда для создания плазмы получило широкое распространение в различных областях техники и технологии, от производства микросхем до плазменных ракетных двигателей [1]. Применение и дальнейшее развитие систем, использующих геликонный разряда связано с возможностью надежного определения параметров плазмы и контроля за протекающими процессами. В Курчатовском институте создана установка для исследования процессов, протекающих в геликонном разряде. Была проведена серия модельных экспериментов по исследованию зависимости параметров плазмы от величины магнитного поля в области ВЧ антенны и профиля магнитного поля.

Методом лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) [2] было проведено измерение концентрации однократно заряженных ионов аргона Ar II на оси установки. В работе использовалась трёхуровневая спектроскопическая схема с накачкой на длине волны лазера λ_L = 611,5 нм и регистрацией флуоресцентного излучения на λ_{FLU} = 460,9 нм. Источником индуцирующего излучения служил перестраиваемый по длинам волн оптический параметрический генератор EXPLA NT342A-SH с накачкой третьей гармоникой Nd:YAG лазера. Так же в работе использовался набор из двух спектрографов Avaspec-mini выполненных по схеме Черни-Тернера с регистрирующим элементом в виде ПЗС линейки на 3648 пикселей. Регистрация излучения проводилась в различных сечениях установки. Проводилось обратное абелевское преобразование методом Пирса [3] для вычисления радиальных распределений электронной температуры. Электронная температура определялась методом относительных интенсивностей [4] по большому массиву зарегистрированных линий (более 70 линий Ar II).

Проведенные измерения показывают ожидаемый рост концентрации ионов аргона с ростом величины магнитного поля под антенной, с характерными значениям $N_{ArII} = 4 \pm 2*10^{12}$ см$^{-3}$. Характерная электронная температура на оси установки составила $T_e = 3 \pm 0{,}3$ эВ. Было предложена три профиля магнитного поля источника плазмы: с плоским распределением поля в области ВЧ антенны, с ростом величины магнитного поля в области антенны и конфигурация с магнитной ловушкой в области ВЧ антенны. По результатам измерений оптимальной, с точки зрения плотности и профиля плазмы, была признана конфигурация с магнитной ловушкой.

Литература

[1]. Mazouffre S., Plasma Sources Sci. Technol. **22**, 013001 (2013).
[2]. Schweer B., Bogen P., Hintz E., Rusbüldt D., Goto S., Steuer K. H., Application of laser-induced fluorescence to the measurement of the release, the transport and the ionization of Ti-atoms at the ASDEX divertor plates, J. Nucl. Mater. **111–112**, 71-74 (1982).
[3]. Кузнецов Э.И., Щеглов Д.А., *Методы диагностики высокотемпературной плазмы*, М.: Энергоатомиздат, 1974.
[4]. Хаддлстоун Р., Леонард С., *Диагностика плазмы*, М.: Мир, 1967.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ РАЗРЯДА В СМЕСЯХ ЭТАНОЛА И ВОДЫ

Лебедев Ю.А., Татаринов А.В., Эпштейн И.Л., Титов А.Ю.

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва, Россия, e-mail: lebedev@ips.ac.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.110

В последние десятилетия. большое внимание исследователей привлекают разряды в жидкостях и в контакте с ними, из-за возможностей решения различных прикладных задач. В частности, для получения водорода используются разряды в смеси этанола и воды. Используются различные типы электрических разрядов, но наименее исследованы микроволновые разряды. Настоящая работа продолжает наш цикл работ по моделированию СВЧ разряда в жидкостях и посвящена изучению кинетических процессов в газовой смеси продуктов разложения смеси этанола с водой. Расчеты проводились для атмосферного давления в нульмерном приближении.

Используемая модель содержит балансные уравнения для нейтральных и заряженных газовых компонент плазмы, уравнение Больцмана для свободных электронов плазмы, уравнение для среднего СВЧ поля в малом объеме, заполненным плазмой [1] и уравнение для температуры газовой смеси. Для описания термических процессов используется набор реакций San Diego Mechanism [2]. Добавлены реакции с заряженными частицами. При расчете температуры газа предполагалось, что энергия, требуемая для осуществления процессов под электронным ударом, берется у электронов. Для определения функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) используется уравнение Больцмана, записанное в двучленном приближении разложения ФРЭЭ по сферическим гармоникам. Константы скорости реакций электронных процессов рассчитываются с помощью набора соответствующих сечений реакций и ФРЭЭ и являются функциями значений приведенного поля E/N. В данной работе ФРЭЭ была рассчитана с помощью программы BOLSIG+ [3] и набору сечений столкновений электронов с молекулами смеси. В кинетическую модель для этанола были включены процессы прямой ионизации, диссоциации, диссоциативного прилипания и ассоциативного отлипания. Модель включает положительно и отрицательно заряженные ионы: H_2O^+, H_3O^+, $H_5O_2^+$, $H_3O^+(H_2O)$, $H_3O^+(H_2O)_2$, $H_3O^+(H_2O)_3$, O_2^+, CH_3O^+, $C_2H_5O^+$, $C_2H_5OH^+$, CH_3^+, $C_2H_3^+$, H^-, O^-, OH^-, $C_2H_5OH^-$, CO^-.

Проведенные нами расчеты позволяют проанализировать роль различных реакций в процессах диссоциации смеси, образования нейтральных продуктов, в частности водорода, и в образования и гибели отрицательно и положительно заряженных частиц для различных значений E/N и температуры газа. Основными продуктами разложения смеси являются водород, монооксид углерода и ацетилен. Концентрации водорода и монооксида углерода, полученные в расчетах, совпадают с экспериментальными данными [4].

Работа выполнена в рамках государственной программы ИНХС РАН при частичной поддержке гранта РФФИ № 21-52-53012.

Литература

[1]. Гильденбург В.Б., Семенов В.Е., Физика плазмы (1980) т.6, вып. 2, с. 445
[2]. https://web.eng.ucsd.edu/mae/groups/combustion/mechanism.html
[3]. https://fr.lxcat.net/solvers/BolsigPlus/index.php.__
[4]. Tonghui Zhu, Bing Sun, Xiaomei Zhu, Liru Wang, Yanbin Xin, Jinglin Liu, J. Anal. Appl. Pyrolysis **156**, 105111 (2021).

ДИАГНОСТИКА ГОРЯЧЕЙ КОМПОНЕНТЫ ПЛОТНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР РАЗРЯДА

[1]Киселёва Е.М., [1]Викторов М.Е., [1]Скалыга В.А., [1]Изотов И.В., [2]Боханов А.Ф.

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
[2]Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.111

Плазма разряда, поддерживаемого в условиях электронного циклотронного резонанса, находит широкое применение во многих областях. Особое место среди приложений занимают источники ионов для ускорителей, так как использование плазмы ЭЦР разряда, удерживаемой в открытых магнитных ловушках, позволяет получать ионы с высоким зарядом. Повышение эффективности таких источников осуществляется, в первую очередь, за счёт усовершенствования систем магнитного удержания и параметров греющего излучения, поддерживающего разряд. Однако для дальнейших улучшений производительности и получения ионов более высоких зарядов необходимо знать и учитывать энергетическое распределение электронов в плазме. Во-первых, оно определяет максимальный заряд ионов в плазме и позволяет оценить константы ионизации. Во-вторых, функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) напрямую связана с развитием кинетических неустойчивостей, существенно влияющих на удержание плазмы [1], а, значит, и на производительность ионных источников.

До настоящего времени форма ФРЭЭ для плазмы ЭЦР разряда неизвестна, а для моделирования обычно используют максвелловскую форму распределения. Существуют различные методы для косвенной оценки энергий в такой плазме: например, локальные зондовые измерения или анализ тормозного излучения. В 2012 году в ИПФ РАН был представлен способ измерения энергетического распределения электронов, покинувших плазму [2]. Этот метод идейно представляет собой классическую масс-спектрометрию ионов с помощью магнитного анализатора, но с инвертированной полярностью магнита. Он позволяет оценить горячую (от единиц кэВ до единиц МэВ) электронную компоненту.

В данной работе экспериментально исследована функция распределения электронов, вылетающих из плазмы ЭЦР ионного источника с высоким удельным энерговкладом, работающим в газодинамическом (столкновительном) режиме, в широком диапазоне значимых параметров мощности греющего излучения и давления нейтрального газа. Также была произведена диагностика излучения в СВЧ и рентгеновском диапазоне, создаваемого этими же энергичными электронами. Были найдены оптимальные режимы развития кинетических неустойчивостей в плазме ЭЦР разряда. Результаты экспериментов вкупе с теоретическими работами в дальнейшем позволят представить новый и на данный момент единственный способ восстановления настоящей ФРЭЭ внутри плазмы.

Литература

[1]. Tarvainen O. et al., Beam current oscillations driven by cyclotron instabilities in a minimum-*B* electron cyclotron resonance ion source plasma, Plasma Sources Sci. Technol. **23**, 025020 (2014).

[2]. Golubev S.V. et al., Experimental electron energy distribution function investigation at initial stage of electron cyclotron resonance discharge, Rev. Sci. Instrum. **83**, 02B504 (2012).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОЙ ДУГИ С ПОДОГРЕВАЕМЫМ КАТОДОМ ИЗ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ

Мельников А.Д., Усманов Р.А., Полищук В.П., Антонов Н.Н., Гавриков А.В., Ворона Н.А.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия, e-mail: amirovravil@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.112

Разработка источников плазмы диэлектрических материалов актуальна для задач создания функциональных покрытий [1] и методов плазменной сепарации [2]. Источники плазмы на основе вакуумных дуг одни из самых производительных. При этом свойства генерируемой плазмы во многом зависят от типа катодной привязки, реализующейся в конкретных экспериментальных условиях [3]. В работе [2] был описан вакуумный дуговой разряд с катодом из CeO_2. CeO_2 используется для создания коррозиестойких покрытий и средств защиты от ультрафиолетового излучения [4 - 5]. Данная работа посвящена исследованию временной эволюции параметров вакуумного дугового разряда на диоксиде церия.

Экспериментальная установка [2] представляла собой вакуумную камеру объемом ~1 м^3. Катодом являлся CeO_2 массой 5 г, помещенный в тигель из молибдена. Тигель разогревался с помощью электронно-лучевого подогрева. Температура тигля контролировалась яркостным пирометром. Для изучения ионного состава использовался масс-спектрометр. В течении эксперимента велась регистрация напряжения, масс-спектра ионов плазмы, температуры катода и интенсивности излучения. В ходе экспериментов ток разряда был фиксирован - 65 А, а напряжение и температура менялись в пределах от 10 до 14 В и от 2,15 – 2,35 кК соответственно.

В результате были обнаружены флуктуации напряжения, амплитуд массовых пиков. Относительные величины флуктуаций меняются с течением времени в пределах от 2% до 10% у напряжения и от 10% до 30% у амплитуд массовых пиков. Среднее значение напряжения снижалось во время эксперимента на величину вплоть до 1,5 В. Наблюдались нестабильные режимы горения, длившиеся от нескольких секунд, до нескольких минут, в которых вырастала амплитуда флуктуаций, регистрировались ионы 2 и 3 кратности и колебания плазменного столба. При проведении видеозаписи поверхности катода было обнаружено, что имеют место как режимы без катодных пятен, так и с пятнами 2 типа [6]. Переходы между диффузным и контрагированным режимами также имели место при варьировании температуры тигля. Через время порядка 1000 с после инициирования разряд становился менее стабильным. Исследование ионного состава показало, что в потоке плазмы преобладают однократные ионы церия Ce^+ молекулярные ионы CeO^+, а также присутствуют ионы молибдена Mo^+. Ионный состав плазмы меняется с течением времени даже при стабильном горении разряда. Это проявляется в изменении доли ионов материала тигля в потоке плазмы, при этом интенсивности пиков Ce^+ и CeO^+ примерно постоянны.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-00077, https://rscf.ru/project/21-72-00077/

Литература

[1]. Liang H., Ming F., Alshareef H., Adv. Energy Mater. **8**, 1801804 (2018).
[2]. Usmanov R.A. et al., Phys. Plasmas **25**, 063524 (2018).
[3]. В. П. Полищук и др. ТВТ, 2020, т. 58, № 4, с. 515–535.
[4]. Ershov S., Druart M.-E., Poelman M., Cossement D., Snyders R., Olivier M.-G., Corros. Sci. **75**, 158–168 (2013).
[5]. Balakrishnan G., Sudhakara P., Abdul Wasy, Ha Sun Ho, Shin K.S., Song J.I., Thin Solid Films **546**, 467–471 (2013).
[6]. Juttner B., J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, R103–R123 (2001).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ В ПЛАЗМЕ НАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

[1,2]Самохвалов А.А., [2]Сергушичев К.А., [1,3]Елисеев С.И., [2]Смирнов А.А., [2]Бронзов Т.П., [2]Гетман Д.В., [2]Большаков Е.П., [2]Бурцев В.А.

[1]*Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия*
[2]*ООО «Лаборатория им. Бурцева В.А.», г. Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.113

Мягкое рентгеновское излучение (МРИ) в области прозрачности воды, т.е. в диапазоне длин волн 2,3 - 4,4 нм представляет интерес для микроскопии биообъектов, т.к. позволяет получать снимки в режиме на просвет достаточно толстых слоев (~10 мкм) клеточных культур с разрешением до 7 нм [1]. Источниками данного излучения являются синхротроны, лазерная плазма и плазма наносекундного импульсного разряда. Последняя имеет ряд преимуществ: возможность получения импульсов МРИ большой спектральной яркости и малой расходимости, компактность установок для её получения и возможность работы с частотами следования импульсов более 5 кГц [2]. В данной работе проводились исследования процессов генерации МРИ в капиллярной плазме наносекундного импульсного разряда с целью получения максимального выхода МРИ в диапазоне прозрачности воды.

Эксперименты проводились на установке, разработанной в ООО «Лаборатория им. Бурцева В.А.». Разрядная геометрия была выполнена в конфигурации полого катода, через капилляр (длина 20 мм, внутренний диаметр 1,5 мм,) через который непрерывно продувался газ. На катод поступал высоковольтный импульс отрицательной полярности, амплитудой 16 - 30 кВ. В качестве рабочего газа был выбран углекислый газ, потому что переходы высоковозбужденных ионов углерода излучают в диапазоне 3-4 нм. На рис.1 представлены результаты экспериментов.

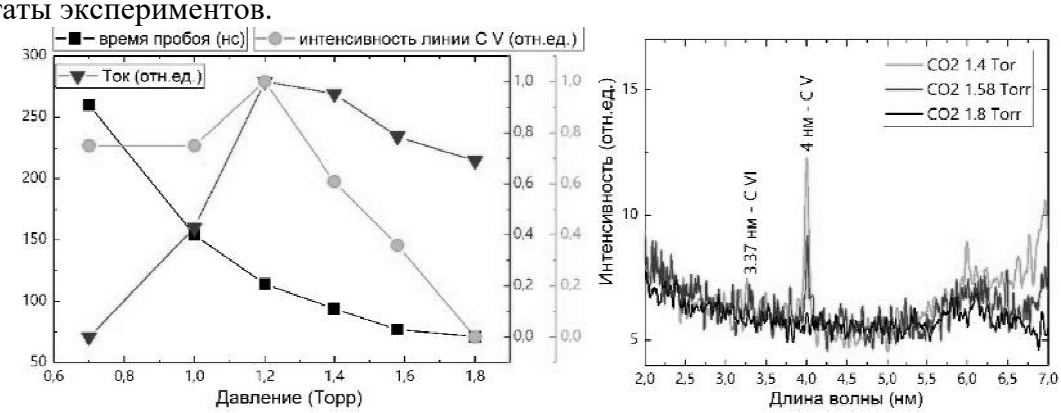


Рисунок 1. Зависимости времени пробоя от давления, амплитуды тока и интенсивности излучения линии иона C V и спектры излучения плазмы разряда (справа).

Результаты свидетельствуют о совпадении максимумов тока и интенсивности МРИ при определенном значении давления газа. Это объясняется зависимостью эффективного сопротивления плазмы от давления, при низких значениях время пробоя увеличивается и энерговклад в плазму низкий, падение тока при дальнейшем повышении давления связано со снижением амплитуды напряжения пробоя от давления газа.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10110).

Литература

[1]. B. Rösner et. al., *Optica* **7**, 1608 (2020).
[2]. K. Bergmann et. al., *Appl. Opt.* **39**, 3833 (2000).

ЭФФЕКТИВНЫЙ ЗАРЯД МАКРОИОНА В КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ

[1,2]Мартынова И.А., [1,2]Иосилевский И.Л.

[1]*Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия, e-mail: martina1204@yandex.ru,*
[2]*Московский физико-технический институт (НИУ) г. Долгопрудный, Россия*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.114

В данной работе рассматривается классическая двухкомпонентная электронейтральная равновесная система макроионов конечных размеров с зарядом Z ($Z >> 1$) и противоположно заряженных микроионов с единичным зарядом. Получены единые автомодельные зависимости эффективного заряда макроиона Z^* от начального заряда макроиона Z, температуры системы и радиуса макроиона, каждая из которых рассчитана для некоторого фиксированного параметра упаковки в рамках приближения Пуассона–Больцмана в средней сферической ячейки Вигнера-Зейтца [1] и в корреляционной полости [2], где внутри полости учтен эффект нелинейного экранирования. Также получена автомодельная зависимость эффективного заряда макроиона Z^* от начального заряда макроиона Z, температуры системы, концентрации макроионов и их размеров. В обоих приближениях (средней сферической ячейки Вигнера-Зейтца и корреляционной полости) все микроионы разделяются на свободные и связанные. Также, введено понятие эффективного заряда макроиона и показано его уменьшение по сравнению с начальным зарядом макроиона в приближении Пуассона-Больцмана в ячейке Вигнера-Зейтца и в корреляционной полости с дополнительным учетом корреляций микроионов соответственно внутри ячейки [3] и полости [2]. В работе оценивается возможность разделения псевдо-жидкости микроионов на более и менее плотные фазы в указанном приближении с учетом корреляций микроионов [2].

Литература

[1]. Martynova I., Iosilevskiy I., Contrib. Plasma Phys. **61**, e202100007 (2021).
[2]. Martynova I., Iosilevskiy I., in *The* 17th *International Conference on the* Physics *of Non-Ideal* Plasmas, *Dresden, 2021,* Book of abstracts, p. 46.
[3]. Martynova I., Iosilevskiy I., Contrib. Plasma Phys. **61**, e202000142 (2021).

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАХВАТА ЧАСТИЦ В РЕЖИМ АВТОРЕЗОНАНСА В ДЛИННОМ ПРОБКОТРОНЕ

Андреев В.В., Новицкий А.А.

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия,
e-mail: temple18@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.115

Целью работы являлось определение эффективности захвата частиц первичной плазмы в режим авторезонансного ускорения в длинном пробкотроне с изменяемым во времени профилем магнитного поля [1, 2]. Обобщены особенности процесса захвата при изменении параметров рабочего цикла и объяснены соответствующие экспериментальные результаты.

Экспериментальный стенд представляет собой осесимметричную систему, в которой цилиндрический высокочастотный резонатор (TE_{118}) помещен в стационарное магнитное поле пробочной конфигурации, создаваемое тремя парами катушек. Резонатор возбуждался от магнетронного генератора (2,45 ГГц, 2,5 кВт) в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса 1 мс. Независимое попарное запитывание катушек магнитного поля, позволяла перестраивать топологию магнитостатического поля в соответствии с требованиями проводимых экспериментов. В двух симметричных относительно минимума магнитного поля ловушки пучностях электрического поля стоячей волны осесимметрично размещены катушки импульсного магнитного поля ($B_{имп}$ = 500 Гс, τ = 450 мкс). Направление тока в импульсных катушках обеспечивает создание импульсного магнитного поля с направлением напряженности противоположным магнитостатическому. Изменение индукции импульсного магнитного поля во времени обеспечивает: снижение индукции стационарного магнитного поля до уровня, соответствующего значению ЭЦР для рабочей частоты резонатора (режим образования исходной плазмы), временное уменьшение тока в импульсных катушках приводит восстановлению исходного профиля стационарного магнитного поля в присутствии электрического поля волны-накачки (режим авторезонанса). В пределах рабочего цикла: образование исходной плазмы, захват и последующее ускорение электронов плазмы в двух симметричных зонах установки происходит генерация и последующее удержание в минимуме магнитостатической ловушки кольцевого плазменного сгустка с энергичной электронной компонентой. Диагностика параметров генерируемой плазмы осуществлялась методами рентгеновской спектрометрии (X-123-CdTe и NaI(Ta)) с эффективной областью регистрации в диапазоне энергий 1 - 60 кэВ и 30 - 3000 кэВ соответственно и рентгенографирования (диапазон регистрации 7 - 100 кэВ).

Изучение изменения интенсивности характеристических линий с газовой мишени позволили определить оптимальные рабочие условия захвата частиц, что напрямую связано с количеством энергичных электронов в сгустке. Спектр и квантовый выход рентгеновского излучения с газовой мишени совместно с рентгенографированием показали, что электроны ускоренного плазменного сгустка в процессе удержания локализованы в минимуме пробочной ловушки и сконцентрированы в тонком цилиндрическом слое. Результаты настоящей работы объясняют ранее полученные результаты и позволяют определить количество ускоренных электронов, их энергетический спектр, а также отследить динамику его изменения в пределах рабочего цикла ускорения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-29-21041).

Литература

[1]. Andreev V.V., Novitskiy A.A., Umnov A.M., Chuprov D.V. Instrum. Exp. Tech. **55**, 301-312 (2012).

[2]. Andreev V. V., Chuprov D. V., Ilgisonis V. I., Novitsky A. A. and Umnov A. M ., Phys. Plasmas **24**, 093518 (2017).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕНЫХ ПРОЦЕССОВ В МОЩНЫХ БЕЗЭЛЕКТРОДНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Кутузов Д.С., Сухов А.Е., Шуровский Д.О., Янченков С.В.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.116

Безэлектродный плазменный ракетный двигатель (БПРД) является одним из наиболее перспективных претендентов на замену химическим двигателям для межпланетных перелетов. Такой двигатель принципиально состоит из трех блоков: геликонного источника холодной плазмы (ГИХП), блока нагрева плазменного потока на ионном циклотронном резонансе (ИЦР) и магнитного сопла, в котором происходи формирование вытекающей струи, а также создается тяга и удельный импульс. Все три блока объединены между собой единой конфигурацией магнитного поля. В настоящее время стоит задача исследования процессов создания и ускорения плазменного потока, а также его срыва с силовых линий магнитного поля в мощных БПРД.

В качестве макета БПРД рассматривается стенд ПН-3, который не только имеет все присущие БПРД компоненты, но и возможность в широком диапазоне менять такие внешние параметры, как сорт и расход рабочего газа, а также способ его подачи, величину вводимой мощности, величину и конфигурацию магнитного поля. Разнообразный диагностический комплекс позволяет снимать пространственные и временные распределения основных параметров плазмы, а также производить перекрестные измерения несколькими различными диагностиками одновременно.

При помощи зондов Ленгмюра получены пространственные распределения плотности и электронной температуры плазмы в истекающем в магнитном сопле плазменном потоке, а также зависимости этих величин от конфигурации магнитных полей, расхода рабочего газа, величины вводимой ВЧ мощности. Полученные зависимости были подтверждены параллельными измерениями при помощи других диагностик – лазерно-индуцированной флюоресценции, оптической эмиссионной спектроскопии и интерферометрии.

Полученные зависимости позволяют дать рекомендации о способе подачи рабочего газа, а также величине и конфигурации магнитного поля для мощных БПРД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МАЛЫХ ПРИМЕСЕЙ В РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЕ ГЕЛИЯ

[1,2]Чиннов В.Ф., [1,2]Кавыршин Д.И., [1]Федорович С.Д., [1,2]Муравьева Е.В., [1,2]Мязин А.С., [1]Чан К.В., [1]Карпов А.В., [1]Будаев В.П.

[1]НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, e-mail: dimakav@rambler.ru,
[2]ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, e-mail: v_chinnov@oivtran.ru.

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.117

В работе рассматривается разреженная (p ~ 10^{-5} атм) электроразрядная плазма гелия вблизи металлической стенки из вольфрама на медной подложке. При плотности основного газа [He] ≈10^{13} ÷ 10^{14} см$^{-3}$ и зарядов (n ≈ 10^{11} ÷ 10^{13}см$^{-3}$) определяющим механизмом уширения спектральных линий является Доплер-эффект, определяемый температурой излучающих частиц [1]. Согласно модели «эффективного времени жизни» Л.М. Бибермана [2], интенсивность реабсорбированной спектральной линии, отвечающей оптическому переходу m → k, определяется эффективной вероятностью перехода $A_{mk}^{*} = A_{mk} \cdot \theta_{mk}$, где A_{mk} - вероятность спонтанного перехода оптически тонкой линии, θ_{mk} – вероятность вылета принадлежащего данному переходу фотона из рассматриваемой точки среды.

Для доплеровского контура линии, излучающей из центра цилиндра радиусом R, вероятность вылета фотона [2]: $\theta(k_0R) = \sqrt{\pi}/(4k_0R\sqrt{ln(k_0R)})$, (1)
а коэффициент поглощения в центре этой линии:

$$k_0 = (\pi e^2/mc) \cdot (f_{km}N_k^{\text{погл}}/\Delta v_D) \quad (2)$$

определяется концентрацией частиц на поглощающем уровне $N_k^{\text{погл}}$ и полушириной доплеровской линии $\Delta v_D = 7.16 \cdot 10^{-7} v_0\sqrt{T/\mu}$. Для диагностики параметров на установке выполнялась регистрация спектров излучения трехканальным спектрометром AvaSpec-ULS2048 в диапазоне длин волн 200-1100 нм. Реабсорбции в разреженной плазме могут быть подвержены спектральные линии, соответствующие переходам в основное состояние атома. В плазме He + Cu это резонансные линии Cu I 324,7 и 327,4 нм. Наблюдаются в спектре и линии Cu I 510,5 и 578,2 нм, которые имеют общий верхний уровень с линиями 324,7 и 327,4 нм соответственно. Выполним оценку вероятности вылета фотона θ для резонансной линии 327,4 нм, используя измеренное отношение интенсивностей рассматриваемых линий с общей (равной) населенностью их излучающего уровня N_{4p}: $N_{4\text{p}} = C\left(578.2J_{578}/g_{4p}A_{578}\right) = C(327.4J_{327}/g_{4p}A_{327} \cdot \theta_{4p-1s})$. Разрешая равенство относительно вероятности вылета «резонансного» фотона λ = 327.4 нм, находим его численное значение $\Theta_{4p\text{-}1s}$ = 0,20. Решив уравнение (1), определяем оптическую плотность плазмы k_0R = 2,35 и, при R = 1,6 см, получаем значение коэффициента поглощения в центре линии 327,4 нм - k_0 = *1*,5 см$^{-1}$. Оценив доплеровскую полуширину резонансной линии Cu I 327,4 нм при T = 1200 K, μ = 63,54, v_0 = 0,92·10^{15} с$^{-1}$, - Δv_D = 2,8·10^{9} с$^{-1}$, определяем по (2) концентрацию поглощающих атомов меди в основном состоянии $N_0^{\text{погл}} = [Cu]$ = 5,7·10^{11} см$^{-3}$. Выполнив аналогичное сравнение интенсивностей второй резонансной линии 324.7 нм и линии 510,6 нм, находим значение θ = 0,14, k_0R =3,0 и [Cu] = 4,8·10^{11} см$^{-3}$. Среднее значение плотности [Cu] = 5,2·10^{11} см$^{-3}$ соответствует давлению насыщенных паров меди над поверхностью металла с температурой $T_W \cong 1300$ K [3] - эта температура находится в хорошем согласии с использованной нами выше температурой атомов при оценке доплеровской ширины линии.

Спектроскопические измерения выполнены при поддержке гранта РНФ 21-79-10281, работы по генерации плазмы на ПЛМ выполнены при поддержке проекта 223 ЕОТП-УТП.

Литература

[1]. В.Н. Очкин, *Спектроскопия низкотемпературной плазмы*, М.: Физматлит, 2006.
[2]. Л.М. Биберман, В.С. Воробьев, И.Т. Якубов, *Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы*, М.: Наука, 1982.
[3]. S. Dushman, *Scientific Foundations of Vacuum Technique* (Wiley, New York, 1962).

СПЕКТРАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАМАГНИЧЕННОМ ГЕЛИЕВОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

[1,2]Кавыршин Д.И., [1]Федорович С.Д., [1,2]Муравьева Е.В., [1,2]Чиннов В.Ф., [1,2]Мязин А.С., [1]Чан К.В., [1]Карпов А.В., [1]Будаев В.П.

[1]НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, e-mail: dimakav@rambler.ru,
[2]ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, e-mail: v_chinnov@oivtran.ru.

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.118

В работе исследуется разряд в гелии низкого давления с магнитным удержанием на экспериментальном стенде МЭИ – плазменной установке ПЛМ (плазменном линейном мультикаспе) [1]. Установка представляет собой магнитную ловушку с минимумом магнитного поля на оси до 6 мТл, плазма в которой создаётся потоком электронов, движущихся в металлической трубе-соленоиде с внутренним диаметром 160 мм от термокатода к аноду. Стационарный поток гелиевой плазмы при давлении в камере $10^{-1} \div 10^{-3}$ торр, токе разряда 2 ÷ 25 А, диаметре струи 15 ÷ 17 мм, длине разряда 400 мм и напряжении горения 100 ÷ 200 В обеспечивает тепловую нагрузку на поверхность вводимой в приосевую область мишени до 10 МВт/м^2. Для диагностики параметров в канале плазмы и в области ее взаимодействия с испытуемым образцом на установке выполнялась регистрация спектров излучения трехканальным спектрометром AvaSpec-ULS2048 в диапазоне длин волн 200 - 1100 нм. Полученное в корональном приближении [2] выражение для отношения интенсивностей ионной линии гелия $J^{+}_{468.6}$ к интенсивности одной из атомных линий J_{mk}

$$\frac{J_{468.6}{}^{+}}{J_{mk}} = \frac{n_e He^{+} K_{14}{}^{+}}{n_e N_0 K_{0m}} \cdot \frac{\lambda_{mk}}{468.6} \cdot \frac{A_{43} \cdot \sum_{j<m} A_{mj}}{(A_{41}{}^{*} + A_{42} + A_{43}) A_{mk}} = C \cdot \Phi\left[\frac{A_{m1}{}^{*}(He)}{A_{41}{}^{*}(He^{+})}\right] \cdot \left(\frac{K_{14}{}^{+}}{K_{0m}} \cdot \frac{\beta_i}{\alpha_{фр}}\right)(T_e) \quad (1)$$

позволило определить температуру плазмы с погрешностью около 10%, путем сравнения экспериментально измеренного отношения интенсивностей к результату расчета по (1). Анализ показал, что при всей сложности состояния исследуемой плазмы: нелокальность ФРЭЭ, сложный характер дрейфа и диффузии зарядов в скрещенных и неоднородных *E* x *H*-полях и др., - излучающий ион гелия является высокочувствительным индикатором уровня средней энергии электронов $\langle\varepsilon\rangle = 3kT_e/2$ – ядра функции распределения. Поэтому использование отношения интенсивностей наиболее сильной в УВИ -диапазоне линии He II 468,6 нм и ряда линий He I с хорошо известными функциями электронного возбуждения [3] оказалось надежным методом спектрального определения электронной температуры замагниченной разреженной плазмы гелия. При следующих экспериментальных условиях: [He] ≈ 10^{14} см$^{-3}$, ток разряда 4,1 А, падение напряжения 182 В, - измеренная с использованием трех синглетных и четырех триплетных линий He I температура электронов составила $T_e^{ср} = 2{,}5 \pm 0{,}3$ эВ.

Спектроскопическое исследование выполнено при поддержкегранта РНФ 21-79-10281 "Спектроскопия высокого разрешения для диагностики приповерхностной плазмы при взаимодействии мощных потоков неравновесной замагниченной плазмы со стенкой", работы по генерации плазмы на ПЛМ выполнены при поддержке проекта 223 ЕОТП-УТП.

Литература

[1]. В.П. Будаев, С.Д. Федорович, Ю.В. Мартыненко, М.В. Лукашевский, М.К. Губкин, А.В. Карпов, А.В.Лазукин, Е.А. Шестаков, Д.И. Кавыршин, К.С. Рогозин, “Плазменная установка ПЛМ для испытаний вольфрама мощными стационарными плазменно-тепловыми нагрузками”, Ядерная физика и инжиниринг (2018), Т. 9, № 3, с. 283-294, doi: 0.1134/S207956291803003X

[2]. В.Н. Очкин, *Спектроскопия низкотемпературной плазмы*, М.: Физматлит, 2006.

[3]. Cross section Database for Helium. NIFS–DATA–059. Oct. 2000.

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ НОВОГО ЗОНДА С ЗАДЕРЖИВАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ЭРД

[1,2]Майстренко Д.А., [1]Шагайда А.А., [1,2]Ловцов А.С.

[1]АО ГНЦ "Центр Келдыша", г. Москва, Россия
[2]Московский физико-технический институт (НИУ) г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.119

В работе представлены результаты разработки и экспериментального тестирования нового зонда с задерживающим потенциалом, способного измерять энергетический спектр ионов в струе плазмы электроракетных двигателей (ЭРД) с расширенным рабочем диапазоне параметров плазмы. Также в работе рассмотрена возможность использования нового зонда в составе системы диагностики плазмы ЭРД как для измерения энергоспектра ионов, так и для измерения плотности ионного тока. Исследование струи дает возможность не только диагностировать работу двигателей космических аппаратов, но и предсказать влияние плазмы на бортовые устройства спутников, расположенные в окрестности двигателя.

Существующие зонды для измерения энергоспектра ионов в плазме используют три или четыре сетки и токоприемник. Первая сетка заземлена и не позволяет внутренним сеткам возмущать плазму вне зонда, предотвращая искажение результатов. На вторую сетку подается отрицательный потенциал для отсечения электронов. Третья сетка, называемая анализирующей, держится под положительным потенциалом и образует потенциальный барьер для ионов. Данная сетка пропускает только ионы с энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, которые затем достигают коллектора. Зависимость тока на коллекторе от потенциала третьей сетки позволяет получить функцию распределения ионов по энергиям.

Эффективная прозрачность зонда для ионов, определяемая как отношение тока на коллекторе, при нулевом потенциале анализирующей сетки, к ионному току на входе в зонд, изменяется в зависимости от плотности плазмы, что затрудняет интерпретацию результатов и может приводить к неконтролируемому изменению систематической погрешности измерений. Поэтому для диагностики струи на всех углах к оси двигателя нужно либо использовать зонд с изменяемой геометрией, либо использовать несколько зондов, что достаточно сложно и неудобно.

Зонд, представленный в докладе, решает эту проблему и, согласно моделированию, позволяет измерять энергоспектр ионов с погрешностью менее 1%, как на оси плазменной струи с максимально высокой плотностью тока, так и на периферии, где плотность тока меньше на несколько порядков. Новый зонд использует ионно-оптическую систему для фокусировки ионного пучка и отсечения электронов. Фильтрация ионов по энергиям происходит непосредственно на токоприемнике, на который подается положительный потенциал. Ионы с недостаточной энергией не достигают токоприемника.

В докладе представлены результаты численного моделирования работы зонда. Исследовано влияние отклонения расположения апертур от соосного и ненулевого наклона падения ионов по отношению к оси зонда на погрешность измерений. Представлены особенности конструкции зонда и методика измерений токов на коллекторе, находящемся под высоким положительным потенциалом. Также в докладе показаны результаты экспериментального тестирования нового зонда и приведено сравнение работы нового зонда и зонда стандартной, многосеточной конструкции. Сделан вывод о возможности применения нового зонда вместо трехсеточного зонда и зонда Фарадея в составе системы диагностики ЭРД.

Литература

[1]. Heubel E. Enhancing Retarding Potential Analyzer Energy Measurements with Micro-Aligned Electrodes, PhD thesis (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2014).

[2]. Hey F. G., Vaupel M., Groll C. Development of a Gridless Retarding Potential Analyzer, in *Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference, Atlanta, GA, 2017,* Paper IEPC-2017-271.

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ АНОМАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Шашков А.С.

АО ГНЦ «Центр Келдыша», г. Москва, Россия,
e-mail: shashkov@phystech.edu

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.120

При моделировании разряда в холловском двигателе одной из ключевых проблем является модель аномальной проводимости. Использовавшаяся ранее модель проводимости Бома, как показали результаты LIF диагностики не подходит для моделирования холловского разряда 0, 0. В наиболее современных моделях сейчас используется экспериментально измеренный профиль проводимости, однако это требует наличия дорогостоящего оборудования и исключает возможность априорного моделирования 0. В попытке предсказывать проводимость априорно появились турбулентные модели 0 – 7] аномального транспорта, однако для их использования требуются знания об амплитуде плазменных возмущений и номере гармоники, на которой происходит резонанс, это не позволяет применять эти модели для предсказания параметров плазмы. Также существует подход с использованием методов машинного обучения для построения профиля аномальной проводимости на основании большой базы данных экспериментальных измерений профилей проводимости 0, 0.

В данной работе предложен метод восстановления профиля аномальной проводимости на основе метода Байесовской оптимизации (относится к семейству методов машинного обучения) и одномерной гибридной модели 0, 0. В отличии от предыдущих работ, метод принимает на входе не профили проводимости плазмы, а интегральные параметры работы двигателя, таких как тяга, ток разряда, моноэнергетичность пучка, и разлет пучка, которые могут быть легко измерены относительно дешевыми методами. Полученные профили проводимости позволяют смоделировать разряд, обладающий значительно большей схожестью с экспериментальными измерениями, чем бомовская модель, однако говорить о количественном совпадении результатов моделирования с результатами зондовых измерений нельзя.

Литература

[1]. J.A. Linnell, and A.D. Gallimore, in *Proceedings of the 31st International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, MI, 2009,* Paper IEPC-2009-105.
[2]. C. J. Durot, B. A. Jorns, E. T. Dale, and A. D. Gallimore, in *Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference, Atlanta, GA, 2017,* Paper IEPC-2017-29.
[3]. I. G. Mikillides, and I. Katz, Phys. Rev. E **86**, 046703 (2012).
[4]. M. A. Capelli, C. V. Young, E. Cha, and E. Fernandez, Phys. Plasmas **22**, 114505 (2015).
[5]. T. Lafleurm S. D. Baalrud, and P. Chabert, Phys. Plasmas **23**, 053503 (2016).
[6]. M. K. Sharfe, C. A. Thomas, D. B. Sharfe, N. Gaskon, A. Cappelli, and E. Fernandez, IEEE Trans. Plasma Sci. 36, 2058 (2008).
[7]. M. Reza, F.Faraji, T. Andreussi, and M. Andrenucci, in *Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference, Atlanta, GA, 2017,* Paper IEPC-2017-367.
[8]. B. Jorns, Plasma Sources Sci. Technol. **27**, 104007 (2018).
[9]. B. Jorns, T. A. Marks, and E. T. Dale, in 2020 AIAA Propulsion and Energy Forum, Paper AIAA 2020-3622.
[10]. A. Shashkov, A. Lovtsov, and D. Tomilin, Phys. Plasmas **24**, 043501 (2017).
[11]. A. Shashkov, A. Lovtsov, and D. Tomilin, Eur. Phys. J. D **73**, 173 (2019).

2D3V ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ПЛАЗМЫ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЧИСЛЕННО ВОССТАНОВЛЕННЫМ ПРОФИЛЕМ АНОМАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Шашков А.С.

АО ГНЦ «Центр Келдыша», г. Москва, Россия,
e-mail: shashkov@phystech.edu

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.121

При построении численных моделей разряда холловского двигателя широкое распространение получили метод PIC и гидродинамический подход [1, 2]. Известно, что гидродинамический подход позволяет значительно сократить время расчета, однако, как правило, содержит ряд допущений, среди которых пренебрежение диагональными членами тензора давления и замыкание системы уравнений на моменты функции распределения. Наиболее распространенные замыкания – это приравнивание второго момента константе и приравнивание нулю всех высших моментов (предположение постоянства температуры); и выражение третьего момента через градиент второго (закон Фурье). Метод PIC учитывает недиагональные члены тензора давления, как и все остальные моменты функции распределения автоматически, однако, является очень затратным с точки зрения вычислительных ресурсов, а также обладает численным шумом. Помимо гидродинамических и кинетических подходов существует еще гибридный подход с гидродинамическим описанием электронной компоненты плазмы и кинетическим описанием тяжелых компонент плазмы [3 - 5].

В данной работе разработана 2D3V гибридная модель, отличающаяся от предыдущих моделей достоверностью расчетной сетки вблизи расчетных границ и отсутствием предположений о термолизованном потенциале для электронов. В качестве профиля проводимости электронов поперек силовых линий магнитного поля взят профиль аномальной проводимости, восстановленный по интегральным параметрам работы двигателя с использованием методов машинного обучения и одномерной численной гибридной модели. Смоделирована плазма в разряде двигателя КМ-88 и посчитаны первые три момента функции распределения для тяжелых компонент плазмы, включая недиагональные члены тензора давления. Полученные моменты говорят о том, что течение нейтрального газа моделировать в гидродинамическом приближении некорректно, а моделирование ионов уравнениями гидродинамики для получения корректных предсказаний параметров двигателя оправдано. Однако, в случае, если необходимо корректно моделировать эффекты, связанные с неосевым течением ионов, гидродинамический подход может приводить к некоторым неточностям.

Литература

[1]. I.G. Mikellides, I. Katz Numerical simulations of Hall-effect plasma accelerators on a magnetic-field-aligned mesh, Phys. Rev. E **86**, 046703 (2012).
[2]. S.V. Irishkov, O.A. Gorshkov, and A.A. Shagayda Fully Kinetic Modeling of Low Power Hall Thrusters , in *Proceedings of the 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton, NJ, 2005,* Paper IEPC-2005-35.
[3]. J.M. Fife, Hybrid-PIC modeling and electrostatic probe survey of Hall thrusters, Ph.D. thesis (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1998)
[4]. G.J.M. Hagelaar, J. Bareilles, L. Garrigues, J.P. Boeuf, Two-dimensional model of a stationary plasma thruster, J. Appl. Phys. **91**, 5592 (2002).
[5]. J.W. Koo, I.A. Boyd, Computational model of a Hall thruster, Comput. Phys. Commun. **164**, 442 (2004).

ОСОБЕННОСТИ ТОКОВЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ В МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ С *X*-ЛИНИЕЙ В ПРИСУТСТВИИ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ (GUIDE FIELD)

Франк А.Г.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: annfrank@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.122

Представлен обзор экспериментальных результатов по изучению особенностей структуры и эволюции токовых слоев, которые формировались в плазме в трехмерных (3D) магнитных конфигурациях с ***X***–линией, в присутствии продольной компоненты магнитного поля, направленной вдоль ***X***–линии (guide field). Известно, что в космических объектах, как и в установках для удержания и нагрева плазмы, магнитные поля, как правило, являются трехмерными. Поэтому изучение возможностей формирования токовых слоев в 3D конфигурациях и анализ структуры таких слоев имеет важное значение для проблемы магнитного пересоединения.

Среди многообразия 3D магнитных конфигураций особый интерес представляют конфигурации с особыми линиями ***X***-типа, что обусловлено их ролью в формировании токовых слоев и в явлениях магнитного пересоединения. Простейшую магнитную конфигурацию с ***X***–линией на оси *0z* можно представить в виде: $\boldsymbol{B} = \{h \cdot y; h \cdot x; B_Z^0\}$, где h – градиент магнитного поля в плоскости (x,y), и B_Z^0 – однородная продольная компонента. Формирование токового слоя осуществляется при возбуждении в плазме тока J_Z, направленного параллельно ***X***–линии.

Рассмотрены структурные особенности токовых слоев, которые формировались в 3D магнитных конфигурациях с ***X***–линией при различных соотношениях между градиентом h и продольной компонентой B_Z^0, в том числе при изменениях B_Z^0 в пределах от 0 до 6 кГс (см. [1] и цитированную там литературу). Экспериментальные результаты были получены с помощью установки ТС–3D (ИОФ РАН).

Показано, что в процессе развития токового слоя происходит усиление продольной компоненты магнитного поля в пределах слоя, что обеспечивается токами плазмы, которые протекают в поперечной плоскости по отношению к основному току в слое. В результате структура электрических токов в слое становится трехмерной.

При увеличении начального значения B_Z^0 уменьшается степень сжатия в слой, как электрического тока, так и плазмы, что обусловлено изменением баланса давлений в слое при появлении в нем избыточного продольного поля.

Деформация плазменных токовых слоев, а именно, появление в 3D магнитных конфигурациях асимметричных и изогнутых слоев, возникает при возбуждении токов Холла и их взаимодействии с продольной компонентой магнитного поля.

Показано, что формирование токовых слоев в 3D магнитных конфигурациях с ***X***–линией возможно в достаточно широком, но ограниченном диапазоне начальных условий.

Литература

[1]. А.Г. Франк, Успехи прикладной физики **9**, 464 (2021).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ТОКОВЫХ СЛОЕВ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ НЕЙТРАЛЬНОГО ГЕЛИЯ С ЗАПРЕЩЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Кирий Н.П., Франк А.Г.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: kyrie@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.123

Представлены результаты измерения плотности плазмы токовых слоев по профилям дипольно-разрешенных линий гелия: He I 447,1 ($4^3D - 2^3P$) нм и He I 492.2 ($4^1D - 2^1P$) нм и соответствующих дипольно-запрещенных линий: He I 447.0 ($4^3F - 2^3P$) нм и He I 492,0 ($4^1F - 2^1P$). Впервые использовался предложенный Г.С. Вороновым новый метод определения плотности электронов, который не требует разделения экспериментально зарегистрированных суммарных профилей спектральных линий He I на разрешенные и запрещенные компоненты. Данный метод имеет существенные преимущества по сравнению с классическими методами в условиях большого динамического диапазона изменения плотности электронов и значительных помех от линий примесей.

Исследования проводились на установке ТС-3D. Токовые слои формировались в сильно неоднородном магнитном поле с особой линией *X* типа как в 2D, так и в 3D магнитных конфигурациях. Градиент магнитного поля составлял $h = 0{,}5$ кГс/см, продольная компонента магнитного поля вдоль *X*–линии равнялась $B_Z = 2{,}9$ кГс. Плазма создавалась при разряде в гелии при начальном давлении $p = 100$ мТорр или $p = 320$ мТорр. Амплитудная величина электрического тока вдоль *X*–линии равнялась $J_Z = 45$ кА [1].

Использовалась двухканальная оптическая схема, в которой излучение плазмы собиралось как из центральной квазицилиндрической области, вытянутой вдоль направления тока в слое, так и вдоль ширины (наибольшего из поперечных размеров) слоя, что позволило определить концентрацию электронов в разных областях токового слоя. Спектральные линии регистрировались в одном импульсе работы экспериментальной установки с помощью цифровой камеры Nanogate 1UF, которая представляет собой электронно-оптический преобразователь с усилителем яркости на основе МКП с CCD матрицей в качестве детектора. Длительность строб-импульса камеры составляла $\Delta t_{gate} = 0{,}8$ мкс [2, 3].

Установлено, что в центральной области токовых слоев, формировавшихся как в 2D, так и в 3D магнитных конфигурациях, плотность электронов составляла: $N_e \approx (0{,}6 - 0{,}5) \times 10^{16}$ см$^{-3}$ в интервале времени $t = (1{,}2 - 3{,}2)$ мкс при начальном давлении гелия $p = 320$ мТорр, т.е. медленно уменьшалась со временем. При давлении $p = 100$ мТорр плотность электронов была $N_e \approx (0{,}2 - 0{,}3) \times 10^{16}$ см$^{-3}$, т.е. меньше, чем при $p = 320$ мТорр.

Показано, что у боковых краев слоя, формировавшегося в 2D магнитной конфигурации, плотность электронов стремительно возрастала, от $N_e \approx 0.8{\times}10^{16}$ см$^{-3}$ до $N_e \approx 16{\times}10^{16}$ см$^{-3}$, т.е. увеличивалась в 20 раз в течение интервала времени $t \approx (1{,}2 - 3{,}2)$ мкс. При этом максимальная величина N_e на краях слоя практически не зависела от начального давления гелия. Однако в 3D магнитной конфигурации плотность электронов на краях слоя изменялась незначительно, в пределах $N_e \approx (0{,}6 - 1{,}3){\cdot}10^{16}$ см$^{-3}$. Эти данные согласуются с результатами измерений плотности плазмы, полученными ранее на основе анализа профилей спектральных линий ионов гелия [2 - 4].

Литература

[1]. A.G. Frank, Phys.-Usp. **53**, 941 (2010).
[2]. N.P. Kyrie, V.S. Markov, A.G. Frank, JETP Lett. **95**, 14 (2012).
[3]. N. P. Kyrie, A. G. Frank, Plasma Phys. Rep. **38**, 960 (2012).
[4]. A.G. Frank, N.P. Kyrie, Plasma Phys. Rep. **43**, 696 (2017).

ВОЗБУЖДЕНИЕ ДИПОЛЬНОЙ И АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ МОДЫ СВЧ СТОЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ПЛАЗМЫ

Жуков В.И., Карфидов Д.М.

Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: zhukov.vsevolod@physics.msu.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.124

Работа посвящена исследованию СВЧ поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) [1] на плазменном столбе газового разряда низкого давления, поддерживаемом самой волной. Использование для возбуждения поверхностной волны [2] волноводного аппликатора позволяет возбуждать как аксиально-симметрическую, так и дипольную моду в зависимости от параметров трубки. Исследовалась однородная вдоль оси область плазменного столба, заключенная в пространстве между двумя зеркалами. Такая структура образует резонатор открытого типа на поверхностной волне. Коэффициент стоячей волны в резонаторе достигает значений до 30 с соответствующей добротностью $Q \approx 60$. Измерены аксиальные, поперечные и азимутальные распределения составляющих вектора напряженности электрического поля ПЭВ. При возбуждении дипольной моды азимутальное распределение поля поверхностной волны характеризуется диаметрально расположенными лепестками с отношением $E_{max}/E_{min} > 10$. Показано, что поверхностная волна характеризуется наличием продольной компоненты E_z, находящейся в противофазе с поперечной компонентой Er. Подтверждена справедливость критерия возбуждения дипольной моды $fr > 2$ > ГГц×см: на трубке с внутренним радиусом 7,5 мм возбуждается m = 0 мода, а при r = 10,5 мм m = 1 мода. Концентрация электронов в слое, по которому распространяется поверхностная волна, определялась по дисперсионной зависимости длины волны ПЭВ от плазменной частоты как для m = 0, так и для m = 1 моды [3]. Продольные профили плотности плазмы получены по интегральной интенсивности излучения плазмы, пропорциональной средней по сечению концентрации электронов [4]. При заполнении трубки аргоном при давлении 1,5 Торр зарегистрирована модуляция плотности плазмы порядка 10 - 15 %, при этом максимумы плотности совпадают с минимумами радиальной и максимумами продольной компонент электрического поля стоячей ПЭВ. В рабочем диапазоне давлений в воздухе (от 0,01 Торр до 0,1 Торр) заметной модуляции плотности не наблюдалось. Дальнейшее увеличение давления приводило к увеличению электронных потерь в разряде, и при $\nu/\omega \approx 1$ распространение разряда прекращалось.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90162.

Литература

[1]. Trivelpiece A.W. Slow wave propagation in plasma waveguides, the PhD thesis (California Institute of Technology, Pasadena, 1958).
[2]. Moisan M., Zakrewski Z., J. Phys. D: Appl. Phys. **24**, 1025 (1991).
[3]. Zhelyazkov I., Atanassov V., Phys. Rep. **255** (2-3), 79-201 (1995).
[4]. Zhukov V.I., Karfidov D.M., Sergeichev K.F., Plasma Phys. Rep. **46**, 760-768 (2020).

СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

Малютин А.Ю., Ярошевская А.Д., Подковыров В.Л., Гуторов К.М.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», e-mail: maliutin@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.125

На ускорителе КСПУ-Т выполняются эксперименты по созданию электрореактивного двигателя с повышенными параметрами тяги и удельного импульса. Для таких исследований важны измерения скорости потока плазмы, которые проводятся при помощи диагностики на основе спектральных и оптических приборов.

Для измерения скорости потока плазмы на основе эффекта Доплера применяется одновременное наблюдение за спектром свечения участка потока во встречном и попутном направлениях. Установлено, что наиболее удобным для регистрации и последующей обработки является спектр гелия, а именно линия на длине волны 587,56 нм. В случае работы ускорителя на водороде или дейтерии гелий добавляется в плазмообразующий газ в виде индикаторной примеси (около 10%).

Для сбора свечения плазмы в вакуумную камеру ускорителя установлены световоды, подключённые к входной щели спектрографа-монохроматора, излучение в котором раскладывается в спектр и проецируется через выходной порт на матрицу высокоскоростной камеры. С частотой 100000 кадров в секунду регистрируется последовательность изображений, содержащих спектральные линии, смещенные относительно друг друга на расстояние, пропорциональное скорости потока плазмы. Для примера на рисунке 1 представлены кадры в момент начала ускорения плазмы (А); установившемся режиме (Б), в момент спада скорости и угасания потока (В и Г). Диагностические линии, собранные двумя световодами, расположены сверху и снизу кадра, верхняя линия смещается влево, нижняя – вправо. Получаемые изображения могут содержать линии слабой интенсивности, шумы и побочные линии, обусловленные наличием остаточного газа в объеме ускорителя, что затрудняет последующую обработку и вычисление скорости. При этом за один импульс накапливается порядка 50 кадров, требующих анализа.

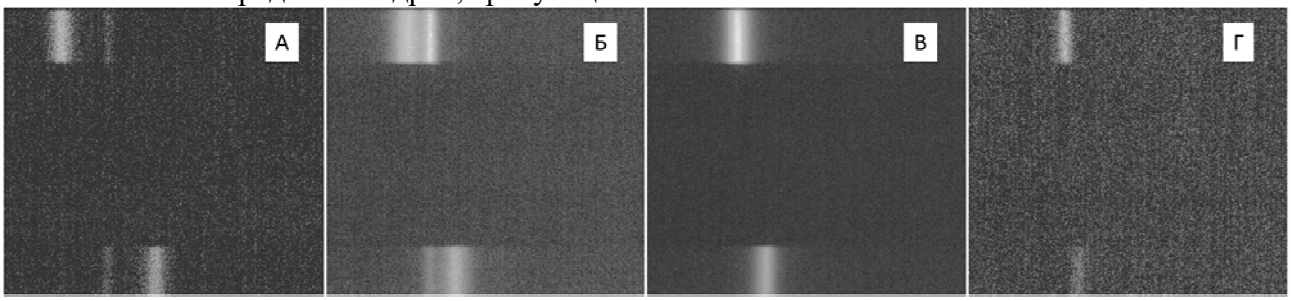


Рисунок 1 – Кадры с зарегистрированными спектральными линиями.

Для автоматизированной обработки последовательностей кадров в среде MATLAB реализован алгоритм, позволяющий вычислять скорость плазмы по смещению спектральных линий и получать зависимость скорости от времени разряда. В алгоритм встроены функции калибровки системы по эталонному излучению, фильтрации спектров и исключения побочных линий. Пользовательский интерфейс скомпилированного MATLAB приложения позволяет в интерактивном режиме обрабатывать последовательности кадров и одиночные изображения для детального анализа, а также сохранять результаты расчетов в виде графиков и табличных значений.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4ц.241.09.21.1115 от 29.04.2021.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА ПЛАЗМЫ КСПУ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

Ярошевская А.Д., Малютин А.Ю., Подковыров В.Л., Гуторов К.М., Карташева А.А.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», e-mail: YaroschAD@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.126

Разработка электроракетного двигателя (ЭРД) нового типа с повышенными параметрами тяги и удельного импульса производится на основе квазистационарного ускорителя плазмы (КСПУ) [1], который должен работать в импульсно-периодическом режиме. Для исследования параметров потока ЭРД был создан диагностический комплекс, одним из компонентов которого стала система определения скорости потока плазмы с временным разрешением, позволяющим отслеживать изменение скорости потока на протяжении импульса разряда.

Использованная диагностика скорости основана на изменении длины волны линии излучения атомов в потоке плазмы за счет эффекта Доплера. На одну матрицу сводилось излучение, собранное в трёх направлениях наблюдения из одной точки пространства: навстречу, перпендикулярно и вслед потоку. Метод реализован на базе монохроматора M522i и скоростной видеокамеры PHANTOM 2640. Излучение собиралось световодами с коллиматорами, размещенными непосредственно в вакуумной камере. Наблюдение эффекта осуществлялось на линии гелия 587,56 нм. При полной длительности свечения плазмы 2,0 мс используемая аппаратура позволяет получать значение скорости объекта каждые 10 мкс.

На рис. 1 показаны результаты применения метода для потоков гелиевой плазмы, а также водородной и дейтериевой с содержанием 10% примеси гелия (диагностического маркера). Разработанный метод позволяет проводить измерения скорости потоков плазмы с частотой 10^5 кадров/с для любого газа с добавлением гелия. В ходе экспериментов выявлены характерные особенности поведения потока плазмы КСПУ в зависимости от рода плазмообразующего газа и вложенной в разряд энергии.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4ц.241.09.21.1115 от 29.04.2021.

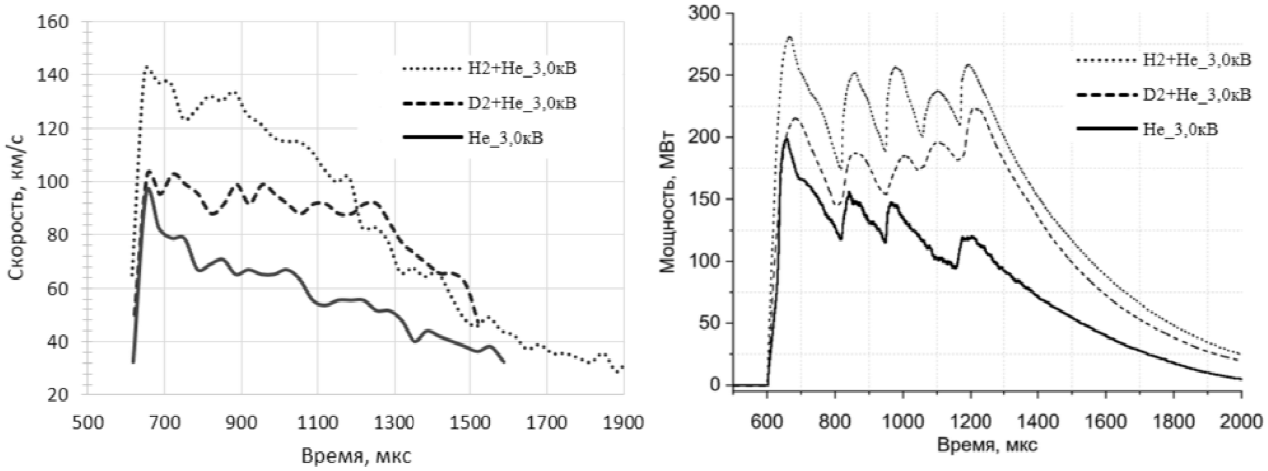


Рисунок 1. Динамика скорости потока плазмы и мгновенной мощности разряда КСПУ.

Литература

[1]. Н.С. Климов. и д. р., «Экспериментальное исследование интегральных характеристик потока плазмы и разряда квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем» ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 3.

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

SECTION «PHYSICAL BASIS FOR PLASMA AND BEAM TECHNOLOGIES»

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА НА ФЕНОЛ

[1]Пискарев И.М., [2]Аристова Н.А., [3]Иванова И.П.

[1]НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, e-mail:i.m.piskarev@gmail.com
[2]Уральский федеральный университет, Нижнетагильский технологический институт, e-mail: aristova-na@mail.ru
[3]Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, e-mail: ivanova.ip@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.127

Сравнивалась деградация фенола под действием холодной плазмы коронного электрического разряда и импульсного излучения горячей плазмы искрового разряда. Обрабатывался раствор фенола в воде концентрацией 25 мг/л (2,65 10^{-4} моль/л). Для генерации активных частиц использовались генератор коронного электрического разряда, выделяемая в разряде мощность 4,7 Дж/с, объем обрабатываемой жидкости 50 мл, и генератор излучения искрового разряда мощностью 0,4 Дж/с, объем обрабатываемой жидкости 10 мл. Наблюдались спектры поглощения фенола в водном растворе после действия обоих источников активных частиц.

Установлено, что под действием коронного разряда фенол разрушается непосредственно во время обработки, и через двое суток после обработки практически никаких изменений не происходит. Все изменения в растворе под действием коронного электрического разряда происходят сразу во время обработки. Основными активными продуктами, образующимися в коронном разряде, являются гидроксильные радикалы. Во время действия разряда гидроксильные радикалы сразу вступают в реакцию с фенолом, растворенным в воде. Когда разряд выключается, генерация гидроксильных радикалов прекращается, и деградация фенола прекращается.

Под действием излучения горячей плазмы в момент обработки практических никаких изменений фенола не наблюдается, генерируется азотистая кислота, спектр которой накладывается на спектр фенола. Все изменения фенола происходят после обработки. Показано, что основным образующимся при деградации продуктом является 4-нитрофенол. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что механизмом деградации фенола под действием импульсного излучения горячей плазмы является нитрование. Нитрование фенола продолжается до 120 часов. Причина заключается в том, что радикалы $HO_2^{\bullet}$, генерируемые в разряде, не могут окислять фенол. За время обработки накапливаются соединения азота, при взаимодействии с которыми происходит нитрование фенола. Реакция нитрования медленная, продолжается до 120 часов.

Таким образом, показано, что механизмы деградации фенола под действием коронного электрического разряда и импульсного излучения горячей плазмы искрового разряда существенно отличаются.

Под действием коронного разряда фенол разрушается непосредственно во время обработки. Основным действующим фактором являются гидроксильные радикалы. Под действием импульсного излучения горячей плазмы искрового разряда разрушение фенола в момент обработки невозможно, так как гидроксильные радикалы в воде не могут образовываться, а радикалы $HO_2^{\bullet}$ имеют недостаточную реакционную способность. Поэтому основным механизмом деградации является нитрование активными формами азота, накопившимися в момент обработки. Реакция нитрования медленная, непосредственно в момент обработки практически никаких изменений фенола не наблюдается. Нитрование происходит в течение времени до пяти суток в реакции с азотистой кислотой, и продуктами распада комплекса (…ONOOH/$ONOO^-$…): пероксинитритом и пероксиазотистой кислотой.

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ ПЛАЗМОТРОНА ПОСТОЯННОГО ТОКА В ОБЛАСТИ НУКЛЕАЦИИ НАНОКОМПОЗИТА МЕДЬ/ ГРАФЕН

Шавелкина М.Б., Кавыршин Д.И.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия, e-mail: mshavelkina@gmail

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.128

Цель данной работы заключается в исследовании оптическими методами процесса интеркалирования при синтезе 3D наноструктур на основе графена в плазменных струях гелия, генерируемых плазмотроном постоянного тока.

Синтез медьсодержащего нанокомпозита проведен при снижении скорости расхода плазмообразующего газа до некоторого порогового значения [1], при котором областью привязки дугового разряда являлась верхняя поверхность канала медного сопла - анода, вызывающая предельную эрозию. Для исследования параметров эрозионной плазменной струи и протекающих в ней процессах был использован трехканальный оптоволоконный спектрометр AvaSpec 2048, регистрирующим излучение плазмы в спектральном диапазоне 220 - 1000 нм со спектральным разрешением 0,2 - 0,5 нм [2]. На рисунке 1 представлено определение температуры твёрдой фазы по ее тепловому излучению методом координат Вина [3]. Полученная температура составила 1700 К.

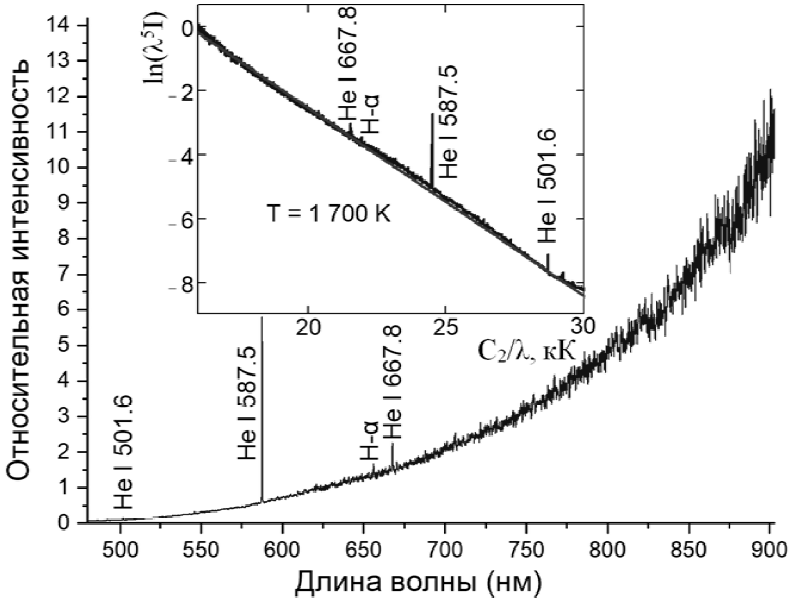


Рисунок 1. Определение температуры твёрдой фазы методом координат Вина.

В целом, показана возможность использования меди в качестве интеркалята графена при создании 3D наноструктур в плазменных условиях. Установлено, что при температуре 1700 К достигается максимальная спектральная плотность потока излучения твердой фазы, образованной конденсированным углеродом (C_2).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-58-04013 Бел_мол_а.

Литература

[1]. Шавелкина М.Б. и др. Химия Высоких Энергий **53**, 380 (2019).
[2]. Shavelkina M B., et al., High Temp. **58**, 309 (2020).
[3]. Ochkin V. N., *Spectroscopy of Low Temperature Plasma* (Wiley-VCH, Weinheim, 2009).

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ "КАЛЬМАР"

[1,2,3]Казаков Е.Д., [1]Крутиков Д.И., [1]Орлов М.Ю.,[4]Павленко М.И,
[1,2]Смирнова А.Р., [1]Стрижаков М.Г., [4]Сунчугашев К.А.

[1]НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия
[2]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Московская область, Россия
[3]НИУ МЭИ, г. Москва, Россия
[4]РУДН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.129

На сильноточном электронном ускорителе «Кальмар» проводятся исследования, посвященные исследованию динамики плазмы в вакуумном диоде ускорителя [1, 2], распространению ударных волн в прозрачных материалах [3], особенностям разрушения многокомпонентных конструкционных материалов [4].

При исследовании динамики плазмы желательно иметь возможность одновременной регистрации как свечения плазмы, так и лазерной тени. Также одной из важнейших задач является определение связи между поведением плазмы и распространением возникающих в материалах ударных волн. В связи с этим возникла необходимость создания диагностического комплекса, позволяющего осуществлять одновременную оптическую регистрацию в нескольких каналах. Причем требовалось предусмотреть возможность использование существенно отличающихся временных масштабов в каналах, так как характерные времена плазменных и ударноволновых процессов различаются более чем на порядок. Для этой цели была разработана оптическая схема, которая апробировалась в экспериментах по исследованию поведения плазмы в диодном зазоре. Регистрация осуществлялась с помощью двух электронно-оптических камер СФЭР-6 и VICA-25MK, работающих в хронографическом режиме. Применялся метод лазерного теневого фотографирования. Перед VIKA-25MK устанавливался интерференционный фильтр на 540 нм, соответствующий длине волны лазерного излучения. Перед камерой СФЭР-6 устанавливался цветной фильтр ЗС-11, пропускающий незначительное количества собственного свечения плазмы. Количество собственного свечения, попадающего на времяанализирующую щель камеры, регулировалось также за счёт изменения диаметра диафрагмы объектива, формирующего изображение. Проведённые предварительные эксперименты позволили разделить теневое изображение и эффекты, связанные как с собственным свечением плазмы, так и с торможением плазменного факела на остаточном газе. Благодаря тому, что лазерный пучок имеет достаточно большой диаметр, а диапазон времен регистрации достаточно широк, в дальнейшем СФЭР-6 можно будет перенастроить на наблюдение ударноволновых процессов, что значительно расширит спектр получаемой из эксперимента информации

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ № 2073 от 09.10.2020).

Литература

[1]. Ананьев С.С., Багдасаров Г.А., Гасилов В.А.и др. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 7. С. 608-615.
[2]. Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Крутиков Д.И., и др. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 8. С. 716-727.
[3]. Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 3. С. 90-95.
[4]. Садовничий Д.Н., Милехин Ю.М., Калинин Ю.Г. и др.// Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94. Вып. 8. С. 1065-1078.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНОТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

[1,2,3]Казаков Е.Д., [1]Крутиков Д.И., [1]Орлов М.Ю., [4]Павленко М.И,
[5]Садовничий Д.Н., [1,5]Смирнова А.Р., [1]Стрижаков М.Г., [5]Шереметьев К.Ю.

[1]НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия
[2]МФТИ, г. Долгопрудный, Московская область, Россия
[3]НИУ МЭИ, г. Москва, Россия
[4]РУДН, г. Москва, Россия
[5]ФГУП «ФЦДТ «Союз», г. Дзержинский, Московская область, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.130

В последние годы развитие технологий создания сложных многокомпонентных материалов приводит к их активному внедрению в космической и авиационной промышленности. В тоже время поведение подобных материалов при мощных импульсных нагрузках изучено недостаточно. При математические модели, достоверно описывающие поведения сложных композитных материалов, либо отсутствуют вовсе, либо требуют большого количества эмпирических констант. Проведённые ранее исследования продемонстрировали, что при воздействии сильноточного электронного пучка в композитных материалах могут образовываться нехарактерные для создаваемых давлений и температур наноструктуры [1], а влияние параметров полимерных связующих на общее поведение композитов при импульсном воздействии оказывается существенно более значительным, чем предполагалось ранее [2].

В данной работе представлено экспериментальное исследование поведения нескольких типов материалов под действием сильноточного релятивистского электронного пучка установки «Кальмар» [3].

Основными преимуществами сильноточного электронного ускорителя «Кальмар» являются: широкий диапазон плотностей энергий воздействия, а также обширный диагностический комплекс, который позволяет с достаточно высокой точностью определять параметры пучка, воздействующего на образец и наблюдать динамику плазмы как в собственном свете, так и в лазерной тени [4]. Также в эксперименте с высокой точностью измерялась масса унесенного с образцов материала. Морфологические исследования поверхности разрушения образцов после воздействия пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» выполнены с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6490.

Эксперименты на установке «Кальмар» выполнены при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ № 2073 от 09.10.2020).

Литература

[1]. Милехин Ю.М., Садовничий Д.Н., Шереметьев К.Ю., Калинин Ю.Г., Казаков Е.Д., Марков М.Б. // Доклады академии наук. 2019. Т. 487. N 2. С. 159–163.
[2]. Садовничий Д.Н., Милехин Ю.М., Калинин Ю.Г. и др.// Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94. Вып. 8. С. 1065-1078.
[3]. Демидов Б.А., Ивкин М.Б., Петров В.А., Фанченко С.Д. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. В. 2. С. 101–116.
[4]. Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Крутиков Д.И., Курило А.А., Орлов М.Ю., Стрижаков М.Г., Ткаченко С.И., Шашков А.Ю. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 8. С. 716-727.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК, СИЛЬНОТОЧНЫМ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

[1,2,3]Казаков Е.Д., [1]Бобырь Н.П., [1]Крутиков Д.И., [1]Орлов М.Ю.,
[1,2]Смирнова А.Р., [1]Спицын А.В., [1]Стрижаков М.Г., [4]Сунчугашев К.А.

[1]НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия
[2]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Московская область, Россия
[3]НИУ МЭИ, г. Москва, Россия
[4]РУДН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.131

При возникновении аварийных ситуаций на мощных плазменных установках потоки плазмы или пучки заряженных частиц могут попадать на стенку вакуумной камеры приводя к её повреждению [1]. В данной работе исследовались образцы из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и ферритно-мартенситной коррозионностойкой стали ЭК-181 (Русфер). Предварительные эксперименты, проведённые на сильноточном ускорителе электронов «Кальмар» продемонстрировали, что многократное воздействие пучка электронов с энергией порядка 100 Дж приводит к значительному оплавлению стали и растрескиванию поверхности образцов из вольфрама [2].

Новая серия экспериментов призвана оценить различие между мощным однократным воздействием и серией воздействий с умеренной мощностью. Также было проведено численное моделирование торможения электронов в образцах.

Моделирование воздействия релятивистского электронного пучка на исследуемый образец проводилось с помощью программы «Каскад» (далее Программа), в которой реализован метод Монте-Карло. Программа предназначена для расчёта линейных характеристик полей электронов, позитронов и гамма-квантов в общей неоднородной среде, представляющую собой цилиндр, разбитый на однородные по составу зоны различных радиусов и толщины. Программа объединяет в себе два основных метода расчёта полей электронов методом Монте-Карло: модель отрезков [3] и модель катастрофических столкновений [4]. В Программе реализованы алгоритмы группировки малых передач энергии для электронов и позитронов и аналоговое моделирование для гамма-квантов в диапазоне энергий 0,01 – 10^5 МэВ для моделирования пробегов между катастрофическими столкновениями. Рождение вторичных заряженных частиц и гамма-квантов моделируется так же, как в модели катастрофических столкновений [5]. Результатами расчётов являлись: глубина пробегов электронов внутри мишеней, глубины энерговыделения и энергия тормозного излучения.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (Приказ № 1953 от 29.09.2020).

Литература

[1]. Саврухин П.В., Шестаков Е.А., Борщеговский А.А., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 4. С. 50–62.
[2]. Бобырь Н.П., Казаков Е.Д., Крутиков Д.И., и др. // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021 Сборник научных трудов VII Международная конференция. Москва, 2021 С. 399-401.
[3]. Berger M. J., Monte Carlo calculation of the penetration and diffusion of fast charged particles, in *Methods in Computational Physics,* Ed. by B. Alder, S. Fernbach, and M. Rotenberg (Academic, New York, 1963), p. 135.
[4]. Аккерман А. Ф., Никитушев Ю. М., Ботвин В. А. Решение методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов в веществе //Алма-Ата: Наука. – 1972. – С. 166.
[5]. Пляшешников А. В., Кольчужкин А. М. Расчет полей излучения точечного мононаправленного источника быстрых электронов методом Монте-Карло, Атомная энергия (1976), т. 41, вып. 6, стр. 415.

ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНЫХ ФАКТОРОВ РАЗРЯДНОЙ СИСТЕМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В.

НИИ механики МГУ, г. Москва, Россия, e-mail: krestytroitsk@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.132

Работа посвящена исследованию сильноточных (до 600 А) протяженных (до 15 см) электрических дуг атмосферного давления на установке П-2000 НИИ механики МГУ [1,2]. В отличие от работ [3-5], в настоящей работе отражены результаты исследований не только в воздушных средах, но и других газах, в аргоне и азоте. Для проведения экспериментальных исследований построена разрядная камера, позволяющая путем вытеснения из неё воздуха и прокачки газов, обеспечивать требуемый состав разрядной среды. Наличие прозрачных стенок позволяет проводить высокоскоростную видеосъёмку разряда в камере. Высокоскоростная видео регистрация разрядного промежутка синхронизирована с данными измерений тока и напряжения. Проводилась пирометрическая диагностика температуры электродов и спектральные измерения характеристик разрядной плазмы в столбе дуги и вблизи электродов. При наложении внешнего аксиального магнитного поля диагностика его компонент в разрядной камере с течением времени обеспечивалась датчиками Холла SS495A. Расчётно-теоретические оценки процессов проведены на основе подходов, развитых в [3, 6, 7]. Проведено исследование устойчивости дугового разряда между электродами при нестабильном межэлектродном расстоянии и наличии внешнего магнитного поля и прокачки газов. Получены и уточнены данные о влиянии состава межэлектродной среды на режимы инициирования разряда. Уточнены данные о допустимых уровнях возмущений межэлектродного зазора, не приводящих к дестабилизации разряда в условиях разряда в разных газах. Проведены эксперименты при разных размерах электродов и зазорах, и ЭДС с целью получения зависимостей критического электрического поля (для инициирования стабильной дуги) от отношения эффективных поперечных размеров анода и катода. Полученные в настоящей работе результаты могут быть востребованы при разработках систем инициирования и гашения протяженных электрических дуг и для оптимизации (дополнительным высокотемпературным сжиганием в плазменной среде) установок утилизации (в т.ч. и токсичных) отходов, трудно разлагающихся при использовании традиционных химических технологий [8].

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова (госконтракт №АААА-А16-116021110198-5) при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-29-21022).

Литература

[1]. Glinov A.P., Golovin A.P., Kozlov P.V., Shaleev K.V., and Lyubimov G.A., J. Phys.: Conf. Ser. **1250**, 012019 (2019).
[2]. Glinov A.P., Golovin A.P., and Kozlov P.V., J. Phys.: Conf. Ser. **2055**, 012006 (2021).
[3]. Glinov A.P., Golovin A.P., and Shaleev K.V., Prikl. Fiz., No. 2, 21 (2018).
[4]. German V.O., Glinov A.P., Golovin A.P., Kozlov P.V., and Lyubimov G.A., Plasma Phys. Rep. **39**, 1142 (2013).
[5]. Glinov A.P., Golovin A.P., Kozlov P.V., Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics **21** (2), 2020, http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-2/articles/916.
[6]. Glinov A.P., Fluid Dynamics **50** (3), 322–331 (2015).
[7]. Glinov A.P., Fluid Dynamics **50** (4), 483–493 (2015).
[8]. Rutberg A.F, Vasil'eva O.B., Kumkova I.I., Safronov A.A., High Temp. **51** (2), 167 (2013).

ОБНАРУЖЕНИЕ В СИЛЬНОТОЧНОМ ГЕНЕРАТОРЕ РЭП СВЕРХЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Белозеров О.С., Бакшаев Ю.Л., Хромов С.А., Данько С.А.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Belozerov_OS@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.133

В импульсных сильноточных генераторах релятивистских электронных пучков, воздействующих на прозрачную для них нагрузку, существует явление ускорения ионов. Энергия отдельных сгустков ионов может в несколько раз превышать приложенное напряжение импульсного генератора, умноженное на ионный заряд. В рамках исследований по ускорению ионов были проведены эксперименты на генераторе «Катран» (напряжение в импульсе ~250 кВ, ток 50 - 150 кА, длительность импульса ~60 нс) [1], которые показали, что ускорение ионов происходит в двух местах: внутри высоковольтного диода генератора и снаружи за тонкой анодной фольгой. Наиболее вероятно, что ускорение ионов до ~ 850 кэВ/нуклон в катод-анодном зазоре связанно с развитием перетяжки в плазме или разрывом токового канала, приводящим к появлению сильного вихревого электрического поля. Электроны в таком поле должны приобретать энергию, существенно превосходящую разность потенциалов высоковольтного диода, умноженную на заряд.

В данной работе представлено экспериментальное измерение энергии электронов по тормозному гамма-излучению. Для определения энергии электронов применялся метод фильтров, в котором проводилось сравнение измеренного отношения сигналов тормозного гамма-излучения открытого датчика к сигналу датчика за фильтром с этим же отношением, рассчитанным по формуле Крамерса [2]:

$$N_\lambda = CZ(\lambda-\lambda_0)/(\lambda_0\lambda^2) \qquad (1)$$

где N_λ – число фотонов приходящихся в единицу времени на единицу поверхности массивного образца, C – константа, зависящая от материала мишени, λ_0 – минимальная длина волны излучения, соответствующая энергии излучающего электрона.

На рис. 1 приведены сигналы напряжения генератора и использовавшихся кремневых детекторов СКД1-01 за 6-ти мм свинцовым фильтром и СКД1-02 без фильтра.

Поскольку временное разрешение детекторов СКД1-01 и СКД1-02 составляет 3,5 и 5 нс, соответственно, а характерная частота осцилляций тока, возникающих в высоковольтном диоде при генерации электронного пучка, составляет 0,5 ГГц, то сигналы детекторов отражают усреднённое значение энергии электронов. Лишь небольшая часть электронов получаются сверэнергичными, поскольку фаза сверхвысокого вихревого поля коротка. И даже при этом условии измеренное отношение сигналов согласуется с рассчитанным для электронов со средней энергией ~400 кэВ.

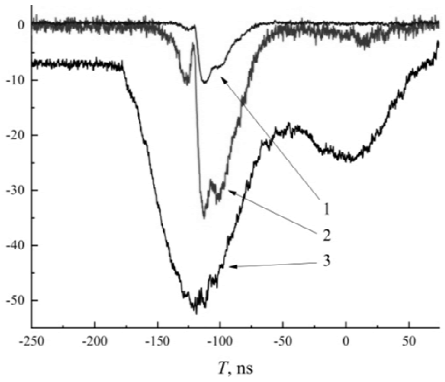


Рис. 1. Характерные сигналы:
(1) – СКД1-01 с фильтром, отн. ед.;
(2) – СКД1-02 без фильтра, отн. ед.;
(3) – напряжение на передающей линии генератора, кВ/5

Работа была выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ №2073 от 09.10.2020).

Литература.

[1]. Белозеров О.С., Данько С.А., Хромов С.А., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, № 1, с. 136-144.

[2]. Павлинский Г.В. Основы физики рентгеновского излучения. – М.: Физматлит, 2007.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА СПД ИЗ ВТСП 2 ЛЕНТЫ

[1]Бишаев А.М., [1]Буш А., [2]Гавриков М.Б., [1]Каменцев Е.К., [2]Савельев В.В.

[1]РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, e-mail: bishaev@mirea.ru, bush@mirea.ru, kamentsev@mirea.ru
[2]ИПМ РАН, г. Москва, Россия, e-mail: mbgavrikov@yandex.ru, ssvvvv@rambler.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.134

Ленты из ВТСП 2 имеют широкие перспективы для создания магнитных систем в самых различных областях, таких как медицина (МРТ), магнитная сепарация, энергетика, магнитное охлаждение и др. Экономическая привлекательность сверхпроводящих магнитов из ВТСП 2 ленты, объясняется тем, что она становится сверхпроводящей при температуре жидкого азота. Магнитная система СПД состоит из двух внутренней и внешней катушек и магнитопровода из мягкого железа. Оптимальная конфигурация магнитного поля в разрядной камере из керамики СПД 100 показана в [1]. В докладе приведены расчеты конфигурации магнитного поля в СПД 100 для магнитной системы из ВТСП 2 ленты. Система состоит из 2-х катушек, которые образуют квадруполь. Катушка большего размера расположена снаружи изолятора разрядной камеры. Вторая катушка расположена внутри изолятора разрядной камеры. Направление тока в обеих катушках одинаковое. Катушки расположены в месте расположения анода в разрядной камере. Поперечное сечение катушки имеет вид прямоугольника с высотой 10 мм и шириной 8 мм. Были проведены расчеты картины силовых линий в такой магнитной системе. При величине тока во внутренней катушке в 7 раз большей, чем во внешней, рассчитанная картина практически совпадает с картиной силовых лини в СПД. Если величина тока во внутренней катушке 4500А, то величина магнитного поля увеличивается от 0 в области анода до 250 Гс на срезе двигателя. Это тоже соответствует параметрам поля в СПД. Величина тока во внутренней катушке получается при токе при токе 45А и числе витков 100. Эксперименты по левитации катушек из ВТСП 2 ленты показали, что указанная величина тока ниже критического значения в ленте шириной 4мм. Такое количество витков помещается в катушке выше указанных размеров. Расчеты также показали возможность изменять градиент возрастания магнитного поля в разрядной камере, изменяя ширину катушек. Проведенные расчеты показали, что в СПД с магнитной системой из ВТСП 2 ленты достижима величина магнитного поля 1000Гс, что позволяет увеличить удельный импульс двигателя. Рассмотренная магнитная система позволяет так же значительно увеличить диаметр двигателя. Это дает возможность создать двигатель на 100 кВт. Как показано в [2], замена традиционной системы магнитных катушек в железной броне на катушки из ВТСП 2 ленты позволяет значительно увеличить кпд и удельный импульс плазменного двигателя за счет увеличения магнитного поля.

Литература

[1]. А.С. Архипов, В.П. Ким, Е.К. Сидоренко. Стационарные плазменные двигатели Морозова, Москва, МАИ. 2012, с. 40-47
[2]. A.S. Voronov et al., J. Phys.: Conf. Ser. **1461**, 012189 (2020).

ОБ АНОМАЛЬНОЙ ЭРОЗИИ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ СПД

[1]Бишаев А.М., [2]Гавриков М.Б.

[1]РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, e-mail: bishaev@mirea.ru
[2]ИПМ РАН, г. Москва, Россия, e-mail: mbgavrikov@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.135

Рассмотрен процесс возникновения локальных неоднородностей эрозии изолятора разрядной камеры в СПД. В [1] показано, что локальные неоднородности эрозии поверхности стенок разрядной камеры СПД при его длительной работе имеют форму канавок вдоль направления движения ионов в выходной части изолятора. Прорези возникают в начале зоны эрозии со стороны анода. При увеличении длительности работы двигателя прорези углубляются и удлиняются вплоть до выходного торца двигателя. Ширина прорезей составляет величину порядка трех миллиметров. Известно, что электроны в зоне ускорения двигателя движутся в основном в азимутальном направлении в скрещенных электрических и магнитных полях (эффект Холла). Траектории электронов в таких полях являются трохоидами [2]. Все траектории электронов, которые выходят из одной точки трохоиды опять собираются в одну точку. Расстояние между этими точками равно шагу трохоиды. Поэтому концентрация электронов в этих точках значительно возрастает, по сравнению с концентрацией на остальной части траектории. Электроны, которые стартуют в различных точках трохоиды с разными скоростями, группируются в сгустки. В этом случае ток Холла состоит из прямолинейных токовых слоев с отрицательными зарядами на расстоянии шага трохоиды. Скорость дрейфа на начальной части зоны эрозии постоянна. Электрические и магнитные силы взаимодействия межу слоями токов Холла выравнивают скорость дрейфа на всем протяжении зоны эрозии. В этом случае на поверхности изолятора образуются полосы отрицательного заряда вдоль направления электрического поля в двигателе. Воздействие электрического поля этих зарядов на ускоренные ионы приводит к увеличению скорости эрозии изолятора и образованию канавок. Ширина этих канавок равна шагу трохоиды. Для характерных параметров магнитных и электрических полей в СПД он составляет 3мм. В начале зоны эрозии энергия ускоренных ионов воль оси двигателя небольшая. Плотность выпадающих на стенку ионов больше, чем на конечной части зоны эрозии. Поэтому аномальная эрозия начинается в начале зоны эрозии. Равенство азимутальной ширины прорезей шагу трохоиды и возникновение аномальной эрозии в начале этой зоны объясняется представленной картиной возникновения аномальной эрозии.

Литература

[1]. В.П. Ким, Р.Ю. Гниздор, В.С. Захарченко и др. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные, и нейтронные исследования, 2020, № 11, с.101-108.

[2]. Л.А. Арцимович, С.Ю. Лукьянов. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Москва «Наука». 1978 г. С. 103-106

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ДИСПЕРСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЖИДКИЕ ЭЛЕКТРОДЫ

Бычков В.Л., Сороковых Д.Е., Мухамадиев А.И.., Шваров А.П., Михайловская Т.О., Горячкин П.А., Малютин И.С., Черников В.А., Изотов А.М.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: bychvl@gmail.com

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.136

Интерес к воздействию плазмы коронного разряда в воздухе на поверхность различных диэлектрических материалов носит практический характер. Он связан с изучением поведения частиц на поверхности Земли в различных условиях под действием электрического поля в условиях гроз, так и в области действия различных устройств транспортировки электрической энергии. Такие исследования представляют также интерес для решения экологических проблем дезинфекции жидкостей и порошков, изменения их проводимости, химического состава, генерации активных частиц в жидкостях и в приповерхностных слоях дисперсных материалов, диспергирования порошков электрическими разрядами, в плазмохимии, а также активация горючих. В последние годы интерес к подобным исследованиям проявляется в связи с проблемами создания почвы в экстремальных местообитаниях, в миссиях на Марс и др.

Фундаментальным вопросом является возможность появления структур на поверхности жидкости или дисперсного материала под действием электрического поля разряда, в экспериментах с коронным разрядом над плохо проводящими - диэлектрическими жидкостями и дисперсными материалами, а именно: спиртом, глицерином, бутил гликоля и глиной. В таком случае, поверхность жидкости или дисперсного материала служит электродом, а другой электрод находится над поверхностью и служит источником плазмы.

Мы наблюдали появление струй, столбиков и фонтанов в случае жидкостей, столбиков и шариков в случае глины, при отсутствии появления структур в случае SiO_2. Появление структур связано с развитием пондермоторных сил и гидродинамических неустойчивостей над поверхностью нижнего электрода, покрытого жидкостью, или дисперсным материалом.

Мы также исследовали воздействие плазмы коронного разряда на поверхность зерна озимой пшеницы и озимого ячменя с целью уменьшения количества вредных грибков на их поверхности. В зависимости от типа грибка плазма уменьшает от нескольких процентов до нуля в зависимости от интенсивности разряда и времени обработки зерна.

Этот эффект открывает новый способ уменьшения количества экологически вредных протравителей при обработке зерна.

ОСНОВНЫЕ ИОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ ВОЗДУХА В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

[1]Бычков В.Л., [1]Кралькина Е.А., [2]Кочетов И.В., [3]Голубков М.Г., [1]Смирнов Д.И.

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: bychvl@gmail.com
[2]АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", г. Москва, Россия, e-mail: kochet@triniti.ru
[3]ФИЦ ХФ им. *Н.Н. Семёнова РАН,* г. *Москва, Россия, e-mail: ilyastep91@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.137

Интерес к составу плазмы ионосферы на высотах 100 - 200 км возрос в последнее время в связи с вопросами химии атмосферы и возможностью создания космических аппаратов для высотно низколежащих траекторий. Это требует знания параметров плазмы около и внутри летательных аппаратов.

В этой связи были проделаны расчеты констант ионизации и прилипания на основе решения уравнения Больцмана для ФРЭЭ на высоте 100 - 200 км в зависимости от параметра *E*/*N*, которые могут реализоваться вблизи антенн летательных аппаратов и при внешнем воздействии источников радиоволнового возбуждения типа Харпа. Диапазон параметра *E*/*N* находился в пределах 100 - 10000 Td.

Были также проделаны расчеты высотного распределения основных ионов N_2+, O_2+, O+, NO+ на основе системы химических уравнений и констант скорости процессов для ионосферы из [1], которые находятся в качественном согласии с ракетными измерениями.

Различие между результатами расчета состава и измерениями связаны с отсутствием надежных данных по скоростям наработки ионов N_2+, O_2+, O+, NO+ в реакциях возбуждения быстрыми частицами и радиацией.

Литература

[1]. Е.В. Мишин, Ю.Я. Ружин. В.А. Телегин, *Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой* (Гидрометеоиздат, Ленинград, 1989).

ОСНОВНЫЕ ИОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ ВОЗДУХА В ТРОПОСФЕРЕ

[1]Бычков В.Л., [1]Кралькина Е.А., [2]Степанов И.Г., [2]Голубков М.Г.,
[1]Смирнов Д.И.

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: bychvl@gmail.com
[2]ФИЦ ХФ им. *Н.Н. Семёнова РАН,* г. *Москва, Россия, e-mail: ilyastep91@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.138

Интерес к составу плазмы ионосферы на высотах 0 - 40 км возрос в последнее время в связи с вопросами химии атмосферы и исследованием процессов ионообразования вблизи грозовых облаков. Вопрос о распределении концентрации ионов в нижней ионосфере по высоте имеет важный прикладной интерес, поскольку концентрация ионов при их участии в химико-физических процессах определяет их влияние на процессы заряжения ионосферы и облаков и электропроводность нижней ионосферы.

Знание концентраций ионов позволяет судить о процессах в ионосфере в состоянии перед землетрясениями, поскольку во время землетрясений происходит стремительный рост концентраций частиц.

Знание об ионном составе атмосферы необходимо при моделировании устройств плазменной аэродинамики, когда необходимо создать область плазмы на высотах, там, где не работают процессы ионизации за счет радона в приземном слое атмосферы.

Важным вопросом является распределение ионов по высоте грозового облака, которое неоднородно заряжается за счет наработки ионов, рожденных при столкновении частиц космических лучей с молекулами воздуха вблизи облака. Для расчетов мы использовали зависимость ионизации атмосферы космическими лучами от высоты над уровнем моря, измеренная в разных точках земного шара, то есть при разных значениях магнитной жесткости.

При определении основных процессов, приводящих к установлению сорта заряженных частиц мы использовали анализ элементарных процессов в нижней ионосфере, который показывает, что после рождения электронов и ионов эффективно происходят процессы прилипания электронов к молекулам кислорода и процессы конверсии положительных ионов. С учетом этих процессов получено, что на рассмотренных высотах выполняется соотношение $Q = \alpha_{ii} \cdot N_{o_2^-} \cdot N_{M_2^+}$, где Q –скорость ионизации, α_{ii} -зависящий от температуры (высоты) высоты коэффициент ион-ионной рекомбинации, $N_{o_2^-}$ - концентрация отрицательных ионов кислорода, $N_{M_2^+}$ - концентрация положительных ионов, при $N_{o_2^-} \approx M_2^+$ $N_{o_2^-} = \sqrt{Q/\alpha_{ii}}$. (При атмосферном давлении, на уровне Земли, когда Q=4 см$^{-3}$·с$^{-1}$, а $\alpha_{ii} \approx 2 \cdot 10^{-6}$, см$^{-3}$/с, концентрация ионов оказываются порядка экспериментальной $N_{o_2^-} \approx 1.4 \cdot 10^3, \text{см}^{-3}$). Основными являются ионы O_2^-, O_4^+. Концентрация электронов определяется на основе соотношения $N_e = (Q + k_{\text{det}} \cdot N_{O_2^-} \cdot N)/\nu_{tr}$ где k_{det} - константа отлипания электронов от молекул кислорода, ν_{tr} - частота трёхтельного прилипания электронов к молекулам кислорода, N – концентрация нейтралов. При учете отлипания концентрация электронов на уровне земли оказывается порядка 1 см$^{-3}$.

НАНОСЕКУНДНЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ СКОЛЬЗЯЩИЙ РАЗРЯД В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА С НАКЛОННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Мурсенкова И.В., Иванов И.Э., Ляо Ю.

МГУ им. Ломоносова, физический факультет; г. Москва, Россия,
e-mail: murs_i@physics.msu.ru DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.139

Представлены результаты экспериментального и численного исследования сверхзвукового течения воздуха с наклонной ударной волной в разрядной камере ударной трубы при инициировании наносекундного поверхностного скользящего разряда. Актуальность работы связана с необходимостью изучения механизма воздействия импульсных разрядов на высокоскоростные потоки в задачах плазменной аэродинамики [1, 2]. Наклонная ударная волна создавалась при обтекании сверхзвуковым потоком небольшого препятствия на нижней стенке канала разрядной камеры; числа Маха потоков составляли 1,16 – 1,70. Численные расчеты газодинамического течения в канале проводились при реализации импульсного энерговклада около верхней стенки канала; геометрия области энерговклада задавалась в соответствии с экспериментальными результатами. Моделирование течения проводилось на основе решения нестационарных двумерных уравнений Навье-Стокса для турбулентного течения вязкого сжимаемого газа [3].

В экспериментах на верхней стенке канала разрядной камеры ударной трубы при приложении импульсного напряжения 25 кВ инициировался поверхностный скользящий разряд длительностью ~300 нс, площадь которого в однородной среде составляет 100 × 30 мм^2 [1, 4]. В неоднородном сверхзвуковом потоке воздуха ток разряда сосредоточен в одиночном канале в области пересечения наклонной ударной волны с пограничным слоем; концентрация электронов в нем превышает 10^{15} см$^{-3}$ при токе разряда ~1 кА [4]. От разрядного канала распространяется ударная волна, влияющая на ударно-волновое течение в канале.

Пространственная структура течения с наклонной ударной волной исследовалась теневым методом. Высокоскоростная теневая регистрация поля течения проводилась с частотой до 525000 кадров в секунду; одновременно регистрировались ток и свечение разряда. Цифровая обработка теневых изображений после разряда показала, что локализованный разрядный канал генерирует полуцилиндрическую ударную волну, динамика которой определяется параметрами потока и параметрами разряда. Численное моделирование, проведенное с учетом экспериментальной динамики фронта ударной волны, показало, что в разрядном канале выделяется тепловая энергия ~0,20 Дж в условиях проведенных экспериментов.

Воздействие ударной волны на течение может быть использовано для управления потоком.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00661.

Литература

[1]. Mursenkova I.V., Znamenskaya I.A. and Lutsky A.E., Influence of shock waves from plasma actuators on transonic and supersonic airflow, J. Phys. D: Appl. Phys. 51, 105201 (2018).

[2]. Стариковский А.Ю., Александров Н.Л., Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 2. С. 126-192

[3]. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Метод расчета турбулентных сверхзвуковых течений. Математическое моделирование, 2009. Т. 21. № 12. С. 103–121

[4]. Мурсенкова И.В., Уланов П.Ю., Кузнецов А.Ю., Ляо Ю. Параметры плазмы наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха. Сб. тез. докл. XLVIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. М., 2021. С. 191. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVIII/T.html

ДИНАМИКА ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПЛОСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

[1]Мурсенкова И.В., [1]Милицина А.А., [1]Кузнецов А.Ю., [2]Уланов П.Ю.

[1]МГУ им. Ломоносова, физический факультет; г. Москва, Россия,
e-mail: murs_i@physics.msu.ru
[2]АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.140

В работе представлены результаты экспериментального исследования движения плоской ударной волны в релаксирующей плазме наносекундного объемного комбинированного разряда в ударной трубе (числа Маха ударных волн 2,2 – 4,0). Изучалась динамика движения ударной волны по плазменному объему при сопоставлении с характером релаксации плазмы. Полученные результаты могут использоваться для воздействия на ударные волны с помощью импульсных разрядов.

Эксперименты проводились на ударной трубе с разрядной камерой, в которой в объеме $100 \times 30 \times 24$ мм^3 инициировался комбинированный объемный разряд при импульсном напряжении 25 кВ [1, 2]. Ток разряда достигал 1 кА, его длительность не превышала 500 нс. Анализировались ток и излучение разряда, на послеразрядной стадии – динамика движения фронта ударной волны. По спектрам излучения оценивались концентрация и энергия электронов в плазменном объеме, напряженность электрического поля.

В присутствии фронта ударной волны в разрядном объеме ток разряда протекает перед фронтом ударной волны. Интенсивность свечения разряда, взаимодействующего с ударной волной, коррелирует с осцилляциями тока разряда. Полная длительность свечения (~1600 нс) значительно больше длительности тока разряда [1]. По оценкам, время диссоциативной рекомбинации ~10 нс в условиях проведенных экспериментов. Продолжительное свечение области газа вблизи фронта ударной волны связано с послесвечением молекулярного азота [1]. Изменение состояния газа в объеме протекания тока разряда приводит к распаду газодинамического разрыва на границе «фронт исходной ударной волны – плазма» [2, 3]. Образуются две ударные волны, движущиеся в противоположные стороны, и контактная поверхность. Одна из ударных волн двигается по области релаксирующей плазмы, сжимая ее и вызывая длительное послесвечение [1, 2]. Высокоскоростная теневая визуализация поля течения в канале с частотой до 525000 кадров в секунду дала возможность определить характер движения образовавшихся волн. Цифровая обработка последовательностей теневых изображений обнаружила временные особенности движения фронта ударной волны по плазменной области и показала, что динамика ударной волны зависит от начальных параметров плазмы и рекомбинационных и релаксационных процессов.

Литература

[1]. Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В. Особенности излучения объемного наносекундного разряда в воздухе при взаимодействии с плоской ударной волной, Прикладная физика, 2016. № 5. С. 16-21.

[2]. Дорощенко И.А., Знаменская И.А., Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Исследование плазмодинамических процессов наносекундного диапазона при формировании ударных волн от импульсных разрядов, ЖТФ, 2018. Т. 88, № 5. С. 684-691

[3]. I. Znamenskaya, I. Mursenkova, I. Doroshchenko, I. Ivanov. Flow analysis of a shock wave at pulse ionization: Riemann problem implementation. Phys. Fluids **31**, 116101 (2019).

ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОДОВ КАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ

Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю., Обрезков О.И.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: mifst04nmy@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.141

Имплантируемые в сердце человека эндокардиальные электроды кардиостимуляторов должны удовлетворять жёстким требованиям, к которым относиться биосовместимость, хороший электрический контакт (в основном ёмкостной) с тканью сердца, прочность и коррозионная стойкость. Наносимое покрытие должно иметь многослойную структуру (см. рис):

- снизу адгезионный и защитный слой от электрохимической коррозии основного материала электрода (0,5 ÷ 2 мкм);
- промежуточный слой с высокоразвитой структурой для увеличения контактирующей поверхности и ёмкости двойного электрического слоя (2 ÷ 20 мкм);



- сверху высокостабильный электроконтактный слой металлов платиновой группы и их оксидов.

Формирование такого сложного покрытия осуществляется путём сожного многоступенчатого поцесса с помощью комплекса оборудования повещённого в один вакуумный объём.

Осаждение титанового покрытия осуществляется в магнетронном распылителе, а образование нитрида титана происходит в результате соосаждения ионов реакивного газа азота [1]. Плазма реактивного газа азота создаётся ВЧ генератором плазмы [1]. Образование высокоразвитой структуры слоя нитрида титана осуществляется в результате сопутствующего облучения ионами Ti с энергией до 30 кэВ от импульсного источника ионов MEVVA [2, 3].

Покрытия платиной и иридием осуществляется дуговыми импульсными испарителями из мишеней, изготавливаемых из металлов платиновой группы. Реактивный газ кислород обеспечивает окисление в процессе осаждения слоя толщиной от 0,1 до 5 мкм. Окисление металлов платиновой группы необходимо для стабилизации их свойств, поскольку в процессе эксплуатации эти металлы окисляются в результате электрохимических реакций.

Литература

[1]. Патент РФ RU 2503 079 C1
[2]. Вершок Б.А., Мартыненко Ю.В., Смирнов В.П., Обрезков О.И., патент на изобретение № 2371513.
[3]. Нагель М.Ю., Мартыненко Ю.В., Российские нанотехнологии, 2013, т. 8, № 7–8. С.72-77.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ В НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ ИОНОВ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

Змиевская Г.И.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия, e-mail: zmig@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.142

Исследования механизмов повреждаемости материалов и особенностей физико-химических процессов поверхностного плавления и кристаллизации, тепломассопереноса, образования и эволюции радиационных дефектов, изменения микроструктуры в условиях воздействия высок*оэнергичных импульсных потоков* ионов инертных газов на поверхность созданы вычислительные методы [1] оценки степени и характера повреждения материалов [2]. Образование структурных дефектов (блистеро*в, кратеров, предтрещин и др.) и структур* вакансионно-газовых дефе*ктов внутри покрытия, создающих* скопления дефектов, которые *исследованы* в радиационно стойком материале - карбиде кремния в условиях облучения ионами Xe^{++} с энергиями от 5 до 10 кэВ; процесс рассмотрен как образование зародышей фазового перехода 1-го рода средствами вычислительной математики в терминах кинетической теории неравновесных процессов. Эволюция ансамбля микропор, образующихся в приповерхностной области двуслойного образца с тонкой пленкой карбида кремния моделируются численно. Образцы SIC/Si в [2] изучаются с помощью сканирующей электронной микроскопии, эллипсометрии и конфокальной рамановской микроскопии. Формирование пористого слоя включает в себя несколько характерных стадий: появление отдельных пор, их рост с образованием структур и последующее возможное слияние в сплошной слой и дальнейшее разрушение. Обсуждаются возможные механизмы образования структур пор, теоретическая модель броуновского движения пор под действием косвенного упругого взаимодействия через возмущение колебаний акустических фононов, свойства пористых материалов, зависящие от средней толщины пористого слоя и материала, в котором создается пористая среда. Статистика "крышек" пор и кратеров в результате их разрушения при разных дозах воздействия в численном эксперименте сравнима с данными микроскопии при разных дозах воздействия. Структура поверхности (с микроскопическими флуктуациями рельефа поверхности) может изменить механизм плавления поверхности, эрозии, ведущей к очистке и выравниванию, наблюдаемых при повторных импульсах радиационного воздействия на материал. Систематизация данных необходима для практических приложений по следующим направлениям: механизмы повреждаемости и модифицирование поверхности исследуемых материалов при различных видах в оздействия потоков ионов; эволюция структуры и фазовых состояний, перераспределение компонентов исследуемых материалов при различных видах воздействия ионов; характеристики неупорядоченной пористости в образцах, состоящих из слоев ("диэлектрик/металл") при различных толщинах слоев.

Литература

[1]. Змиевская Г.И. Стохастическая модель зарождения пор при облучении образца ионами инертного газа // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела, 2020, № 1, 137-148

[2]. Redkov Alexey V., Kukushkin Sergey A., Osipov Andrey V., Growth of faceted pores in a multi-component crystal by applying mechanical stress. CrystEngComm **22**, 5280-5288 (2020).

ЭНЕРГОСОДЕРЖАНИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ГЕНЕРИРУЕМОГО В ПЛАЗМЕ ПОТОКА СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ РЭП С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 5 МКС

[1,2]Аржанников А.В., [1,2]Синицкий С.Л., [1]Самцов Д.А., [1,2]Сандалов Е.С., [1,2]Попов С.С., [1]Атлуханов М.Г., [1]Макаров М.А., [1,2]Калинин П.В., [1]Куклин К.Н., [1]Ровенских А.Ф., [1,2]Степанов В.Д.

[1]*Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия*
[2]*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.143

Экспериментальные исследования механизмов генерации субмиллиметрового излучения (0,1 – 0,5 ТГц) при коллективной релаксации релятивистского электронного пучка (РЭП с параметрами 0,6 МэВ/15 кА/5 мкс) проводятся на специализированной установке ГОЛ-ПЭТ [1]. Эксперименты проводятся при плотности плазмы $(0,5 – 1)10^{15}$ см$^{-3}$ в пробочном магнитном поле 4,8/3,6 Тл при плотности тока пучка (1 - 2) кА/см^2.В ходе проводимых исследований за 2015 - 2021 годы экспериментально и теоретически исследованы возможные механизмы генерации субмм излучения в пучково-плазменной системе [2]. В экспериментах, описываемых в представляемом докладе, использован замагниченный плазменный столб со следующим распределением плотности плазмы. Созданы радиальные градиенты плотности, способствующие прямой накачке пучком ЭМ волн в плазме [2]. Кроме того, сформирована область с низкой плотностью плазмы на участке столба со спадающим вдоль оси магнитным полем в окрестности графитового коллектора, поглощающего прошедший через плазму пучок. Эксперименты в 2019 – 2020 годах показали, что мощность в потоке излучения, выведенного в атмосферу через выходное фторопластовое окно, при заданном распределении плотности плазмы достигало величины~10 МВт [3], но длительность импульса ограничивалась уровнем 0,5 мкс из-за развития высокочастотного пробоя на вакуумной стороне окна.

Калориметрические измерения показали, что при указанном ограничении длительности импульса, энергосодержание в выведенном потоке достигает величины 7 Дж. В этих экспериментах был также измерен спектральный состав импульсов излучения, и проведены измерения функции распределения электронов пучка, прошедшего через плазму. Для подъёма длительности импульса выведенного излучения при сохранении уровня мощности, расстояния между поворотным зеркалом и выходным окном было увеличено по вакуумной трубе с 30 до 210 см. Кроме того, это окно из фторопласта было заменено на окно из полиметилпентена (ТРХ), что позволило удлинить импульс излучения до 4 мкс. Такую длительность импульса обеспечил РЭП, получаемый при полочке напряжения на ускорительном диоде на уровне 0.6 МВ с продолжительностью до 5 мкс. Таким образом, достигнут большой прогресс по энергии в импульсах излучения с длиной волны 1 мм.

Литература

[1]. D.A. Samtsov, A.V. Arzhannikov, S.L. Sinitsky, et al., Generation of a Directed Flux of Megawatt THz Radiation as a Result of Strong REB-Plasma Interaction in a Plasma Column, IEEE Trans. Plasma Sci. **49**, 3371 (2021).

[2]. A.V. Arzhannikov, I.A. Ivanov, A.A. Kasatov, et al., Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients, Plasma Phys. Control. Fusion **62**, 045002 (2020).

[3]. A.V. Arzhannikov, V.V. Annenkov, I.A. Ivanov, et. al., Effect of plasma density gradients on generation of terahertz radiation in magnetized plasma column during relaxation of kiloampere REB inside it, J. Phys.: Conf. Ser. **1647**, 012010 (2020). doi: 10.1088/1742-6596/1647/1/012010.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Черкез Д.И., Степанов Н.О., Ананьев С.С., Спицын А.В.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Cherkez_DI@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.144

Источники низкотемпературной плазмы в настоящее время широко применяются в самых разнообразных областях науки и техники и промышленности: бытовое применение в качестве источников света; производство микроэлектроники; плазменная обработка материалов; научные исследования, посвященные различным аспектам взаимодействия плазмы с материалами, в т. ч. перспективными для применения в термоядерном реакторе. Плазменные источники основывается на различных методах ионизации газа: ионизация молекул в тлеющем газовом разряде, ионизация газа электронным ударом, возбуждение высокочастотными (ВЧ) и сверхвысокочастотными (СВЧ) источниками тока и т.д. Для проведения прикладных исследований в области взаимодействия плазмы с поверхностью применительно к задачам термоядерных установок наиболее интересны высокопоточные плазменные генераторы, имитирующие плазменные потоки существующих и строящихся термоядерных реакторов.

К перспективному типу компактных плазменных источников для исследования взаимодействия плазмы с материалами можно отнести ВЧ-источники плазмы, в частности с индукционным разрядом геликонного типа [1 - 2]. Достоинством подобных плазменных источников является возможность варьировать плотность плазмы (и, соответственно, потоки плазмы) в широких пределах, а также отсутствие эродирующих в ходе горения разряда электродов, что существенно влияет на чистоту плазмы. В тоже время, установки такого типа, позволяют достигать плотности плазмы порядка $10^{17} – 10^{19}$ м$^{-3}$ и отличаются компактностью.

В работе представлены результаты проектирования и создания лабораторной экспериментальной установки ГПИ-2 на основе 13,56 МГц геликонного источника плазмы мощностью 2 кВт. Установка предназначена для изучения взаимодействия плазмы с перспективными для применения в термоядерных реакторах материалами. В работе также рассмотрены перспективы дальнейшей модернизации: увеличение вводимой ВЧ-мощности и применение дополнительных магнитных катушек (до 0,3 Тл) для создания магнитной фокусировки с целью повышения плотности плазменного потока. В текущей конфигурации установки в качестве рабочего газа используются изотопы водорода: протий или дейтерий, в т.ч. с возможностью добавления примесей – гелия, неона или аргона.

В работе также приведены первые результаты экспериментов с измерением величин ионных токов в зависимости от введённой ВЧ мощности, а также данные полученные с помощью зондов Ленгмюра. Полученные результаты подтверждают возможность работы источника плазмы в ожидаемом диапазоне плотностей потока ионов $10^{20} – 10^{22}$ ионов/(с·м^2).

Эта работа была частично поддержана Российским научным фондом (№ 18-72-10162).

Литература

[1]. A.A. Ivanov, V.I. Davydenko, I.A. Kotelnikov, A. Kreter, V.V. Mishagin, I.A. Prokhorov, I.V. Shikhovtsev, B. Unterberg, High Efficiency Helicon Plasma Source for PMI Studies, Fusion Sci. Technol. **63** (1T), 217-220 (2013).

[2]. Е.А. Кралькина Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе — УФН, 2008, том 178, номер 5, 519–540, https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200805f.0519.

ДИАГНОСТИКА ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КОМПОНЕНТОВ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА

[1]Рогозин К.А., [1]Федорович С.Д, [1,2]Карпов А.В., [1,3]Кавыршин Д.И., [1,2]Будаев В.П., [1]Лукашевский М.В., [1]Чан К.В., [1]Кваскov В.С., [1]Коньков А.А., [1]Белоусов С.В., [1]Васильев Г.Б.

[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия, e-mail: budayevvp@mpei.ru
[2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
[3]ОИВТ РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.145

При плазменных испытаниях обращенных к плазме внутрикамерных компонентов дивертора ИТЭР и будущего термоядерного реактора - токамака (ТИН, ДЕМО) взаимодействие плазмы с материалами вызывает эрозию поверхности [1] и поступление эродированных материалов в приповерхностную плазму. В результате возникают эффекты плазменного экранирования и изменения условий взаимодействия плазма-стенка. Стоит задача создать диагностические системы для измерения параметров плазмы в таком измененном приповерхностном слое, который может быть толщиной от нескольких сантиметров до миллиметров. Перенос частиц и тепла через такой слой зависит как от средних значений концентрации и температуры электронов и ионов, так и от свойств турбулентности плазмы. Измерение потоков плазмы и тепла на материальную поверхность следует проводить для оценки вклада эффектов эрозии, дуговых эффектов в процессы взаимодействия плазма стенка и, в итоге, оценки уровня тепловой нагрузки на внутрикамерные компоненты реакторы. Такие измерения следует проводить совместно с регистрацией температуры материальной поверхности и теплообмена между поверхностью и системой охлаждения компонентов.

На модифицированной установке ПЛМ (плазменный линейный мультикасп - ПЛМ [2]) в НИУ «МЭИ» разработана и изготовлена система зондовой диагностики для измерения концентрации плазмы, температуры электронов, характеристик турбулентности плазмы и тепловых потоков в приповерхностной зоне над испытуемыми компонентами облицовки первой стенки и дивертора крупномасштабного токамака реакторного размера. Система состоит из измерительных ленгмюровских зондов, электромеханического манипулятора для быстрого перемещения ленгмюровских зондов в плазму, автономной системы питания зондов, измерительных термопар, системы регистрации сигналов зондов и термопар. Проведены измерения характеристик приповерхностной плазмы над вольфрамовым модулем со структурой поверхности типа «пух». Определены характеристики спектров приповерхностной турбулентной плазмы, они типичны для пристеночной плазмы крупномасштабных токамаков и плазменных термоядерных установок. Турбулентные сигналы свидетельствуют о сильной турбулентности приповерхностной плазмы в частотном диапазоне от 1 до 1000 кГц, что указывает на дрейфово-диссипативный тип турбулентности.

Работа поддержана: испытания материалов на установке ПЛМ - проектом № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д ГК «Росатом» ЧУ «Наука и инновации», спектроскопическое исследование - грантом РНФ 21-79-10281, анализ поверхности материалов - Министерством науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023), оценка радиационных эффектов - грантом РФФИ 19-29-02020.

Литература

[1]. Будаев В.П. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез. – 2015. – Т. 38, № 4. – С. 5
[2]. Будаев В.П. и др. ВАНТ сер. Термоядерный синтез. – 2017. – Т. 40, № 3. – С. 35

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА СВЧ ПОЛЯ РЕЗОНАНСНОГО РАЗРЯДА В ПРОБКОТРОНЕ

[1]Двинин С.А., [2,3]Корнеева М.А.

[1]МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: s_dvinin@mail.ru
[2]РУДН, г. Москва, Россия, e-mail: korneevama@mail.ru,
[3]ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.146

Работа посвящена численному и аналитическому исследованию пространственной структуры сверхвысокочастотного (СВЧ) поля и распределения поглощаемой СВЧ мощности в пробкотроне (B_0 = 875 Гс), помещенном в цилиндрический резонатор, а также зависимости импеданса разряда от плотности электронов при возбуждении резонатора через щель в боковой стенке (рис. 1). В центральной области резонатора для СВЧ поля ($\omega/2\pi$ = 2,45 ГГц) выполняются условия циклотронного резонанса ($\omega = \Omega_e$). Такого рода разряды могут использоваться в качестве источников ионных пучков, а также создания плазмохимических реакторов [1].

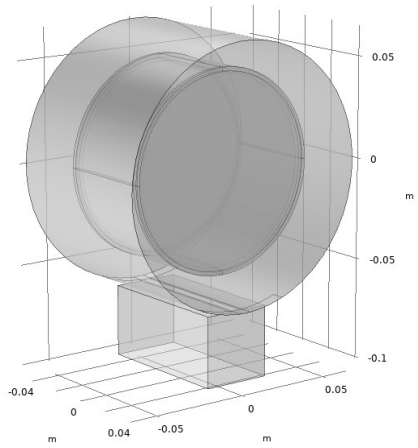


Рис. 1. Геометрическая модель исследуемого резонатора

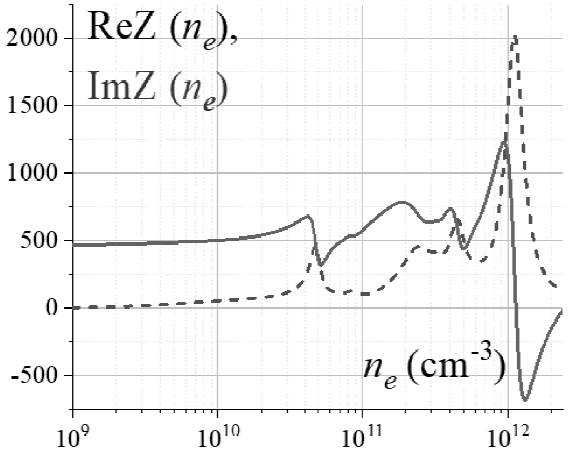


Рис. 2. Изменение импеданса резонатора при изменении плотности электронов

При низких давлениях (10^{-4} Торр) плотность электронов в разряде существенно ниже критической $n_c = m\omega^2/4\pi e^2$, поэтому поглощение СВЧ волны происходит в области циклотронного резонанса. Увеличение давления газа сопровождается значительным увеличением плотности электронов вплоть до $3\cdot10^{11}$ см$^{-3}$ [2] и качественной перестройкой пространственного распределения электромагнитного поля, что подтверждается измерением поляризации волн с помощью ВЧ зондов в эксперименте.

Численное моделирование с помощью пакета Comsol Multiphysics® (лицензия принадлежит физическому факультету МГУ) показало, что на зависимости импеданса заполненного плазмой резонатора наблюдается несколько всплесков поглощения при определенных плотностях электронов (рис. 2), причем в промежутке между всплесками происходит качественная перестройка электромагнитного поля, что согласуется с результатами эксперимента.

Литература

[1]. G. Castro, D. Mascali, S. Gammino, G. Torrisi, F. P. Romano, L. Celona, C. Altana, C. Caliri, N. Gambino, D. Lanaia, R. Miracoli, L. Neri and G. Sorbello, *Plasma Sources Sci. Technol,* **26**, 055019 (2017).

[2]. V.V. Andreev, I. A. Voldiner, M.A. Korneeva, *Plasma Phys. Rep.* **43,** 1119 (2017).

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА ПРИ РАБОТЕ НА ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ И НА ВОЗДУХЕ

Бычков В.Л., Вавилин К.В., Кралькина Е.А., Двинин С.А.,
Задириев И.И., Никонов А.М., Смирнов Д.И.

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: ekralkina@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.147

Высокочастотные источники ионов (ВЧ ИИ) широко используются в наземных и космических технологиях [1]. На земле ВЧ ИИ применяются в процессах чистки и поверхностной модификации материалов, процессах ионного стимулирования при напылении тонких пленок. В космосе ВЧ ИИ применяются для создания тяги, позволяющей управлять ориентацией космических аппаратов (КА), компенсировать потери их скорости в результате трения, изменять высоту орбиты. До недавнего времени основным рабочим газом ИИ или, точнее, электроракетных двигателей (ЭРД), был ксенон.

В последние годы актуальной стала организация полетов КА на низких околоземных орбитах (НОО) (180–200 км), открывающих перспективы для развития телекоммуникаций, транспортных операций и широкого круга научных исследований [2]. Основная проблема полетов на НОО состоит в высоком сопротивлении остаточной атмосферы, приводящим к быстрой потере высоты КА. Выходом из положения является оснащение КА ЭРД, способным компенсировать потери скорости. Однако расчеты показывают, что запасы топлива, необходимые для долговременной работы КА на высотах 180–200 км, неоправданно велики. В связи с этим в мире интенсивно ведутся работы по созданию устройств забора атмосферных газов (УЗАГ), сопряженных с ЭРД. Поток газов, поступающих в ЭРД из УЗАГ, должен обеспечить создание тяги, необходимой для компенсации сопротивления остаточной атмосферы. В связи с этим появляется потребность в разработке эффективных ВЧ ИИ, работающих на молекулярных азоте и кислороде, а также на атомарном кислороде, преобладающих в земной атмосфере на расстоянии от Земли 180 - 200 км или их смеси с инертными газами.

В настоящей работе была поставлена задача изучить возможности оптимизации ВЧ ИИ при их работе на ксеноне, аргоне, воздухе и их смесях. В качестве модели ВЧ ИИ используется индуктивный источник ионов диаметром 5 см. Источник состоит из кварцевой газоразрядной камеры (ГРК) и ионно-оптической системы (ИОС), сформированной тремя перфорированными электродами. В верхней части ГРК расположен газоввод, через который рабочий газ поступает в ГРК. На внешней боковой поверхности ГРК расположена соленоидальная антенна. Антенна подключалась к ВЧ генератору через систему согласования. Мощность ВЧ генератора могла изменяться в диапазоне 0 – 1000 Вт, частота генератора – 13,56 МГц. На индуктивный ВЧ разряд накладывалось внешнее магнитное поле, величина которого выбиралась из условия максимума ионного тока.

Предварительные измерения показали, что замена ксенона на аргон и воздух существенно понижает долю мощности ВЧ генератора, поглощенную плазмой (от 0,8 до 0,47). Это сопровождается понижением величины ионного тока, получаемого при заданной мощности ВЧ генератора и повышением «энергетической цены» иона. Тем не менее из результатов следует возможность использования атмосферных газов в качестве рабочего тела двигателя КА. Результаты экспериментов сопоставлены с расчетами. Проведены первые расчеты движения молекул внутри УЗАГ.

Литература

[1]. Kralkina E.A., Vavilin K.V., Zadiriev I.I., Nekliudova P.A., Shvydkiy G.V. Vacuum, **167**, 136 (2019). https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.05.041.
[2]. Filatyev A.S., Yanova O.V., Acta Astronautica, **158**, 23 (2019), doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.10.039

ВРМБ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ ДВУМЕРНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЛНЫ НАКАЧКИ В ПРИБЛИЖЕНИИ СИЛЬНОЙ ДИССИПАЦИИ

[1]Двинин С.А., [2]Солихов Д.К., [2]Хобилов Д.У.

[1]МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: dvinin@phys.msu.ru,
[2]Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан,
e-mail: davlat56@mail.ru. DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.148

Рассмотрена задача о конвективном усилении волн при ВРМБ в условиях, когда волна накачки с частотой ω_0 и волновым вектором $\mathbf{k}_0$ и амплитудой E_0, распространяется вдоль плазменного слоя (ось $0X$) размерами $0 < y < L_2$, $-L_{1A} < x < L_{1B}$. Проекции волновых векторов рассеянных волн (звуковой и электромагнитной с частотами ω_1, ω_2, $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$ и волновыми векторами $\mathbf{k}_1$ и $\mathbf{k}_2$) на ось $0X$ имеют разные знаки. Среда предполагается неоднородной вдоль оси $0X$ с характерной длиной L_0. Условия синхронизма волновых векторов $\mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$ выполняются при $x = 0$. Рассматривается случай произвольного угла рассеяния электромагнитной волны θ. ВМРБ описывается системой укороченных уравнений для рассеянных волн [1]

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} - V_s \cos\beta_1 \frac{\partial a_1}{\partial x} + V_s \sin\beta_1 \frac{\partial a_1}{\partial y} + \gamma_s a_1 = \nu_1 a_2 e^{-i\varphi(x)},$$

$$\frac{\partial a_2}{\partial t} + c\cos\beta_2 \frac{\partial a_2}{\partial x} - c\sin\beta_2 \frac{\partial a_2}{\partial y} + \gamma_t a_2 = \nu_2 a_1 e^{i\varphi(x)}$$

где $a_1 = N_1/N_0$, N_1 – возмущение концентрации электронов в звуковой волне, $a_2 = \delta E^*$ – амплитуда поля рассеянной волны, V_s, с – групповые скорости рассеянных волн, $\beta_2 = \pi - \theta$, $\beta_1 = \theta/2$; $\nu_1 = Ze^2E_0k^2/4mm_i\omega_0\omega_1\omega_2$, $\nu_2 = E_0^*\omega_{Le}^2/4\omega_0$ – коэффициенты нелинейной связи волн, $\gamma_t = -c^2/2\omega_2\left(dk_{2x}/dx\right) + \nu_e\omega_{Le}^2/\left(2\omega_2^2\right)$, $\gamma_s = V_s^2/\left(2\omega_1\right)\left(dk_{1x}(x)/dx\right) + \nu_i/2$ – коэффициенты затухания рассеянной электромагнитной и звуковой волн, e, m, N_0 – заряд, масса и концентрация электронов, z, m_i – зарядовое число и масса ионов, $\varphi(x) = \int_x \chi(x')dx'$ – разность фаз рассеянной электромагнитной и звуковой волн, возникающая из–за неоднородности плазмы, $\chi(x) = k_0(x) - k_2(x) - k_1(x)$. Показано, что процесс рассеяния описывается безразмерными параметрами $A = 2L_0\gamma_1/k_0L_2$, $P = \nu_2\nu_1/\gamma_1\gamma_2$, и $G = \nu_2\nu_1L_2/\gamma_1$. Получены точные решения для пространственного распределения амплитуды рассеянной волны и интенсивности рассеянного излучения в приближении сильной диссипации. Вычисления показали следующее.

При высоких надпороговостях наиболее сильное рассеяние происходит по направлению, вдоль которого область взаимодействия волн имеет наибольший размер. Если размер области усиления рассеянной электромагнитной волны ограничен неоднородностью и характерный размер неоднородности L_0 будет больше, чем поперечный размер области взаимодействия L_2, то рассеяние идет в направлении оси $0X$, в противном случае преобладает рассеяние в поперечном направлении.

Если интенсивность волны накачки слабо превышает порог, усиление электромагнитной волны в области взаимодействия сравнимо с затуханием в ее окрестности; зависимость рассеянного излучения становится более сложной и требует численного расчета для каждого конкретного случая.

Сопоставление расчетов интенсивности рассеянного излучения при ВРМБ по полученным формулам с экспериментом [2, 3] показало их качественное согласие.

Литература.

[1]. Солихов Д.К., Двинин С.А., Хобилов Д.У. // Известия ВУЗов, Физика, 2019. Т. 62. № 12. С. 42.
[2]. Ng A., Pitt L., Salzmann D., Offenberger A.A., Phys. Rev. Lett. **42**, 307 (1979).
[3]. Toroker Z., Malkin V.M., Fish N.Z., Phys, Plasmas **21**, 113110 (2014).

ВОЗМОЖНОСТЬ СИНТЕЗА ПЛАТИНОВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ПОДПОРОГОВОМ РАЗРЯДЕ

[1,2]Ахмадуллина Н.С., [2]Батанов Г.М., [2]Борзосеков В.Д., [2]Воронова Е.В., [2]Гусейн-заде Н.Г., [2]Заклецкий З.А., [2]Качмар В.В., [2]Князев А.В., [2]Козак А.К., [2]Колик Л.В., [2]Кончеков Е.М., [2]Летунов А.А., [2]Логвиненко В.П., [2]Малахов Д.В., [2]Мошкина К.Г., [2,3]Образцова Е.А., [2]Петров А.Е., [2]Скворцова Н.Н., [2]Соколов А.С., [2]Степахин В.Д., [2]Харчев Н.К., [2,4]Шишилов О.Н.

[1] *ИММ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия*
[2] *ИОФ РАН, г. Москва, Россия, e-mail: borzosekov@fpl.gpi.ru*
[3] *ИБХ им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, г. Москва, Россия*
[4] *РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.149

В ИОФ РАН (Москва, Россия) реализуется проект синтеза микро и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении. Специфика данного подхода состоит в первичной инициации разряда в приповерхностном слое смеси порошков на контактах металл-диэлектрик в области СВЧ пучка. Взаимодействие частиц порошка с плазмой приводит к испарению вещества, модификации поверхности частиц и протеканию плазмохимических реакций. Всегда существует порог интенсивности СВЧ излучения, ниже которого не удается инициировать разряд. Для того чтобы обеспечить взаимодействие частиц целевых порошков с плазмой даже в отсутствие пробоя на контактах металл-диэлектрик, была предложена конфигурация эксперимента, более характерная для решения прикладных экологических и плазмохимических задач [2]. СВЧ излучение, не испытывая существенного ослабления в смеси порошков, попадает на инициатор, где возникают локальные пробои газа, и начинает развиваться разряд, распространяющийся по пучку в сторону источника излучения. Температура газа в разряде достигает 6000 К, а плотность плазмы 10^{17} см$^{-3}$. Результаты первых экспериментов (рис.1) со смесью порошков Al_2O_3 и Pt показали, что взаимодействие частиц порошка с плазмой подпорогового микроволнового газового разряда приводит к покрытию микрочастиц носителя (Al_2O_3) наночастицами платины. Такие покрытые частицы подобны использующимся в качестве катализаторов в химических технологических процессах.

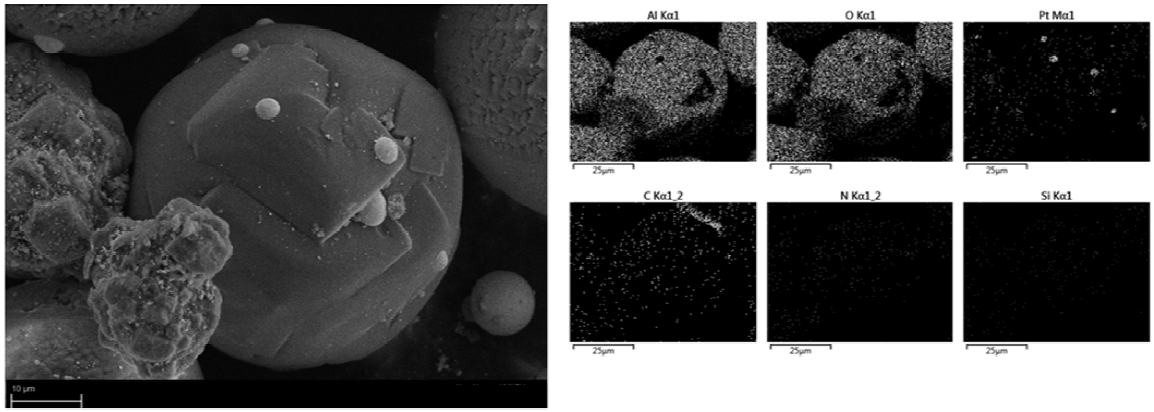


Рис.1. РЭМ изображение с различным увеличением и соответствующие карты распределения химических элементов, полученные методом ЭДС образца Al_2O_3 + 2% Pt.

Работа выполнена в рамках госзадания ГЗ БВ10–2021 «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

Литература

[1]. G.M. Batanov and I.A. Kossyi, Plasma Phys. Rep. **41**, 847–857 (2015).
[2]. K.V. Artem'ev et al., Plasma Phys. Rep. **44**, 615–625 (2018).

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПОРОШКОВ ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ПРИ СИНТЕЗЕ КАТАЛИЗАТОРОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

[1]Воронова Е.В., [1]Летунов А.А., [1,2]Логвиненко В.П., [1]Князев А.В.

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: woronowa.elena@gmail.com
[2]Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.150

Представлены результаты определения температуры поверхности порошков в экспериментах по плазмохимическому синтезу катализаторов платиновой группы (для трансформации углеводородов) в смесях оксида алюминия Al_2O_3 с палладием Pd и Al_2O_3 с платиной Pt с разными концентрациями.

Температуры определялись по наклону приближающей прямой к спектру, построенному в так называемых виновских координатах. Тепловое излучение объекта с произвольной излучательной способностью ε(λ, T) описывается выражением

$$I = \varepsilon C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T}-1}, \quad (1)$$

где C_1 = 37418 Вт·мкм^4/см^2, C_2 = 14388 мкм·град – постоянные Вина, длина волны – в микрометрах, интенсивность – в Вт/(см^2·мкм).

Для области Вина, где $e^{C_2/\lambda T} \gg 1$, после преобразования

$$\ln(\varepsilon C_1) - \frac{C_2}{\lambda T} = \ln(\lambda^5 I). \quad (2)$$

Для серого тела (ε = const) это выражение является уравнением прямой в плоскости (x, y), где $x = \ln(\lambda^5 I)$ и $y = C_2/\lambda$ – виновские координаты. Наклон прямой определяется температурой. При наличии атомных линий и молекулярных полос выражение (2) – это нижняя касательная к графику спектра, по которой можно определить температуру излучателя в случае, если графическая зависимость спрямляется, т.е., объект является серым телом [1].

Полученные оценки температур поверхности составляют (2900 – 2700) ± 200 К для смеси Al_2O_3 с 1% Pd и (2800 – 2700) ± 200 К для смеси Al_2O_3 с 10% Pd [2] – между температурами плавления и кипения при атмосферном давлении обеих компонент порошковой смеси, что создает подходящие условия для инициации самоподдерживающихся (цепных) плазмохимических реакций. Для смесей Al_2O_3 с Pt температуры поверхности – (2400 – 2200) ± 200 К для смеси Al_2O_3 с 10% Pt и (900 – 700) ± 200 К для смеси Al_2O_3 с 20% Pt, что делает более понятной наблюдавшуюся в экспериментах бóльшую трудность возбуждения разрядов, если в смеси единственным металлом является платина, имеющая более высокие температуры плавления и кипения чем Pd, а также в сравнении с ним на два – три порядка более низкую плотность паров при той же температуре.

Работа выполнена в рамках госзадания ГЗ БВ10–2021 «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

Литература

[1]. Магунов А.Н. // Научное приборостроение. 2010. Т. 20. № 3. С. 22.
[2]. Voronova E.V., Knyazev A.V., Letunov A.A., Logvinenko V.P., Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Temperature of the Surface of Powders in Experiments with Chain Plasma-Chemical Reactions Initiated by the Radiation of a Gyrotron in Pd + Al_2O_3 Mixtures», Phys. At. Nucl. 84 (10), 2021 (in press). doi: 10.1134/S1063778821090374]

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРНОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ КАТОДНЫХ ПЯТЕН, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ МИКРОПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА, ПОКРЫТОГО ТОНКОЙ ОКСИДНОЙ ПЛЁНКОЙ

Иванов В.А., Коныжев М.Е., Камолова Т.И., Дорофеюк А.А.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.151

Известно, что поток плотной плазмы в вакууме может инициировать микроплазменные разряды (МПР) на поверхности металла, покрытого тонкой диэлектрической плёнкой [1]. Эти разряды возникают в результате электрического разряда (пробоя) между заряженной в потоке плазмы внешней поверхностью пленки и открытой поверхностью металла [2, 3].

Цель работы состояла в том, чтобы с помощью высокоскоростного фоторегистратора IMACON468 в кадровом режиме экспериментально исследовать пространственную микроструктуру свечения в оптическом диапазоне длин волн, и определить время жизни катодных пятен при распространении одиночного импульсного МПР, возбуждаемого на поверхности титана ВТ-1, покрытого тонкой диэлектрической плёнкой толщиной до 6 нм. МПР инициировался на поверхности титана импульсным (25 мкс) потоком плазмы с максимальной плотностью 2×10^{13} см$^{-3}$ и электронной температурой 10 эВ. В последующие моменты времени МПР поддерживался внешним источником электрического тока и напряжения (50 А, –400 В). Образец титана в форме пластины имел размеры 20×20 мм^2 и толщину 0.6 мм. На поверхности титана в воздушной атмосфере при комнатной температуре естественным образом формировалась диэлектрическая оксидная плёнка толщиной до 6 нм.

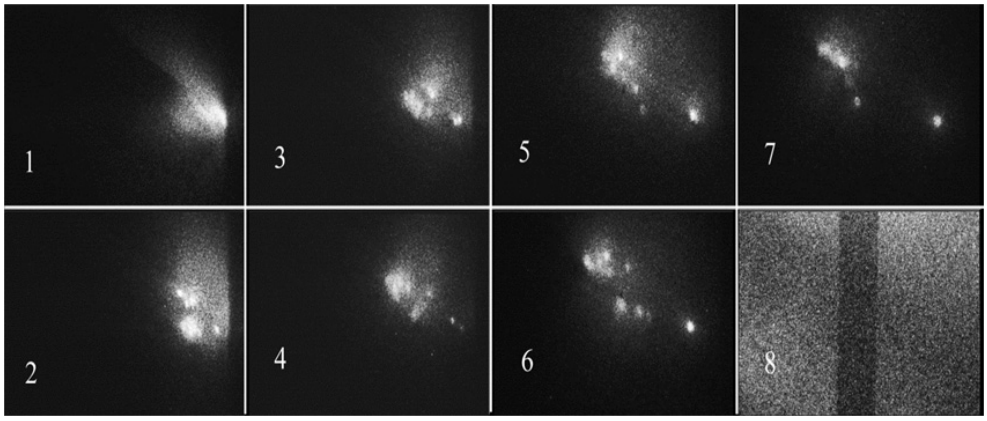


Рис. 1. Свечение одиночного микроплазменного разряда на поверхности титана, зарегистрированное на 7 последовательных кадрах (длительность каждого кадра 100 нс, интервал между кадрами 500 нс). Кадр № 8 – калибровочный (ширина тёмной вертикальной полоски 1 мм). Размер каждого кадра 7×6 мм^2. Плазменный поток движется от инжектора плазмы к пластине титана с правой стороны.

На основании анализа изображений МПР (рис. 1) установлено, что свечение микроплазменного разряда на поверхности титана, покрытого оксидной плёнкой 6 нм, визуально в микромасштабе состоит из 4–10 одновременно ярко светящихся «точечных» образований – катодных пятен, характерное время жизни которых составляет около 1 мкс.

Литература

[1]. Ivanov V.A., Sakharov A.S., Konyzhev M.E., Plasma Phys. Rep. **34**, 150–161 (2008).
[2]. Ivanov V.A., Sakharov A.S., Konyzhev M.E. et al., J. Phys.: Conf. Ser. **907**, 012023 (2017). https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/907/1/012023/pdf.
[3]. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Dorofeyuk A. A. et al., J. Phys.: Conf. Ser. **1647**, 012018 (2020), https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1647/1/012018/pdf.

МИКРОВОЛНОВЫЕ ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОСАЖДЕНИЮ РЕГОЛИТА (ЛУННОЙ ПЫЛИ) НА ПЛАСТИНЫ МЕТАЛЛОВ

[1]Скворцова Н.Н., [1]Степахин В.Д., [2]Сорокин А.А., [1]Малахов Д.В., [1]Качмар В.В., [1]Гусейн-заде Н.Г., [1,3]Ахмадуллина Н.С., [1]Борзосеков В.Д., [1]Воронова Е.В., [1,4]Шишилов О.Н.

[1]ИОФ РАН, г. Москва, Россия, e-mail: mukudori@mail.ru
[2]ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия
[3]ИММ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия
[4]РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.152

В докладе представлены экспериментальные результаты по осаждению заряженных частиц, имитирующих левитирующую пыль на Луне, на металлические пластины. Ансамбли заряженных частиц создаются над поверхностью смеси порошков реголита, по составу и распределению по размерам, повторяющих пыль, покрывающую лунную поверхность. Под воздействием СВЧ излучения импульсного гиротрона на порошок в слое реголита и над ним развиваются нелинейные физико-химические процессы (микроволновый пробой, цепные плазмохимические реакции, разлет частиц по кулоновскому механизму). В результате над поверхностью порошка возникает левитирующее облако заряженных частиц, повторяющих по составу и распределению по размерам лунную пыль [1]. В таком облаке возможна установка пластин из различных материалов для моделирования воздействия на них заряженной пыли (пылевой плазмы), левитирующей над поверхностью Луны. Имитационный эксперимент основан на аналогии физико-химических процессов, развивающихся в микроволновом лабораторном эксперименте с реголитом, с процессами, которые происходят на Луне при бомбардировке ее поверхности микрометеоритами. Исследуется воздействие левитирующего облака на пластины из нержавеющей стали, молибдена, тантала и показано, что на ней осаждаются частицы реголита в виде сфероидов различной формы и размеров (рис. 1). Осаждение частиц на поверхность металлов зависит от качества ее поверхности [2]. Показано, что полученная в лабораторных условиях пылевая плазма (ансамбли заряженных частиц реголита) может быть использована для имитационных экспериментов для изучения изменения поверхности разных материалов (металлов) для космической техники.

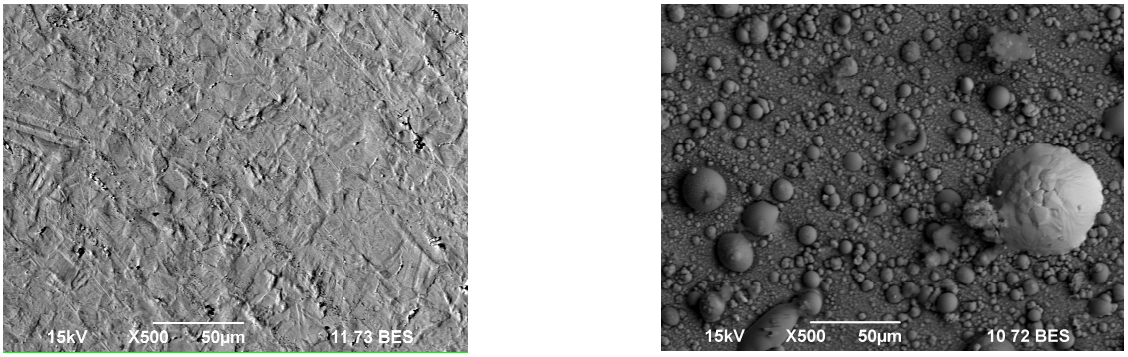


Рис. 1. РЭМ изображение поверхности нержавеющей стали до (слева) и после (справа) обработки в облаке зараженных частиц реголита (пылевой плазме).

Литература

[1]. N.N. Skvortsova, D.V. Malakhov, et al., JETP Lett. **106**, 262–267 (2017).
[2]. N.N. Skvortsova, V.D. Stepakhin, A.A. Sorokin,et al., Materials **14**, 6472 (2021).

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЕННЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Иванов И.Е.

Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: iei@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.153

Плазменные релятивистские генераторы имеют рекордную полосу генерации и их можно уверенно отнести к сверхширокополосным. Широкополосность определяется величиной η отношения диапазона генерации ($\nu_{max} - \nu_{min}$) к средней частоте диапазона ($\nu_{max} + \nu_{min}$)/2. Если этот коэффициент $\eta > 0.2$, то такой источник относится к сверхширокополосным. Для плазменных приборов η может достигать значения 1. Рассматривается широкополосное излучение плазменных релятивистских генераторов с длительностью микроволнового импульса 300 – 500 нс для области частот 1 – 5 ГГц. Такой источник сверхширокополосного излучения является генератором шума. Для шумовых источников важно "качество шума". Речь идёт о полезной шумовой генерации, когда на любом временном интервале широкополосного импульса ширина полосы генерации будет одинакова. Также будет приблизительно одинакова и энергия "шума" на этом интервале. Энергия шумовых импульсов плазменных релятивистских источников остаётся равной энергии при работе и в других режимах – в режиме усиления внешнего сигнала и режиме обычной генерации, т.е. достигает 15 – 20 Дж. Для анализа шумовой генерации плазменных релятивистских источников, рис.1, применяется обычное преобразование Фурье и метод мгновенной частоты.

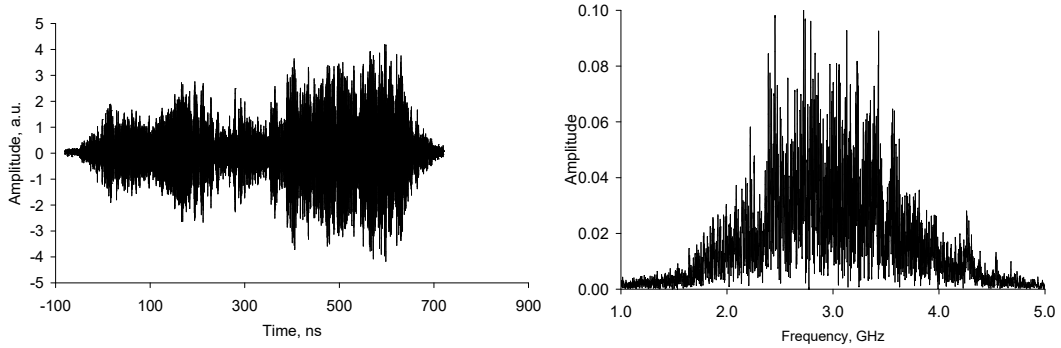


Рис. 1. Слева – осциллограмма шумового импульса, справа – Фурье-преобразование за весь временной интервал записи импульса (800 нс).

Указанные методы позволяют оценить стабильность шумовой генерации во времени и изменение амплитуды шумового импульса, напряжённость электрического поля. Однако для сравнения генерации шумовых импульсов от различных источников или режимов этих характеристик недостаточно. Демонстрируется применение корреляционного анализа с использованием автокорреляционной функции

$$B_f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) f(t+\tau) dt$$

Вычисляются коэффициенты корреляции и время корреляции для участков осциллограммы различной длительности. Строятся графики скользящего коэффициента корреляции (скользящая корреляция), вычисляется средний квадрат коэффициентов корреляции в графиках скользящей корреляции. Указанной методикой сравниваются широкополосные импульсы релятивистского электронного пучка в вакууме и импульса в присутствии плазмы в системе.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 19-08-00625 А.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ СВЧ-ИМПУЛЬСА ИЗЛУЧЕНИЯ ГИРОТРОНА В СМЕСЯХ ПОРОШКОВ Al_2O_3/Pt

Заклецкий З.А., Малахов Д.В., Скворцова Н.Н., Борзосеков В.Д., Степахин В.Д., Гусейн-заде Н.Г.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: fiveziggen@gmail.com

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.154

Для плазмохимических взаимодействий между частицами в смеси порошков, является важным согласование параметров СВЧ импульса гиротрона, размера частиц и массовым соотношением компонентов в исходной порошковой смеси металл-диэлектрик. Изменения коэффициента поглощения СВЧ излучения в смеси порошка металл-диэлектрик может служить качественной характеристикой для анализа процессов протекающих в плазмохимическом реакторе.

Для определения коэффициента поглощения используется СВЧ-диагностика на основе 3 СВЧ-датчиков (рис. 1). Мощность гиротронного излучения, поглощенная в порошке, может быть рассчитана из балансного соотношения $P_{abs} = P_{in} – P_{ref} – P_{pas}$, где P_{in} – мощность излучения, входящая в плазмохимический реактор, Pref – мощность излучения, отраженная от частей квазиоптического тракта и элементов плазмохимического реактора, P_{pas} – мощность излучения, прошедшая через плазмохимический реактор. Коэффициентом поглощения называется отношение $K = P_{abs} /P_{in}$.

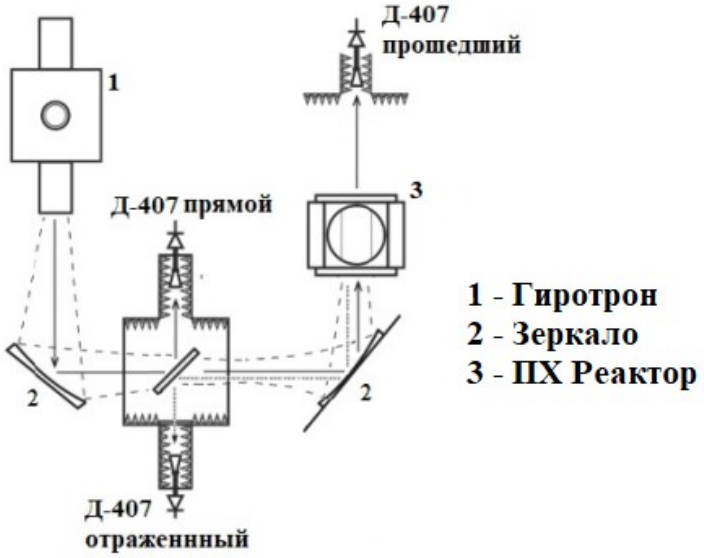


Рисунок 1. Принципиальная схема определения коэффициента поглощения абсолютной мощности СВЧ-импульса гиротрона

Работа выполнена в рамках госзадания ГЗ БВ10–2021 «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В ПЛАЗМЕННОМ РЕЛЯТИВИСТСКОМ СВЧ УСИЛИТЕЛЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Диас Михайлова Д.Е., Иванов И.Е., Стрелков П.С.

ИОФ РАН, г. Москва, Россия, e-mail: tomasrulit@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.155

Ток релятивистского электронного пучка (РЭП) имеет значительную шумовую модуляцию. Поэтому РЭП излучает в вакууме в широкой полосе частот, $\Delta f > 3$ ГГц. В работе [1] исследовался усилитель шума РЭП. Показано, что, располагая СВЧ поглотители на левом конце СВЧ усилителя, где РЭП влетает в плазму, можно добиться полного подавления обратной связи. Это доказано анализом автокорреляционных функций СВЧ сигналов. Об этом также свидетельствует отсутствие в спектре выходного излучения отдельных линий с большим уровнем энергии. В плазменном релятивистском СВЧ усилителе монохроматического сигнала на левом конце плазменного волновода находится узел ввода СВЧ мощности от внешнего источника. Для подавления обратной связи используются СВЧ поглотители, но использовать поглотители, которые были использованы в работе [1] невозможно - СВЧ мощность от внешнего источника не будет поступать в плазменный волновод.

В докладе излагаются результаты различных экспериментов по подавлению обратной связи подбором оптимальных поглотителей и величины внешнего магнитного поля. Показано, что удаётся получить уровень энергии шумов менее 10% в широком диапазоне значений плотности плазмы, $\Delta n_p/n_p = 0{,}45$. В этом диапазоне значений плотности плазмы частота усиленного сигнала совпадает с частотой входного сигнала $f_0 = 2{,}715$ ГГц с точностью 1 МГц, а ширина пика на частоте f_0 по полувысоте равна 4 - 6 МГц при естественной ширине 4 МГц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ проект № 19-08-00625.

Литература

[1]. П.С. Стрелков, В.П. Тараканов, Д.Е. Диас Михайлова, И.Е. Иванов, Д.В. Шумейко Физика плазмы, 2019, т.45, №4, с. 335-345

ПЛАЗМЕННЫЙ МАЗЕР В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ УСИЛЕНИЯ ШУМА

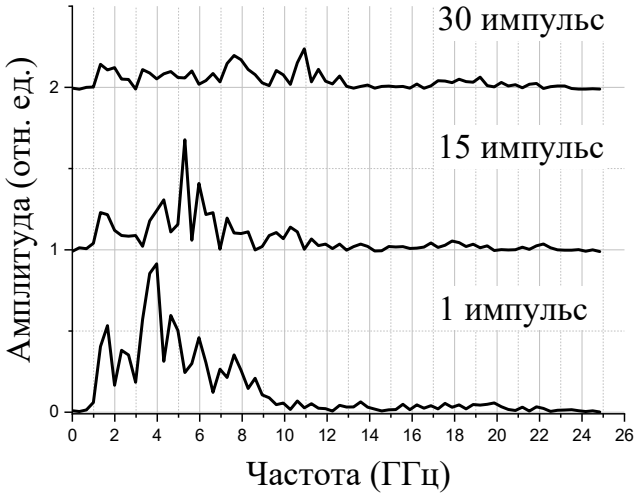
[1]Асанина С.Г., [1,2]Булейко А.Б., [1]Бахтин В.П., [1,2]Лоза О.Т., [1]Раваев А.А.

[1]АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, Россия, e-mail: asanina_sg@triniti.ru
[2]РУДН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.156

Плазменный мазер – источник мощного микроволнового излучения, основанный на черенковском взаимодействии сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) и медленной плазменной волны. Плазма используется в качестве замедляющей структуры, а быстрое изменение ее плотности позволяет оперативно изменять частоту генерируемого излучения.

В настоящей работе исследовался плазменный мазер в режиме усиления шума. Ток трубчатого РЭП 2 кА обеспечивался импульсами напряжения с амплитудой 250 кВ, длительностью 2 нс и частотой формирования до 100 Гц. Плазма с концентрацией 10^{12}…10^{13} см$^{-3}$ создавалась в течение 100 мкс посредством ионизации газа отдельным электронным пучком. Транспортировка РЭП и формирование плазмы осуществлялась в магнитном поле с индукцией 1 Тл, создаваемом соленоидом. В результате взаимодействия плазменной волны с электронным пучком происходило усиление широкополосного шума в СВЧ-диапазоне и последующий вывод микроволнового излучения через коническую рупорную антенну. Подобный мазер в режиме формирования одиночных импульсов [1] демонстрировал максимальную за импульс мощность излучения до 400 МВт при КПД по энергии импульса до 26%.



В данном экспериментальном исследовании был реализован режим работы в частотном режиме с частотой повторения импульсов СВЧ-излучения до 100 Гц. Ранее в работе [2] было показано, что периодическое осаждение тока РЭП с длительностью 80 нс на коллектор плазменного мазера влечет обильную десорбцию газов и существенные изменения профиля концентрации плазмы и режима работы мазера в следующих импульсах.

На рисунке показаны спектры СВЧ-излучения плазменного мазера с длительностью тока РЭП 2 нс, полученные последовательно в разных импульсах, следовавших с частотой 100 Гц. От импульса к импульсу происходил сдвиг спектра излучения в сторону высоких частот и его расширение, и одновременно наблюдалось уменьшение мощности. В среднем, к 30-му импульсу изменения накапливались до максимального значения, вследствие чего спектр стабилизировался в полосе частот ~2…20 ГГц. Управление спектрами излучения в каждом импульсе при периодическом режиме их формирования было задачей данной работы.

Литература

[1]. Buleyko A.B., Ponomarev A.V., Loza O.T., et al. (2021) *Physics of Plasmas* **28:** 023304.
[2]. Andreev S.E., Bogdankevich I.L., Gusein-zade N.G., Loza O.T. (2021) *Plasma Phys. Rep.* **47**, 257–268.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ СИЛЬНОТОЧНОМ ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Карташева А.А., Подковыров В.Л., Гуторов К.М., Васильев Г.Б., Коваленко Д.В.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.157

В связи с модификацией установки КСПУ [1] с целью создания прототипа плазменного двигателя были проведены измерения радиальных распределений электронной температуры и концентрации, свечения плазменного потока. Полученные значения плазменных параметров, а также скорости плазменного потока представляют интерес для расчета тяговых характеристик и КПД прототипов плазменных двигателей.

Пространственно-временные распределения температуры и концентрации были получены с помощью зондового метода. Данный метод диагностики плазмы на основе многоштырьковых зондов успешно используются для измерения электронной температуры и концентрации, потенциала плазмы, числа Маха в условиях нестационарных высокоскоростных сильноионизированных потоков, генерируемых в плазменных ускорителях [2] и импульсных капиллярных разрядах [3]. В качестве электродов использовались тонкие вольфрамовые стержни, помещенные в керамический кожух. Электрическая схема включает в себя источники постоянного напряжения для создания фиксированной разности потенциалов между парами стержней, шунты для регистрации тока в цепях зондов. Подобная схема измерений обеспечивает низкую чувствительность к электромагнитным помехам и не требует снятия полной зондовой ВАХ, что улучшает точность данного метода и делает его привлекательным для диагностики быстропротекающих плазменных процессов, в частности, импульсных плазменных ускорителей. С помощью многоэлектродного зонда впервые были получены пространственно-временные профили температуры и концентрации электронов в условиях квазистационарного сильноточного ускорителя. Для плазменного потока водорода средние значения температуры и концентрации электронов, вычисленные на основе теории, изложенной в работе [4], составили 7,6 эВ и 2×10^{-16} см$^{-3}$ соответственно.

Пространственно-временные распределения излучения плазменного потока были получены с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom v2512 с частотой кадров 660 000 к/с. Для детального измерения внутренней структуры потока пространственно-временное распределение изучения было сопоставлено с профилями концентрации и температуры.

Оценка скорости плазменного потока водорода, генерируемого в КСПУ при фиксированном значении энергии, вложенной в разряд, была проведена двумя независимыми методами. Во-первых, экспериментально полученное значение скорости плазменного потока с помощью высокоскоростной регистрации составило 40 км/с. Во-вторых, скорость была измерена на основе регистрации токов на продольно и поперечно ориентированные зонды [2]. Подобная конфигурация обусловлена тем, что ионный ток насыщения на поперечно ориентированный зонд зависит от скорости потока плазмы. Значения скорости, полученные описанными методами, находится в хорошем соответствии.

Исследование выполнено в рамках Государственного контракта от 29.04.2021 № Н.4ц.241.09.21.1115.

Литература

[1]. Климов Н.С. и др., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, В. 3, С. 52-63
[2]. Eckman R. et al., J. Propul. Power **17**, 762-771 (2001).
[3]. Pashchina A.S., Karmatsky R.E., J. Phys.: Conf. Ser. **1112**, 012023 (2018).
[4]. Chen S.L., Sekiguchi T., J. Appl. Phys. **36**, 2363-2375 (1965).

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА

[1]Анпилов А.М., [1]Бархударов Э.М., [1]Коссый И.А., [1]Кузнецов С.В., [2]Мисакян М.А., [1]Моряков И.В., [3]Петухов Д.И., [1]Тактакишвили И.М

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: igor_miw@mail.ru
[2]НИУ ВШЭ, Москва, Россия
[3]МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия).

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.158

В последнее время большое внимание уделяется созданию алмазоподобных углеродных (diamond like carbon, DLC) покрытий и пленок для решения широкого спектра прикладных задач, в частности в медицине, радиотехнике, при получении алмазных покрытий плазмохимическим способом и пр. [1]. Одна из проблем, возникающих при получении DLC покрытий, состоит в том, чтобы добиться высокой степени их однородности и адгезии при толщинах ~1 мкм.

В предлагаемой работе алмазоподобное углеродное покрытие было получено методом испарения коллоидного раствора наноструктурированного углерода в этаноле на твердой поверхности. Подробно методика получения приведена в [2]. Коллоидный раствор представлял собой аморфный углерод (разупорядоченный графит), с характерным размером частиц от 4 нм до 40 нм.

Предварительные экспериментальные результаты по формированию алмазоподобных покрытий при активации исходной поверхности УФ-излучением на длине волны 253,7 нм и при нагреве до 55°С, демонстрируют возможность повышения однородности покрытий и их адгезии.

Эксперимент состоял в следующем: на предметное стекло для микроскопа, наносился коллоидный раствор наноуглерода в этаноле. После испарения этилового спирта на поверхности стекла образовывались «островки» тонкой << 1мкм углеродной пленка. При активации поверхности УФ-излучением и при стимулировании процесса испарения этанола коллоидного раствора в целом удалось повысить однородность «островкового» покрытия и его адгезию.

Измерение контактного угла смачивания проводилось при помощи прибора FTA1000 Drop Shape Instrument B Frame System. Исследуемый образец был помещен на горизонтальный держатель. Во избежание ошибок, вызванных искажением формы капли под действием силы тяжести, жидкость наносили на поверхность исследуемого образца с помощью специального микродозирующего шприца. Объем капель составлял 100 мкл.

Литература

[1]. Barkhudarov E.M., Kossyi I.A., Anpilov A.M., Ivashkin P.I., Artem'ev K.V., Moryakov I.V., Misakyan M.A., Cristofi N., Burmistrov D.E., Smirnova V.V., Ivanyuk V.V., Bunkin N.F., Kozlov V.A., Penkov N.V., Sharapov M.G., Volkov M.Yu., Sevostyanov M. A., Lisitsyn A.B., Semenova A.A., Rebezov M.B., Gudkov S.V. New Nanostructured Carbon Coating Inhibits Bacterial Growth, but Does Not Influence on Animal Cells. Nanomaterials **10** (2130), 1-12 (2020).

[2]. Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Kossyi I.A., Luk'ianchikov G.S., Misakyan M.A., Moryakov I.V. Influence of external impact on secondary emission characteristics of anti-multipactor nanocarbon, J. Phys.: Conf. Ser. **1328**, 012052 (2019).

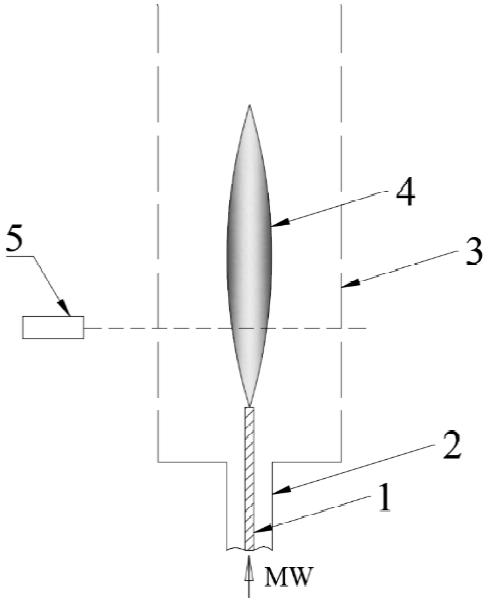
ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО КОМПОНЕНТА В МИКРОВОЛНОВОМ ФАКЕЛЕ

Давыдов А.М., Артемьев К.В.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академи наук, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.159

Представлены результаты эксперимента по измерению температуры газа в микроволновом факеле, принцип работы которого описан в [1]. В качестве источника микроволновой энергии использовался бытовой магнетрон (f = 2,46 ГГц), работавший в импульсно-периодическом режиме с частотой 50 Гц. Средняя микроволновая мощность, вкладываемая в разряд, составляла 550…600 Вт. Схема проведения эксперимента по измерению газовой температуры в микроволновом факеле приведена на рисунке. Внутренний электрод являлся полым и через него подавался рабочий газ (аргон или воздух). Внешний электрод коаксиального тракта 2 продолжался сетчатым электродом 3 с параметрами ячейки 1 × 1 мм. На конце внутреннего электрода 1 в области максимального значения величины СВЧ поля происходила инициация разряда, который за время микроволнового импульса формируется в протяженное плазменное образование – микроволновый факел 4. С помощью оптического спектрометра 5 регистрировались спектры излучения в различных точках разряда. Для определения температуры газа в разряде использовался непрерывный участок спектра построенный в виновских координатах. Из предположения, что микроволновый разряд является планковским излучателем, по наклону спектра определялась излучательная температура разряда, которая в свою очередь предполагалась равной газовой температуре. Таким способом было построено аксиальное распределения температуры газа разряда для аргона и воздуха.



Литература

[1]. С.И. Грицинин, В.Ю. Князев, И.А. Коссый, Н.И. Малых, М.А. Мисакян. Импульсно-периодический факел в коаксиальном волноводе. Динамика формирования и пространственная структура // Физика плазмы, 2004, том 30, № 3, с. 283-291.

ПРЯМОЙ ПЬЕЗОРАЗРЯД КАК ИСТОЧНИК ОКИСЛОВ АЗОТА И АЗОТИСТОЙ КИСЛОТЫ

Артемьев К.В., Давыдов А.М., Колик Л.В.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.160

Источник низкотемпературной плазмы, созданный на основе пьезоэлектрического трансформатора, описан в [1, 2]. В данной работе исследовался состав воздуха при его обработке прямым (без диэлектрического барьера) пьезоразрядом. Качественный и количественный анализ состава воздуха во время обработки производился на ИК фурье-спектрометре Инфраспек ФСМ 2202. Обработка воздуха производилась в замкнутой цилиндрической камере, которая располагалась в кюветном отделении ИК фурье-спектрометра вдоль диагностирующего ИК пучка. При этом ИК спектры обрабатываемой воздушной среды прописывались непосредственно во время работы пьезоразряда. В ИК спектрах присутствовали полосы поглощения окислов азота NO, NO_2, N_2O и азотистой кислоты HONO. Полосы поглощения других возможных соединений не превосходили уровень шума. Количественный расчет средней концентрации окислов азота в разрядной камере производился с помощью открытой базы данных HITRAN. Количественный расчет средней концентрации азотистой кислоты HONO производился по данным, представленным в работе [3].

Литература

[1]. E.M. Konchekov, N.G. Gusein-zade, L.V. Kolik, K.V. Artem'ev, A.V. Pulish. Using of direct piezo-discharge in generation of plasma activated liquid media // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **848**, 012037 (2020).

[2]. E.M. Konchekov, A.P. Glinushkin, V.P. Kalinitchenko, K.V. Artem'ev, D.E. Burmistrov, V.A. Kozlov and L.V. Kolik. Properties and use of water activated by plasma of piezoelectric direct discharge, Front. Phys. **8**, 616385 (2021).

[3]. W.S. Barney, L.M. Wingen, M.J. Lakin, T. Brauers, J. Stutz, B.J. Finlayson-Pitts. Infrared absorption cross-section measurements for nitrous acid (HONO) at room temperature // J. Phys. Chem. A **104**, 1692-1699 (2000).

ПАРАМЕТРЫ РАЗЛЕТА ЧАСТИЦ ПРИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ МАТЕРИАЛОВ В РЕАКТОРЕ ГР-1

Заклецкий З.А., Малахов Д.В., Петров А.Е., Скворцова Н.Н.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: malakhov@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.161

В рамках выполнения цикла исследований по синтезу материалов с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении предложен алгоритм оценки характеристик реакционных частиц. Разработанная ранее методика синтеза [1] предполагает использование в качестве исходных материалов смеси частиц металлов и диэлектриков. Для регистрации параметров разлёта частиц используются высокоскоростные камеры (Fastec Imaging IN250M512, 640x478, монохромная, 8bit, 250к/сек, 200мкс; Contrastech MARS640-815UC 640x480, цветная, 10bit, 1000к/сек, 5мкс) и различные источники освещения. Калибровка фактических размеров объектов на изображениях производиться с помощью калибровочных слайдов (мишень USAF 1951 и аналогичные) с учётом телецентричности объективов. Объект наблюдения представляет собой смесь светящихся газовых образований и частиц движущихся с низу вверх, что было показано в ранних работах [2]. Интерес представляет оценка характерных размеров образований и скоростей их движения. Существующая диагностика позволяет получить проекцию частиц в одной плоскости. Скорость движения частиц определяется по смещению светящихся точек в кадре по предполагаемой траектории и составляет для разных режимов работы реактора от 1 до 45 м/с (рис.1a). Важной характеристикой протекающих процессов так же являются размеры частиц и светящихся областей. Было показано, что в ходе экспериментов некоторые реакционные частицы в начальный момент времени окружены светящимся ореолом с характерными размерами до 1...2 мм (рис.1b). Данные образования движутся совместно с ядром и распадаются за время от 1 до 20 мс. В тоже время светящиеся частицы двигаются по сложным траекториям и светятся на протяжении долгого времени. В зависимости от реакционной смеси время послесвечения ядер составляет до 0,5 сек. Параметры разлёта реакционных смесей являются основой для проведения модельных расчётов. Работа выполнена в рамках госзадания ГЗ БВ10–2021 «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

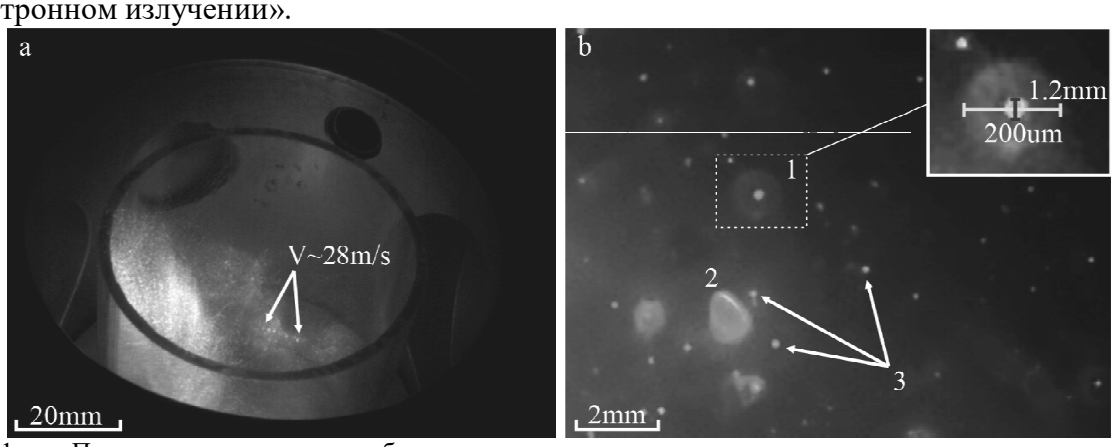


Рис.1. a – Пример интегрального изображения, получаемого после усреднения данных с высокоскоростной камеры. b - Фотография процесса горения реакционной смеси, где позиции 1 и 2 — это частицы с ореолом в виде светящихся газовых пузырей, а 3 – одиночные частицы без окружения.

Литература

[1]. G.M. Batanov, I.A. Kossyi. Plasma Physics Reports, 2015, V. 41, N. 10, pp. 847–857.
[2]. A.S. Sokolov, D.V. Malakhov, N.N. Skvortsova. Engineering Physics, 2018, V.11, pp 3-7.

ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ПО СПЕКТРАМ ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНОГО СВЧ-ИМПУЛЬСА ГИРОТРОНА СО СМЕСЬЮ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛА И ДИЭЛЕКТРИКА

[1]Князев А.В., [1]Летунов А.А., [1]Воронова Е.В., [1,2]Логвиненко В.П.

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия,
e-mail: knjazev_a@list.ru
[2]Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.162

В процессе экспериментов по синтезу различных микро и нано объектов путём воздействия мощным СВЧ-импульсом на порошки проводилась регистрация спектров излучения, возникающего при этом разряде, с целью определения параметров происходящих в это время процессов. Спектры состоят из излучения поверхности твёрдой фазы (возможно, включая поверхность контейнера), излучения молекул, чаще всего образующихся во время разряда, и некоторых атомных линий. В большинстве случаев в спектрах присутствуют линии щелочных элементов: натрия, лития и калия, являющихся примесями в порошках. В зависимости от состава порошков присутствуют также атомарные линии составляющих их веществ, таких, например, как Al и Al_2O_3 или Ti и TiO_2. Все обнаруженные линии относятся к излучению нейтральных атомов. При имеющемся спектральном разрешении и чувствительности не удалось зафиксировать линий, достоверно идентифицируемых как ионные.

В работе использовались два спектрометра «AvaSpec» фирмы «Avantes», один с чувствительностью в диапазоне 200–375 нм, шириной щели 50 мкм, с линейкой 2048 пикселов, второй с диапазоном 380–900 нм, щелью 10 мкм и линейкой из 3648 пикселов.

В зависимости от состава порошка были получены различные пригодные для определения электронных температур наборы линий алюминия (~310 и ~395 нм), титана (несколько десятков линий) и некоторых других элементов. Проведены расчеты электронной температуры исходя из соотношения $\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 * g_1 * \lambda_2}{A_2 * g_2 * \lambda_1} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right)$ [1], применяемого как к двум, так и к большему числу линий [2]. Здесь I_1, I_2 – интенсивности линий, A_1, A_2 – вероятности переходов, g_1, g_2 – степени вырождения верхних уровней, λ_1, λ_2 – длины волн линий, E_1, E_2 – энергии верхних уровней, k – постоянная Больцмана, T – подлежащая определению электронная температура.

В большинстве разрядов с составами, в которых присутствовал Al, получены температуры в диапазоне 3 – 5,5 кК. Во многих случаях удалось также определить временной ход температуры в течение разряда. При этом на стадии распада плазмы в отдельном импульсе удалось зафиксировать минимальную температуру 2,1 кК. В разрядах, в которых присутствовал Ti, электронные температуры оказались в среднем выше – 4,5 – 6,5 кК.

Работа выполнена в рамках госзадания ГЗ БВ10–2021 «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

Литература

[1]. Plasma Diagnostics, edited by W. Lochte-Holtgreven. Amsterdam, 1968.
[2]. Градов В.М., Зимин А.М., Кривицкий С.Е., Шумов А.В. Автоматизированный спектрометрический комплекс для диагностики плазмы магнетронного разряда. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2009. № 1. С. 64–71.

ОЦЕНКИ ГАЗОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗРЯДА ПО СПЕКТРАМ ИЗЛУЧЕНИЯ γ-СИСТЕМЫ TiO ПРИ СИНТЕЗЕ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПЛАТИНЫ

[1,2]Логвиненко В.П., [1]Летунов А.А., [1]Воронова Е.В., [1]Князев А.В.

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия
[2]Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия
e-mail: logvin_vlad@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.163

В опытах со смесью Pt и TiO_2 для оценки газовой температуры в разряде использовались спектры γ-системы молекулы TiO, регистрировавшиеся спектрометром AvaSpec-3648 (спектральный размер пикселей 0,15 нм, разрешение ~0,3 нм). Спектр γ-системы TiO обусловлен переходами между электронными состояниями $A^3Ф$ — $X^3Δ$. В работе [1] спектры были рассчитаны для определения газовой температуры при лазерной абляции металлического титана в атмосфере O_2. Расчеты основаны на данных измерений спектра молекулы TiO фурье-спектрометром [2] и соотношениях для коэффициентов Хенля – Лондона [3]. Были выведены параметры. удобные для оценки молекулярных температур. Мы использовали один из них – **β**-отношение амплитуды канта R–ветви **γ_3(0,0)** – 705,42 нм и интенсивности подложки вблизи него. Эта величина в предположении равенства вращательной и колебательной температур молекул позволяет определить газовую температуру разряда.

Из-за отличия условий регистрации спектра в наших измерениях и в работе [1], связанных с разными соотношениями между шириной пикселя и полушириной аппаратной функции (АФ), для использования результатов этой работы требуется коррекция. Расчет сделан для гауссовых АФ с полуширинами от 0,5 до 0,05 нм, и для полуширины 0,1 нм он сопоставляется с измерениями, проделанными спектрометром, в котором на полуширине АФ размещается почти десяток пикселей детектора. В наших условиях это ~ 2 пикселей, как и в большинстве спектрометров, во всяком случае, такого класса. Большое число пикселей на полуширине АФ, обеспечивая малость отличий сигналов соседних пикселей, делает результаты измерений амплитуд кантов практически адекватными расчету. А малое создает заметную неопределенность максимума на месте канта, являющегося сгущением вращательных линий сравнимых интенсивностей. Расстояние между вращательными линиями линейно растет при удалении от канта и быстро становится сравнимым со спектральным размером пикселя.

В докладе описывается способ адаптации результатов работы [1] к нашим условиям измерений, оценена связанная с их различием дополнительная систематическая погрешность. Для этого, в частности, проведен расчет относительных интенсивностей части R-ветви канта **γ_3(0,0)** в соответствии с работой [1]. Это позволило пересчитать зависимость температуры от параметра **β** в работе [1] в аналогичную для наших условий измерений.

Полученные оценки газовой температуры разряда, в предположении равенства вращательной и колебательной температур молекул, составили 4 – 6 кК.

Работа выполнена в рамках госзадания ГЗ БВ10–2021 «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

Литература

[1]. Hermann J., Perrone A. and Dutouquet C. // J. Phys. B. **34**, 153–164 (2001)
[2]. Ram R.S., Bernath P.F., Dulick M. and Wallace L. // Astrophys. J. **122**, 331,(1999)
[3]. Kovacs I, Rotational Structure in the Spectra of Diatomic Molecules. 1969 Budapest.

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ПРОЕКТ ИТЭР: ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО»

SECTION «ITER PROJECT: A STEP TO THE FUTURE OF POWER ENGINEERING»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА И ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ С ВОЛЬФРАМОМ, В УСЛОВИЯХ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ БЫСТРЫХ ПРОЦЕССОВ В ИТЭР

[1,2]Новоселова З.И., [1,2]Позняк И.М., [1,2]Топорков Д.А., [1,2,3]Сафронов В.М., [1]Кочнев Д.М., [1]Карелов С.В., [1,2]Федулаев Е.Д., [1]Цыбенко В.Ю.

[1]АО ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, округ Троицк, Россия, e-mail: teufida@gmail.com
[2]Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия, e-mail: novoselova.zi@phystech.edu
[3]ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, e-mail: V.Safronov@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.164

В условиях, характерных для переходных процессов в ИТЭР [1], облучение защитных покрытий вакуумной камеры мощными потоками плазмы повлечёт эрозию материалов, в том числе их интенсивное испарение. При экспериментальном моделировании переходных процессов было показано, что сильному разрушению материалов препятствует эффект паровой экранировки [2]. Этот эффект может оказывать значительное влияние на ресурс защитных покрытий, а также на режимы горения плазменного шнура (поступление примесей). Актуальной задачей является проверка расчётно-теоретических моделей, описывающих переходные процессы в ИТЭР [3], путём сопоставления результатов моделирования с соответствующими экспериментальными данными.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование динамики и энергетических характеристик экранирующего парового слоя, формирующегося при воздействии водородного плазменного потока на вольфрамовые образцы. Эксперименты проводились на импульсной плазменной установке МК-200UG [4]. Фактор теплового воздействия на образцы F_{HF} варьировался в пределах 1 – 7 ГДж/м^{2}с^{0,5}, длительность воздействия $t_{pl} \approx 15$ мкс. Облучение проводилось для двух значений магнитного поля в мишенной камере установки – $B = 1$ и 2 Тл.

Динамика экранирующего слоя изучалась с помощью быстрой фотокамеры, чувствительной к излучению в вакуумном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах длин волн. Установлено, что формирование экранирующего слоя происходит менее чем за 2 мкс, после чего его свечение регистрируется в течение 15 – 20 мкс. Скорость расширения паровой плазмы от поверхности мишени составляет 10 – 15 км/с.

Определена зависимость плотности энергии, поглощённой мишенью, Q_{abs}, от плотности энергии в налетающем плазменном потоке Q_{full}, а также мощность радиационных потерь из примишенной плазмы W_{rad}. Для этого были изготовлены оснащённые термопарами вольфрамовая мишень (Q_{abs}) со встроенным в её центр медным калориметром (Q_{full}). Для измерения W_{rad} использовалась камера-обскура, оснащённая в качестве регистраторов излучения абсолютно калиброванными AXUV-фотодиодами. Получена зависимость энергии излучения парового слоя от расстояния до мишени. Характерная толщина излучающего слоя составляет 5 см. Установлено, что до 40% энергии налетающего водородного плазменного потока преобразуется в излучение.

Работа выполнена в рамках международного контракта с организацией ИТЭР IO/18/CT/4300001763.

Литература

[1]. Roth J. et al., J. Nucl. Mater. **390-391**, 1-9 (2009).
[2]. Pitts R.A. et al., J. Nucl. Mater. **438**, S48-S56 (2013).
[3]. Pestchanyi S. et al., Fusion Eng. Des. **124**, 401-404 (2017).
[4]. Федулаев Е.Д. и др., Труды 62-й конференции МФТИ, Москва, 2019, с.375-376.

СВОЙСТВА ПОСТАВОЧНОЙ ПАРТИИ КЕРАМИКИ КАРБИДА БОРА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПОРТОВ ИТЭР

[1,2]Шошин А.А., [1,3]Бурдаков А.В., [1]Иванцивский М.В., [1,2]Полосаткин С.В., [1,2]Суляев Ю.С., [1,3]Семенов А.М., [4]Овсиенко А.И.

[1]Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия
[3]Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
[4]ООО Вириал, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.165

Для нейтронной защиты диагностических портов строящегося во Франции экспериментального международного термоядерного реактора ИТЭР будет использована керамика карбида бора. Производство керамики должно соответствовать утвержденной Организацией ИТЭР спецификации на изготовление керамики ITER_D_457TBH и чертежам ITER_D_X2GWTZ. Данная спецификация предъявляет требования как к свойствам керамики, так и условиям её изготовления. Готовая керамика должна на не менее 97% по массе состоят из карбида бора. Предъявляются требования по плотности, тепловым (теплоемкости, теплопроводности, коэффициенту линейного расширения) и вакуумным свойствам (удельному газовыделению в вакуум). Требования к удельному газовыделению очень жесткие и на в 10 раз превышают требования к другим материалам в вакуумной камере ИТЭР. Керамика должна иметь удельное газовыделение ниже 10^{-8} Па*м^3/с/м^2 по водороду при температуре 100ºС.

ООО Вириал изготовил первую партию спеченной керамики карбида, которая в ИЯФ СО РАН будет установлена в защитные кассеты и затем кассеты будут установлены в экваториальном порту № 11 ИТЭР. Керамика прошла очистку согласно требованиям ITER Vacuum Handbook (ITER_D_2EZ9UM) и упакована в индивидуальные вакуумные пакеты для сохранения чистоты. Метод упаковки согласован с Вакуумной секцией ИТЭР.

В докладе представлены результаты измерений механических, тепловых и вакуумных свойств первой поставочной партии спеченной керамики карбида бора, которая будет установлена в вакуумной камере ИТЭР. Вакуумные тесты и подготовка к ним проводились согласно требованиям ITER Vacuum Handbook.

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

[1]Коваленко Д.В., [1]Карташева А.А., [1]Петраков М.В., [1]Подковыров В.Л., [1]Сергеечев А.А., [1]Гуторов К.М., [1]Ярошевская А.Д., [1]Панин С.Е., [1]Барсук В.А.

[1]АО "ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", г. Москва, округ Троицк, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.166

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования поведения алюминия и коррозионно-стойкой стали под действием излучения с параметрами, характерными для ослабленного срыва ИТЭР [1]. Излучение генерировалось при торможении потока плазмы, сформированного квазистационарным сильноточным плазменным ускорителем КСПУ-Т, на твердотельной преграде (мишени) [2]. Облучаемые образцы материалов устанавливались под углом 45º к оси ускорителя сбоку от мишени, и не подвергались прямому воздействию плазменного потока. В работе [3] было показано, что такое облучение излучением коррозионно-стойкой стали 316L(N)-IG (предполагаемой для использования в качестве обращенного к плазме материала диагностических патрубков ИТЭР) приводит к образованию на поверхности образца регулярной волнообразной структуры с горбами и впадинами с характерным масштабом вдоль поверхности 1-3мм. В данной работе основное внимание было уделено изучению динамики процесса модификации поверхности материалов под действием вспышек излучения, впервые проведена высокоскоростная видеорегистрация формирования рельефа поверхности.

Эксперименты проводились на квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ-Т. Мишень, на которой происходило торможения потока плазмы, устанавливалась на оси ускорителя перпендикулярно плазменному потоку на расстоянии 80 см от электродов. Поперечный размер мишени составлял 160 мм, что больше характерного диаметра плазменного потока КСПУ-Т (~100 мм). Расстояние от центра облучаемого образца до центра мишени составляло 100 - 150 мм. В качестве плазмообразующего газа использовались водород, гелий или азот. Тепловая нагрузка на поверхность образца варьировалась в диапазоне 0,5 - 1,0 МДж/м^2 при длительности воздействия 0,5 - 1,0 мс, количество воздействий на образец составляло до 10 импульсов. Высокоскоростная регистрация процессов развития рельефа проводилась с помощью видеокамеры Phantom со скоростью съемки до 200000 кадров в секунду и размером кадра 256 х 256 пикселей. После облучения образцы исследовались с помощью оптической и электронной микроскопии.

В результате проведенных экспериментов был определен момент начала плавления материала на поверхности образца. Обнаружено, что на поверхности алюминия формируется пленка темного цвета, которая в процессе облучения трескается, при этом образовавшиеся островки пленки перемещаются по поверхности расплавленного металла до его затвердевания. Рельеф поверхности практически не изменяется. На поверхности стальных образцов, напротив, обнаружено сильное развитие рельефа, формирование которого происходит непосредственно во время импульса облучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00153.

Литература

[1]. Riccardi B. et al., Fusion Eng. Des. **86**, 1665-1668 (2011).
[2]. Коваленко Д.В. и др., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, В.4, С.39-48.
[3]. Klimov N.S. et al., J. Nucl. Mater. **438**, S241-S245 (2013).

РАЗВИТИЕ ДИЗАЙНА ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ВНК

[1]Таскаев А.С., [1]Иванцивский М.В., [1,2]Бурдаков А.В., [1]Шиянков С.В., [1]Селезнев П.А., [1]Грехова М.В., [1,3]Шошин А.А., [4]Немцев Г.Е., [5]Смирнов А.Б., [5]Пожилов А.А., [5]Кириенко И.Д., [5]Модестов В.С.

[1]Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2]Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
[3]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия
[4]ЧУ ГК «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия
[5]Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.167

Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК) для установки ИТЭР будет состоять из двух частей, в каждой из которых будет располагаться по шесть детекторных узлов, объединенных в герметичные диагностические модули, снабжённые системой сервисного вакуума и системой водяного охлаждения. Верхняя ВНК будет установлена в верхний порт (ВП) № 18 и должна являться составной частью ДЗМ этого порта, нижняя ВНК устанавливается в нижний порт (НП) № 14.

Во время развития дизайна и интеграции данной диагностики были произведены следующие основные изменения и результаты работ:

- изменена передняя часть защитных кассет – она имеет скошенный передний край (как у ДЗМ), проведена обновлённая система водяных каналов охлаждения. На передней части кассет были добавлены элементы крепления, с помощью которых обеспечивается точная финальная установка кассет относительно ДЗМа.

- изменена геометрия защиты детекторных модулей. В данном дизайне с помощью сложной геометрии защиты было максимально заполнено свободное пространство вокруг детекторов для обеспечения улучшенной защиты.

- в связи с изменениями в диагностическом защитном модуле электрические разъёмы ВВНК были передвинуты в направлении от плазмы. На задних частях защитных кассет с помощью болтов крепятся опорные структуры, вдоль которых проводятся сигнальные кабели. На конце опорных структур устанавливаются ответные части электрических разъёмов.

- в следствии проведения работ по оптимизации конструкции ВВНК было принято решение об изменении маршрута прокладывания кабелей. В предыдущем дизайне кабели прокладывались над детекторами, что требовало опускать сами детекторы ближе к плазме. В изменённом дизайне провода прокладываются по бокам кассет (слева и справа от детекторов), что позволило поднять детекторы, отдалив их от плазмы и улучшив соотношение сигнал/шум.

- была изменена разводка труб системы сервисного вакуума. В данном дизайне три трубки SVS от каждого из детекторов (на каждой из двух кассет) прокладываются вблизи с сигнальными кабелями и рядом с опорной структурой, соединяются в одну трубку для дальнейшей сварки с трубой SVS порт-интегратора.

- в конструкции предусмотрены места крепления для элементов диагностики вакуумного ультрафиолетового излучения, которую разрабатывает Корейское домашнее агентство.

- подрядной организацией были подготовлены исходные данные для прочностного анализа финального проекта верхней ВНК (внутривакуумные элементы).

СТАТУС РАБОТ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР В ИЯФ СО РАН

[1]Иванцивский М.В., [1,3]Бурдаков А.В., [1]Гавриленко Д.Е. [1]Грехова М.В. [1]Золотухина Н.А. [1]Константинов В.М. [2]Кравцов Д.Э. [1]Листопад А.А. [1]Манаенкова Ю.А. [1]Рыжанков И.С. [1]Селезнев П.А. [1]Серемин В.В. [2]Сорокина Н.В. [1,4]Суляев Ю.С. [1]Таскаев А.С. [1]Шабунин Е.В. [1]Шарафеева С.Р. [1]Шиянков С.В. [1,4]Шошин А.А.

[1]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: M.V.Ivantsivsky@inp.nsk.su,
[2]ЧУ ГК «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, e-mail: D.Kravtsov@iterrf.ru,
[3]Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, e-mail: A.V.Burdakov@inp.nsk.su,
[4]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия, e-mail: Yu.S.Sulyaev@inp.nsk.su.

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.168

Институт ядерной физики с 2013 года ведет проектные работы по диагностическому оборудованию для установки ИТЭР. В перечень разрабатываемого оборудования входят: проектирование и интеграция верхних диагностических портов №№ 02, 07, 08, экваториального диагностического порта № 11 в качестве основного поставщика, а также в виде изготовителя и разработчика части системы в диагностиках: вертикальная нейтронная камера (верхняя и нижняя), диверторный монитор нейтронного потока, анализатор атомов перезарядки (внутри вакуумная часть).

За этот период были успешно проведены защиты финального проекта для интеграции экваториального порта № 11, диверторного монитора нейтронного потока и внутри вакуумной части анализатора атомов перезарядки. Данные проекты сейчас находятся в стадии подготовки производства или производства. В частности, в 2021 г. были изготовлены коллимационные модули для анализатора атомов перезарядки, начаты работы по изготовлению внутрипортовых компонент экваториального порта № 11. Перед началом производственных операций коллективом ИЯФ была проделана огромная работа по подготовки документации описывающих предстоящие производственные процессы, в т.ч. планирование и проведение квалификации операции «глубокое сверление» без которой невозможно изготовить систему охлаждения диагностических защитных модулей. В данный момент ведется активная подготовка документации по квалификации сварочных процессов и процессов неразрушающего контроля для проведения защиты второго этапа производства.

В то же время, по остальным, перечисленным выше проектам, была успешно проведена защита предварительных проектов и ведется активная проектная работа над финальными проектами.

Опыт полученный командой ИЯФ в процессе проведения подготовки производства может быть крайне полезен другим группам, работающим по направлению проектирования и изготовления диагностического оборудования для установки ИТЭР.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВКИ МК-200UG ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ НА ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ИТЭР

[1,2]Федулаев Е.Д., [1,2]Позняк И.М., [2]Топорков Д.А., [1,2]Сафронов В.М., [2]Кочнев Д.М., [1,2]Новоселова З.И, [2]Карелов С.В., [2]Иванов А.И.

[1]*НИУ МФТИ, г. Долгопрудный, Россия*
[2]*АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия*

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.169

Во время работы ИТЭР защитные покрытия вакуумной камеры будут подвергаться воздействию мощных потоков плазмы. Это вызовет эрозию материалов и сократит их срок службы. Наиболее теплонагруженным элементом ИТЭР является дивертор. Согласно расчетам, во время срывов тока тепловая нагрузка в этой области может достигнуть 80 МДж/м^2 [1]. На существующих сегодня токамаках подобные тепловые нагрузки недостижимы, поэтому для лабораторных исследований материалов применяются иные экспериментальные методы.

Цель работы – исследовать параметры потока плазмы на экспериментальной установке МК-200UG в различных режимах ее работы и выбрать режимы, обеспечивающие испытания материалов в условиях, максимально приближенных к условиям ELM-ов и срывов в ИТЭР.

Установка МК-200UG состоит из следующих компонентов: мощного импульсного плазменного ускорителя, плазмомпровода с продольным магнитным полем и мишенной камеры, в которой размещаются исследуемые образцы. Изменяя режимы работы установки, можно получать плазменные потоки с различными параметрами.

В данной работе были измерены различные параметры плазменного потока. Так для определения полной энергии потока и плотности поглощенной энергии на поверхности мишени были использованы термопарные многоканальные калориметры различных конструкций. При помощи системы магнитных зондов измерены скорость, длительность, диаметр, газокинетическое давление плазменного потока. Давление торможения плазменного потока на мишени регистрировалось при помощи пьезоэлектрического датчика. Напряжение на электродах ускорителя и ток разряда фиксировались с использованием высоковольтного делителя и пояса Роговского.

Таким образом, определены режимы работы системы, наиболее точно повторяющие параметры плазменного потока, ожидаемые в переходных процессах в ИТЭР. При лабораторных исследования взаимодействия плазмы с защитными покрытиями вакуумной камеры установка МК-200UG обладает следующими достоинствами: интенсивность плазменно-теплового потока, фактор теплового воздействия, энергия ионов, магнитное поле в мишенной камере близки к параметрам, ожидаемым во время ELM-ов и срывов тока в ИТЭР. Из недостатков можно выделить малую длительность потока (не более 30 мкс). Тем не менее, эта величина значительно больше характерного времени формирования примешенной плазмы (менее 2 мкс) и длительность импульса не является препятствием для дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках международного контракта с организацией ИТЭР IO/18/CT/4300001763.

Литература

[1]. Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F. et al. A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status, J. Nucl. Mater. **438**, S48-S56 (2013).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА ИНЖЕКТОРА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ НЕЙТРАЛОВ С УСКОРЕНИЕМ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА

Сотников О.З., Бельченко Ю.И., Иванов А.А., Санин А.Л., Горбовский А.И.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: O.Z.Sotnikov@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.170

Инжектор высокоэнергетичных нейтралов включает в себя поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов водорода, одноапертурный ускоритель, нейтрализатор и сепаратор. Схема инжектора показана на рис. 1. Согласно выбранной схеме, пучок отрицательных ионов от высокочастотного поверхностно-плазменного источника ионов сначала ускоряется в источнике до энергии 120 кэВ, затем транспортируется через секцию с отклоняющими магнитами, где очищается от сопутствующих частиц и фокусируется на вход одноапертурного ускорителя, который осуществляет дальнейшее ускорение пучка до полной энергии 0,4 - 1 МэВ. Далее ускоренный пучок отрицательных ионов конвертируется в пучок высокоэнергетичных атомов в камере нейтрализатора и сепарирующим магнитом отделяется от сопутствующих положительных и отрицательных ионов.

В рамках программы по созданию инжектора высокоэнергетичных атомов в ИЯФ СО РАН ведутся работы по всем перечисленным этапам получения, ускорения и нейтрализации пучков ОИ. В докладе описываются результаты проведенных в 2021 году работ по получению пучка отрицательных ионов с током около 1 А и его ускорению до энергии 0,34 МэВ.

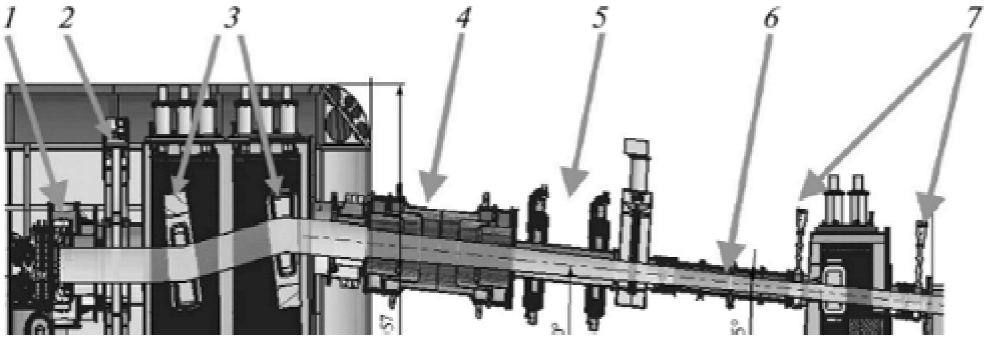


Рисунок 1. Проект пучкового тракта инжектора высокоэнергетичных атомов: 1 – источник отрицательных ионов; 2 – шибер ионного источника; 3 – отклоняющие магниты камеры очистки пучка; 4 – одноапертурный ускоритель; 5 – квадрупольные магниты; 6 – плазменный нейтрализатор; 7 – шиберы тракта нейтралов.

ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ КУПОЛА ДИВЕРТОРА ИТЭР ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ В КСПУ-Т: РЕЗУЛЬТАТЫ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ НА УСЛОВИЯ ИТЭР

[1,2]Будаев В.П., [3]Житлухин А.М., [1]Мартыненко Ю.В., [3,4]Подковыров В.Л., [3,4]Позняк И.М., [3]Коваленко Д.В., [3]Цыбенко В.Ю, [3,4]Новоселова З.И., [3,4]Федулаев Е.Д., [2,3]Бурмистров Д.А., [3,4]Лиджигоряев С.Д., [3]Исмагилов О.Р.

[1]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: budaev@mail.ru ,
[2]НИУ МЭИ, г. Москва, Россия
[3]АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия, e-mail: teufida@gmail.com
[4]МФТИ, г. Долгопрудный, Россия,e-mail: novoselova.zi@phystech.edu

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.171

Для определения ресурса теплозащитной облицовки ИТЭР и исследования процессов их эрозии необходимо проводить испытания образцов защитных материалов при интенсивной плазменно-тепловой нагрузке [1]. В данной работе испытания образцов защитных покрытий проводились на квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ-Т.

Установка КСПУ-Т позволяет создавать плазменные потоки с длительностью импульса ≈ 1 мс и с тепловой нагрузкой на облучаемые образцы 0,2 – 5 МДж/м^2, что сопоставимо с условиями переходных процессов в ИТЭР [2]. В связи с этим КСПУ-Т используется для ресурсных испытаний защитных покрытий и исследования механизмов эрозии [3].

Для того, чтобы при испытаниях защитных покрытий максимально приблизиться к условиям переходных плазменных процессов в ИТЭР, следует создавать магнитное поле в области взаимодействия плазмы с материалом, а также замагничивать сам плазменный поток. Интерес представляет сравнение процесса облучения материалов плазмой в присутствии магнитного поля и без него, что позволит выявить новые физические закономерности. Кроме варьирования величины поля следует исследовать различные конфигурации магнитного поля и положения поверхности защитного покрытия по отношению к налетающему плазменному потоку, так как эти условия могут значительно влиять на интенсивность эрозии.

С целью проведения испытаний при наличии магнитного поля была разработана специальная система катушек Гельмгольца для размещения внутри мишенной камеры установки КСПУ-Т. Проведено две серии экспериментов по облучению образцов вольфрамовых покрытий (плоских мишеней) без магнитного поля и с полем величиной ≈ 0,6 Тл. В каждой серии испытывались две мишени, одна из которых облучалась при нормальном падении плазменного потока, а вторая – под углом 45° к направлению потока. Испытания проводились при одинаковых условиях плазменного воздействия, длительность которого составляла 0,75 мс, а тепловая нагрузка в центре мишени – 1,5 МДж/м^2. Измерены профили и оптические изображения поверхности облученных образцов, проведён анализ результатов экспериментов и выполнена экстраполяция данных на условия ИТЭР.

Работа выполнена при поддержке ГК «Росатом» в рамках выполнения государственных контрактов № Н.4а.241.19.18.1027, № Н.4а.241.19.19.1009, № Н.4а.241.19.20.1042, ЕОТП-УТП-223.

Литература

[1]. Будаев В.П., ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2015, Т.38, №4, с. 5
[2]. Roth J. et al., J. Nucl. Mater. **390-391**, 1-9 (2009).
[3]. Позняк И.М. и др. – ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2012, Т. 35, №4, с. 23-33

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ, ЧАСТИЦ И ВВОДА ТОКА В ТОКАМАКЕ ИТЭР

[1]Ханаева Р.А., [2]Хайрутдинов Р.Р.

[1]Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия, e-mail: hanaeva.ra@phystech.edu
[2]НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: khayrutd@mail.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.172

При старте разряда в токамаке происходит несколько важнейших явлений в развитии сценария разряда: превращение пучка электронов на лавинной стадии разряда в ионизованный газ хаотически движущихся частиц на кулоновской стадии; фазовый переход газ – плазма; превращение разомкнутых магнитных поверхностей в замкнутые внутри плазменной области начиная с некоторого тока плазмы. Это выделяет начальную стадию разряда в отдельную задачу [1]. Из-за инженерных ограничений для токамака ИТЭР требования к параметрам начальной стадии разряда особенно жёсткие, а некоторые параметры задачи не являются вполне определёными. Моделирование транспортных процессов на начальной стадии разряда позволяет определить условия образования плазмы в токамаке ИТЭР. Также значительный интерес вызывает возможность управления физическими процессами в плазме токамака при помощи обратных связей [2]. В данной работе проведено моделирование эволюции концентрации, температуры и тока на основе системы нульмерных уравнений (с включением 2D-эффектов) с использованием обратных связей. Для моделирования начальной стадии используется нульмерный код SCENPLINT, включающий в себя уравнения баланса энергии и частиц, уравнения для эволюции тока плазмы и тока убегающих электронов как для чисто омического старта разряда, так и для разрядов с ЭЦР подогревом плазмы.

Литература

[1]. V.A. Belyakov, K.M. Lobanov, L.P. Makarova, A.B. Mineev, V.V. Vasiliev, Plasma Initiation Stage Analysis with TRANSMAK code, Plasma Devices Oper. **11** (3), 193 (2003).
[2]. В.Э. Лукаш, В.Н. Докука, Р.Р. Хайрутдинов. Программновычислительный комплекс ДИНА в системе MATLAB для решения задач управления плазмой токамака // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 1, с. 40-49

ТЕХНОЛОГИИ УСКОРЕНИЯ РАСЧЁТОВ В ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ ТОКАМАКА

Скопинцев Д.А., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р.

АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", г. Москва, округТроицк, Россия.
e-mail: scopintsev.d.a@triniti.ru, khayr@triniti.ru, dokuka@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.173

В работе описаны технологии ускорения расчётов при применении пакетов прикладных программ, реализованных на языке FORTRAN для моделирования плазмофизических процессов в токамаках.

При этом трудность при моделировании обусловлена различными по своей природе процессами, которые имеют пространственные и временные масштабы, различающиеся на много параметров. Именно поэтому требуется объединение в единую систему различных специализированных кодов, которые в совокупности позволяют спроектировать установку токамак и проанализировать её работу [1].

Одной из важных задач является прогнозирование поведения плазменного шнура в ходе эксперимента — так называемый расчёт сценария разряда. Разработка соответствующих компьютерных кодов и проведение вычислительных экспериментов с их помощью является задачей чрезвычайной вычислительной сложности [2].

Имитационные модели токамака-реактора включают моделирование не только плазмо-физических состояний разряда, но и формирование инструментальных средств (алгоритмов и программных кодов) для входящих в контур управления плазмой компонентов и систем. Таких как, модуль восстановления параметров плазмы по данным магнитных измерений, система электропитания обмоток, система магнитного управления плазмой, предназначенная для управления током, положением и формой плазмы и т.д. [3]

Модельные коды предъявляют весьма серьёзные требования к вычислительным ресурсам. Возникает задача распределения вычислений по массиву вычислительных ядер, что возможно при использовании компилятора с поддержкой CUDA для Fortran, например, компании Portland Group Inc. (PGI), и применении библиотек CUDA с архитектурой современных GPU [4].

Массивы должны передаваться в память GPU для параллельной обработки, а затем возвращаться обратно. Поэтому они должны быть статическими. Общая производительность ограничена этими операциями. Появление новой шины NVLink и памяти HBM2, к которой может обращаться управляющая CPU и GPU должны снять это ограничение.

Модификация кода производилась с помощью директив компилятору. Алгоритм реализации проверялся на сценарии где каждое уравнение решалось по отдельности и для каждого момента времени проводились итерации, до достижения необходимой абсолютной точности схождения. Время схождения при использовании GPU сократилось на порядок.

Литература

[1]. Kostomarov D.P., Zaitsev F.S., Shishkin A.G., Sychugov D.Yu., Stepanov S.V., Suchkov E.P., “Virtual tokamak” software toolbox, Вестник Московского Университета, Сер. 15, Вычислительная математика и кибернетика, 2011, №4, с. 48-56.

[2]. Зайцев Ф.С. Математическое моделирование эволюции тороидальной плазмы. М.: МАКС Пресс, 2005.

[3]. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E., J. Comput. Phys. **109**, 193 (1993).

[4]. Рутш Г., Фатика М., CUDA Fortran для инженеров и научных работников (пер. с англ. Слинкин А. А.), М.: ДМК Пресс, 2014.

РАЗВИТИЕ АППАРАТНО-ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА (АИП ИКП) КАК ИНСТРУМЕНТА ИНТЕГРАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ УТС

Портоне С.С., Миронова Е.Ю., Семенов О.И., Ежова З.В., Семенов Е.В., Миронов А.Ю., Ларионов А.С., Нагорный Н.В., Семенов И.Б., Звонарева А.А., Григорян Л.А., Гужев Д.И., Журавлев М.К., Николаев А.И.

ЧУ ГК «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.174

С ростом сложности проводимых исследований и увеличением объема получаемых данных возрастает потребность в совместной научно-исследовательской деятельности. Информационные технологии позволяют объединить в рамках экспериментальных программ профессиональные компетенции, вычислительные мощности и аппаратную инфраструктуру, организовать подготовку научно-технических кадров. Технологическим базисом для проведения совместных исследований служат системы участия в дистанционных экспериментах.

Для обеспечения возможности участия в дистанционных экспериментах в области УТС исследований в России в 2021 году начаты работы по внедрению аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства (АИП ИКП). АИП ИКП обеспечивает получение и отображение научной информации, в том числе экспериментальных данных, тематических публикаций, справочной информации, проведение дистанционных совместных исследований и предоставление иных научных и телекоммуникационных сервисов для участников отечественного УТС сообщества. АИП ИКП представлена набором узлов: Совместными Лабораториями для подключения к источникам данных, Центральным Узлом и Центром Работы с Данными для выполнения расчетов, вычислений и обеспечения сервисов ИКП, а также Центрами Дистанционного Участия для коллективного доступа к ИКП.

В 2025 году должна должен состояться запуск самой большой в мире экспериментальной установки ИТЭР. Информационно-коммуникационное пространство ИТЭР будет являться эталоном для взаимодействия в рамках международного сотрудничества в области УТС; в этой связи Россия должна быть готова к работам на установке ИТЭР.

В докладе рассмотрен российский опыт создания и разработки АИП ИКП и первые результаты её деятельности, а также международный опыт построения систем участия в дистанционных экспериментах в рамках крупнейших проектов в области УТС, в том числе проекта экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. На основе изучения зарубежного опыта и подходов, использующихся в международной Организации ИТЭР, сформулированы перспективные направления развития АИП ИКП, позволяющие создать единое информационное пространство УТС исследований в РФ, а также обеспечить интеграцию платформы с международными исследованиями в области УТС: разработка унифицированных форматов и структур данных, совместимых с IMAS; хранение данных как в унифицированном, так и в нативном формате; интеграция с математическими пакетами и кодами с возможностью создания пользовательских приложений и др.

Целью данного доклада является демонстрация возможности развития АИП ИКП как инструмента интеграции отечественных и мировых УТС исследований с учётом стандартов и подходов, принятых в мировой практике, в том числе в международной Организации ИТЭР.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.04.2021 № Н.4Q.241.09.21.1092 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в РФ. Этап 2021 года».

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ НА ТОКАМАКЕ С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

[1]Афанасьев В.И., [2]Гончаров П.Р., [1]Мельник А.Д., [1]Миронов М.И., [1]Наволоцкий А.С., [1]Несеневич В.Г., [1]Петров М.П., [1]Петров С.Я., [1]Чернышев Ф.В.

[1]ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: val@npd.ioffe.ru
[2]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: p.goncharov@spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.175

В настоящее время анализ потоков атомов является одним из основных методов диагностики ионной компоненты высокотемпературной плазмы. Этот метод обеспечивает возможность изучения как ионной функции распределения, так и соотношения концентраций изотопов водорода. Атомные анализаторы успешно применялись на всех лидирующих мировых установках с магнитным удержанием, таких как JET [1, 2], TFTR [3], JT-60U [4] и др., а разрабатываемый в настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе комплекс атомных анализаторов включен в перечень приоритетных диагностик для международного термоядерного реактор ИТЭР [5, 6].

Данный доклад посвящен изучению возможностей применения диагностики по потокам атомов для исследования параметров плазмы и дополнительных методов нагрева на новой российской плазменной установке, проектирование которой начато в 2021 году, – токамаке с реакторными технологиями (ТРТ) [7]. Выполнено численное моделирование проникновения нейтральных пучков в плазму ТРТ, на основе чего получена функция источника быстрых дейтронов и произведены расчеты пространственной, энергетической и угловой зависимости функции распределения скоростей дейтронов в плазме с учетом эффектов замедления и диффузии в пространстве скоростей в результате кулоновских столкновений с электронами и ионами фоновой плазмы. Сделаны оценки популяции быстрых ионов, возникающих при введении в плазму ВЧ мощности на частоте ионно-циклотронного резонанса. На основе полученных результатов и данных о пространственном распределении плотностей мишеней нейтрализации проведены расчеты энергетических распределений и интенсивности потоков вылетающих атомов перезарядки вдоль линий наблюдения анализаторов. Получены соответствующие скорости счета атомов в различных диапазонах энергий. Все расчеты проведены для режимов работы ТРТ, описанных в работе [8].

Литература

[1]. M. P. Petrov, V. I. Afanasyev, S. Corti et al, 19th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, vol.16C(II), 1031 (1992).
[2]. V. I. Afanasiev, A. Gondhalekar, P. Yu. Babenko et al, Rev. Sci. Instrum. **74**, 2338 (2003).
[3]. M. P. Petrov, R. Bell, R. V. Budny et al., Phys. Plasmas **6**, 2430 (1999).
[4]. V. I. Afanassiev, Y. Kusama, M. Nemoto et al. Plasma Phys. Control. Fusion, **39**, 1509 (1997).
[5]. V. I. Afanasyev, F. V. Chernyshev, A. I. Kislyakov et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **621**, 456 (2010).
[6]. S. Y. Petrov, V. I. Afanasyev, A. D. Melnik et al., Phys. Atom. Nucl. **80**, 1268 (2017).
[7]. А. В. Красильников, С. В. Коновалов, Э. Н. Бондарчук и др., Физика плазмы, 2021, Т. 47, № 11, стр. 970–985 (2021).
[8]. В. М. Леонов, С. В. Коновалов, В. Е. Жоголев и др., Физика плазмы, 2021, Т. 47, № 11, стр. 986–997.

ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ В ДИВЕРТОРЕ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА

Мухин Е.Е.

Физико-технический институт им А.Ф.Иоффе, 194021, Санкт Петербург
e-mail: e.mukhin@mail.ioffe.ru DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.176

Важной частью экспериментальной программы по разработке токамака реактора станут режимы с большими тепловыми потоками через последнюю замкнутую магнитную поверхность. В таких режимах ограничивающими факторами становятся физические ограничения тепловой нагрузки на первую стенку и элементы дивертора. Дивертор – наиболее энерго-напряженный и потому самый критический элемент любого токамака-реактора. Именно поэтому необходимо уделять внимание изучению пристеночной плазмы, взаимодействию плазма-стенка, исследованию и контролю рециклинга водорода, контролю режима с полным или частичным отрывом плазмы, характеризующегося существенным снижением тепловой нагрузки на пластины дивертора. Высокая плотность мощности дополнительного нагрева токамака-реактора приведет к экстремально высоким нагрузкам на область дивертора, что увеличит риск серьезной аварии. Режимы работы дивертора, их оптимизация и отслеживание в процессе работы приобретают особо важное значение для защиты реактора от аварий. Модель пристеночной и диверторной плазмы, а также режима отрыва до конца не разработана. При разработке режимов работы дивертора потребуются надежные экспериментальные данные о распределении электронной, ионной и нейтральной компонент плазмы (T_e,n_e,T_i,n_i,$n_{He/H/D/T}$), необходимые для валидации теоретических моделей и численных кодов [1].

Скорости реакций с участием электронной компоненты T_e, n_e, такие как ионизация, рекомбинация и излучение играют важную роль в охлаждении плазмы. Параметры ионной компоненты и концентрация нейтрали T_i, n_i, $n_{He/H/D/T}$ важны при оценке скоростей ион-нейтральных столкновений.

Всю совокупность плазменных параметров в районе Х-точки, их изменение от Х-точки вдоль сепаратрисы до наружной диверторной мишени и вдоль поверхности наружной диверторной пластины предлагается решать с помощью совмещенной лазерной диагностики томсоновского рассеяния (ТР) и лазерно – индуцированной флуоресценции (ЛИФ) [2]. Одна из наиболее важных функций диагностики будет заключаться в проверке модельных предположений поведения плазмы в диверторе и ее отрыва от диверторных пластин. Акцент на исследовании наружной диверторной ноги объясняется тем, что полный отрыв плазмы от внутренней мишени дивертора обычно происходит раньше, чем во внешней, а также сложностью проведения лазерных измерений во внутренней ноге.

Совокупность параметров, измеряемых совмещенной диагностикой ТР/ЛИФ позволит:

- обеспечить контроль режима работы дивертора, определяя области преимущественной ионизации/рекомбинации в диверторной плазме с помощью измерений локальных значений скоростных коэффициентов ионизации и рекомбинации (T_e n_e $n_{*He/H/D/T}$);
- рассчитать силы трения плазменных потоков о нейтральную компоненту (T_i, n_i, $n_{*He/H/D/T}$);
- рассчитать изменение давления вдоль наружной ноги дивертора (T_e n_e T_i n_i);
- определить соотношение концентраций изотопов водорода $n_{*H/D/T}$,
- определить концентрацию (эффективность откачки) гелия – продукта термоядерного синтеза.

Литература

[1]. E.E. Mukhin, et al Physical aspects of divertor Thomson scattering implementation on ITER 2014 Nucl. Fusion **54** 043007 https://doi.org/10.1088/0029-5515/54/4/043007

[2]. E.E. Mukhin et al Integration of Thomson scattering and laser-induced fluorescence in ITER divertor 2019 Nucl. Fusion **59** 086052 https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1cd5

ОПЫТ РОССИИ В РАЗРАБОТКЕ И ТЕСТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УДАЛЕННОГО УЧАСТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ИТЭР

[1]Семенов О., [1]Звонарева А., [1]Ларионов А., [2]Лобес Л., [1]Миронова Е., [1]Потапов А., [1]Нагорный Н., [1]Портоне С., [3]Степанов Д., [1]Семенов И.

[1]Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия O.Semenov@iterrf.ru
[2]Томский политехнический университет, Томск, Россия
[3]Организация ИТЭР, Сен-Поль-ле-Дюранс, Франция

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.179

Международный проект ИТЭР реализовывается при участии семи равноправных партнеров и более тридцати стран-участниц. Соглашение о строительстве и использовании реактора ИТЭР предусматривает доступ к результатам экспериментов для всех участников проекта. В связи с этим, в систему сбора данных установки закладывается возможность удаленного доступа и дистанционной обработки научных данных, как после (оффлайн), так и в процессе (онлайн) проведения эксперимента. Российская Федерация, как один из участников проекта, принимает в этой работе активное участие. По состоянию на 2021 г., Россия, США и Япония подключены на постоянной основе к развернутой в настоящий момент системе сбора технологических данных на площадке ИТЭР для проведения научно-исследовательских работ и тестирования функционала.

Российский центр удаленного участия в ЧУ «Проектный Центр ИТЭР» (г. Троицк) является наиболее продвинутым в плане доступной функциональности из всех, на его основе проводятся совместные с МО (Международной Организацией) ИТЭР работы по отработке технологий и принципов дистанционного участия в эксперименте для других участников проекта, в том числе проведены исследование протоколов, методов и каналов передачи данных через существующие общедоступные сети с целью выработки стратегии подключения к системе сбора данных ИТЭР и тестирование различных интерфейсов удаленного доступа к данным ИТЭР. В работе были исследованы процессы передачи данных (задержка, скорость, стабильность, одиночный и многопоточный поток данных и т. д.), а также вопросы информационной безопасности через L3-подключения к Международной Организации ИТЭР.

Проведены исследование вопросов информационной безопасности доступа к ИТ-инфраструктуре МО ИТЭР, исследования вопросов зонирования ИТ сетей в соответствии с требованиями кибербезопасности и стандарта IEC 62645. Созданы элементы доступа к системе сбора данных ИТЭР в режиме реального времени и создания эффекта присутствия на установке через шлюз EPICS. Кроме того, протестированы различные инструменты для удаленного участия, планируемые к использованию в рамках проекта ИТЭР, такие как совместное использование экрана, просмотр данных и т. д,. из Российского центра удаленного участия в МО ИТЭР (расстояние около 3000 километров), в результате чего со стороны МО ИТЕР сформулированы требования к подобным подключениям для всех партнеров.

Благодаря этой работе Российская Федерация стала одной из первых стран участниц проекта ИТЭР, обеспечивших прямое подключение к технологическим данным площадки ИТЭР. Результаты работы представляют дорожную карту для участия в экспериментальной программе всех партнеров проекта в будущем. Сегодня, основываясь на полученном опыте, со стороны МО ИТЕР сформулированы требования к каналам, скорости и т.д. для всех партнеров. Кроме того, в рамках исследований возможностей Центра удаленного участия проведены удаленные испытания нейтронной диагностики на реакторе ИБР-2 (ОИЯИ г. Дубна), а также различные эксперименты на нейтронном генераторе в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ». Результаты этой работы также легли в основу технологий и методов, необходимых для реализации проекта по созданию аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства УТС исследований в РФ.

Работы выполнены по договору № Н.4Q.241.09.21.1092с Госкорпорацией «Росатом» и рабочему соглашению C45TD15FR с Международной Организацией ИТЭР.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ НАУЧНЫХ ДАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УТС ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Нагорный Н.В., Звонарева А.А., Миронов А.Ю., Миронова Е.Ю., Журавлёв М.К., Гужев Д.И., Николаев А.И., Нестеренко В.М., Портоне С.С.

Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.178

Экспериментальные исследования физических процессов сегодня выполняются с помощью большого количества различных физических установок, в масштабах от небольших лабораторных стендов до мегасайенс проектов. Каждый проект предполагает получение научных данных в ходе эксперимента, и чем сложнее установка и изучаемый физический процесс, тем важнее связь между управлением экспериментом и учётом результатов анализа, получаемых в процессе эксперимента научных данных.

Анализу научных данных, под которым можно понимать работу с сохранёнными данными после эксперимента, либо учёт результатов автоматической обработки данных системами управления во время эксперимента, предшествуют получение данных и их потоковая обработка на разных уровнях аппаратной и программной иерархии измерительной системы. Такая иерархия может включать обработку данных сразу после АЦП с помощью жёсткой логики, перепрограммируемых логических интегральных схем и выполнение преобразований данных с помощью микроконтроллеров для последующей передачи в компьютер. Выполнение операций с данными в операционной системе компьютера происходит с использованием различных аппаратных ресурсов, таких как ядра процессоров, память, графических процессоров, а также программных средств. Конечная обработку данных выполняется на уровне центральной системы управления установкой.

В данной работе представлен опыт применения современных аппаратных и программных средств для выполнения потоковой обработки информации, поступающей с измерительного оборудования в различных диагностических системах УТС экспериментов и достижения высокой скорости обратной связи с системами управления и экспериментатором.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

Литература.

[1]. Plant Control Design Handbook – Iter. https://www.iter.org/mach/codac/plantcontrolhandbook.

[2]. M. Zhuravlev, G. Nemtcev. Development of a real-time signal processing unit for diamond detectors of ITER Vertical Neutron Camera. – EPJ Web Conf., 2021. – Volume 253.

[3]. M. Kadziela, B. Jablonski. Evaluation of the ITER Real-Time Framework for Data Acquisition and Processing from Pulsed Gigasample Digitizers. - Journal of Fusion Energy (2020) 39:261–269.

СПИСОК АВТОРОВ

К

Krasilnikov A.V.	39

А

Аблесимов В.Е.	110
Агеев А.В.	99
Акунец А.А.	112, 113, 122
Александров В. В.	120, 121
Александрова И.В.	113
Алиева А.И.	84, 94
Аммосов Я.М.	69
Ананьев С.С.	97, 98, 102, 184
Анашкин И.О.	68
Андреев В.В.	153
Андреев В.Ф.	58, 70
Анненков В.В.	59
Анпилов А.М.	198
Антонов Н.Н.	150
Антонов П.А.	106
Ануарулы О.	48
Апфельбаум Е.М.	131
Аржанников А.В.	91, 183
Аристова Н.А.	167
Артемьев К.В.	199, 200
Асанина С.Г.	196
Атлуханов М.Г.	183
Афанасьев В. И.	218
Ахмадуллина Н.С.	189, 192

Б

Багрянский П.А.	34, 59, 83
Баженов А.Н.	63
Бакшаев Ю.Л.	173
Бакшт Е.Х.	31
Балаченков И.М.	52
Бардаков В.М.	142
Баркалов Е.Е.	68
Баронова Е.О.	114, 115
Барсук В.А.	209
Бархударов Э.М.	198
Баско М. М.	121
Батанов Г.М.	189
Баткин В.И.	81
Батукаев Т.С.	135
Бахарев Н.Н.	51, 52, 63, 64
Бахтин В.П.	196
Беграмбеков Л.Б.	94
Беденко С.В.	91
Беклемишев А.Д.	90
Белов А.С.	84, 94
Белозеров О.С.	173
Белоплотов Д.В.	31
Белоусов С.В.	185
Бельченко Ю.И.	213
Бишаев А.М.	49, 174, 175
Бобырь Н.П.	171
Большаков Е.П.	151
Борзосеков В.Д.	189, 192
Борисенко Н.Г.	112, 122
Боронина М.А.	67
Боханов А.Ф.	146, 149
Бочкарев С.Г.	127
Брагин Е.Ю.	147, 154
Браницкий А. В.	120, 121
Брантов А.В.	127
Бронзов Т.П.	151
Бруль А.В.	100, 101
Брюннер С.	48
Будаев В.П.	53, 55, 56, 60, 155, 156, 185, 214
	38
Булгадарян Д.Г.	93
Булейко А.Б.	196
Бунин Е.А.	147, 154
Бурдаков А.В.	81, 208, 210, 211
Бурмистров Д.А.	60, 75, 214
Бурцев В.А.	151
Буш А.А.	49, 174
Быченков В.Ю.	127
Бычков В.Л.	176, 177, 178, 187

В

Вавилин К.В.	187
Вагин Е.Ю.	143
Вадимов Н.А.	69
Варава А.Н.	55, 56
Варфоломеев В.И.	51, 52, 63

Васильев Г.Б.	53, 55, 56, 60, 185, 197
Васильева О.Б.	136
Васильков Д.Г.	105
Васина Я.А.	62, 87, 106
Вафин И.Ю.	103
Вахрушев Р.В.	100
Векленко Б.А.	134
Векшина Е.О.	64
Вергунова Г.А.	30
Вертков А.В.	106
Викторов М.Е.	149
Виницкий Е.А.	94
Виноградов Н.П.	31
Вихрев В.В.	115, 125
Вичев И.Ю.	121
Волков В.А.	117
Волков Г.С.	118
Волчок Е.П.	59
Ворона Н.А.	150
Воронин А.В.	72
Воронова Е.В.	189, 190, 192, 202, 203
Воскобойников Р.В.	85
Вшивков В.А.	67
Выбин С.С.	144 – 146
Высоцкий С.А.	117

Г

Гавриков М.Б.	49, 141, 174, 175
Гавриков А.В.	150
Гавриленко Д.Е.	211
Гаврилин Р.О.	117
Гаврилкин С.Ю.	113
Гаврилов В.В.	75
Галанин М.П.	124
Герлер Т.	48
Гетман Д.В.	151
Глинов А.П.	172
Гожев Д.А.	127
Голачев В.М.	42
Головин А.П.	172
Голубев С.В.	146
Голубков М.Г.	177, 178
Гончаров П.Р.	218
Горбовский А.И.	213
Горбун М.С.	69
Горенков И.А.	83
Горяинов В.Ю.	72
Горячкин П.А.	176
Грабовский Е.В.	118, 120, 121, 123, 124
Грехова М.В.	210, 211
Григорян Л.А.	217
Грицук А. Н.	118, 120, 121
Гришина И.А.	103, 104
Громов А.И.	112, 122
Грунин А.В.	94
Грушин Ф.С.	121
Губкин М.К.	53, 55, 56, 60
Губский К.Л.	84, 94
Гужев Д.И.	42, 217, 221
Гуреев В.М.	57
Гусаков Е.З.	89
Гусев В.К.	51, 52, 63, 64, 71, 80, 95
Гусейн-заде Н.Г.	37, 189, 192
Гуськов С.Ю.	32, 126
Гуторов К.М.	163, 164, 197, 209
Гуцевич Е.И.	69

Д

Давыденко В.И.	101
Давыдов А.М.	199, 200
Данилов А.В.	61
Данько С.А.	173
Двинин С.А.	186-188
Дедов А.В.	53, 55, 56
Дейчули П.П.	100, 101
Демченко Н.Н.	109
Джигайло Н.Т.	62, 106
Джурик А.С.	62, 87, 106
Диас Михайлова Д.Е.	195
Длугач Е.Д.	65
Днестровский А.Ю.	61
Днестровский Ю.Н.	61
Докука В.Н.	216
Долгова К.В.	64
Дорофеюк А.А.	191
Драбинский М.А.	68, 69, 74

Дроздовский А.А.	117
Дудник Ю.Д.	136
Дудникова Г.И.	67

Е

Ежова З.В.	217
Елисеев Л.Г.	61, 69, 73, 74
Елисеев С.И.	138, 139, 151
Ермаков Н.В.	63
Ефимов Н.Е.	84, 93
Ефремов Н.М.	123, 124

Ж

Жарков М.Ю.	106
Жильцов Н.С.	51, 63, 64, 71, 80, 95
Житлухин А.М.	75, 214
Жуков В.И.	162
Журавлев М.К.	42. 217, 221

З

Задириев И.И.	187
Заклецкий З.А.	189, 201
Захаренков А.В.	53, 55, 56, 60
Звонарева А.А.	42, 217, 220, 221
Земцов И.А.	68
Зецер Ю.И.	140
Змиевская Г.И.	182
Змитренко Н.В.	111
Золотухина Н.А.	211
Зорин А.В.	106

И

Иваненко О.М.	113
Иванов А.А.	100, 101, 213
Иванов А.И.	212
Иванов Б.В.	97, 102
Иванов В.А.	29, 191
Иванов И.А.	81, 86, 88
Иванов И.Е.	193, 195
Иванов И.Э.	178
Иванов Р.С.	85
Иванова И.П.	167
Иванцивский М.В.	208, 210, 211
Изарова А.Д.	94
Изотов А.М.	176
Изотов И.В.	144 – 146, 149
Ильичева М.В.	123
Ильясова М.В.	51, 52, 63
Инжеваткина А.А.	79, 86, 88
Иосилевский И.Л.	36, 152
Исаев М.Ю.	48
Исакова А.С.	94
Исмагилов О.Р.	214

К

Кавыршин Д.И.	53, 60, 155, 156, 168, 185
Казаков Е.Д.	169-171
Казиев А.В.	94
Калинин П.В.	183
Каменцев Е.К.	49, 174
Камолова Т.И.	191
Канцырев А.В.	117
Карелов С.В.	207, 212
Карпов А.В.	53, 55, 56. 60, 155, 156, 185
Карташева А.А.	164, 197. 209
Карфидов Д.М.	162
Касьянова Н.В.	70
Качмар В.В.	189, 192
Кашапов Л.Н.	137
Кашапов Н.Ф.	137
Кваснов В.С.	53, 56, 185
Ким Д.А.	121
Кириенко И.Д.	210
Кирий Н.П.	161
Киселев Е.О.	51, 63, 64, 71, 80, 95
Киселёва Е.М.	146, 149
Князев А.В.	189, 190, 202, 203
Коваленко Д.В.	197, 209, 214
Коваль А.Н.	63
Козак А.К.	189
Козинцева М.В.	49
Козлов П.В.	172
Койдан В.С.	57
Колесников Д.С.	117
Колесниченко К.С.	85
Колик Л.В.	189, 200
Колмогоров В.В.	100
Колодко Д.В.	94
Комаров Г.Л.	118

Комов А.Т.	53, 55, 56, 60
Константинов В.М.	211
Кончеков Е.М.	189
Коныжев М.Е.	191
Коньков А.А.	53, 55, 56, 60, 185
Корешева Е.Р.	113
Корнеева М.А.	186
Коробейникова О.А.	59, 85
Косарев И.Б.	140
Коссый И.А.	198
Костюшин В.А.	75
Кочетов И.В.	177
Кочнев Д.М.	207, 212
Кошелев Е.Л.	113
Кравцов Д.Э.	211
Кравчук С.И.	106
Кралькина Е.А.	177, 178, 187
Красильников А.В.	40
Крат С.А.	84, 94
Крашевская Г.В.	135
Крохалев О.Д.	69, 74
Крутиков Д.И.	169-171
Крылов М.К.	123, 124
Кувшинов И.Р.	112
Кудряшов С.И.	35
Кузнецов А.П.	84, 117
Кузнецов А.Ю.	180
Кузнецов В.Е.	136
Кузнецов С.В.	198
Куйбеда Р.П.	117
Куклин К.Н.	81, 183
Кукушкин А.Б.	76, 77, 78, 82
Куличенко А.А.	76
Курскиев Г.С.	51, 52, 63, 64, 71, 80, 95
Курячий А.В.	106
Кутеев Б.В.	41, 65, 97, 98
Кутузов Д.С.	147, 154
Кучугов П.А.	126

Л

Лазарев В.Б.	62, 87, 106
Лазарева С.Г.	42
Лапин Р.Л.	146
Ларионов А.С.	42, 217, 220
Ларичкин М.В.	79, 86
Лаухин Я.Н.	123, 124
Лашкул С.И.	89
Лебедев Ю.А.	135, 148
Летунов А.А.	189, 190, 202, 203
Лешов Н.В.	87, 106, 128
Лиджигоряев С.Д.	75, 214
Лизунов А.А.	54
Лобес Л.	220
Листопад А.А.	211
Ловцов А.С.	157
Логвиненко В.П.	189, 190, 202, 203
Лоза О.Т.	196
Ломаев М.И.	31
Ломов К.А.	79, 86
Лопес-Бруна Д.	61
Лосева Т.В.	140
Лотоцкий А.П.	123, 124
Лубенченко А.В.	53, 55, 60
Лукашевский М.В.	53, 55, 56, 185
Лукин В.В.	124
Луцик И.О.	91
Лыкова Ю.А.	81
Лысенко С.Е.	61, 69
Люблинский И.Е.	106
Ляо Ю.	178
Ляхов А.Н.	140

М

Майстренко Д.А.	157
Макаров М.А.	183
Малахов Д.В.	189, 192, 201
Малькин А.Г.	110
Малютин А.Ю.	163, 164
Малютин И.С.	176
Мамонтова Т.В.	143
Манаенкова Ю.А.	211
Мартыненко Ю.В.	53, 55, 56, 60, 181, 214
Мартынова И.А.	152
Марченков А.Ю.	55, 56
Матюшин А.А.	91
Меклер К.И.	81
Мельник А.Д.	218

Мельников А.В.	61, 68, 69, 73, 74, 94
Мельников А.Д.	150
Мельников Н.А.	81
Мещеряков А.И.	94, 103, 104
Милицина А.А.	180
Минаев В.Б.	51, 52, 63, 64, 71, 80, 95
Минашин П.В.	82
Мингалеев А.Р.	119
Мирнов С.В.	62, 87, 106, 128
Миронов А.Ю.	42, 217, 221
Миронов Е.А.	144, 145
Миронов М.И.	218
Миронова Е.Ю.	42, 217, 220, 221
Мирошников И.В.	51, 63, 71
Мисакян М.А.	198
Митрофанов К.Н.	120, 121
Михайловская Т.О.	176
Михайлюк А.В.	135
Мицен К.В.	113
Модестов В.С.	210
Модестов Д.Г.	91
Мозговой А.Г.	116
Молчанов П.А.	64
Морозов В.А.	106
Моряков И.В.	198
Мошкина К.Г.	189
Муравьев С.В.	57
Муравьева Е.В.	155, 156
Мурахтин С.В.	83, 85
Мурачев М.М.	106
Мурсенкова И.В.	179, 180
Мухамадиев А.И.	176
Мухин Е.Е.	63, 219
Мязин А.С.	155, 156

Н

Наволоцкий А.С.	218
Нагель М.Ю.	181
Нагорный Н.В.	42, 217, 220, 221
Неверов В.С.	77
Недбайлов К.О.	58
Немцев Г.Е.	210
Несеневич В.Г.	218
Нестеренко В.М.	221
Неудачин С.В.	92
Никитенко А.И.	113
Никишин А.В.	81
Николаев А.И.	42, 217, 221
Николашин А.А.	123, 124
Никонов А.М.	187
Новицкий А.А.	153
Новоселова З.И.	207, 212, 214
Новохацкий А.Н.	63
Норов С.А.	69
Нургалиев М.Р.	48

О

Образцова Е.А.	189
Обрезков О.И.	181
Овсиенко А.И.	208
Олейник Г.М.	120, 121
	33, 94
Орлов М.Ю.	169-171

П

Павленко М.И.	169, 170
Палашов О.В.	144, 145
Панасенков А.А.	98
Панин С.Е.	209
Панфилов Д.Г.	123, 124
Панфилов Д.С.	68
Пастор И.	61
Пастухов А.В.	112, 122
Патров М.И.	51, 52, 63, 95
Пашарина О.Ю.	110
Перваков К.С.	112
Перевозчикова П.А.	94
Петраков М.В.	209
Петров А.В.	71, 80, 95
Петров А.Е.	189, 201
Петров М.П.	218
Петров С.Я.	218
Петров Ю.В.	51, 52, 63, 64, 71, 80, 95
Петрова Н.П.	106
Петухов Д.И.	198
Пикуз С.А.	75, 119
Пименов И.С.	96

Пинженин Е.И.	59
Пискарев И.М.	167
Подковыров В.Л.	163, 164, 197, 209, 214
Подоляко Ф.С.	94
Пожилов А.А.	210
Позняк И.М.	207, 212, 214
Поклад Ю.В.	140
Полищук В.П.	150
Полозков С.Д.	91
Полосаткин С.В.	81, 208
Пономарев А.В.	43
Пономаренко А.М.	71, 80, 95
Попов С.С.	183
Портоне С.С.	42, 217, 220, 221
Поступаев В.В.	81, 86
Потапов А.	220
Приходько В.В.	50, 83, 91
Пришвицын А.С.	62, 84, 87, 94
Прокофьева Т.Ю.	69
Пушина А.В.	75

Р

Раваев А.А.	196
Разумова К.А.	70
Ригин А.В.	142
Ровенских А.Ф.	81, 183
Рогозин К.А.	53, 55, 56, 60
Рогозин К.А.	185
Родионов Н.Б.	121
Родионова В.П.	121
Рожанский В.А.	64
Рой И.Н.	68
Романова В.М.	119
Рудской И.В.	117
Рупасов А.А.	118
Рыжанков И.С.	211
Рязанцев С.Н.	75

С

Савельев В.В.	47, 49, 174
Савин С.М.	117
Савкин В.Я.	83, 85
Садовничий Д.Н.	170
Самохвалов А.А.	151
Самцов Д.А.	183
Сандалов Е.С.	183
Сандомирский А.В.	54
Санин А.Л.	213
Саранча Г.А.	69, 73
Сасоров П.В.	121
Сафронов А.А.	136
Сафронов В.М.	207, 212
Сахаров Н.В.	51, 52, 63, 64, 71, 80, 95
Сдвиженский П.А.	77
Селезнев П.А.	210, 211
Семенов А.М.	208
Семенов Е.В.	57, 217
Семенов И.Б.	42, 217, 220
Семенов О.И.	42, 217, 220
Сергеечев А.А.	209
Сергушичев К.А.	151
Серемин В.В.	211
Серяков А.Г.	123, 124
Сидоров Е.Н.	81
Синельников Д.Н.	93
Синицкий С.Л.	183
Сироткин Н.А.	133
Скалыга В.А.	144 – 146, 149
Скворцова Н.Н.	189, 192, 201
Скляров В.Ф.	81
Скобелев И.Ю.	75
Сковородин Д.И.	81
Скопинцев Д.А.	216
Скрекель О.М.	51, 52, 63
Слива А.П.	56
Смирнов А.А.	151
Смирнов А.Б.	210
Смирнов Д.И.	177, 178, 187
Смирнов Д.В.	48
Смирнова А.Р.	169 – 171
Соколов А.С.	189
Солдаткина Е.И.	59
Солихов Д.К.	188
Соловьев А.А.	67
Соломянная А.Д.	121
Солоха В.В.	71
Сорокин А.А.	192
Сорокин А.В.	101

Сорокин Д.А.	31
Сорокин И.А.	94
Сорокина Н.В.	211
Сороковых Д.Е.	176
Сотников О.З.	213
Спицын А.В.	171, 184
Степанов В.Д.	183
Степанов Д.	220
Степанов И.Г.	178
Степанов Н.О.	184
Степанов С.Ю.	99
Степахин В.Д.	189, 192
Стрелков П.С.	195
Стрижаков М.Г.	169 – 171
Строкин Н.А.	142
Ступин А.Н.	142
Ступишин Н.В.	100, 101
Субботин Г.Ф.	68
Судников А.В.	79, 86, 88
Сулимин Ю.Н.	123, 124
Суляев Ю.С.	208, 211
Сунчугашев К.А.	169, 171
Сухов А.Е.	147, 154
Сушков А.В.	68
Сычугов Д.Ю.	61

Т

Тактакишвили И.М.	198
Тарасенко В.Ф.	31
Таскаев А.С.	210, 211
Татаринов А.В.	148
Таюрский А.А.	141
Тельнова А.Ю.	51, 52, 63, 64
Теплова Н.В.	89
Тер-Оганесьян А.Е.	119
Тиликин И.Н.	119
Тимашева Т.П.	113
Тимофеев И.В.	59
Тимохин В.М.	64
Титов А.Ю.	148
Титов В.А.	133
Ткаченко Е.Е.	63, 71
Токарев В.А.	64
Толкачёв М.С.	79, 86
Толоконников С.М.	122
Толстяков С.Ю.	51, 52, 63, 71
Топорков Д.А.	75, 207, 212
Трошин Г.А.	89
Тюхменева Е.А.	51, 52, 63, 64, 71

У

Уланов П.Ю.	180
Уласевич Д.Л.	94
Ульянов Д.К.	43
Унежев В.Н.	57
Урюпин С.А.	143
Усманов Р.А.	150
Устюжанин В.О.	79, 86, 88

Ф

Федин П.А.	117
Федорович С.Д.	53, 55, 56, 60, 155, 156, 185
Федулаев Е.Д.	207, 212, 214
Франк А.Г.	160, 161
Фролов А.Ю.	115, 125
Фролов И.Н.	118, 121

Х

Хабанов Ф.О.	61, 69, 73, 74
Хавин В.Э.	89
Хайрутдинов Р.Р.	215, 216
Ханаева Р.А.	215
Харчев Н.К.	69, 73, 189
Хилькевич Е.М.	51, 52, 63
Хилько М.В.	118
Химченко Л.Н.	40
Хлюстова А.В.	133
Хобилов Д.У.	188
Хольнов Ю.В.	105
Хрипунов Б.И.	57
Христо М.С.	90
Хромов Н.А.	64
Хромов С.А.	173
Хурчиев А.О	117
Хуснутдинов Р.И.	77, 78

Ц

Цветков А.А.	57
Цветков А.Ю.	113
Цыбенко В.Ю.	207, 214

Ч

Чан К.В.	155, 156, 185

Чан Куанг В.	53, 55, 56, 60
Чебакова В.Ю.	137
Чекушин Р.В.	106
Черкасов С.В.	61
Черкез Д.И.	184
Черников В.А.	176
Черноштанов И.С.	50, 66, 67, 79
Чернышев Ф.В.	218
Чиннов В.Ф.	155, 156

Ш

Шабунин Е.В.	211
Шавелкина М.Б.	168
Шагайда А.А.	157
Шарафеева С.Р.	211
Шашков А.С.	158, 159
Шваров А.П.	176
Шевелев А.Е.	51, 52, 63
Шелегеда И.А.	69
Шелковенко Т.А.	119
Шереметьев К.Ю.	170
Ширяев В.Н.	136
Шишилов О.Н.	189, 192
Шиянков С.В.	210. 211
Шленский М.Н.	41
Шмаков В.М.	91
Шмигельский Е.А.	50
Шошин А.А.	208, 210, 211
Шпатаковская Г.В.	132
Штелинг В.С.	55, 56
Шуровский Д.О.	147, 154

Щ

Щеголев П.Б.	51, 52, 63, 64, 80
Щербак А.Н.	62, 128

Э

Эпштейн И.Л.	148

Ю

Юхимчук А.А.	97

Я

Яковлев Д.В.	50, 59
Янченков С.В.	154
Ярошевская А.Д.	163, 164, 209
Яхин Р.А.	126
Яшин А.Ю.	71, 80, 85

ООО «Издательство МБА»
Москва, ул. Рождественка,
д.12/1, стр.1, оф. 8-11.
Тел.:(495)726 31 69
e-mail: izmba@yandex.ru

Составитель и заказчик
АО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН
Подписано в печать 03.02.2022
Печать офсетная.
Бумага офсетная 65г/м^2
Тираж 500 экз.
Заказ № 101