

РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР С ВЫСОКОЙ СКОРОСТЬЮ СЧЕТА КВАНТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИКИ СПЕКТРОВ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ФТ-2^{*)}

Кантор М.Ю., Буц М.К., Алтухов А.Б., Баранов Ю.Ф., Есипов Л.А., Куприенко Д.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия m.kantor@mail.ioffe.ru

На токамаке ФТ-2 разработан рентгеновский спектрометр, обеспечивающий высокую скорость счета квантов при высоком энергетическом разрешении для измерения динамики спектров тормозного излучения в плазме. Спектрометр создан на основе модуля XR100-SDD с кремниевым дрейфовым детектором FASTSDD апертурой 70 мм² и модулем управления и обработки импульсов РХ-5 компании АМРТЕК. Скорость счета спектрометра при разрешении <200 эВ ограничена ~105 1/сек, что требует для измерения спектров сотни мс. Для применения спектрометра на малых токамаках с короткой длительностью разряда необходимо повысить скорость счета фотонов на порядок.

Для решения этой задачи используется новый подход к счету фотонов и измерению их энергий, основанный на цифровой фильтрации импульсов отклика детектора в правильную гауссовую форму [1] вместо традиционной трапецеидальной [2]. Гауссовая фильтрация сохраняет симметричную форму выходного импульса при уменьшении его ширины до времени нарастания отклика детектора. Это существенно сокращает мертвое время разрешения двух наложенных импульсов и увеличивает точность определения их амплитуд, что обеспечивает большую скорость счета квантов при высоком разрешении спектрометра [3].

Новый подход реализован на базе модуля XR100-SDD. Ступенчатый выходной сигнал модуля преобразовывался малошумящим усилителем [4] в импульсные сигналы с фронтом нарастания 45 нс [5], что вдвое короче, чем в аналогичном усилителе модуля РХ-5. Преобразованные сигналы записывались АЦП с частотой оцифровки 250 МГц и разрешением 14 бит. Спектрометр был установлен на юстируемом столе для сканирования плазмы в полоидальном сечении от разряда к разряду. Входной поток излучения регулировался диафрагмами и фильтрами, установленными на оси наблюдения спектрометра.

Модернизированный спектрометр обеспечил измерения спектров тормозного излучения плазмы с разрешением лучше 150 эВ при скорости счета квантов до $5 \cdot 10^6$ 1/сек. Высокое разрешение выявило особенности кремниевого детектора при регистрации фотонов низких энергий. Для корректного измерения спектров в этой области проведена спектральная калибровка спектрометра по линиям флуоресценции легких элементов и определена эффективность детектирования фотонов в этой области по тормозному излучению плазмы.

Спектры тормозного излучения, измеренные в режимах омического нагрева, сравниваются с модельными, вычисленными с использованием релятивистского дифференциального сечения тормозного излучения [6] и двумерного распределения электронов в плазме. Распределения электронов найдены по численному решению уравнения Фоккер-Планка в плазме с продольным электрическим полем и НГ волнами [7].

Рентгеновские измерения поддержаны ФТИ им. А.Ф. Иоффе Госконтракт FFUG-2022-0001. Анализ данных поддержан ФТИ им.А.Ф. Иоффе Госконтракт FFUG-2024-0028.

Литература

- [1]. Kantor M.Yu., Sidorov A.V. JINST (2019) 14, P01004, . 10.1088/1748-0221/14/01/P01004
- [2]. Jordanov V.T., Knoll G.F. et al. Nuclear Instr. and Methods in Phys Res A (1994) 353, 261
- [3]. Kantor M.Yu., Sidorov A.V. JINST (2020) 15, P06015. 10.1088/1748-0221/15/06/P06015
- [4]. Tuboltsev Yu.V. et al. St. Petersburg Polytec. Univ. Jour. Phys and Math (2023) 16, 438
- [5]. Kantor M.Yu. et al. St. Petersburg Polytec. Univ. Jour. Phys and Math (2023) 16, 484
- [6]. Koch H.W. and Motz J.W. Review of Modern Phys (1959) 31, 4, 920
- [7]. Shoucril M., Peysson Y., Shkarofsky I. EUR-CEA-FC-1737 (2006)

^{*)} DOI – тезисы на английском