Нелинейное взаимодействие СВЧ излучения с потоком плазмы в условиях верхнего гибридного резонанса

Абрамов И.С., Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

Резонансный разряд, поддерживаемый мощным СВЧ излучением в открытой магнитной ловушке, имеет широкий спектр приложений: от генерации ионов высокой кратности для современных ускорителей до разработки источника экстремального ультрафиолетового излучения для проекционной литографии высокого разрешения [1–5]. Для исследования разрядов данного типа требуется теоретическое описание неоднородного потока неравновесной плазмы многозарядных ионов, распространяющегося вдоль оси магнитной ловушки. Соответствующая теория была развита авторами в работах [6, 7], где представлена модель, позволяющая произвести анализ газодинамических характеристик потока многозарядной плазмы переменного сечения в условиях, когда температура электронов существенно превосходит температуру ионов, и вычислить потери энергии в результате многократной ионизации и возбуждения ионов электронным ударом. Однако в результате резонансного усиления поддерживающего плазму высокочастотного поля существенное влияние на параметры потока может оказывать усредненная пондеромоторная сила, действующая со стороны этого поля на электроны плазмы. В свою очередь, локальное электрическое поле внутри потока само зависит от параметров плазмы. Данный эффект взаимного влияния поля и потока не рассмотрен в [6, 7], но представляется существенным для приложений.

В настоящей работе предпринята попытка теоретического описания нелинейного взаимодействия стационарного квазиодномерного течения плазмы, каналируемой внешним магнитным полем, и высокочастотного электрического поля. В рамках предложенной модели определены условия резонанса плазменного образования и поля (представляющего собой модификацию верхнего гибридного резонанса холодной плазмы), произведена классификация стационарных течений плазмы, установлены характерные зависимости поглощаемой плазмой мощности в нелинейном режиме.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-02-00173 и № 18-32-00419). И. С. Абрамов благодарит за персональную поддержку Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС»   
(проект № 18-1-5-12-1).

Литература

1. Vodopyanov A. V. et al. Multiple ionization of metal ions by ECR heating of electrons in vacuum arc plasmas // Rev. Scientific Instruments. – 2004. – V. 75. – No. 5. – P. 1888.
2. Vodopyanov A. V. et al. Extreme-ultraviolet source based on the electron-cyclotron-resonance discharge //JETP letters. – 2008. – V. 88. – №. 2. – С. 95.
3. Chkhalo N. I. et al. Source for extreme ultraviolet lithography based on plasma sustained by millimeter-wave gyrotron radiation //Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. – 2012. – V. 11. – No. 2. – P. 021123.
4. Skalyga V. et al. High current proton beams production at Simple Mirror Ion Source 37 // Rev. Scientific Instruments. – 2014. – V. 85. – P. 02A702.
5. Abramov I. S. et al. Prospects of extreme ultraviolet radiation sources based on microwave discharge for high-resolution lithography // Physics of Plasmas. – 2017. – V. 24, P. 073511.
6. Абрамов И. С. и др. О формировании многозарядной плазмы в направленном потоке газа // Известия ВУЗов: Радиофизика. – 2015. – Т. 58. – № 12. – C. 1022.
7. Шалашов А. Г. и др. Теория стационарного СВЧ разряда с многозарядными ионами в расширяющейся струе газа // ЖЭТФ. – 2016. – Т. 150. – В. 2(8). – С. 254.