

04;09;12

Параметры плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда в открытой магнитной ловушке в квазигазодинамическом режиме удержания

© А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, В.Г. Зорин,
С.В. Разин, М.А. Шилов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Поступило в Редакцию 25 марта 1999 г.

Экспериментально исследовалось тормозное рентгеновское излучение в диапазоне 2–10 keV импульсного разряда в условиях электронно-циклотронного резонанса в прямой магнитной ловушке с накачкой пучком мощного миллиметрового излучения. По спектру и интенсивности рентгеновского излучения определены температура и концентрация плазмы. Полученные данные свидетельствуют о реализации квазигазодинамического режима удержания плазмы.

В настоящее время большое внимание привлекает к себе СВЧ разряд в тяжелых газах в открытых магнитных ловушках в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). Такой разряд широко используется в источниках многозарядных ионов (МЗИ) для циклотронных ускорителей [1]. Рассматривается также возможность использования ЭЦР разряда в качестве источника мягкого некогерентного рентгеновского излучения [2–4] для литографии высокого разрешения. Перспективы повышения эффективности работы таких источников, т. е. повышение зарядности ионов, увеличение тока ионных пучков и интенсивности мягкого рентгеновского излучения связаны с использованием более высокочастотного и более мощного излучения гиротронов. Дело в том, что при повышении частоты излучения можно надеяться на существенное увеличение плотности плазмы, в результате чего не только возрастет ток ионов, но и реализуется так называемый квазигазодинамический режим удержания неравновесной (температура электронов много больше температуры ионов) плазмы [5,6]. Плотность плазмы, при

которой происходит смена механизма удержания, может быть оценена из равенства времен жизни при классическом удержании $\tau_c \approx \nu^{-1}$ (здесь ν — частота столкновений электронов с ионами) [7] и газодинамическом $\tau_g \approx kL/(V_s)^{-1}$ (здесь k — пробочное отношение ловушки, L — ее длина, V_s — ионно-звуковая скорость) [8]. В квазигазодинамическом режиме удержания время жизни плазмы в ловушке слабо зависит от ее концентрации и, следовательно, при увеличении плотности плазмы улучшаются условия для образования МЗИ (растет параметр $N\tau$, где N — концентрация электронов, τ — время жизни плазмы). Естественно, что при увеличении плотности плазмы необходимо поддерживать температуру электронов на достаточно высоком уровне, оптимальном для многократной ионизации (~ 1000 eV). Именно с реализацией такого режима авторы [6] связывают существенное смещение распределения ионов по зарядам в сторону больших кратностей ионизации (средний заряд ионов аргона в [6] составлял 11–12, в то время как в традиционных источниках, использующих существенно меньшую частоту СВЧ излучения, средний заряд ионов аргона не превышал 8). В связи с этим весьма актуальным является измерение плотности плазмы и температуры электронов в ЭЦР разряде. В данной работе эти параметры определялись на основе измерений абсолютной интенсивности тормозного рентгеновского излучения.

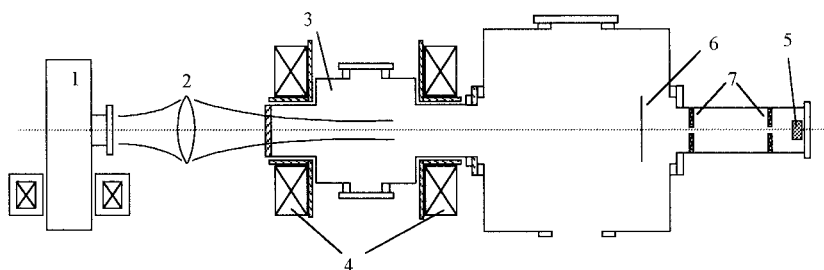


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — гиротрон ($f = 37.5$ GHz, $T = 1$ ms, $P = 130$ kW), 2 — фокусирующая диэлектрическая линза, 3 — вакуумная камера, 4 — соленоиды прямой магнитной ловушки, 5 — рентгеновский анализатор XR-100T, 6 — алюминиевый фильтр (толщина $15 \mu\text{m}$), 7 — свинцовый коллиматор.

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. СВЧ излучение линейной поляризации направлялось в разрядную камеру с характерным поперечным размером 14 см, помещенную в прямую магнитную ловушку. Длительность импульса магнитного поля ~ 13 ms, длина ловушки 25 см, пробочное отношение 3.5, максимальное значение напряженности магнитного поля в пробке 2.3 Т. Рабочий газ — аргон, давление $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ Торг. Исследования рентгеновского излучения разряда проводились в диапазоне 2–10 keV с помощью анализатора XR-100T на основе охлаждаемого pin-диода. Прибор работает в режиме счета фотонов, максимальный темп обработки информации — 10^4 квантов в секунду. Спектральное разрешение 250 eV. Дiode располагался на оси ловушки на расстоянии 130 см от центра разряда. Необходимое ослабление потока рентгеновского излучения

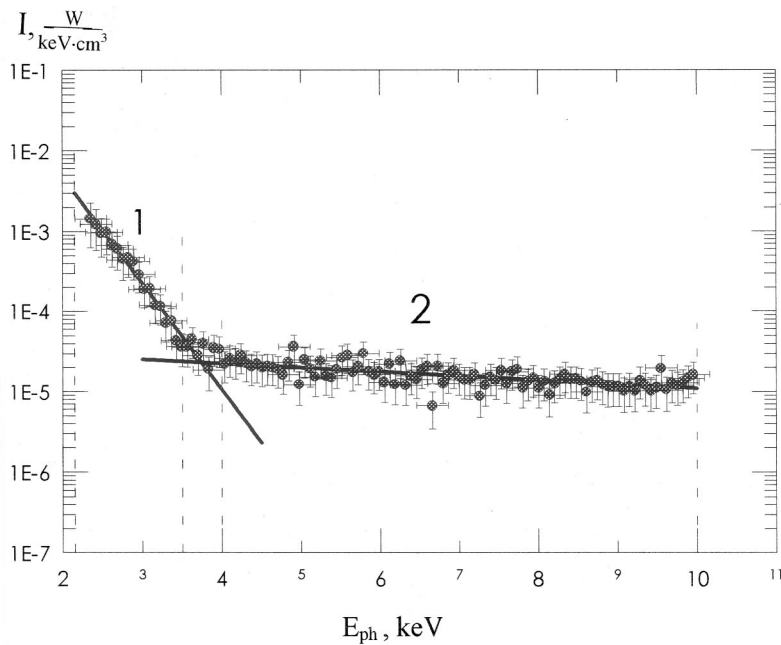


Рис. 2. Спектральная интенсивность рентгеновского излучения плазмы.

осуществлялось с помощью свободно висящего алюминиевого фильтра и коллиматора.

На рис. 2 приведен спектр излучения плазмы, полученный в результате накопления информации от 250 реализаций разряда. При обработке измерений учитывались: зависимость эффективности регистрации квантов от их энергии, коэффициенты пропускания алюминиевого фильтра и входного бериллиевого окна анализатора. Зависимость интенсивности излучения от энергии кванта в полулогарифмическом масштабе достаточно хорошо аппроксимируется двумя прямыми. Оценки показывают, что такой спектр соответствует тормозному излучению плазмы с двухтемпературным распределением электронов по энергиям. Из полученного спектра видно, что первая группа электронов имеет температуру 300–400 eV, а вторая 7–10 KeV. Измеренные абсолютные значения интенсивности рентгеновского излучения позволяют определить также и концентрации этих двух групп электронов. Для этого необходимо знать эффективный заряд ионов, хотя плотность плазмы слабо (как корень квадратный) зависит от его величины. На основании результатов работы [6] в условиях описываемых экспериментов величина эффективного заряда иона принята 6. В результате концентрация низкотемпературной группы электронов составила порядка 10^{14} cm^{-3} и высокотемпературной — порядка 10^{10} cm^{-3} .

Измеренные параметры свидетельствуют о реализации в условиях экспериментов квазигазодинамического режима удержания плазмы, так как при достигнутых в эксперименте плотности плазмы и температуре электронов выполняется неравенство $\tau_g > \tau_c$.

Авторы выражают благодарность проф. С. Мияке и Н. Абе (Университет г. Осака, Япония) за сотрудничество в проведении экспериментов и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Geller R., Jacquot B., Sortais P. // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 1986. V. A243. P. 244–154.
- [2] Arata Y., Myake S., Kishimoto H., Abe N., Kawai Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. 27. N 7. P. 1281–1286.
- [3] Arata Y., Myake S., Kishimoto H. // Jap. J. Appl. Phys. 1989. V. 28. N 7. P. 234–239.

- [4] Голубев С.В., Зорин В.Г., Платонов Ю.Я., Разин С.В. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 20. В. 4. С. 7–11.
- [5] Golubev S.V., Zorin V.G., Zorina T.N., Razin S.V. // Proc. Int. Workshop on "Strong Microwaves in Plasmas". N. Novgorod. 1991. V. 1. P. 485–489.
- [6] Голубев С.В., Зорин В.Г., Разин С.В. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 8. С. 60–64.
- [7] Pastukhov V.P. // Nuclear Fusion. 1974. V. 14. P. 3.
- [8] Rutov D.D. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1986. V. 28. P. 191.