

02;04;09;10;12

Распределение ионов по зарядовым состояниям в мощном импульсном разряде, поддерживаемом излучением миллиметрового диапазона длин волн в условиях электронно-циклотронного резонанса

© С.В. Голубев, В.Г. Зорин, С.В. Разин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Поступило в Редакцию 28 октября 1996 г.

В работе измерено распределение ионов по зарядовым состояниям в мощном импульсном электронно-циклотронном разряде в аргоне, поддерживаемом излучением миллиметрового диапазона длин волн. Обнаружено, что максимум распределения существенно смещен в сторону больших зарядностей по сравнению с распределениями в традиционных источниках многозарядных ионов непрерывного действия с накачкой излучением сантиметрового диапазона. Такое смещение максимума распределения связано, по-видимому, с тем, что при использовании более мощного и более коротковолнового излучения гиротрона удалось реализовать так называемый квазигазодинамический режим удержания плазмы в магнитной ловушке, при котором с увеличением плотности плазмы увеличивается параметр удержания $N\tau$, определяющий распределение ионов по зарядам.

Наиболее перспективными источниками многозарядных ионов представляются в настоящее время источники, использующие плазму СВЧ разряда, поддерживаемого в открытой магнитной ловушке в условиях электронно-циклотронного резонанса. Такие источники предназначены в первую очередь для инъекции ионов в циклотронные ускорители, эффективность работы которых во многом определяется эффективностью работы источника ионов [1].¹

¹ Наряду с этим электронно-циклотронный резонансный разряд рассматривается как возможный источник мягкого некогерентного рентгеновского излучения [2-4].

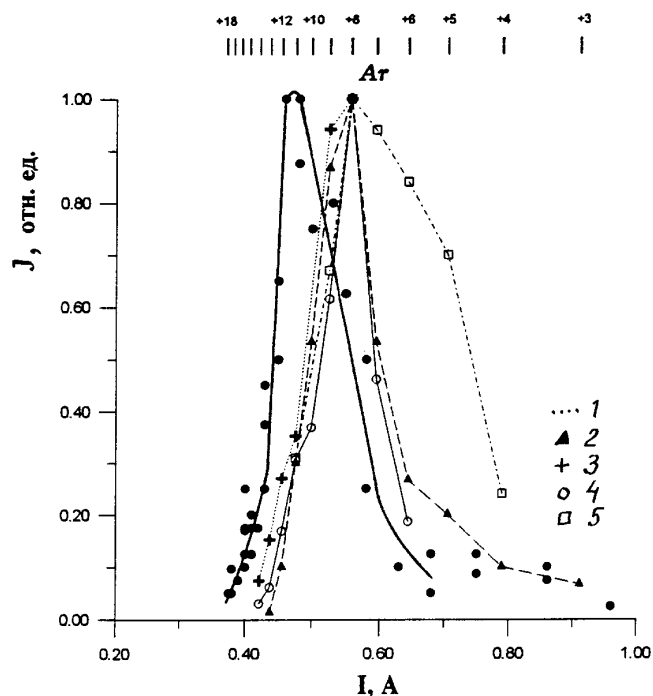


Рис. 1. Зависимость сигнала с анализатора ионов от тока анализирующего магнита. В верхней части рисунка рисками показаны токи магнита, соответствующие ионам аргона с различным зарядом (1 — результаты нашего эксперимента, 2 — данные [5], 3 — [8], 4 — [9], 5 — [10]).

В свою очередь существенное повышение эффективности работы таких источников, т.е. повышение зарядности и интенсивности ионных пучков, возможно при увеличении частоты СВЧ накачки. Это направление исследований получило развитие после опубликования серии экспериментальных работ (см., например, [5]), в которых было продемонстрировано существенное увеличение выхода многозарядных ионов при изменении частоты накачки от 10 до 18 ГГц — ток ионов со средним по распределению зарядом увеличивался пропорционально квадрату частоты накачки (f^2). В то же время распределение ионов по зарядам практически не изменялось (рис. 1). В рамках элемен-

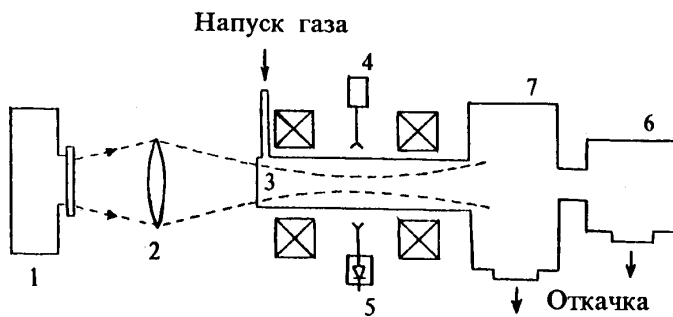


Рис. 2. Схема эксперимента.

тарных представлений это можно объяснить следующим образом. При увеличении частоты СВЧ накачки возрастает плотность плазмы N , при этом пропорционально N растут и потери плазмы за счет кулоновских столкновений (время жизни плазмы в ловушке $\tau \sim 1/N$). В этом случае, при оптимальной энергии электронов, распределение ионов по зарядам, определяемое параметром удержания $N\tau$, не изменяется, а ток многозарядных ионов, определяемый параметром N/τ , будет пропорционален f^2 , если $N \sim f$. В связи с вышесказанным понятен интерес к исследованиям электронно-циклотронного резонансного разряда, поддерживаемого излучением с большой частотой, поскольку соответственно должен возрасти ток многозарядных ионов. Более того, использование миллиметрового излучения современных гиротронов позволяет надеяться на такое увеличение плотности плазмы, которое приводит к изменению характера удержания плазмы в ловушке, — реализуется так называемый квазигазодинамический режим удержания плазмы [6], когда время жизни плазмы слабо зависит от ее плотности.² При реализации такого режима не только увеличится интенсивность пучков многозарядных ионов, но, и это главное, увеличится параметр $N\tau$, что должно существенно сместить распределение ионов по зарядам в

² Время жизни в квазигазодинамическом режиме удержания плотной плазмы с замагниченными бесстолкновительными электронами и холодными ионами в случае, когда основным каналом потерь электронов является их рассеяние в конус потерь при взаимодействии с резонансной СВЧ накачкой, определяется, согласно [7], соотношением $\tau \sim LK/V$, где L — характерный размер ловушки, V — скорость ионного звука, K — коэффициент, слабо зависящий от плотности плазмы.

область больших кратностей ионизации. В настоящей работе приводятся первые экспериментальные данные о распределении ионов по зарядовым состояниям в мощном импульсном электронно-циклотронном резонансном разряде, поддерживаемом коротковолновым излучением гиротрона. Схема эксперимента приведена на рис. 2. СВЧ излучение импульсного гиротрона (1) с частотой 37.5 ГГц, длительностью импульса 1 мс, мощностью 130 кВт фокусировалось диэлектрической линзой (2) внутрь разрядной вакуумной камеры (3). Поляризация волны — линейная. Разрядная камера с входным окном диаметром 70 мм помещалась в прямую магнитную ловушку, создаваемую двумя соленоидами (длительность импульса магнитного поля ≈ 13 мс). Длина ловушки 25 см, пробочное отношение 3.2. Максимальное значение напряженности магнитного поля в пробке 2.3 Тл. Для оценки плотности плазмы в разряде проводились измерения коэффициента прохождения диагностической СВЧ волны через плазму (4, 5). Диагностическое СВЧ излучение на частоте 35.52 ГГц с поляризацией, соответствующей обыкновенной волне, вводилось перпендикулярно магнитному полю в центре ловушки. Ионы, вылетающие из плазмы вдоль магнитного поля, исследовались с помощью двухступенчатого (магнитный и электростатический анализ) анализатора ионов (6), позволяющего независимо измерять энергию ионов и отношение их заряда к массе с разрешением $\frac{q}{m} \left[\Delta \left(\frac{q}{m} \right) \right]^{-1} = 3$. Калибровка анализатора (тока анализирующего магнита) проводилась по ионам водорода. Анализатор был присоединен к разрядной камере через соединительную секцию (7). Рабочее давление газа (аргона) устанавливалось с помощью импульсного натекателя и изменялось от 10^{-3} до 10^{-5} Тор, причем напуск газа осуществлялся в разрядную камеру (рис. 2), а в анализаторе и соединительной секции поддерживалось низкое давление $\sim 10^{-6}$ Тор. Отличительной особенностью данных экспериментов является то, что исследования эффективности генерации многозарядных ионов проводились при достаточно больших (на порядок больше, чем в традиционных электронно-циклотронных резонансных источниках многозарядных ионов) плотностях плазмы. В экспериментах наблюдалась полная экранировка диагностического и мощного СВЧ излучения разрядом, что свидетельствует об образовании в наших условиях плазмы с концентрацией больше $4 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$.

Эффективность генерации многозарядных ионов и их энергия существенно зависела от давления газа и мощности СВЧ излучения. При оптимальном давлении газа ($\sim 10^{-4}$ Тор) энергия вылетевших из плаз-

мы ионов аргона лежала в пределах от 100 эВ до 10 кэВ. Распределение ионов по зарядам слабо зависело от энергии ионов. Зависимость сигнала с анализатора ионов от тока анализирующего магнита, характеризующая распределение ионов по зарядам, для энергии ионов 900 эВ представлена на рис. 1. Там же, для сравнения, представлены распределения ионов по зарядам, полученные в традиционных электронно-циклотронных резонансных источниках многозарядных ионов непрерывного действия с накачкой излучением сантиметрового диапазона длин волн (от 6 до 18 ГГц) [5,8–10]. Из рисунка видно, что полученное в наших экспериментах распределение смещено в сторону больших кратностей ионизации (максимум распределения соответствует заряду ионов 11–12, в то время как в традиционных источниках — 8).

Таким образом, можно предположить, что при использовании более мощного и более коротковолнового излучения гиротрона удалось реализовать квазигазодинамический режим удержания плазмы, что обеспечило увеличение параметра $N\tau$ и соответственное смещение распределения ионов по зарядам в сторону большей кратности ионизации.

Список литературы

- [1] *Geller R.* // Colloque de Physique. Supplement au Journal de Physique. 1989. V. 50. С. 1. P. C1-887–C1-892.
- [2] *Booske J.H., Aldabe F.A., Ellis R.F., Getty W.D.* // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 3. P. 1055–1067.
- [3] *Arata Y., Miyake S., Kishimoto H., Abe N., Kawai Y.* // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 7. P. 1281–1286.
- [4] *Голубев С.В., Зорин В.Г., Платонов Ю.Я., Разин С.В.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 4. С. 7–11.
- [5] *Geller R., Jacquot B., Sortais P.* // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 1986. V. A243. P. 244–254.
- [6] *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.
- [7] *Golubev S.V., Semenov V.E., Suvorov E.V., Tokman M.D.* // Proc. Int. Workshop on "Strong Microwaves in Plasmas". N. Novgorod, 1994. V. 1. P. 347–375.
- [8] *Beuscher H.* // Review of Scientific Instruments. 1990. V. 61. N 1. P. 262–264.
- [9] *Antaya T.A., Gammino S.* // Proc. Int. Workshop on "Strong Microwaves in Plasmas". N. Novgorod, 1994. V. 1. P. 399–413.
- [10] *Гульбекян Г.Г., Колесов И.В., Бехтерев В.В. и др.* // Краткие сообщения ОИЯИ. 1995. № 4 (72)-95. С. 63–74.