

02;03;04;12

Электронно-циклотронный резонансный разряд в тяжелых газах, поддерживаемый мощным микроволновым пучком в магнитной ловушке, как источник мягкого рентгеновского излучения

© А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, В.Г. Зорин, А.Ю. Крячко,
А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, С.В. Разин, А.Н. Смирнов

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород
E-mail: avod@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 4 июля 2000 г.

С помощью монохроматора на основе многослойного рентгеновского зеркала исследовалось линейчатое мягкое рентгеновское излучение импульсного электронно-циклотронного резонансного разряда в аргоне, поддерживаемого мощным пучком миллиметровых волн в прямой магнитной ловушке. Получен рентгеновский спектр в интервале 6–17 nm, определена абсолютная спектральная интенсивность излучения в указанном диапазоне. Показано, что такой разряд является эффективным источником мягкого рентгеновского излучения с к.п.д. преобразования микроволновой мощности в рентген на уровне 10% и с максимумом спектральной мощности 7.3 kW/nm на длине волны 9 nm.

Одним из перспективных источников мягкого ($\lambda \approx 1 - 20$ nm) рентгеновского излучения (МРИ) является неравновесный разряд в тяжелых (Ar, Kr и др.) газах, поддерживаемый в магнитных ловушках в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) мощной СВЧ волной [1–4]. Генерация МРИ в таком источнике происходит следующим образом: в разряде в существенно неравновесных условиях ($T_e \gg T_i$, где T_e и T_i — температура электронов и ионов соответственно) образуется заметное количество многозарядных ионов (МЗИ) различной кратности ионизации [5,6], возбуждение которых электронным ударом с последующим спонтанным высвечиванием обеспечивает образование линейчатого излучения в области мягкого рентгена. Интенсивность такого излучения пропорциональна произведению концентраций электронов

и многозарядных ионов $I \propto N_e \cdot N_i$, т.е. пропорциональна плотности плазмы в квадрате N_e^2 (в условиях квазинейтральности $N_i \approx N_e/\bar{z}$, где \bar{z} — средний заряд ионов плазмы). Особенно привлекательным в этой связи представляется использование мощного миллиметрового излучения современных гиротронов [7,8], позволяющее существенно увеличить плотность плазмы (до $N_e \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ [9]) и поддерживать оптимальную для образования и возбуждения МЗИ температуру электронов ($T_e \sim 1 \text{ keV}$).

Уже первые экспериментальные исследования ЭЦР разряда с накачкой миллиметровым излучением гиротронов [3,4] подтвердили высокую эффективность генерации линейчатого МРИ: к.п.д. преобразования СВЧ излучения в рентген (длина волны порядка 10 nm) достигал 25%. Однако эти измерения носили предварительный характер, поскольку проводились без достаточного спектрального разрешения. Длина волны рентгеновского излучения в работах [3,4] оценивалась на основании анализа сигналов с калиброванных в абсолютных единицах рентгеновских датчиков ($p-i-n$ диодов СППД-11-04) при использовании сменных фильтров на пропускание из различных материалов. Такой анализ позволил лишь приблизительно определить спектральный диапазон рентгеновского излучения: 4.5–12 nm. Эффективность преобразования СВЧ излучения в рентген оценивалась в предположении, что в указанном диапазоне интенсивность рентгеновского излучения и спектральная чувствительность датчиков постоянны. Для более точного определения эффективности генерации мягкого рентгеновского излучения необходимо более детальное исследование его спектра. С этой целью в настоящей работе проведены измерения спектра линейчатого МРИ с использованием рентгеновского монохроматора на основе многослойного рентгеновского зеркала.

Эксперименты проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1. В качестве источника СВЧ накачки использовался гиротрон (1) с частотой 37.5 GHz длительностью импульса 1 ms и максимальной СВЧ мощностью 130 kW. Излучение гиротрона линейной поляризации фокусировалось диэлектрической линзой (2) внутрь разрядной вакуумной камеры (3), при этом интенсивность СВЧ волны в фокальной плоскости составляла не менее 10 kW/cm^2 . Рабочий газ (аргон) подавался в камеру через импульсный клапан (4). Вакуумная камера помещалась в прямую осесимметричную магнитную ловушку, создаваемую двумя последовательно соединенными одинаковыми со-

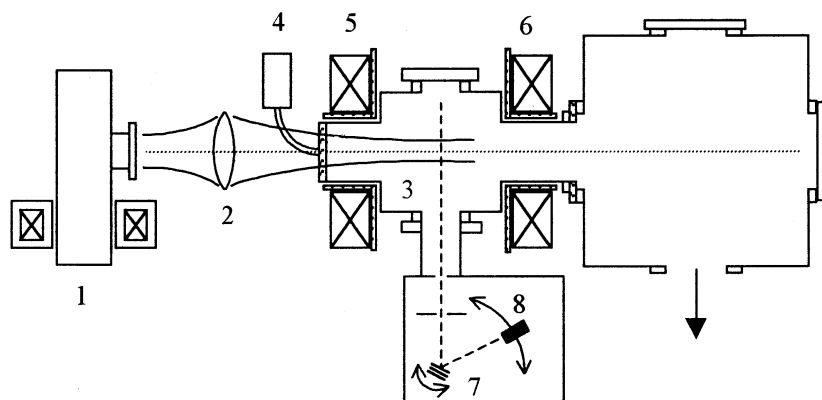


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

леноидами (5, 6). Длительность импульса магнитного поля ловушки составляла 13 ms. Максимальное значение напряженности магнитного поля в пробках достигало 2.5 Т, длина магнитной ловушки составляла 25 см, пробочное отношение равнялось 3.4.

Измерение интенсивности линейчатого МРИ проводилось с помощью монохроматора, диспергирующим элементом в котором служило многослойное рентгеновское зеркало (7), а детектором рентгена являлся абсолютно калиброванный $p-i-n$ диод СППД-11-04 (8), на входное окно которого для защиты от видимого и УФ-излучения был напылен слой алюминия. Зеркало и детектор устанавливались в $\varphi-2\varphi$ рентгеновском гониометре. Такие приборы при умеренной спектральной селективности обладают достаточно высокой чувствительностью. В наших экспериментах использовались рентгеновские зеркала на основе структур молибден-карбид бора Mo-B₄C (рабочий диапазон 6.5–13 nm) и молибден-кремний Mo-Si (рабочий диапазон 12.6–20 nm). Коэффициенты отражения зеркал в зависимости от диапазона длин волн достигали 0.1–0.4 [10]. Ширина аппаратной функции в зависимости от длины волны изменялась приблизительно от 1 до 2 nm.

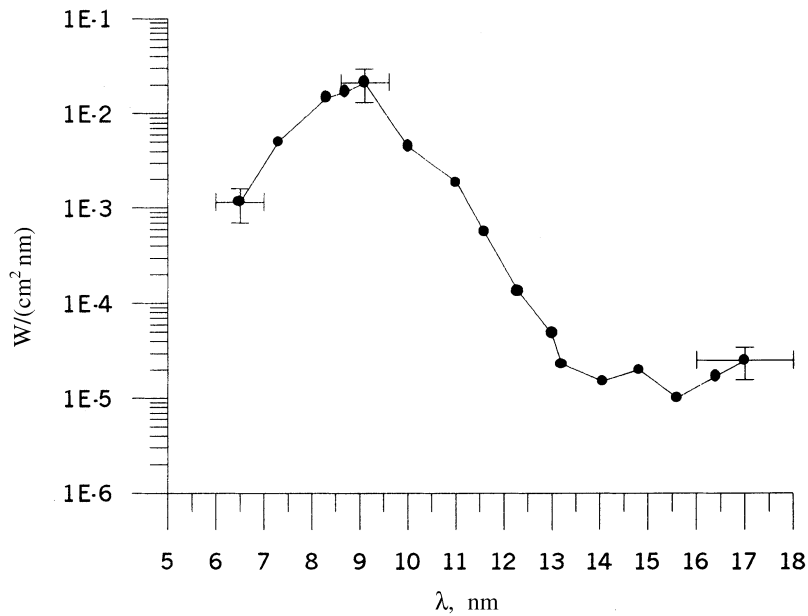


Рис. 2. Зависимость абсолютной спектральной интенсивности линейчатого рентгеновского излучения от длины волны в точке расположения $p-i-n$ диода (36 см от центра разряда). Излучение принималось от $\approx 1/20$ -й части полного объема плазмы.

Результаты измерений в виде зависимости интенсивности линейчатого МРИ от длины волны представлены на рис. 2. Эти данные были получены с учетом спектральных зависимостей чувствительности $p-i-n$ диода, коэффициента отражения многослойного рентгеновского зеркала и ширины аппаратной функции монохроматора при максимальной мощности СВЧ излучения 130 kW и оптимальном давлении аргона $p \approx 2 \cdot 10^{-4}$ Torr. Необходимо отметить, что в экспериментах спектральное разрешение было невелико и не позволяло выделять отдельные линии излучения многозарядных ионов. Тем не менее проведенные измерения дают возможность со значительно большей, чем в [3,4], точностью оценить полную мощность рентгеновского

излучения ЭЦР разряда. В условиях экспериментов размер области плазмы: из которой принималось излучение (~ 7 см), был существенно меньше расстояния от плазмы до детектора (36 см), поэтому для оценки мощности линейчатого МРИ разряд аппроксимировался точечным источником рентгена, расположенным в центре магнитной ловушки. В предположении изотропного распределения рентгеновского излучения мощность линейчатого МРИ, генерируемая ЭЦР разрядом, оценивается на уровне 16 кВт. Отсюда видно, что эффективность преобразования мощности СВЧ пучка в мягкий рентген составляет $16/130 \text{ kW} \approx 0.12$.

Таким образом, результаты настоящей работы подтверждают выводы, сделанные в [3,4], о том, что основная часть мягкого рентгеновского излучения ЭЦР разряда, поддерживаемого мощным микроволновым пучком в магнитной ловушке в тяжелых газах, приходится на диапазон длин волн в области $\lambda \sim 10 \text{ nm}$ и такой разряд является эффективным источником мягкого линейчатого рентгеновского излучения с к.п.д. преобразования СВЧ мощности в рентген на уровне 10%.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 00-02-16480 и № 98-02-16621.

Список литературы

- [1] *Booske J.H., Aldabe F.A., Ellis R.F., Getty W.D.* // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 3. P. 1055–1067.
- [2] *Arata Y., Miyake S., Kishimoto H., Abe N., Kawai Y.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 7. P. 1281–1286.
- [3] *Голубев С.В., Зорин В.Г., Платонов Ю.Я., Разин С.В.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 4. С. 7–11.
- [4] *Golubev S.V., Platonov Yu.Ya., Rasin S.V., Sorin V.G.* // J. X-ray Sci. and Technol. 1996. V. 6. P. 244–248.
- [5] *Geller R.* // Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR plasmas. Institute of Physics. Bristol. 1996. 435 p.
- [6] *Golubev S.V., Rasin S.V., Vodopyanov A.V., Zorin V.G.* // Transactions of Fusion Technology. 1999. V. 35. N 1T. P. 288–291.
- [7] *Goldenberg A.L., Litvak A.G.* // Physics of plasmas. 1995. V. 2. N 6. Pt. 2. P. 2562–2572.
- [8] *Thumm M.* // Applied Surface Science. 1997. V. 111. P. 106–120.

- [9] *Водопьянов А.В., Голубев С.В., Зорин В.Г., Разин С.В., Шилов М.А.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 14. С. 90–94.
- [10] *Andreev S.S., Gaponov S.V., Salashchenko N.N., Shamov E.A., Shmaenok L.A., Bobashev S.V., Simanovskii D.M., Ragozin E.N.* // Proceedings of SPIE. 1998. V. 3406. P. 45–69.