

02;04;09;12

©1994

## МЯГКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЦР РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО ПУЧКОМ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

*С.В.Голубев, В.Г.Зорин,  
Ю.Я.Платонов, С.В.Разин*

1. В последнее время заметно повысился интерес к исследованиям СВЧ разряда в магнитном поле в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). Это связано не только с традиционными исследованиями термоядерной направленности, но и с возможностью использования ЭЦР разряда в тяжелых газах в качестве источника многозарядных ионов (МЗИ). Такие источники предназначены в первую очередь для получения пучков МЗИ, которые используются для инъекции в циклотронные ускорители [1,2] и для получения уникальных полупроводниковых материалов [3]. ЭЦР разряда рассматривается также как возможный интенсивный источник мягкого некогерентного излучения [4].

Согласно современным представлениям, существенное повышение эффективности работы ЭЦР источников возможно при увеличении частоты СВЧ накачки и соответствующем увеличении плотности плазмы в разряде [5]. Особый интерес в этой связи вызывает разряд, поддерживаемый миллиметровым излучением современных гиротронов [6,7].

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований мощного импульсного ЭЦР разряда в пучке миллиметровых волн в простой магнитной ловушке, обсуждается генерация мягкого некогерентного рентгеновского излучения и эффективность образования МЗИ.

2. Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. СВЧ излучение импульсного гиротрона 1 (длительность импульса  $\tau = 1$  мс, мощность  $S = 130$  кВт, частота  $f = 37.5$  ГГц, поляризация волны — линейная) фокусировалось диэлектрической линзой 2 внутрь стеклянной вакуумной камеры 3. Площадь СВЧ пучка в фокальной области  $\sim 10$  см<sup>2</sup>. Вакуумная камера помещалась в магнитное поле пробочной конфигурации, создаваемое с помощью двух импульсных соленоидов ( $\tau_{и} = 9$  мс) 4, расстояние между пробками 20 см, пробочное отношение 3. Входное кварцевое окно вакуумной камеры диаметром 70 мм по-

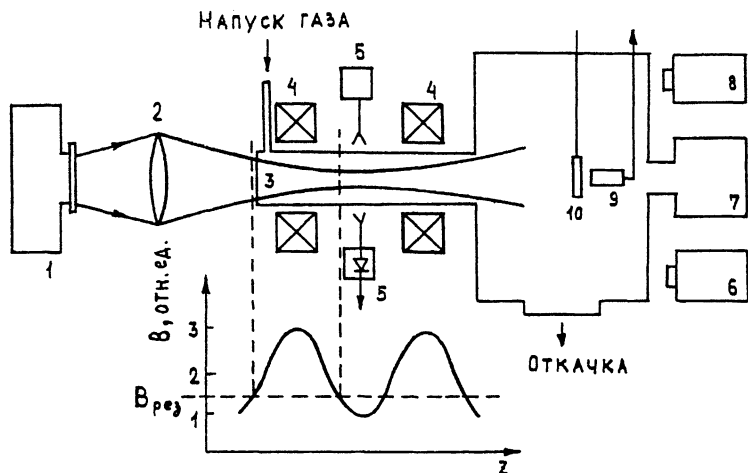


Рис. 1. Схема эксперимента.

мещалось вне ловушки на расстоянии  $\approx 2.5$  см от магнитной пробки. Рабочее давление газа  $P$  (воздух или кислород) в камере изменялось от  $10^{-6}$  до  $10^{-2}$  Тор. Контроль плотности плазмы в разряде осуществлялся по отсечке диагностической СВЧ волны с частотой 35.52 ГГц с поляризацией, соответствующей обыкновенной волне, которая вводилась в разряд перпендикулярно магнитному полю в центре ловушки 5. Регистрация спектра излучения разряда в видимой области и в области вакуумного ультрафиолета проводилась с помощью спектрографа СТЭ-1 6 и вакуумного спектрографа ТМС-1 7. Отдельные линии изучения изучались с помощью монохроматора МДР-6 8 и ФЭУ-84 с временным разрешением 10 мкс. Исследование мягкого рентгеновского излучения ЭЦР разряда осуществлялось с помощью полупроводниковых датчиков СППД 11-04 9 с алюминиевым (СППД-Al) и серебряным (СППД-Ag) защитными входными окнами толщиной соответственно 0.09 и 0.1 мкм и сменных фильтров 10. В качестве сменных фильтров на пропускание использовались свободно висящие пленки из алюминия толщиной 0.8 мкм, лавсана толщиной 1 мкм и пластинка из кварца толщиной 1 мм. Датчики располагались на оси разряда на расстоянии 55 см от его центра. Временное разрешение используемой схемы измерений  $\approx 10$  мкс.

3. В условиях наших экспериментов ЭЦР разряд возник при превышении давления газа в камере пороговой величины  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  Тор [8]. При этом наблюдались отсечка диагностического СВЧ сигнала и полная экранировка плазмой излучения гиротрона, что свидетельствует о достижении в разряде значительной плотности плазмы, превыша-

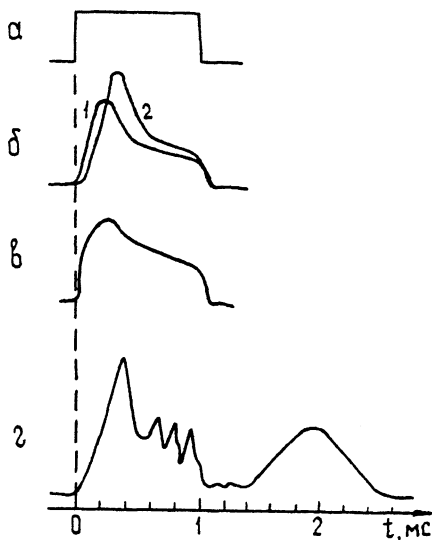


Рис. 2. Осциллограммы сигналов.

*a* — СВЧ импульс; *б* — излучение ионов на длинах волн: 1 —  $O^+$ , 3749.5Å, 2 —  $O^{2+}$ , 3754.7Å; *в* — интегральное излучение плазмы в видимой области; *г* — рентгеновское излучение.

ющей критическое значение  $N_e > 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . В спектре излучения разряда были идентифицированы линии излучения ионов  $O^+$ ,  $O^{2+}$ . Интенсивность излучения в ВУФ области спектра растет с уменьшением длины волны излучения вплоть до границы измерений ВУФ спектрографа (500Å). Характерные осциллограммы различных сигналов приведены на рис. 2. Максимальная интенсивность излучения  $O^{2+}$  и максимальный сигнал с обоих рентгеновских датчиков наблюдались при следующих оптимальных условиях:  $P \approx (3-6) \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$ ,  $S \approx 130 \text{ кВт}$  и магнитном поле в пробке ловушки  $H \approx 2.3 \text{ Т}$ . Сигналы с обоих датчиков уменьшались примерно в 10–12 раз, если перед ними помещался двойной фильтр, состоящий из лавсановой и алюминиевой пленок, кварцевый фильтр уменьшал сигналы с обоих датчиков до нуля. Сигнал СППД-Ag уменьшался фильтром из лавсана в 3–4 раза, фильтром из Al в 7–10 раз.

Использование сменных фильтров и датчиков с различными входными окнами и различной спектральной чувствительностью позволило грубо определить спектральный состав рентгеновского излучения. Анализ показывает, что основной вклад в сигналы с датчиков дает излучение с длиной волны в области  $\sim 100\text{Å}$ . Сигналы с датчиков при наличии двойных фильтров и сигнал с СППД-Ag с фильтром из

Al обусловлены более коротковолновым излучением с большим коэффициентом прохождения через фильтры и входные окна датчиков, т.е. излучением с длиной волны  $< 10\text{Å}$ . Сравнительно слабое уменьшение сигнала СППД-Ag при использовании лавсанового фильтра обусловлено частичной его прозрачностью в полосе 45–120Å.

По измеренному току датчиков (максимальный ток датчиков  $(3-7) \cdot 10^{-4}$  А) с учетом их спектральной чувствительности (например, чувствительность СППД-Ag на длине волны  $\sim 100\text{Å}$  не выше  $6.4 \cdot 10^{-4}$  А см<sup>2</sup>/Вт) можно определить плотность потока излучения  $J$  в месте расположения датчиков (55 см от центра разряда). В области длин волн  $\sim 100\text{Å}$   $J \approx 1$ , а в диапазоне короче  $10\text{Å}$   $J \approx 5 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Полная мощность мягкого рентгеновского излучения ЭЦР разряда  $W_p$  оценивалась при аппроксимации разряда точечным изотропным источником рентгена, расположенным в центре ловушки. В области  $\sim 100\text{Å}$   $W_p \approx 35$  кВт, а КПД преобразования СВЧ излучения в мягкое рентгеновское излучение превышает 25%.

4. Механизм генерации интенсивности рентгеновского излучения в ЭЦР разряде до конца не ясен, можно только предположить, что в существенно неравновесной плазме определяющую роль играет линейчатое излучение МЗИ  $W_{\text{л}}$ . Действительно, интенсивность тормозного и рекомбинационного излучения,  $W_{\text{непр}}$  сравнима с наблюдаемой только при  $N_e > 10^{15}$  см<sup>-3</sup> (в экспериментах  $N_e$  существенно меньше). Абсолютное значение  $W_{\text{л}}$  в ЭЦР разряде можно оценить, полагая, что излучается вся энергия, идущая на возбуждение МЗИ. В этом случае для условий эксперимента  $W_{\text{л}} \approx kEN_eN_iV \approx 10$  кВт (для оценок по порядку величины мы приняли, что суммарная константа возбуждения МЗИ  $k \sim 10^{-9}$  см<sup>3</sup>/с, энергия рентгеновского кванта  $E \approx 100$  эВ,  $N_e \approx 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> и  $N_i \approx 10^{13}$  см<sup>-3</sup> — плотность электронов и МЗИ соответственно,  $V \approx 1$  л — объем плазмы), что согласуется с полученными данными. Кроме того,  $W_{\text{л}}$  можно оценить на основании численных расчетов [4], в которых удельная мощность излучения ЭЦР разряда в Ag и Kг достигала  $\approx 10^{-3}$  Вт/см<sup>3</sup> при  $N_e$  почти в 100 раз меньше, чем в наших экспериментах. Если предположить, что кинетика возбуждения МЗИ в разных газах подобна и интенсивность излучения растет пропорционально квадрату плотности плазмы, то при объеме разряда 1 л  $W_{\text{л}} \approx 10$  кВт, что сравнимо с измеренным значением.

5. Таким образом, ЭЦР разряд в пучке мощного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона является весьма эффективным источником мягкого рентгеновского

излучения. Особенно перспективным представляется исследование ЭЦР разряда с накачкой СВЧ излучением субмиллиметрового диапазона длин волн. В настоящее время разработаны гиротроны с длиной волны излучения до 0.5 мм [9,10], применение которых может позволить получить ЭЦР разряд с поперечными размерами менее одного миллиметра, что существенно для использования такого источника в проекционной рентгеновской литографии.

### Список литературы

- [1] *Geller R.* // *J. Physique.* 1989. V. 50. N 1. P. C1-887-C1-892.
- [2] *Beuscher H.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1990. V. 61. N 1. P. 262-264.
- [3] *Howald A.M. et al.* // *Phys. Rev.* 1986. A33. P. 3779-3785.
- [4] *Booske J.H., Aldabe F.A., Ellis R.F., Getty W.D.* // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. N 3. P. 1055-1067.
- [5] *Geller R. et al.* // *Proc. Int. Conf. ECR Ion Sources and Their Application, MSUCP-47, National Superconducting Cyclotron Laboratory Lansing, MI, 1987. P. 1-6.*
- [6] *Arata Y., Miyake S., Kishimoto H., Abe N., Kawai Y.* // *Jap. J. Appl. Phys.* 1988. V. 27. N 7. P. 1281-1286.
- [7] *Быков Ю.В., Еремеев А.Г., Голубев С.В., Зорин В.Г.* // *Физика плазмы.* 1990. Т. 16. В. 4. С. 487-489.
- [8] *Golubev S.V., Zorin V.G., Plotnikov I.V., Razin S.V., Tokman M.D.* // *Proc. of Symposium'92 of Research Center for Ultra High Energy Density Heat Source. Osaka University, Japan, 1992. P. 17-22.*
- [9] *Лучинин А.Г., Малыгин О.В., Нусинович Г.С., Фикс А.Ш.* // *Письма в ЖТФ.* 1982. Т. 8. В. 18. С. 1147-1149.
- [10] *Flyagin V.A., Luchinin A.G.* // *Int. J. of Infrared and Millimeter Wave.* 1983. V. 4. N 4. P. 229-237.

Институт прикладной  
физики  
Нижний Новгород

Поступило в Редакцию  
21 ноября 1993 г.