

## Compact microwave plasma source CERA-RI

A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov  
People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

*The coaxial resonator and electromagnet with iron-cored of spatial profile configuration are used to form plasma flow. It has been found experimentally that total ion current could reach 20 mA under 20 W microwave power (2.45 GHz) and magnetic field level corresponded 60 % from ECR condition. We suppose that this type of a source can be used to create miniature microwave discharge ion thruster for small satellite propulsion system.*

УДК 533.9

## Характеристики рентгеновского излучения из ЭЦР-разряда в зеркальной магнитной ловушке

Д. М. Карфидов, К. Ф. Сергейчев  
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*Экспериментально исследована генерация рентгеновского излучения в ЭЦР-разряде низкого давления. Показано, что спектр рентгеновских квантов экспоненциально спадает с энергией и может быть охарактеризован эффективной температурой. Максимальная энергия квантов достигает 200 кэВ при СВЧ-мощности ~ 1 кВт.*

Эксперименты проводились на подробно описанной в [1] установке, представляющей собой зеркальную магнитную ловушку, создаваемую двумя симметричными магнитными катушками, между которыми установлена сферическая вакуумная камера размером 40 см в поперечнике, откачиваемая до остаточного давления  $10^{-6}$  Торр. Распределение напряженности магнитного поля внутри камеры имеет вид "седла": на оси катушек — это параболический профиль с пробочным отношением  $\sim 2,5$ , а в радиальном направлении — перевернутая парабола, спадающая в 1,5 раза на расстоянии 20 см от оси камеры.

Условия электронного циклотронного резонанса достигаются в области, где частота сверхвысокочастотного излучения совпадает с гирочастотой электронов  $\omega = eB/mc$ , где  $B$  — индукция магнитного поля,  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона,  $c$  — скорость света.

В качестве источника СВЧ-излучения использовали магнетрон Samsung OM75P(31), питаемый через однополупериодный выпрямитель от сети переменного тока с частотой 50 Гц. Частота излучения магнетрона 2,45 ГГц, средняя мощность 600 Вт при длительности импульса 8 мс, скважности 2,5 и максимальной импульсной мощности 1,5 кВт. СВЧ-мощность передавалась по волно-

водному тракту и вводилась в камеру с помощью рупорной антенны через кварцевое окно параллельно вектору магнитной индукции. Максимальная напряженность электрического поля бегущей волны в центре вакуумной камеры  $E_{\text{max}} < 40$  В/см. Величина резонансного магнитного поля для холодных электронов  $B_{cr} = 875$  Гс.

Описываемая серия экспериментов была проведена при фиксированной величине магнитного поля в центре камеры  $B_0 = 580$  Гс; при этом области резонанса находились на расстоянии  $\pm 13,4$  см от центра. Для измерения параметров рентгеновского излучения использовали детектор гамма-излучения Вусгон 2.5M2.5/3LP-X, представляющий собой кристалл NaI(Tl) диаметром 76 мм, смонтированный в одном корпусе с фотоумножителем и предварительным усилителем сигналов. Рабочий диапазон детектора 0,05—1 МэВ. Детектор был помещен на расстоянии 1,5 м от камеры в свинцовый цилиндрический экран с коллиматором, направленным перпендикулярно оси установки. Толщина стенки экрана и коллиматора 2 см, при этом поле зрения детектора перекрывало все пространство между катушками магнитного поля. Линейная зависимость амплитуды сигнала детектора от энергии поглощенных фотонов позволяла проводить амплитудный анализ энергии-

ческого спектра рентгеновского излучения с помощью многоканального анализатора "Аспект АЦП-1К-В2".

Для измерения распределения ускоренных электронов по скоростям использовали экранированный коллектор [2], расположенный напротив рентгеновского анализатора, представляющий собой цилиндр Фарадея диаметром 9 мм, ориентированный также поперек магнитного поля. На дне цилиндра помещали круглый коллектор, находящийся под положительным потенциалом для сбора электронов, который мог перемещаться вдоль оси цилиндра. При положении  $h$  коллектора относительно края цилиндра на него могут попадать только электроны с ларморовским радиусом, удовлетворяющим условию  $2\rho > h$ , и соответствующими скоростями  $v_e > h\omega_B/2$ . Плотность и температуру электронов плазмы измеряли одиночными ленгмюровскими зондами, а для измерения плотности плазменных электронов использовали еще и открытый СВЧ-резонатор с рабочей длиной волны 8 мм.

Эксперименты проходили при начальном давлении в камере  $p_0 = 2 \cdot 10^{-6}$  Торр и средней СВЧ-мощности 600 Вт. После пробоя происходил рост давления, обусловленный десорбцией газа со стенок, что вело к существенному росту давления за первые 10—12 импульсов до  $p \approx 10^{-5}$  Торр. Все измерения проводились при установившемся давлении.

Характерные осциллограммы генерации рентгеновского излучения приведены на рис. 1, *а* вместе с огибающей СВЧ-сигнала с детектора (см. рис. 1, *б*), расположенного в волноводе перед рупорной антенной и регистрирующего амплитуду стоячей волны, образующейся при интерференции падающей и отраженной от движущейся границы плазмы. Рентгеновское излучение имеет вид вспышек с характерной длительностью  $\tau \geq 10$  мкс, определяемой как инерцией сцинтиллятора, так и полосой усиления предусилителя рентгеновского детектора. Обращает на себя внимание, что генерация рентгеновского излучения происходит не только во время импульсов СВЧ-излучения, но и в промежутках между импульсами, хотя и с меньшей энергией.

На рис. 2, *а* приведен усредненный за 60 с (по 3000 импульсов) энергетический спектр рентгеновского излучения из разряда. Спектр экспоненциально спадает с ростом энергии, что позволяет характеризовать его эффективной температурой  $T_{eff}$ . На рис. 2, *б* для сравнения с рентгеновским спектром представлена функция распределения ускоренных в ЭЦР-разряде электронов, построенная по результатам измерений с помощью экранированного коллектора. Концентрация ускоренных электронов, по оценкам, составляет ~1 % от полной концентрации электронов плазмы. Спектр ус-

коренных электронов делят на две группы: относительно медленных электронов с характерной энергией ~10 кэВ и быстрых электронов с широким энергетическим распределением, простирающимся далее 100 кэВ. На примере тормозного рентгеновского спектра, приведенного на рис. 2, *а*, видно, что максимальная энергия ускоренных электронов должна достигать ~400 кэВ.

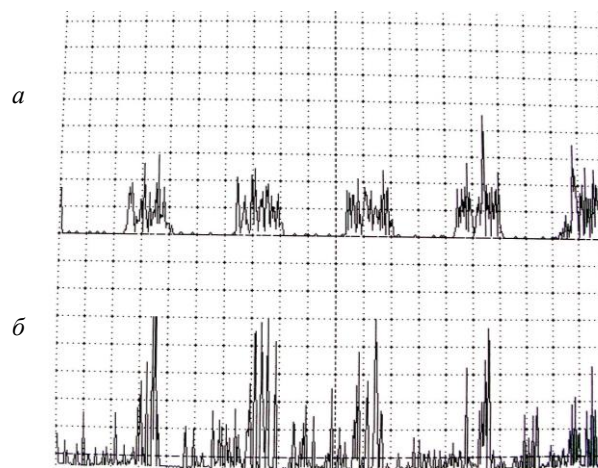


Рис. 1. Осциллограммы рентгеновского излучения (а) и СВЧ-сигнала из волновода (б)

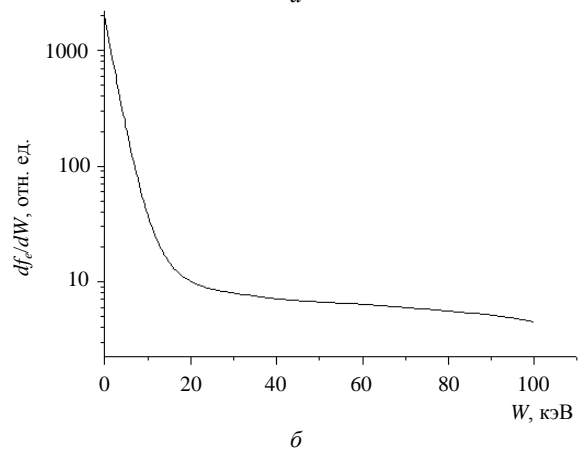
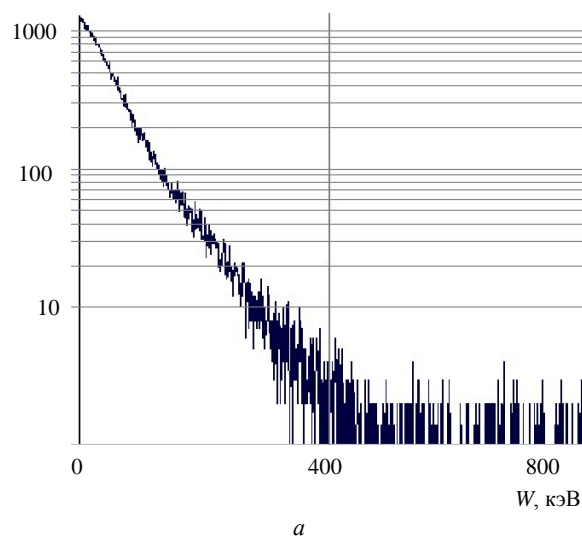


Рис. 2. Энергетический спектр рентгеновского излучения (а) и ускоренных электронов (б)

На рис. 3, *а* приведена зависимость интенсивности и эффективной температуры рентгеновского излучения от давления в камере. Величина давления, при которой интенсивность излучения достигает максимума, близка к давлению, соответствующему максимуму плотности плазмы (см. рис. 3, *б*). Интенсивность и энергия рентгеновского излучения спадают с ростом давления более медленно, чем температура электронов плазмы. Более того, спад плотности плазмы и спад интенсивности рентгеновского излучения имеют качественно разный характер из-за наличия “плато” на зависимости плотности от давления. Это позволяет предположить, что ускорение электронов до высоких энергий, ведущее к генерации рентгеновского излучения, и поддержание разряда с низкотемпературной плазмой имеют разные физические механизмы.

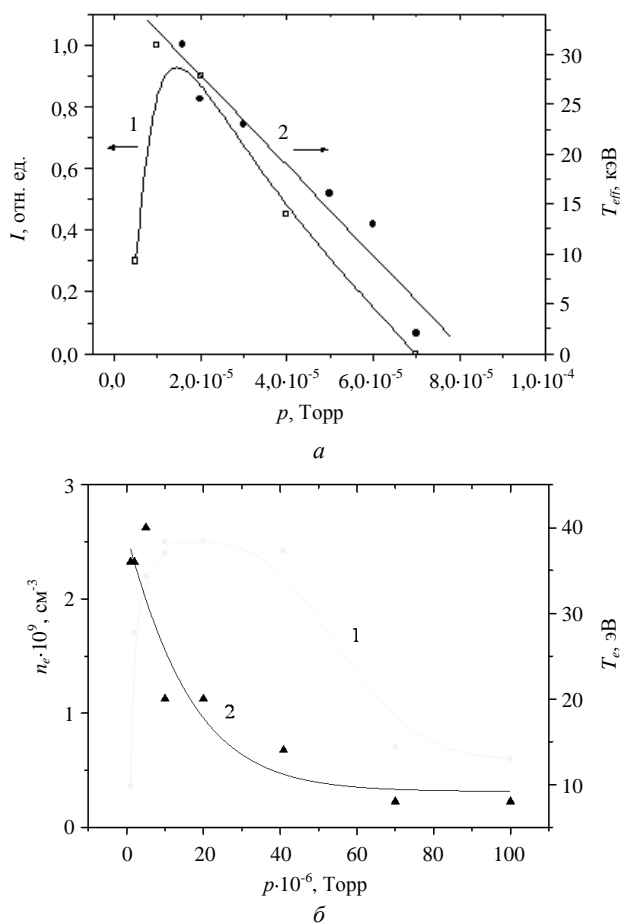


Рис. 3. Зависимость интенсивности и эффективной температуры рентгеновского излучения (*а*) и параметров плазмы (*б*) от давления:

*а*: 1 — интенсивность; 2 — эффективная температура;  
*б*: 1 — концентрация плазмы; 2 — температура электронов

Описанная выше генерация рентгеновского излучения происходит в результате столкновений энергичных электронов со стенками вакуумной камеры. При введении через сальник в боковом фланце камеры металлической мишени, представляющей собой трубку диаметром 6 мм из нержа-

вующей стали, и ее продвижении к центру ловушки по радиусу происходит рост эмиссии рентгеновского излучения с одновременным уменьшением энергии рентгеновских квантов. На рис. 4, *а* приведены зависимости интенсивности рентгеновского излучения и энергии рентгеновских квантов от положения мишени. При перемещении последней по направлению к центру камеры сначала наблюдался рост интенсивности излучения, которая достигала максимума на расстоянии 10 см от центра камеры и затем спадала до 0 в центре камеры. Энергия рентгеновских квантов при перемещении мишени монотонно спадала от максимального значения у боковой стенки до 0 в центре камеры.

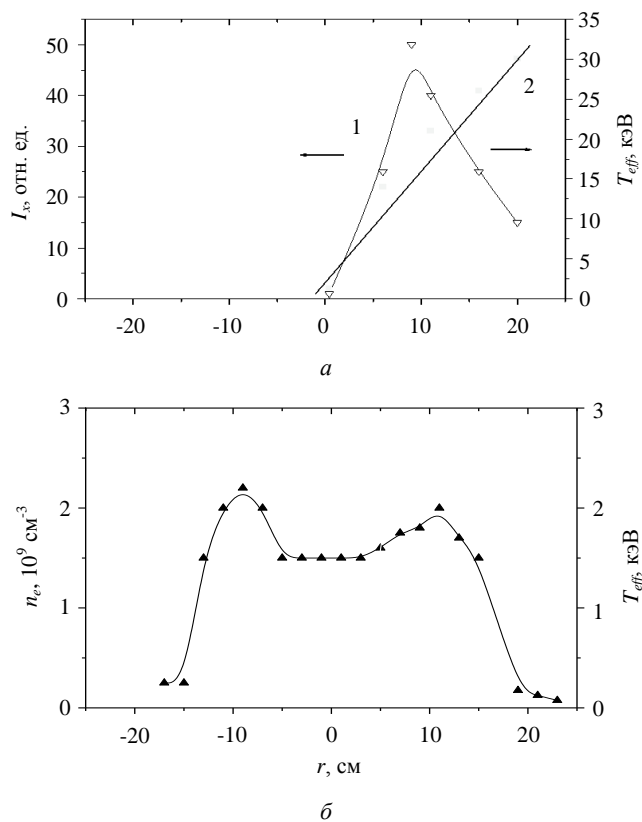


Рис. 4. Зависимость параметров рентгеновского излучения (*а*) и плотности плазмы (*б*) от положения мишени: *а*: 1 — интенсивность; 2 — эффективная температура

Приведенное на рис. 4, *б* радиальное распределение плотности плазмы имеет неглубокий провал на оси и два пика при  $r \approx 10$  см, положение которых совпадает с максимумами рентгеновского излучения. Симметрия распределения плотности плазмы показывает, что основная масса плазмы практически не реагирует на возмущения, вносимые зондом. В случае значительного влияния зонда симметрия профиля была бы нарушена. Подавление же генерации рентгеновского излучения является свидетельством роли магнитной ловушки в удержании ускоряемых электронов при их многократном прохождении объема ловушки между резонансными зонами.

Показано, что ЭЦР-разряд в зеркальной магнитной ловушке сопровождается генерацией рентгеновского излучения с энергией, достигающей нескольких сотен килоэлектронвольт. Эксперименты проводились в гелии, аргоне и воздухе, но заметного влияния рода газа на параметры рентгеновского излучения не зарегистрировано. Рост давления газа приводит к подавлению рентгеновской эмиссии. При введении в область разряда металлической мишени наблюдаются рост интенсивности и спад энергии рентгеновского излучения при введении мишени до центра камеры.

*Работа выполнена по проекту Президиума Российской академии наук по программе № 12 "Фундаментальные науки — медицине".*

#### Л и т е р а т у р а

1. Карфидов Д. М., Лукина Н. А., Сергейчев К. Ф. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 6. С. 505—525.
2. Dawson J. M., Kim H. C., Armush D. et al. // Phys. Rev. Letters. 1976. V. 37. P. 1547.

*Статья поступила в редакцию 27 августа 2007 г.*

## Characteristics of the X-ray emission from ECR discharge in the mirror magnetic trap

*D. M. Karfidov, K. F. Sergeichev*

A. M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

*X-rays generation in the low pressure ECR discharge has been studied experimentally. The X-rays quanta energy spectrum has been shown to fall down exponentially during energy growth and could be characterized with effective temperature. The maximum X-rays quanta energy reaches 200 keV under microwave power about 1000 Watts.*

УДК 533.9

## Определение физических характеристик приповерхностного электронного слоя в начальной стадии импульсного лазерного пробоя плотного инертного газа

*М. А. Яковлев, С. Ю. Ерохин*

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

*Представлены результаты численного моделирования пробоя плотного инертного газа электронами пограничного слоя при облучении металлической мишени мощными пикосекундными лазерными импульсами. Получено распределение температуры электронов внутри материала мишени. Создана более полная модель взаимодействия излучения с конденсированным веществом мишени, окруженной плотным газом. Определен температурный профиль (вид которого заметным образом влияет на процессы пробоя) электронной компоненты внутри конденсированного вещества с учетом нелинейного характера теплопроводности.*

Поглощение импульсного лазерного излучения приводит к нарушению термодинамического равновесия между электронным газом и решеткой вблизи поверхности металла и образованию приповерхностного электронного слоя (ПЭС) [1, 2].

Основной причиной формирования ПЭС при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на металлическую мишень является значительный отрыв ( $\approx 1$  эВ) температуры электронной компо-

ненты от температуры решетки. Это приводит к резкому увеличению термоэмиссионного тока и образованию вблизи поверхности достаточно протяженной области объемного отрицательного заряда.

Ранее был исследован процесс ионизации атомов газа, найдено распределение температуры и концентрации электронов в газе в процессе облучения мишени.