

# Scientific researches on physics of plasmas and controlled thermonuclear fusion in Russia in 2004

I. A. Grishina, V. A. Ivanov, L. M. Kovrizhnikh, M. L. Nagaeva  
A. M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian academy of sciences,  
Moscow, Russia

*In this paper the review of the scientific works and analysis of development of the basic directions of scientific researches presented in the reports of annual XXXII conference on physics of plasma and controlled thermonuclear fusion was done. This conference was held from February 14 till February 18, 2005 in Zvenigorod-town which is in Moscow region. In the conclusion of the paper the basic tendencies of development of physics of plasma in Russia are formulated.*

УДК 533.951

## Особенности формирования микроволновой плазмы в источнике CERA-R

В. В. Андреев, А. А. Балмашнов, А. В. Калашников, А. М. Умнов  
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

*Для формирования азимутально-симметричного веерообразного потока микроволновой плазмы используются коаксиальный резонатор и два дискообразных постоянных магнита. Экспериментально установлено, что концентрация частиц в создаваемой плазме может превышать критическое значение. Результаты вычислительного эксперимента находятся в соответствии с результатами реального эксперимента и указывают на возможность создания на основе разработанного источника плазмы генератора мягкого рентгеновского излучения.*

В настоящее время микроволновый разряд широко используется в различных технологических процессах. При этом расширение области его применения определяет неизменный интерес к процессам, протекающим в этом типе разряда, и устройствам, его реализующим [1, 2]. Многообразие технических решений, применяемых в этих устройствах, является следствием необходимости их использования для той или иной цели, в том или ином конкретном процессе. Среди этого многообразия особое место занимают источники плазмы, создание которой осуществляется в условиях какого-либо резонансного механизма взаимодействия, в частности электронного циклотронного резонанса. Резонансные механизмы взаимодействия определяют высокую энергетическую эффективность устройств, возможность управления энергетическим спектром заряженных частиц, а также возможность пространственной локализации параметров рабочей среды (плазмы, диссоциированных молекул и т. д.) в достаточно широком диапазоне давлений рабочего газа [3]. В таком типе источников часто используются полые резонаторы [4, 5], структура полей в которых и пространственное распределение величины стационарного

магнитного поля позволяют организовать резонансное взаимодействие в желаемой области разряда [6]. При этом, как правило, в этих источниках формируется аксиально-симметричный поток плазмы. Для создания азимутально-симметричного веерообразного потока плазмы в радиальном направлении авторами предлагается источник CERA-R.

Микроволновый источник плазмы CERA-R позволяет формировать в радиальном направлении веерообразный поток заряженных частиц, концентрация которых может достигать  $(1-2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  при электронной температуре  $T_e > 10 \text{ эВ}$ .

Схематически источник представлен на рис. 1.

Источник плазмы состоит из коаксиального резонатора и двух дискообразных постоянных магнитов, создающих в области формирования плазмы ( $r > 2 \text{ см}$ ) плавно спадающее в  $r$ -направлении азимутально-симметричное магнитное поле пробочной конфигурации. Геометрические размеры резонатора и параметры постоянных магнитов были выбраны таким образом, чтобы была обеспечена компактность источника в целом.

Для возбуждения резонатора использовался магнетронный генератор мощностью до  $P_{hf} = 250 \text{ Вт}$ ,

работающий в непрерывном режиме генерации микроволнового поля на частоте  $f = 2,45$  ГГц.

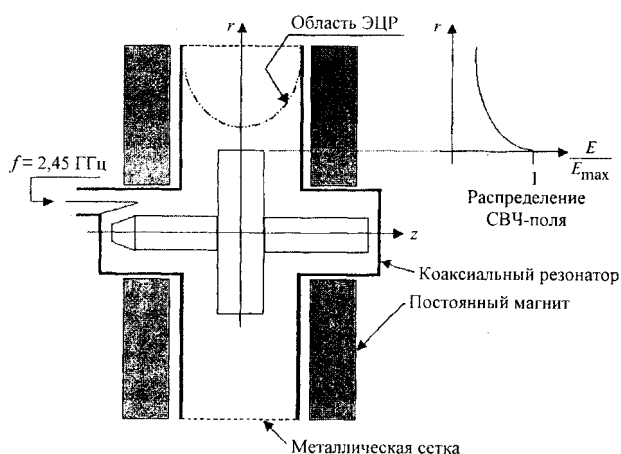


Рис. 1. Схема источника плазмы CERA-R

Давление рабочего газа (Ar) в режиме генерации плазмы составляло  $P = (1-8) \cdot 10^{-4}$  Торр.

Диагностика параметров плазменного потока осуществлялась электростатическим пятисеточным анализатором энергий заряженных частиц и одиночным электрическим зондом.

Было установлено:

- в диапазоне давления  $P = (5-8) \cdot 10^{-4}$  Торр при мощности, поступающей в резонатор  $P_{hf} = (100-130)$  Вт, плотность тока ионной компоненты плазмы ( $I_i$ ) на расстоянии 0,5 см от источника не превышает 3 мА/см<sup>2</sup>. При этом ее зависимость от вводимой в резонатор СВЧ-мощности, как предполагается, определяется не только увеличением темпа наработки частиц плазмы, но и изменением условий транспортировки частиц поперек силовых линий магнитного поля, а именно увеличением скорости градиентного дрейфа электронов ( $V_{gr}$ ), связанной с ростом температуры электронной компоненты плазмы в условиях ЭЦР (рис. 2),

$$V_{gr} = \frac{V_e^2}{2\omega_c B_z(r)} \frac{\partial B_z(r)}{\partial r},$$

где  $V_e$  — скорость движения электронов поперек силовых линий магнитного поля;

$\omega_c = \frac{eB}{mc}$  — электронная циклотронная частота;

$e, m$  — заряд и масса электрона, соответственно;

$c$  — скорость света в вакууме;

- при  $P_{hf} > 150$  Вт в указанном выше диапазоне давлений наблюдается резкое увеличение  $I_i$ , которая может достигать 30 мА/см<sup>2</sup> (см. рис. 2). При этом регистрируются интенсивные низкочастотные плазменные колебания в диапазоне десятков килогерц, что, очевидно, связано с

возникновением плазменной неустойчивости параметрического характера [7], определяющей возможность формирования плазмы с концентрацией частиц, превышающей критическое значение для используемой частоты поля накачки ( $7 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>), а также значительное улучшение транспортных характеристик в  $r$ -направлении в условиях присутствия амбиполярного потенциала;

- при давлении  $P = (1-3) \cdot 10^{-4}$  Торр и  $P_{hf} \geq 200$  Вт в плазменном потоке регистрируются электроны с энергией, превышающей 300 эВ (рис. 3), что предполагает возможность использования CERA-R в качестве источника высокоэнергетических частиц.

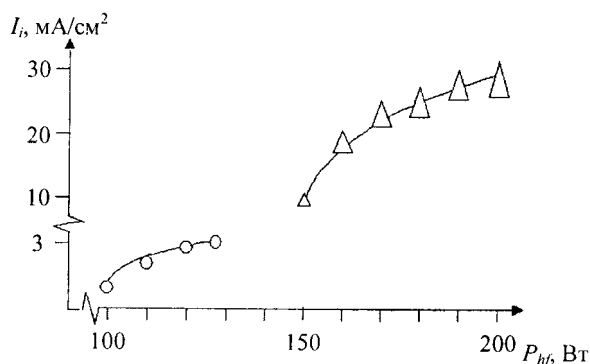


Рис. 2. Зависимость плотности тока ионной компоненты плазмы ( $I_i$ ) от величины вводимой в резонатор СВЧ-мощности ( $P_{hf}$ );  $P = 6 \cdot 10^{-4}$  Торр

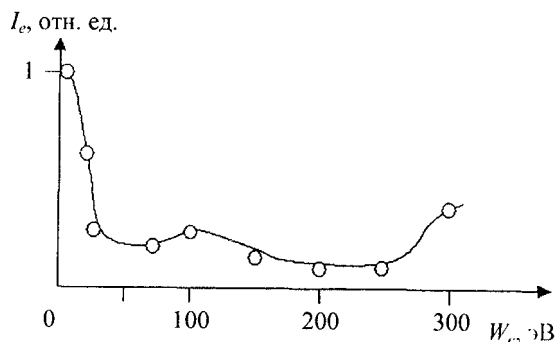


Рис. 3. Энергетический спектр электронной компоненты плазмы:

$I_e$  — ток электронов;  $W_e$  — энергия электронов;  
 $P = 2 \cdot 10^{-4}$  Торр,  $P_{hf} = 200$  Вт

Для детального исследования поведения плазмы в источнике CERA-R был предпринят численный эксперимент, реализующий трехмерное моделирование плазменных процессов. Расчеты проводились для геометрии системы, соответствующей реальному эксперименту. Стационарное магнитное поле создавалось постоянными кольцевыми магнитами, расположенными таким образом, чтобы в продольном направлении профиль магнитного поля имел пробочную конфигурацию, а в радиальном, в области формирования плазмы, плавно спадал, что обеспечивало возникновение радиального

дрейфа частиц. Области ЭЦР как в реальном, так и в численном экспериментах соответствовала парабола с вершиной, находящейся в медианной плоскости системы на расстоянии 3 см от ее оси. Численная модель построена в соответствии с методом частиц в ячейке [8, 9]. В начальный момент времени генерировалось однородное распределение частиц плазмы вблизи ЭЦР-поверхности. Начальные энергии электронов и ионов считались близкими к нулю. Распределение СВЧ-электрического поля в области формирования плазмы определялось системой электродов коаксиального резонатора.

Диагностики, используемые в модели, позволяли рассчитывать интенсивность потока частиц в радиальном направлении и энергетические спектры электронов и ионов для различных условий эксперимента. В численных экспериментах наблюдались амбиполярный и градиентный дрейфы частиц, скорости которых зависели от напряженности электрического поля и начальной плотности плазмы. Результаты численных экспериментов позволяют сделать вывод о возможности формирования интенсивных потоков плазмы в радиальном направлении.

Представленные в работе результаты исследований показывают перспективность продолжения работ по изучению параметров плазмы, формируемой в источнике CERA-R, как для его

применения в технологических процессах, так и его использования в качестве источника мягкого рентгеновского излучения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.*

#### Л и т е р а т у р а

1. Strong microwave in plasma. V Int. Workshop. — Nizhny Novgorod. Russia. 2002.
2. Microwave Discharge: Fundamentals and Applications. IV Int. Workshop. — Zvenigorod. Russia. 2002.
3. Balmashnov A. A.: Proc. International University Conference "Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies". (UHF-99). — St. Petersburg. 1999. P. 432.
4. Asmussen J.: Proc. of Int. Workshop Microwave plasma and its applications. — Zvenigorod. 1994. P. 52.
5. Musil J. Proc. of Int. Workshop "Microwave plasma and its applications". — Zvenigorod. 1994. P. 318.
6. Андреев В. В., Балмашинов А. А., Умнов А. М.// Прикладная физика. 2004. № 6. С. 91.
7. Силин В. П. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. — М.: Наука, 1973.
8. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd. 1995. P. 305.
9. Сигов Ю. С. Вычислительный эксперимент: Мост между прошлым и будущим физики плазмы. — М.: Физматлит. 2001. С. 223.

*Статья поступила в редакцию 26 апреля 2005 г.*

## The peculiarities of microwave plasma creation in CERA-R device

V. V. Andreev, A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, A. M. Umnov  
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

*Coaxial vacuum cavity and two permanent disk magnets are used to form azimuthally symmetric flux of microwave plasma. It has been found experimentally that the density of plasma created in the device can exceed its critical value. The results of 3D plasma simulation and the experimental evidence point to the feasibility of designing a soft x-ray source on a basis of a developed source of microwave plasma.*

УДК 533.924, 537.525

## Образование сверхплотной плазмы при СВЧ-пробое диэлектриков

В. А. Иванов, М. Е. Коныжев, В. П. Гавриленко, А. А. Летунов  
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Е. А. Окс

Обернский университет, Оберн, Алабама, США

*Исследованы безэлектродные разряды, возбуждаемые импульсным сверхвысокочастотным (СВЧ) излучением (импульсная мощность до 2 МВт, частота колебаний 2 ГГц, длительность импульсов до 10 мкс) на поверхности диэлектриков в вакууме ( $\sim 10^{-4}$  Па). Установлено, что наиболее интенсивное оптическое излучение регистри-*