

# Электронные и ионные пучки

УДК 533.9

## Самоорганизация сгустков электронов в ЭЦР-источнике рентгеновского излучения CERA-RX(C)

А.А. Балмашнов, А.В. Калашников, В.В. Калашников, С.П. Степина, А.М. Умнов

*Установлено, что при положительном потенциале на осевом электроде коаксиального резонатора CERA-RX(C) в режимах генерации рентгеновского излучения в спектре СВЧ-сигнала из резонатора регистрируются сателлиты основной частоты 2,45 ГГц, частота которых линейно зависит от величины потенциала. На основе полученных результатов делается вывод о формировании в азимутально симметричной ЭЦР-области источника сгустков электронов, скорость азимутального дрейфа которых определяется потенциалом на осевом электроде.*

PACS: 52.50.Sw; 52.27.Ny; 52.40.Db.

*Ключевые слова:* плазма, электронный циклотронный резонанс, релятивизм, неоднородное магнитное поле, коаксиальный резонатор.

### Введение

В настоящее время источники плазмы на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) успешно используются в различных областях науки и техники. В частности, при производстве полупроводниковых структур, в текстильной и деревообрабатывающей промышленности, в медицине и т.д. Ведутся разработки ЭЦР-двигателей космических аппаратов [1] и источников излучения различного частотного диапазона [2]. В связи с этим не ослабевает интерес к процессам, сопровождающим этот тип разряда в различных устройствах, отличающихся конфигурацией постоянного магнитного поля и электрического СВЧ-поля.

Наряду с ЭЦР-источниками плазмы, в которых локализация СВЧ-полей осуществляется в полых резонаторах, в последнее время для решения ряда практических задач определенное внимание уделяется источникам с коаксиальными резонаторами, позволяющими существенно уменьшить их габариты [3]. Работа в этом направлении применительно к созданию двигателя коррекции орбиты легкого космического аппарата [4] и генератора рентгеновского излучения (CERA-RX) [5] ведутся нами с 2006 г. Основные результаты ранее проведенных исследований представлены в работах [5–9]. CERA-RX состоял из коаксиального резонатора [5], возбуждаемого на основной моде, и постоянных кольцеобразных

магнитов, формирующих радиально неоднородное магнитное поле с удаленной от осевого электрода резонатора узкой азимутально-симметричной областью ЭЦР. ЭЦР-нагрев частиц сопровождается увеличением ларморовского радиуса, что обеспечивает их попадание на центральный электрод и формирование азимутально-симметричного потока рентгеновского излучения в радиальном направлении. Было показано [10], что положительный потенциал на осевом электроде резонатора способствует электростатическому удержанию электронов в продольном направлении и повышает энергетическую эффективность генератора.

Для создания направленного излучения узкого спектрального диапазона (характеристическое излучение, CERA-RX(C) [8]) осевой электрод резонатора в центральной части был дополнен радиально ориентированным электродом-мишенью, протяженность которого определяла попадание на него электронов с энергией, превышающей определенную величину. Диаметр электрода определял локализацию области генерации излучения, а его материал – энергию излучаемых квантов. Было установлено [9], что в генераторе CERA-RX(C) на эффективность генерации рентгеновского излучения может влиять особенность высадки электронов на электрод-мишень, имеющая характер, близкий к синфазному, что, как следствие, приводит к возникновению электрического СВЧ-поля, пульсирующего на основной частоте 2,45 ГГц.

Как и ранее [10], для повышения энергетической эффективности CERA-RX(C), на осевой электрод резонатора подавался положительный потенциал. Предполагалось, что, в отличие от его применения в ранее исследуемом генераторе CERA-RX, он должен привести не только к электростатическому удержанию электронов в продольном направлении [10], но и к увеличению частоты их высадки на электрод мишень за счет азимутального дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Балмашнов Александр Александрович, профессор.  
Калашников Андрей Владимирович, научн. сотрудник.  
Калашников Владимир Владимирович, аспирант.  
Степина Светлана Петровна, доцент.  
Умнов Анатолий Михайлович, доцент.  
Российский университет дружбы народов (РУДН).  
Россия, 117198. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.  
Тел.: 8.495 9550923. E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2014 г.

© Балмашнов А.А., Калашников А.В., Калашников В.В., Степина С.В., Умнов А.М., 2014

Предварительные экспериментальные результаты исследования показали, что в этих условиях при генерации рентгеновского излучения в спектре СВЧ-сигнала из резонатора регистрируются спутники основной частоты  $f = 2,45$  ГГц, смещение по частоте которых относительно  $f$  находится в мегагерцовом диапазоне.

Целью работы являлось экспериментальное изучение условий формирования спутников основной частоты в генераторе CERA-RX(C).

### Постановка задачи и метод ее решения

Задачей данных исследований являлось изучение условий формирования спутников основной частоты в генераторе CERA-RX(C).

Экспериментальные исследования осуществлялись на генераторе рентгеновского излучения CERA-RX(C). Генератор CERA-RX(C) описан ранее в работах [4, 5]. Он состоит из цилиндрического полуволнового коаксиального резонатора переменного сечения, возбуждаемого на основной моде (TEM) магнетронным генератором М-105 на частоте 2,45 ГГц. Диаметр центральной части резонатора 9,6 см, ее протяженность 3,2 см. Стационарное магнитное поле формируется кольцеобразными постоянными магнитами создающими аксиально-симметричную ЭЦР-поверхность, расположенную на расстоянии 1,7 см от оси симметрии в медианной плоскости резонатора. Осевого электрод, имеющий диаметр 1,6 см, в своей центральной части имеет радиально направленный цилиндрический выступ (электрод-мишень, медь) диаметром 0,2 см и протяженностью 0,1 см.

Регистрация интенсивности рентгеновского излучения, поступающего из резонатора через берилловое окно, осуществлялась крио-Si(Li) (Bruker Baltic) детектором. Характеристики СВЧ-поля в резонаторе определялись спектр-анализатором RSA 6114 Real-Time Spectrum Analyzer (9 кГц – 14 кГц). Измерение поступающей в резонатор СВЧ-мощности проводилось с помощью направленного ответвителя и прибора Я2М-66.

### Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментально было установлено, что в режимах генерации характеристического излучения при неизменной СВЧ-мощности, поступающей в резонатор генератора CERA-RX(C), увеличение положительного потенциала на осевом электроде приводит к росту интенсивности рентгеновского излучения и уменьшению напряженности электрического СВЧ-поля в резонаторе. При этом в спектре СВЧ-сигнала из резонатора возникают спутники основной частоты (рис. 1), смещение которых относительно основной частоты линейно зависит от приложенного потенциала. На рис. 2 представлены зависимости интенсивности рентгеновского излучения  $J_x$ , квадрата напряженности СВЧ-поля в резонаторе  $E_r^2$  и смещение частоты спутников  $f_s$  от потенциала на осевом электроде  $U$  для ЭЦР-разряда в водороде при давлении  $P = 9 \cdot 10^{-5}$  Торр, величине СВЧ-мощности, поступающей в резонатор,  $P_r = 8$  Вт и значении магнитного поля, обеспечивающего ЭЦР-взаимодействие в азимутально симметричной области с радиусом  $R = 1,7$  см. Зависимости  $J_x$  и  $f_s$  от квадрата

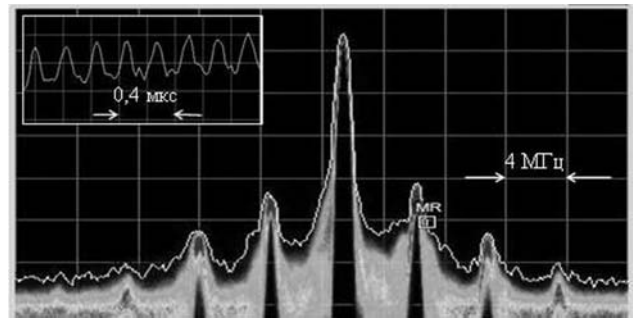


Рис. 1. Спектр СВЧ-колебаний в резонаторе.  $P = 9 \cdot 10^{-5}$  Торр,  $P_r = 8$  Вт,  $U = 570$  В.

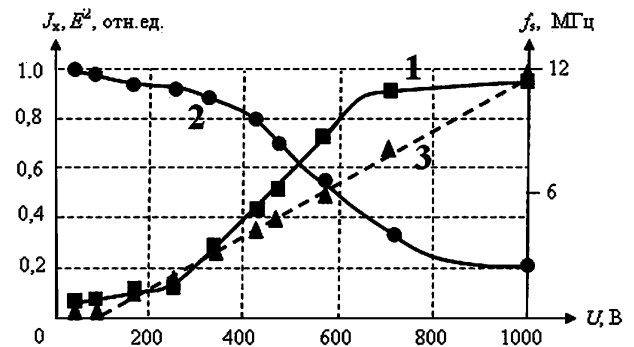


Рис. 2. Экспериментальные зависимости: 1 – интенсивности рентгеновского излучения,  $J_x$ , отн. ед., 2 – квадрата напряженности СВЧ-поля в резонаторе  $E^2$ , отн. ед., 3 – смещения частоты спутников относительно основной частоты,  $f_s$ , МГц, от потенциала на осевом электроде резонатора  $U$ .

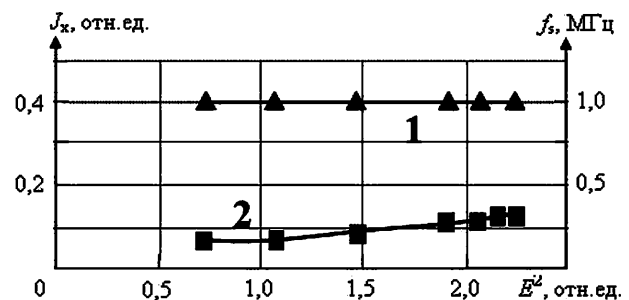


Рис. 3. Зависимости: 1 – интенсивности рентгеновского излучения,  $J_x$ , отн. ед.; 2 – смещения частоты спутников относительно основной частоты,  $f_s$ , МГц, от квадрата напряженности СВЧ-поля в резонаторе  $E^2$ , отн. ед. Масштаб шкалы  $J_x$  соответствует масштабу шкалы на рис. 2.

напряженности СВЧ-поля в резонаторе при  $U = 130$  В представлены на рис. 3.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при наличии положительного потенциала на осевом электроде резонатора в зоне ЭЦР возникает пространственная сепарация электронов, формируются пространственно периодические области с избыточным отрицательным потенциалом (сгустки электронов), скорость азимутального дрейфа которых зависит от величины  $U$  (дрейф в скрещенных электрическом и магнитном полях). При этом пространственный период сгустков и скорость их азимутального дрейфа определяют частоту пульсаций потенциала вблизи измерительной СВЧ-антенны следствием чего является возникновение спутников основной частоты в сигнале из резонатора.

Линейная зависимость  $f_s$  от  $U$  показывает, что пространственная периодичность сгустков не зависит от  $U$ .

Отсутствие зависимости частоты  $f_s$  от напряженности СВЧ-поля в резонаторе указывает на то, что в условиях проводимых экспериментов оно практически не влияет на пространственный период сгустков. При этом увеличение интенсивности рентгеновского излучения с увеличением частоты регистрируемых пульсаций связано с частотой высадки энергетичных электронов, содержащихся в сгустках, на электрод-мишень. В соответствии с вышесказанным, можно предположить, что пространственный масштаб сгустков электронов преимущественно определяется периодом пульсации их энергии (релятивистский фактор) и скоростью градиентного дрейфа в радиально неоднородном магнитном поле. Факт отсутствия эффекта пространственной сепарации электронов в ранее проводимых исследованиях на генераторе CERA-RX [10], отличающегося от генератора CERA-RX(C) отсутствием электрода-мишени, указывает на возможность его определяющей роли в изучаемом явлении.

Таким образом, экспериментально полученные результаты показывают, что процессы протекающие в генераторе рентгеновского излучения CERA-RX(C) при наличии потенциала на осевом электроде коаксиального резонатора приводят к самоорганизации электронной компоненты плазмы в азимутально симметричной ЭЦР-области, т.е. к сепарации электронной компоненты плазмы и формированию пространственно периодических сгустков электронов.

### Заключение

В результате проведенных исследований экспериментально установлены зависимости частоты пульсации электрического поля и интенсивности рентгеновского излучения от потенциала на осевом электроде коаксиального резонатора генератора рентгеновского излучения CERA-RX(C). Установлено, что в условиях экспериментов интенсивность рентгеновского

излучения и частота пульсаций практически не зависят от напряженности СВЧ-поля в резонаторе (или СВЧ-мощности, поступающей в резонатор).

На основе проведенных исследований делается вывод, что процессы протекающие в генераторе рентгеновского излучения CERA-RX(C) при наличии потенциала на осевом электроде коаксиального резонатора приводят к самоорганизации электронной компоненты плазмы в азимутально симметричной ЭЦР области в виде сепарации электронной компоненты плазмы и формированию пространственно периодических сгустков электронов.

Результаты работы могут представлять практический интерес для многочисленных приложений ЭЦР-источников плазмы. При этом продолжение начатой работы предполагается в направлении более детального изучения физических процессов, протекающих в генераторе характеристического излучения CERA-RX(C).

### Литература

1. 33<sup>rd</sup> International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013), Washington, D.C. USA.
2. *Andreev V.V., Umnov A.M.* // Plasma Sources Science and Technology. 1999. V. 8. P. 479.
3. *Балмаинов А.А., Калаишиков А.В.* // Прикладная физика. 2008. № 6. С. 93.
4. *Балмаинов А.А., Калаишиков А.В.* // Прикладная физика. 2007. № 6. С. 99.
5. *Андреев В.В., Балмаинов А.А., Калаишиков А.В., Умнов А.М.* // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 80.
6. *Балмаинов А.А., Умнов А.М.* // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 40.
7. *Балмаинов А.А., Степина С.П., Умнов А.М.* // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 96.
8. *Балмаинов А.А., Калаишиков А.В., Степина С.П., Умнов А.М.* // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 100.
9. *Балмаинов А.А., Калаишиков А.В., Калаишиков В.В., Степина С.П., Умнов А.М.* // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 88.
10. *Балмаинов А.А., Калаишиков А.В.* // XXXVI Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, 2009. Тез. Докл. С. 229.

## Self-organization of electron bunches in the X-ray ECR source CERA-RX (C)

*A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, V. V. Kalashnikov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov*

People's Friendship University of Russia  
6 Mikluho-Maklay str., 117198, Moscow, Russia,  
E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru

*Received May 12, 2014*

***It has been found out that in the CERA-RX satellites the fundamental frequency (2.45 GHz) recorded in modes in X-ray emission in the spectrum of the microwave signal from the resonator at positive potential on the axis electrode of the coaxial resonator of the facility. The frequencies of the satellites are slightly dependent on the intensity of the microwave electric field in the cavity and depend linearly on the magnitude of the potential at the axial electrode. It is concluded the formation of bunches of electrons in the azimuth-symmetric ECR region.***

PACS: 52.50.Sw; 52.27.Ny; 52.40.Db.

*Keywords:* plasma, electron cyclotron resonance, relativistic effect, inhomogeneous magnetic field, coaxial resonator.

### References

1. *33<sup>rd</sup> International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013)* (Washington, D.C. USA).
2. V. V. Andreev and A. M. Umnov, *Plasma Sources Science and Technology* **8**, 479 (1999).
3. A. A. Balmashnov and A. V. Kalashnikov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 93 (2008).
4. A. A. Balmashnov and A. V. Kalashnikov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 99 (2007).
5. V. V. Andreev, A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 80 (2006).
6. A. A. Balmashnov and A. M. Umnov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 40 (2010).
7. A. A. Balmashnov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 96 (2011).
8. A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, S. P. Stepina, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 100 (2011).
9. A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, V. V. Kalashnikov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 88 (2012).
10. A. A. Balmashnov and A. V. Kalashnikov, in *Proceedings of the XXXVI Intern. Zvenigorod. Conference on Plasma Physics* (Zvenigorod, Russia, 2009), p. 229.