

УДК 533.9

## Влияние пульсирующего электрического поля на ЭЦР-нагрев в источнике рентгеновского излучения CERA-RX(C)

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

*Методом частиц в ячейке проведено 3D-моделирование плазмы для конфигурации полей, реализуемых в ЭЦР-источнике (2,45 ГГц) рентгеновского излучения CERA-RX(C). Получены зависимости энергетических спектров электронов, высаживаемых на электрод-мишень, от амплитуды и частоты пульсаций электрического поля, лежащей в мегагерцовом диапазоне. Проведено сравнение с результатом натурального эксперимента.*

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

*Ключевые слова:* плазмы, электронный циклотронный резонанс, релятивизм, коаксиальный резонатор, 3D-моделирование, стохастические процессы.

### Введение

Изучение возможности увеличения эффективности нагрева электронной компоненты плазмы в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) представляет как научный, так и практический интерес.

Известно, что при ЭЦР-нагреве в условиях отсутствия сбоя фазы взаимодействия (вызванного процессами любого характера и происходящими по случайному закону, которые в дальнейшем мы будем называть *стохастическими*) основным фактором, ограничивающим рост энергии частиц, является возникающее в результате релятивистского эффекта периодическое изменение фазы взаимодействия электронов с электрическим СВЧ-полем и, как следствие этого, пульсации энергии электронов. Этот процесс определяет вид функции распределения электронов, в которой существенная доля частиц находится в низкоэнергетической области. Компенсация эффекта, связанного с изменением массы электрона, может быть достигнута как пространственным структурированием магнитного поля [1], так и изменением его величины во времени [2].

Стохастические процессы, приводящие к сбою фазы взаимодействия электрона с полем волны при ЭЦР-взаимодействии, могут как ограничивать рост энергии частиц, так и способствовать ее увеличению. В реальных условиях сбой фазы может быть следствием столкновений частиц между собой и взаимодействия электронов с флуктуирующими в плазме полями.

Стохастический процесс также может быть реализован фазовой хаотизацией исходной волны накачки, использованием волноводных систем с одновременно возбуждаемыми различными типами колебаний [3], а также пульсирующими во времени внешними электрическими и (или) магнитными полями.

Как было показано в работах [4, 5], результатом действия пульсирующего электрического поля в условиях его синхронизации с частотой изменения энергии электрона (влияние релятивистского фактора) при определенных условиях может явиться рост энергии частицы. В то же время при пульсациях, реализуемых по случайному закону, основным эффектом является трансформация функции распределения электронов, а именно, обеднение низкоэнергетической ее области и локализация большего числа частиц в высокоэнергетической.

Целью данной работы являлось исследование (на основе 3D-моделирования методом частиц в ячейке) зависимости энергетического спектра электронов, попадающих на электрод-мишень ЭЦР-генератора (2,45 ГГц) рентгеновского излучения CERA-RX(C), от амплитуды и частоты пульсаций электрического поля, лежащей в мегагерцовом диапазоне, и сравнение полученных результатов с результатом реального эксперимента.

---

**Балмашинов Александр Александрович**, профессор.  
**Калашников Андрей Владимирович**, научный 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) 955-09-23; 8 (495) 955-08-29.  
E-mail: anumnov@yandex.ru; abalmashnov@rambler.ru

*Статья поступила в редакцию 3 марта 2015 г.*

© Балмашинов А. А., Калашников А. В., Калашников В. В., Степина С. П., Умнов А. М., 2015

### Постановка задачи и метод ее решения

Задача исследования заключалась в определении степени влияния частоты пульсаций электрического поля и его амплитуды на спектр энергии электронов плазмы ЭЦР-разряда в генераторе рентгеновского излучения CERA-RX(C).

Решение этой задачи осуществлялось численным 3D-моделированием по схеме, описанной ранее в работе [4]. В трехмерной численной модели, разработанной на основе метода частиц в ячейке, учтены основные параметры экспериментальной установки — геометрические размеры, конфигурации СВЧ-, ВЧ- и магнитного полей. Спектр энергии определялся для электронов, попадающих на электрод-мишень генератора CERA-RX(C), для различных амплитуд и частот пульсаций электрического поля, лежащих в мегагерцовом диапазоне, создаваемых изменением положительного потенциала на осевом электроде цилиндрического резонатора генератора.

Натурный эксперимент проводился на генераторе CERA-RX(C), схема которого подробно описана в работах [6]. Он состоит из цилиндрического полуволнового коаксиального резонатора переменного сечения. Осевой электрод диаметром 2 см в своей центральной части имеет радиально направленный цилиндрический выступ (электрод-мишень) диаметром 0,15 см и протяженностью 0,2 см. Стационарное магнитное поле формируется кольцеобразными постоянными магнитами, создающими аксиально-симметричную ЭЦР-поверхность, расположенную на расстоянии 1,75 см от оси симметрии в медианной плоскости резонатора. При этом радиальный градиент магнитного поля вблизи этой поверхности составляет 140 Гс/см. Соосно постоянным магнитам расположены соленоиды, создающие однородное магнитное поле и позволяющие изменять его общий уровень в резонаторе до 6 % относительно величины, соответствующей условию ЭЦР для электронов с массой покоя, без существенного изменения пространственного распределения и тем самым варьировать расстояние между зоной ЭЦР и электродом-мишенью. Напротив электрода-мишени в корпусе резонатора располагается берилловое окно. Регистрация тормозного излучения с электрода-мишени осуществлялась прибором BRUKER (SiLi-детектор, диапазон — 1—60 кэВ). С целью снижения загрузки детектора до 3 % использовался алюминиевый фильтр (толщина 2 мм).

В работе использовался магнетронный генератор М-105 со стабилизированным источником анодного напряжения (SPELLMAN, SL 1200). Резонатор возбуждался на частоте 2,45 ГГц через емкостную связь генератора с осевым электродом резонатора. Пульсирующее электрическое ВЧ-поле

положительной полярности ( $E_{ВЧ} = E_0[1 + \cos(2\pi ft + \varphi)]$ , частота  $f = 12,5$  МГц), подавалось непосредственно на осевой электрод. Амплитуда ВЧ-поля могла варьироваться. Регистрация СВЧ- и ВЧ-полей в резонаторе осуществлялась анализатором спектра Tektronix RSA 6114A (диапазон 9 кГц — 14 ГГц).

### Полученные результаты и их обсуждение

Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1 показана зависимость энергетического спектра электронов в области нахождения электрода-мишени от частоты пульсаций электрического поля  $f$  при его амплитуде в области ЭЦР на уровне  $E_0 = 250$  В/см. На рис. 2 — та же зависимость энергетического спектра от амплитуды пульсаций ВЧ-поля  $E_0$  в области ЭЦР для  $f = 12,5$  МГц. Расчет проводился для одинакового числа циклов СВЧ-поля. Напряженность СВЧ электрического поля в области ЭЦР составляла  $E_{СВЧ} = 250$  В/см.

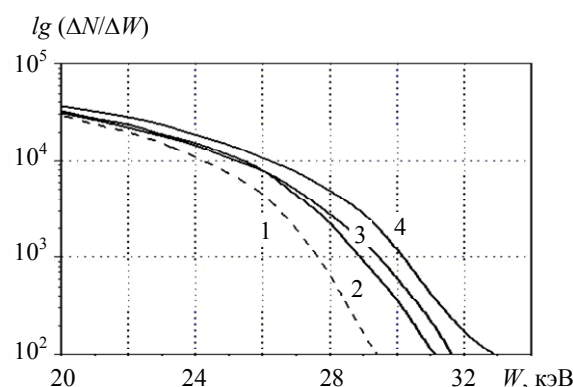


Рис. 1. Зависимость энергетического спектра электронов вблизи электрода-мишени ( $\Delta N/\Delta W$ ) от частоты пульсации электрического поля  $f$ . 1 —  $f = 0$ ; 2 —  $f = 2,5$  МГц; 3 —  $f = 12,5$  МГц; 4 —  $f = 20$  МГц

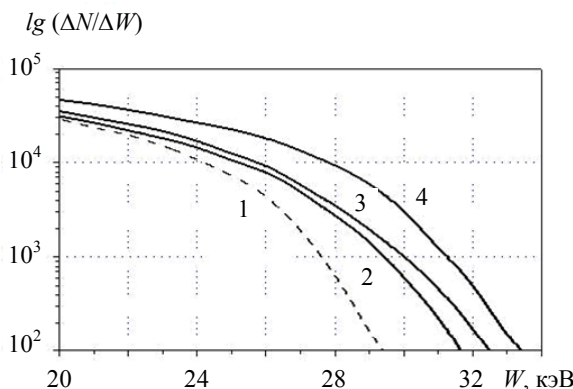


Рис. 2. Зависимость энергетического спектра электронов вблизи электрода-мишени ( $\Delta N/\Delta W$ ) от амплитуды  $E_0$  пульсаций ВЧ-поля в области ЭЦР. 1 —  $E_0 = 0$ ; 2 —  $E_0 = 250$  В/см; 3 —  $E_0 = 500$  В/см; 4 —  $E_0 = 1000$  В/см

Из полученных результатов следует, что увеличение частоты пульсаций электрического поля приводит к более быстрому смещению энергетического спектра электронов в область больших энергий, что, в свою очередь, свидетельствует о влиянии частоты стохастического сбоя фаз электронов на эффективность их нагрева при ЭЦР взаимодействии. При этом величина смещения энергетических спектров в области их больших энергий составляет (2—4) кэВ относительно спектра, полученного при отсутствии пульсаций. Это хорошо согласуется с результатом натурального эксперимента, представленным на рис. 3, в котором исследовался спектр рентгеновского излучения с электрода-мишени при ЭЦР-разряде в водороде (давление  $P = 9,5 \cdot 10^{-5}$  Торр). Здесь смещение спектра рентгеновского излучения при частоте пульсаций  $f = 12,5$  МГц и  $E_0 = 250$  В/см составило  $\approx 2$  кэВ, относительно спектра, полученного в отсутствие пульсаций [3].

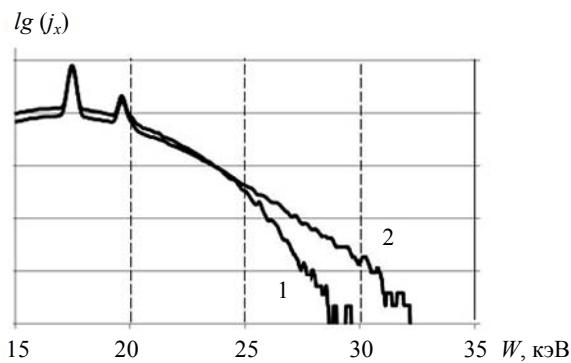


Рис. 3. Вид спектров рентгеновского излучения с электрода-мишени. 1 —  $E_0 = 0$  В/см; 2 —  $E_0 = 250$  В/см,  $f = 12,5$  МГц.  $E_{\text{свч}} = 250$  В/см. ЭЦР-разряд в водороде при давлении  $P = 9,5 \cdot 10^{-5}$  Торр

Следует отметить, что регистрируемое изменение в энергетическом спектре излучения связано исключительно с наличием ВЧ-пульсаций, т. к. в условиях проводимых экспериментов влияние пульсаций потенциала на осевом электроде резонатора с частотой 2,45 ГГц, способствующих локализации электронов в области ускоряющих фаз ЭЦР-взаимодействия [5], было исключено.

При этом наличие на нем постоянного потенциала не приводит к изменению энергетического спектра излучения, а влияет только на его интенсивность [7].

Таким образом, можно констатировать, что результаты вычислительного эксперимента находятся в соответствии с экспериментально полученным результатом и показывают возможность существенного влияния пульсирующего электрического поля на нагрев электронов в условиях ЭЦР.

### Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что стохастический сбой фазы взаимодействия электрона с СВЧ полем при ЭЦР, создаваемый пульсирующим электрическим полем, приводит к смещению энергетического спектра электронов в область больших энергий, при этом темп смещения увеличивается с увеличением частоты пульсаций.

Результаты работы могут представлять практический интерес в виду возможности реализации используемого способа стохастического сбоя фаз взаимодействия в системах с ЭЦР-нагревом частиц.

Продолжение начатой работы предполагается в направлении более детального исследования изучаемого эффекта как в теоретическом, так и экспериментальном планах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Golovanivsky K. S., Milantiev V. P. // Plasma Physics. 1974. V. 16. P. 549.
2. Andreev V. V., Umnov A. M. // Plasma Sources Science and Technology. 1999. V. 8. P. 479.
3. Антонов А. Н., Буц В. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 69. Вып. 11. С. 806.
4. Балмаинов А. А., Умнов А. М. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 40.
5. Балмаинов А. А., Калаишиков А. В., Калаишиков В. В. и др. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 88.
6. Андреев В. В., Балмаинов А. А., Калаишиков А. В. и др. // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 80.
7. Балмаинов А. А., Калаишиков А. В., Калаишиков В. В. и др. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 51.

## Effect of pulsating electric field on the ECR heating in CERA-RX(C)

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

People' Friendship University of Russia, Plasma Physics Lab.  
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia  
E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru; anumnov@yandex.ru

*Received March 3, 2015*

***3D particle-in-cell plasma simulation for field configurations implemented in the ECR source of X-ray CERA-RX (C) (2.45 GHz) was carried out. Energy spectra of electrons landed on the target electrode on the amplitude and frequency of the pulsations of the electric field in the megahertz range were obtained. The comparison of simulation data with the result of a natural experiment was performed.***

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

***Keywords:*** plasma, electron cyclotron resonance, relativism, coaxial resonator, 3D simulation, stochastic processes.

### RERERENCES

1. K. S. Golovanivsky and V. P. Milantiev, Plasma Physics **16**, 549 (1974).
2. V. V. Andreev and A. M. Umnov, Plasma Sources Science and Technology **8**, 479 (1999).
3. A. N. Antonov, V. A. Buts, et al., JETP Lett. **69**, 806 (1999).
4. A. A. Balmashnov and A. M. Umnov, Prikladnaya Fizika, No. 6, 40 (2010).
5. A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, V. V. Kalashnikov, et al., Prikladnaya Fizika, No. 6, 88 (2012).
6. V. V. Andreev, A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, et al., Prikladnaya Fizika, No. 6, 80 (2006).
7. A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, V. V. Kalashnikov, et al., Prikladnaya Fizika, No. 3, 51 (2014).