

УДК 533.9

Влияние пульсирующего электрического поля на ЭЦР-нагрев в пространственно неоднородном магнитном поле

А. А. Балмашнов, А. М. Умнов

Численным моделированием показана возможность сильного влияния пульсирующего по случайному закону электрического поля на ЭЦР-нагрев в неоднородном магнитном поле. Установлено, что в этих условиях энергетический спектр электронов обедняется в области низких энергий за счет увеличения числа частиц в высокоэнергетической области. Предполагается использовать этот эффект для увеличения эффективности генерации рентгеновского излучения в ЭЦР-источниках.

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

Ключевые слова: электронный циклотронный резонанс, релятивизм, неоднородное магнитное поле, пульсирующее электрическое поле.

Введение

Изучение возможности увеличения эффективности нагрева электронной компоненты плазмы в условиях циклотронного резонанса (ЭЦР) представляет как научный, так и практический интерес, в частности, применительно к созданию ЭЦР-источников рентгеновского излучения [1—3] компактность и энергетическая эффективность которых, а также отсутствие в них соответствующего жесткости излучения статической разности потенциалов, ускоряющей электроны, определяют перспективность их использования.

Известно, что при ЭЦР-нагреве в условиях отсутствия сбой 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 СВЧ-электрическим 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 [4], так и изменением его величины во времени [5].

Стохастические процессы при ЭЦР-взаимодействии могут как ограничивать рост энергии частиц, так и способствовать ее увеличению. В разреженной плазме в условиях, при которых можно пренебречь потерей энергии электронами вследствие их столкновений с тяжелыми частицами, влияние стохастических явлений проявляется в изменении фазы взаимодействия электрона с СВЧ-полем. В реальных условиях сбой фазы взаимодействия может быть следствием столкновений частиц между собой и взаимодействия электронов с флуктуирующими в плазме полями [6, 7]. Практически он также может быть реализован фазовой хаотизацией исходной волны накачки, использованием волноводных систем с одновременно возбуждаемыми различными типами колебаний [8], а также пульсирующими во времени внешними электрическими и (или) магнитными полями. Результатом действия этих полей в условиях синхронизации пульсаций с частотой изменения энергии электрона вследствие влияния релятивистского эффекта при определенных условиях можно ожидать рост энергии частицы, а при пульсациях, реализуемых по случайному закону, как основной эффект, трансформацию функции распределения электронов — обеднение низкоэнергетической ее области и локализацию большего числа частиц в высокоэнергетической.

Цель данной работы — исследование влияния пульсирующего электрического поля, направленного параллельно вектору напряженности электрического СВЧ-поля, на ЭЦР-нагрев в пространственно неоднородном стационарном магнитном

Балмашнов Александр Александрович, профессор.
Умнов Анатолий Михайлович, профессор.
Российский университет дружбы народов.
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.
Тел. 8 (495) 955-09-23. E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru
Статья поступила в редакцию 14 сентября 2010 г.

поле. Такая постановка задачи соответствует условию оптимального воздействия пульсирующего электрического поля на циклотронное вращение электронов, а изучаемый процесс может быть реализован в эксперименте по ЭЦР-нагреву в коаксиальном резонаторе [8].

Постановка задачи и метод ее решения

Изучение влияния пульсирующего электрического поля на ЭЦР-нагрев частиц в неоднородном магнитном поле осуществлялось численным моделированием этого процесса как в условиях линейного изменения магнитного поля в направлении, перпендикулярном направлению вектора индукции магнитного поля $B_z(x) = B_0(1 + \alpha \cdot x)$ (2D-моделирование), где $B_0 = \frac{m_0 c \omega}{e}$ (e и m_0 — заряд и масса покоя электрона, соответственно, c — скорость света в вакууме, ω — круговая частота СВЧ-поля, α — параметр, определяющий градиент магнитного поля) без учета продольного движения частиц (z — направление), так и для распределений стационарного магнитного и СВЧ-электрического полей, реализуемых в источнике рентгеновского излучения CERA-RX [8] (3D-моделирование).

Источник CERA-RX состоит из цилиндрического полуволнового коаксиального резонатора переменного сечения, возбуждаемого на основной моде (TEM). Область локализации плазмы имеет диаметр 9 см и протяженность 3,2 см. Диаметр центрального электрода — 0,5 см. Стационарное магнитное поле формируется кольцеобразными постоянными магнитами. Реализуются две аксиально симметричные ЭЦР-поверхности, расположенные на расстояниях 1,7 и 3,2 см от оси симметрии в медианной плоскости резонатора, градиент магнитного поля в которых достигает 100 Гс/см. Подробное описание CERA-RX представлено в работе [8]. Изучаемый процесс взаимодействия осуществлялся для дальней ЭЦР-поверхности. Для расчета магнитного поля использовались измеренные величины индукции магнитного поля (B_r и B_z), которые сохранялись на стационарной пространственной сетке с шагом 0,1 см. Количество узлов пространственной сетки 91×33. В точках расположения электронов компоненты магнитного поля B_x , B_y , B_z рассчитывали методом билинейной интерполяции [9].

В целях изучения влияния однополярного пульсирующего электрического поля на ЭЦР-нагрев "в чистом виде" расчеты проводили без учета влияния собственных электрического и магнитного полей плазмы, для значений напряженности

СВЧ-электрического поля (2,45 ГГц) 300 В/см и напряженности пульсирующего поля прямоугольной формы 1500 В/см, направленного в сторону увеличения B_z компоненты магнитного поля. Предполагалось, что индуцированное на фронтах пульсирующего электрического поля магнитное поле не влияет на характер взаимодействия и что в начальный момент времени низкоэнергетичные электроны (10 эВ) однородно распределены в области изменения стационарного магнитного поля в 3 % относительно резонансного значения (для электронов с массой покоя). Начальные направления импульсов электронов задавали случайным образом. Граничные условия для частиц определяли размерами вакуумной камеры: производилась компенсация частиц, уходящих на стенки резонатора, низкоэнергетичными электронами, возникающими в области значений магнитного поля, определенной ранее как начальное условие. Общее число моделируемых электронов — 20 000.

В расчетах использовалась безразмерная форма уравнения движения электронов с учетом релятивизма:

$$\frac{\bar{u}^{n+1/2} - \bar{u}^{n-1/2}}{\Delta\tau} = \bar{g}^n + \frac{\bar{u}^{n+1/2} + \bar{u}^{n-1/2}}{2\gamma^n} \bar{b}^n, \quad (1)$$

где \bar{u} — импульс электрона в единицах m_0c ;

\bar{g}^n — безразмерное суммарное электрическое

$$\text{поле } \bar{g}^n = \frac{(\bar{E}_{hf}^n + \bar{E}_{pulse}^n)}{B_0};$$

\bar{E}_{hf}^n — напряженность электрического СВЧ-поля;

\bar{E}_{pulse}^n — напряженность пульсирующего электрического поля;

\bar{b}^n — индукция магнитного поля, нормированная на B_0 ;

$\Delta\tau = \omega \cdot \Delta t$ — временной шаг;

n — номер временного шага интегрирования уравнения (1);

$\gamma^n = (1 + u^2)^{1/2}$ — релятивистский фактор.

Временной шаг составлял не более 1/250 периода СВЧ-поля.

Уравнение (1) решали методом "с перешагиванием" по схеме Бориса [9] введением вспомогательных переменных \bar{u}^- и \bar{u}^+ таким образом, что

$$\bar{u}^{n-1/2} = \bar{u}^- - \frac{q}{m} \bar{E}^n \Delta t; \quad (2)$$

$$\bar{u}^{n+1/2} = \bar{u}^+ + \frac{q}{m} \bar{E}^n \Delta t. \quad (3)$$

Тогда для перехода от \vec{u}^- к \vec{u}^+ можно использовать алгоритм малого числа арифметических шагов и настолько мало арифметических регистров, насколько это возможно в оптимизированной программе движения заряженных частиц:

$$\vec{u}' = \vec{u}^- + \vec{u}^- \times \vec{t}; \quad (4)$$

$$\vec{u}^+ = \vec{u}^- + \vec{u}' \times \vec{s},$$

где $\vec{t} = q\vec{B}\Delta t / 2mc\gamma$, а $\vec{s} = 2\vec{t} / (1+t^2)$. (5)

Координаты частицы, нормированные на релятивистский радиус циклотронного вращения электрона $r_L = c/\omega$, на каждом временном шаге пересчитываются в соответствии с равенством:

$$\vec{x}^{n+1} = \vec{x}^n + \vec{u}^{n+1/2} \Delta\tau / \gamma^{n+1/2}. \quad (6)$$

Аналогичным образом рассчитываются y и z координаты электронов.

Полученные результаты

На рис. 1 представлена зависимость энергии электрона от времени (2D-моделирование) в случае включения постоянного электрического поля в момент, соответствующий нахождению частицы в области тормозящих фаз его взаимодействия с СВЧ-электрическим полем ($\alpha = 0,08 \text{ см}^{-1}$).

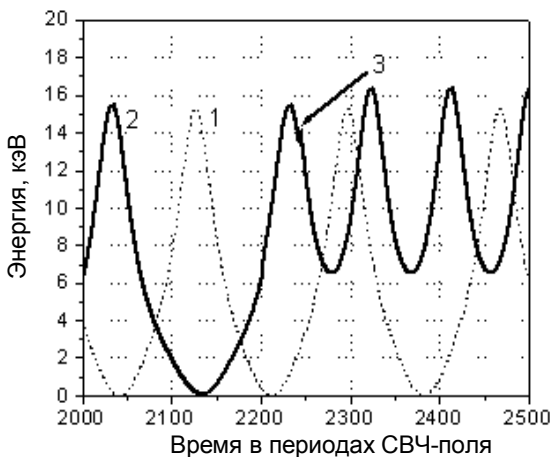


Рис. 1. Зависимость энергии электрона от времени:

1 — в отсутствие постоянного электрического поля;

2 — в случае включения электрического поля в момент времени 3

На рис. 2 приведен результат 2D-моделирования — зависимость энергии электрона от времени в условиях синхронизации пульсаций внешнего электрического поля с частотой изменения энергии электрона. Действие импульсов пульсирующего поля также реализовано в момент нахождения электрона в области тормозящих фаз. Расчет проводился для $\alpha = 0,08 \text{ см}^{-1}$.

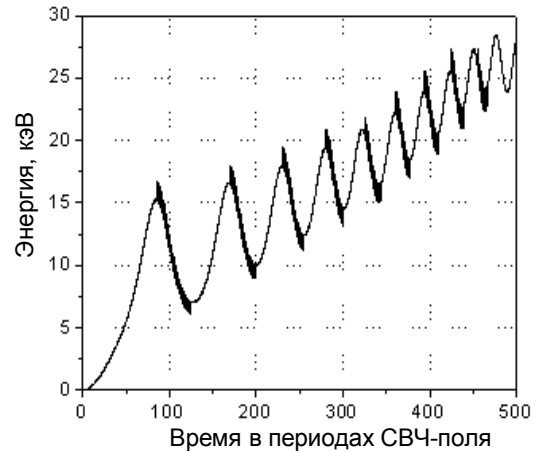


Рис. 2. Зависимость энергии электрона от времени в условиях синхронизации пульсаций внешнего электрического поля с частотой изменения энергии электрона

На рис. 3 (2D-моделирование) изображена трансформация функции распределения электронов по энергиям в условиях генерации импульсов электрического поля (1500 В/см) с варьированием частоты в диапазоне 190—210 МГц — скважность и длительность каждого последующего импульса менялась по случайному закону. Пунктирная и сплошная кривые соответствуют случаям отсутствия импульсного поля и его наличия, соответственно ($\alpha = 0,15 \text{ см}^{-1}$).

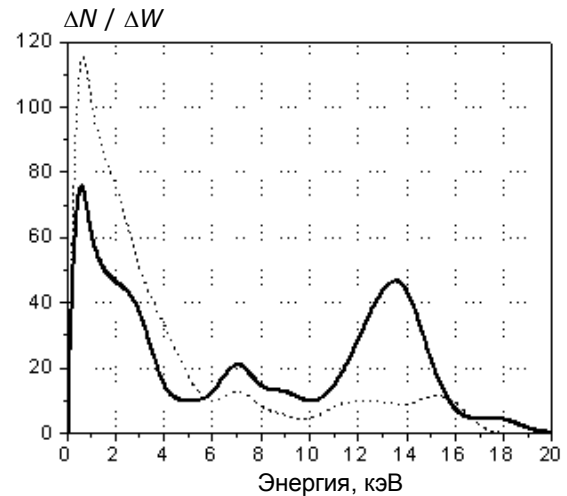


Рис. 3. Трансформация функции распределения электронов по энергиям в условиях генерации импульсов электрического поля по случайному закону

На рис. 4 представлены результаты 3D-моделирования изучаемого взаимодействия в магнитном и СВЧ-электрическом поле, реализуемым в источнике рентгеновского излучения CERA-RX. В расчетах стохастичность процесса обеспечивалась изменением частоты повторения пульсаций электрического поля на $\pm 5\%$ от 40 МГц по случайному закону (скважность — 2).

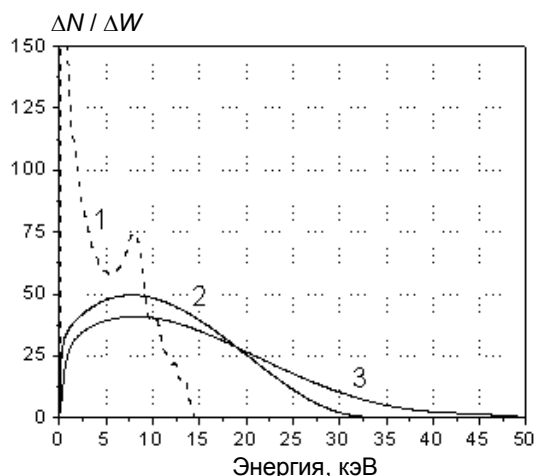


Рис. 4. Энергетические спектры электронов:

1 — пульсирующее электрическое поле отсутствует;
 2, 3 — в присутствии пульсирующего поля после 40 000 и 160 000 периодов колебания СВЧ-поля, соответственно

Представленные выше результаты расчетов показывают, что присутствие пульсирующего по случайному закону электрического поля при ЭЦР-взаимодействии может приводить к группировке достаточно большого числа электронов в области энергии, близкой к максимально достигаемой частицами. Следует отметить, что эффект группировки продемонстрирован для определенной конфигурации магнитного поля и, как видно из рис. 4, он отсутствует при 3D-моделировании изучаемого взаимодействия в магнитных и электрических СВЧ-полях, реализуемых в источнике рентгеновского излучения CERA-RX.

Заключение

В результате проведенных исследований установлена возможность существенного влияния пульсирующего электрического поля на ЭЦР-нагрев в неоднородном магнитном поле. Показано, что пульсации электрического поля по случайному закону приводят к трансформации функции

распределения электронов по энергиям: происходит ее обеднение частицами в низкоэнергетичной области и их группировки в области более высоких энергий.

Результаты работы представляют интерес не только с точки зрения повышения энергетической эффективности ЭЦР-источников рентгеновского излучения, но и для объяснения эффектов генерации быстрых электронов, возникающих за счет пульсаций электрических и магнитных полей в микроволновых плазменных источниках в ЭЦР-областях с высокими градиентами стационарного магнитного поля.

В ближайшее время будет проведено численное моделирование изучаемого процесса с учетом собственных полей плазмы по методу частиц в ячейке и его экспериментальное исследование.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы в рамках государственного контракта П 23-13 ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России".

Литература

1. Bacal M., Gaudin C., Bourdier A. et al.//Nature. 1996. V. 384. P. 421.
2. Gaudin C., Lamoureux M., Rouille C.//Phys. Med. Biol. 2001. V. 46. P. 835.
3. Сергеев А. Ф., Сычев И. А.//Геоматематизм и аэрономия. 2002. Т. 42. № 4. С. 550.
4. Faulconer D. W., Liboff R. L.//Phys. Fluids. 1972. V. 15. P. 1831.
5. Andreev V. V., Umnov A. M.// Plasma Sources Science and Technology. 1999. V. 8. P. 479.
6. Антонов А. Н., Буц В. А. и др.//Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 69. Вып. 11. С. 806.
7. Manuilenko O. V., Lee J. K.//Plasma Sources Sci. Technol. 2005. V. 14. No. 1. P. 98.
8. Андреев В. В., Балмашнов А. А., Калашиников А. В., Умнов А. М.//Прикладная физика. 2006. № 6. С. 80.
9. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. — Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995.

Influence of the pulse electric field on ECR heating in an inhomogeneous magnetic field

A. A. Balmashnov, A. M. Umnov

People's Friendship University of Russia, 6 Mikluho-Maklay str., Moscow, 117198, Russia

E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru

A strong influence of the randomized pulse electric field on ECR plasma heating in inhomogeneous magnetic field has been shown to be possible through a computer simulation. It has been found out the electron energy spectrum is shifted to the high energy region due to the interaction of the electrons with the pulse electric field under ECR. The number of low energy electrons therewith slumps down. The obtained effect is intended to be used in ECR sources for effective X-ray generation.

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

Keywords: electron cyclotron resonance, relativistic effect, inhomogeneous magnetic field, pulse electric field.

Bibliography — 9 references.

Received September 14, 2010