

УДК 533.9

Компактный ЭЦР-генератор характеристического излучения на основе коаксиального резонатора

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

Представлено описание компактного и энергетически эффективного ЭЦР-генератора направленного рентгеновского излучения узкого спектрального диапазона, созданного на основе коаксиального резонатора.

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

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

Введение

Широкая область возможного практического применения определяет интерес к созданию энергетически эффективных и компактных генераторов направленного рентгеновского излучения узкого спектрального диапазона—генераторов характеристического излучения [1]. Для этого могут быть использованы любые источники, формирующие потоки заряженных частиц с энергией, обеспечивающей возможность генерации характеристического излучения и, в частности, источники, нагрев электронов в которых осуществляется в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Энергетическая эффективность ЭЦР-нагрева, простота реализации такого типа устройств и низкая себестоимость позволяют предположить перспективность их использования. В целях локализации высокочастотных полей в этом типе устройств традиционно применяются полые резонаторы, а для пространственной локализации плазмы — магнитные поля пробочной конфигурации, что в свою очередь определяет геометрические размеры самого источника, которые могут быть значительно уменьшены использованием коаксиального резонатора и постоянных магнитов.

Существенным недостатком, снижающим энергетическую эффективность созданных на основе полых резонаторов ЭЦР-генераторов характеристического излучения, является достаточно широкий энергетический спектр электронов, высаживаемых на электрод-мишень, обусловленный отсут-

ствием механизма сепарации по энергиям частиц вблизи него. Решение этой проблемы путем ввода в резонатор электрода-мишени не является оптимальным, так как, с одной стороны, при ЭЦР-разряде нагретая фракция электронов практически пространственно не разделена с тепловыми электронами, а с другой — снижается добротность резонатора, поскольку возникают дополнительные потери СВЧ-энергии.

Известно, что относительно узкий энергетический спектр частиц может быть достигнут реализацией режима гиромагнитного авторезонанса [2], который, однако, более применим для формирования электронов с энергиями, превышающими 100 кэВ, а не для создания генераторов характеристического излучения, энергия квантов которого лежит в диапазоне единицы—десятки кэВ.

Повышение энергетической эффективности может быть достигнуто созданием условий, обеспечивающих попадание на электрод-мишень преимущественно электронов, которые при ЭЦР-нагреве приобрели энергию, достаточную для эффективной генерации характеристического излучения. Эти условия были реализованы в генераторе азимутально-симметричного потока рентгеновского излучения CERA-RX [3], в котором центральный электрод коаксиального резонатора одновременно являлся электродом-мишенью, а радиально-неоднородное магнитное поле с азимутально-симметричной зоной ЭЦР, удаленной от центрального электрода резонатора, обеспечивало азимутальный дрейф частиц и, соответственно, при достижении ими определенной энергии попадание на центральный электрод. В связи с тем, что аналогичный механизм сепарации нагретых электронов может быть реализован для генерации излучения в пространственно локализованной области, а также в связи с тем, что для практического применения представляют определенный интерес генераторы узконаправленного характеристического излучения, авторами была начата работа в этом направлении.

Балмашинов Александр Александрович, профессор.
Калашников Андрей Владимирович, научный сотрудник.
Степина Светлана Петровна, доцент.
Умнов Анатолий Михайлович, доцент.
Российский университет дружбы народов.
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.
Тел. (495) 955-09-23. E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru

Статья поступила в редакцию 20 июня 2011 г.

© Балмашинов А. А., Калашников А. В., Степина С. П., Умнов А. М., 2011

Цель работы — разработка и создание ЭЦР-генератора направленного рентгеновского излучения узкого спектрального диапазона, отличающегося от известных образцов ЭЦР-генераторов компактностью и энергетической эффективностью.

Постановка задачи и метод ее решения

Для создания направленного излучения узкого спектрального диапазона (характеристического излучения) предлагается дополнить центральную часть коаксиального резонатора источника CERA-RX [3] радиально направленным электродом-мишенью, протяженность которого определяет попадание на него электронов с определенной энергией, диаметр — локализацию области генерации, а материал — энергию излучаемых квантов. В предлагаемой конструкции энергетическая эффективность генерации излучения определяется созданием условий, при которых значительная часть электронов, создаваемых и нагреваемых в азимутально-симметричной области ЭЦР, высаживаются на электрод-мишень за счет градиентного дрейфа в радиально неоднородном магнитном поле при достижении ими энергии, соответствующей величине ларморовского радиуса, равного или превышающего расстояние между ЭЦР-зоной и электродом-мишенью. Это, в свою очередь, для конкретной конфигурации магнитного поля определяет напряженность электрического СВЧ-поля, величина которой должна обеспечивать достижение электронами энергии, с одной стороны, необходимой для генерации характеристического излучения, а с другой — определять незначительное изменение максимальной достигаемой электронной энергии (релятивистский фактор) за времена, равные периоду их азимутального дрейфа и периоду баунс колебаний.

Источник CERA-RX состоит из цилиндрического полуволнового коаксиального резонатора переменного сечения, возбуждаемого на основной ТЕМ-моду на частоте 2,45 ГГц. Центральная часть резонатора имеет диаметр 9 см и протяженность 3,2 см. Стационарное магнитное поле формируется в ней кольцеобразными постоянными магнитами. Реализуются две аксиально-симметричные ЭЦР-поверхности, расположенные на расстояниях 1,75 и 3,20 см от оси симметрии в медианной плоскости резонатора. Радиальный градиент магнитного поля вблизи ЭЦР-поверхностей составляет 140 Гс/см. Осевой электрод диаметром 2 см в своей центральной части имел радиально направленный цилиндрический выступ (электрод-мишень из меди) диаметром 0,2 см и протяженностью 0,3 см, что обеспечивало высадку на него электронов с минимальной энергией порядка 8 кэВ, центр вращения которых находится в ближней ЭЦР-зоне. Подробное описание CERA-RX и

картина профиля магнитного поля, создаваемого кольцеобразными магнитами, представлены в работе [3].

В проводимых экспериментах использовались также соленоиды, создающие дополнительное однородное магнитное поле B_c . Это позволяет увеличить его общий уровень в резонаторе, примерно, на 6 % относительно величины, соответствующей условию ЭЦР для электронов с массой покоя (т. е. $B_c \leq 0,06 \cdot B_{\text{эцр}}$) без существенного изменения пространственного распределения. Это дает возможность варьировать расстояние между ЭЦР-зоной и электродом-мишенью. В водороде СВЧ-разряд формировался в области около ближней аксиально-симметричной ЭЦР-поверхности. Коэффициент стоячей волны (КСВ) всей системы "СВЧ-генератор — резонатор" поддерживался на уровне 1,8.

Для определения области локализации генерации рентгеновского излучения использовалась ПЗС-матрица с форматом 1392×1032 элементов, чувствительная к квантам с энергией в диапазоне 1—10 кэВ. Спектр рентгеновского излучения регистрировался спектрометром с криостатическим SiLi-детектором в диапазоне 1—60 кэВ. Измерения осуществлялись с использованием бериллового вакуумного окна с толщиной 0,05 см и специальной системы, коллимирующей излучение и ориентированной в направлении электрода-мишени. Эта система имеет два экрана из свинца, каждый толщиной 0,8 см, которые расположены на расстоянии 30 см и имеют соосные отверстия с диаметром 0,05 см.

Исследование процессов, протекающих в разрабатываемом генераторе, осуществлялось как 3D-численным моделированием, так и экспериментально на модернизированном источнике рентгеновского излучения CERA-RX.

Для расчета магнитного поля использовались измеренные величины его индукции (точнее, компоненты 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 рассчитывались методом билинейной интерполяции. Предполагалось, что в начальный момент времени низкоэнергетичные электроны (с энергией 2 эВ) однородно распределены в области изменения стационарного магнитного поля в границах 0,5 % относительно резонансного значения (для электронов с массой покоя). Начальные направления импульсов электронов задавались случайным образом. Граничные условия для частиц определялись размерами центральной части коаксиального резонатора, т. е. производилась компенсация частиц, уходящих на электроды резонатора, новыми низкоэнергетичными электронами (2 эВ), возникающими в области значений магнитного поля, определенной ранее

как начальное пространственное условие. Общее число моделируемых электронов — 20000.

Как и в ранее представленной работе по ЭЦР нагреву плазмы в источнике CERA-RX [4], в расчетах использовалась безразмерная форма уравнения движения электронов с учетом релятивизма, которое решалось методом "с перешагиванием" по схеме Бориса [5]. Определялась зависимость энергетического спектра высаживаемых на электродмишень электронов от напряженности электрического СВЧ-поля и величины корректирующего магнитного поля, на основании которых, с учетом закона степени $3/2$, вычислялась величина, пропорциональная интенсивности характеристического излучения для каждого из рассматриваемых случаев. Время вычислительного эксперимента было больше максимального, обеспечивающего неизменность любого из определяемых спектров энергии, и во всех расчетах было одинаковым.

Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментально было установлено, что при давлениях рабочего газа $P = (4-90) \cdot 10^{-6}$ Торр и поступающей в резонатор СВЧ-мощности $W_{\text{СВЧ}} > 15$ Вт регистрируется тормозное и характеристическое излучения (с энергией квантов, соответственно, 8,05 и 8,92 кэВ), интенсивность которых зависит как от конкретного значения $W_{\text{СВЧ}}$, так и от величины корректирующего магнитного поля B_c . При этом область локализации характеристического излучения находится на электродмишени.

На рис. 1 представлены спектры экспериментально регистрируемого рентгеновского излучения для $P = 0,8 \cdot 10^{-5}$ Торр, $B_c = 0,03 \cdot B_{\text{эпр}}$, и $W_{\text{СВЧ}} = 20, 40, 60$ Вт. На рис. 2 показаны спектры излучения для $W_{\text{СВЧ}} = 40$ Вт и $B_c = (0,01; 0,02; 0,03) \cdot B_{\text{эпр}}$.

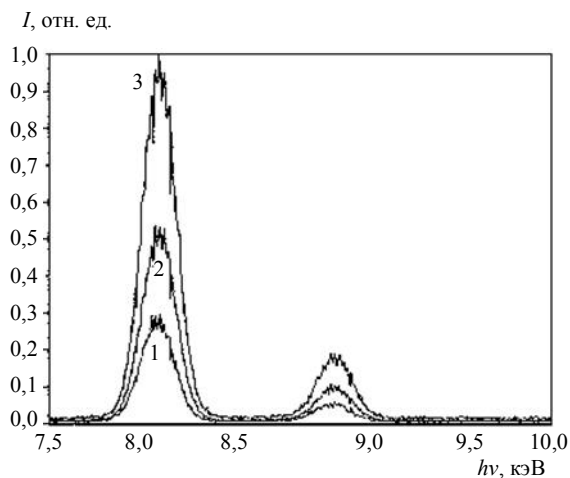


Рис. 1. Спектры рентгеновского излучения при давлении $P = 0,8 \cdot 10^{-5}$ Торр и корректирующем поле $B_c = 0,03 B_{\text{эпр}}$ для различных значений СВЧ-мощности, вводимой в генератор: 1 — $W_{\text{СВЧ}} = 20$ Вт; 2 — $W_{\text{СВЧ}} = 40$ Вт; 3 — $W_{\text{СВЧ}} = 60$ Вт

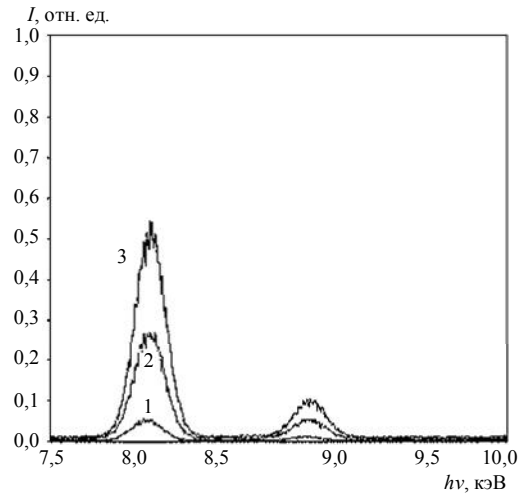


Рис. 2. Спектры рентгеновского излучения при $P = 0,8 \cdot 10^{-5}$ Торр, $W_{\text{СВЧ}} = 40$ Вт для различных значений корректирующего магнитного поля: 1 — $B_c = 0,01 \cdot B_{\text{эпр}}$; 2 — $B_c = 0,02 \cdot B_{\text{эпр}}$; 3 — $B_c = 0,03 \cdot B_{\text{эпр}}$

Результаты численного расчета в виде энергетических спектров высаживаемых на электродмишень электронов для различных значений B_c и $W_{\text{СВЧ}}$ изображены на рис. 3 и 4.

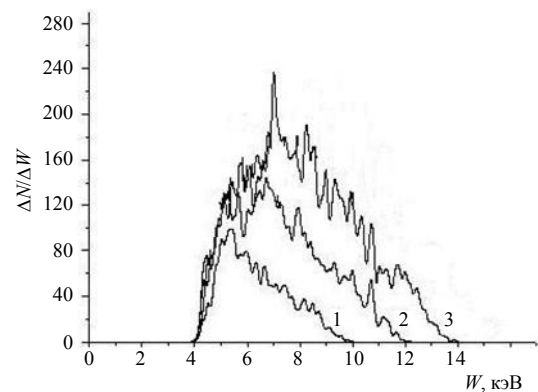


Рис. 3. Спектры энергий электронов (в усл. ед.), высаживаемых на электродмишень, для $B_c = 0,02 \cdot B_{\text{эпр}}$ при различных значениях напряженности электрического СВЧ-поля:

1 — $E = 100$ В/см; 2 — $E = 200$ В/см; 3 — $E = 250$ В/см

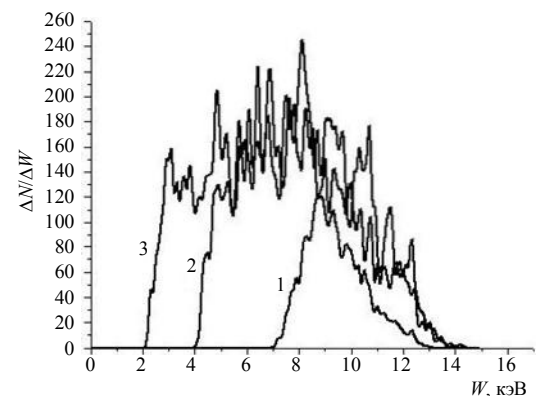


Рис. 4. Спектры энергий электронов (в усл. ед.), высаживаемых на электродмишень, для $E = 200$ В/см при различных значениях корректирующего магнитного поля: 1 — $B_c = 0,01 \cdot B_{\text{эпр}}$; 2 — $B_c = 0,02 \cdot B_{\text{эпр}}$; 3 — $B_c = 0,03 \cdot B_{\text{эпр}}$

Экспериментальные зависимости интенсивности в линиях характеристического излучения I_x от V_c и $W_{\text{СВЧ}}$, а также результаты соответствующих расчетов, полученных в вычислительном эксперименте для напряженностей электрического СВЧ-поля $E = 100, 200, 250$ В/см, представлены на рис. 5. Здесь значения интенсивности характеристического излучения (эксперимент) для $W_{\text{СВЧ}} = 20$ Вт и расчетная величина интенсивности для $E = 100$ В/см нормированы на единицу. При этом полагается, что значение $W_{\text{СВЧ}} = 20$ Вт соответствует в расчетах электрическому полю $E = 100$ В/см, а также учитывается, что $W_{\text{СВЧ}} \sim E^2$.

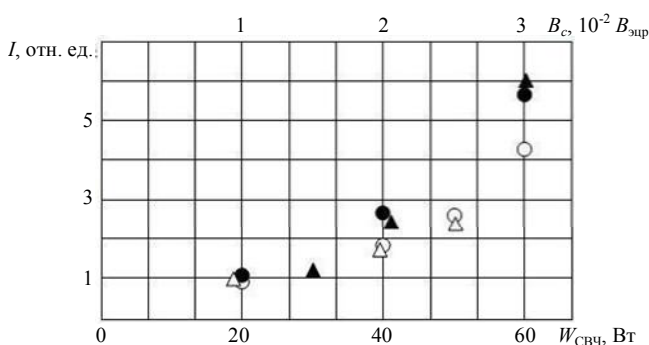


Рис. 5. Зависимости от V_c интенсивности в линиях характеристического излучения и результаты соответствующих расчетов (вычислительный эксперимент) при $W_{\text{СВЧ}} = 40$ Вт (○ — эксперимент; △ — вычисления) и от $W_{\text{СВЧ}}$ при $V_c = 0,03 \cdot V_{\text{эпр}}$ (● — эксперимент; ▲ — вычисления)

Анализ результатов проведенных исследований показывает хорошее соответствие между экспериментальными результатами и результатами, полученными в вычислительном эксперименте (см. рис. 5). Основываясь на этом, делаем вывод о том, что используемая в расчетах модель процессов, реализуемых в изучаемом генераторе рентгеновского излучения, в условиях проводимых исследований достаточно корректно их описывает. Это позволяет сделать еще один вывод, а именно, что с ростом интенсивности характеристического излучения

увеличивается энергетическая эффективность генератора, т. е. увеличивается отношение числа электронов с энергией более 8,9 кэВ, высаживаемых на электрод-мишень, к их полному числу, задаваемому как постоянная величина в численной модели.

Заключение

В результате проведенных исследований установлена возможность создания на основе коаксиального резонатора компактного ЭЦР-генератора направленного рентгеновского излучения узкого спектрального диапазона.

Результаты работы могут представлять практический интерес благодаря возможности использования разрабатываемого генератора в различных отраслях науки и техники, в частности, в технологиях производства полупроводниковых структур.

Продолжение начатой работы предполагается в направлении более детального изучения физических процессов, протекающих в изучаемом ЭЦР-генераторе и оптимизации его параметров.

Расчетная часть работы выполнена в рамках ГК № П 23-13 Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России".

Литература

1. Рабочее совещание "Рентгеновская оптика—2008". РФ. — Черноголовка, 6—9 октября 2008.
2. Andreev V. V., Umnov A. M. // Plasma Sources Science and Technology. 1999. V. 8. P. 479.
3. Андреев В. В., Балмашинов А. А., Калашиников А. В., Умнов А. М. // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 80.
4. Балмашинов А. А., Умнов А. М. // Там же. 2010. № 6. С. 40.
5. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. — Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995.

Compact ECR generator of directional characteristic X-ray based on a coaxial resonator

A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, S. P. Stepina, A. M. Umnov
 Russian University of People's Friendship,
 6 Mikluho-Maklay str., Moscow, 117198, Russia
 E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru

The energy-efficient and compact ECR generator of directional characteristic X-ray on basis of a coaxial resonator is described.

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

Keywords: plasma, electron cyclotron resonance, relativistic effect, inhomogeneous magnetic field, coaxial resonator, characteristic radiation, numerical modeling.

Bibliography — 5 references.

Received June 20, 2011