

УДК 533.9

Генерация пульсирующего с частотой 2,45 ГГц электрического поля в ЭЦР-источнике CERA-RX(C) и его влияние на эффективность генерации рентгеновского излучения

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

Установлен механизм возникновения пульсаций электрического поля на частоте поля накачки 2,45 ГГц, и показана возможность их влияния на эффективность генерации характеристического излучения в источнике CERA-RX(C).

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

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

Введение

Плазменные ЭЦР-источники (источники на основе электронного циклотронного резонанса) диссоциированных молекул и рентгеновского излучения имеют в настоящее время широкую область практического использования. Их совершенствование применительно к решению конкретных задач происходит путем использования различных конфигураций магнитных полей и типов СВЧ-колебаний, что позволяет локализовать области генерации заряженных частиц, их ускорение, накопление, характер пространственного распределения и транспортировку.

Одной из таких задач, интерес к которой определяется возможностью широкого применения в различных областях науки и техники, является создание компактного, энергетически эффективного ЭЦР-генератора направленного рентгеновского излучения узкого спектрального диапазона — генератора характеристического излучения [1]. В отличие от традиционно применяемых с этой целью полых резонаторов, в которых энергия электронов может превышать 100 кэВ [2], для решения этой задачи было предложено использовать коаксиальный резонатор [3], возбуждаемый на основной моде, а также постоянные кольцеобразные

магниты, формирующие радиально неоднородное магнитное поле с удаленной от осевого электрода резонатора узкой азимутально-симметричной областью ЭЦР. Это конструктивное решение позволило существенно снизить массу и габариты генератора рентгеновского излучения CERA-RX, энергия квантов которого определялась материалом осевого электрода, являющегося мишенью. Его энергетическая эффективность обеспечивалась реализацией условий, при которых на электрод-мишень высаживались электроны с энергией, зависящей от расстояния между этим электродом и ЭЦР-поверхностью. В генераторе CERA-RX азимутальный дрейф электронов в радиально неоднородном магнитном поле, в конечном итоге, вызывал азимутально-симметричный поток рентгеновского излучения.

Для создания направленного излучения узкого спектрального диапазона (характеристического излучения) 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 — локализацию области генерации излучения, а материал — энергию излучаемых квантов [4]. Было установлено, что в данной конструкции CERA-RX(C) энергетическая эффективность генерации направленного излучения определяется отношением потока высаживаемых на поверхность электрода-мишени (медь) электронов с энергией, превышающей 8,9 кэВ, к полному потоку электронов на него [5]. Увеличение интенсивности характеристического излучения с ростом СВЧ-мощности, поступающей в резонатор, и (или) с приближением ЭЦР поверхности к осевому электроду сопровождается снижением КПД генератора и возникновением дополнительного нагрета

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

Статья поступила в редакцию 20 июля 2012 г.

© Балмашнов А. А., Калашников А. В., Калашников В. В., Степина С. П., Умнов А. М., 2012

ва электрода-мишени за счет электронов, высаживаемых на него, но не производящих направленного рентгеновского излучения.

Дальнейшие исследования [6] показали, что в режимах генерации характеристического излучения в спектрах СВЧ-сигнала из резонатора возникают пики на удвоенной частоте поля накачки. Экспериментально было установлено, что причиной этого может являться наличие электрического СВЧ-поля, пульсирующего на основной частоте. В связи с этим начаты исследования, первые результаты которых представлены в данной работе.

Цель работы — установить механизм возникновения пульсирующего СВЧ электрического поля и степень его влияния на эффективность генерации характеристического излучения.

Постановка задачи и метод ее решения

Исследования механизма возникновения пульсирующего электрического СВЧ-поля в генераторе рентгеновского излучения CERA-RX(C) осуществлялось 3D-численным моделированием.

Генератор CERA-RX(C) описан ранее в работах [4, 5]. Он состоит из цилиндрического полуволнового коаксиального резонатора (2,45 ГГц) переменного сечения, возбуждаемого на основной моде (ТЕМ) магнетронным генератором М-105. Диаметр резонатора 9 см, его протяженность 3,2 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. Радиальный градиент магнитного поля вблизи ЭЦР-поверхности составляет 140 Гс/см. В проводимых экспериментах использовались также соленоиды, создающие однородное магнитное поле B_c . Это позволяло изменять общий уровень магнитного поля в резонаторе до 6 % относительно величины, соответствующей условию ЭЦР для электронов с массой покоя (т. е. $B_c \leq \pm 0,06 \cdot B_{ЭЦР}$) без существенного изменения пространственного распределения, и тем самым варьировать расстояние между зоной ЭЦР и электродом-мишенью.

Осевой электрод (диаметр — 2 см) в своей центральной части имеет радиально направленный цилиндрический выступ (электрод-мишень) диаметром $d = 0,2$ см и протяженностью $h = 0,3$ см (материал — медь).

Вычислительный эксперимент (3D-моделирование) осуществлялся по схеме, описанной ранее в работе [7]. Определялись временная зависимость числа электронов, высаживаемых на всю поверхность электрода-мишени, а также энергетический

спектр электронов, высаживаемых на его поверхностный слой толщиной 0,1 мм при различных значениях корректирующего магнитного поля B_c ($B_c = \alpha \cdot B_{ЭЦР}$). Вычисления проводились для неизменной величины амплитудного значения напряженности электрического СВЧ-поля в резонаторе E_0 и для случая, когда напряженность электрического поля зависит от числа попадающих на весь электрод-мишень электронов, создающих ее пульсации E_n . Величина E_n варьировалась. Для высаживаемых на поверхностный слой мишени электронов с энергией, превышающей 8,9 кэВ, с учетом закона степени 3/2 вычислялись зависимости изменения величины, пропорциональной интенсивности характеристического излучения ΔI , от величины E_n для различных значений α . Одновременно предполагалось, что постоянная составляющая потенциала на осевом электроде отсутствует, так как в исследуемом диапазоне энергий коэффициент вторичной эмиссии электронов составляет единицу, а время их выхода из мишени порядка 10 нс.

Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментально было установлено, что только в режимах генерации характеристического излучения в спектрах СВЧ-сигнала из резонатора возникают пики на удвоенной частоте поля накачки (рис. 1), амплитуда которых зависит от условий разряда, а именно, давления рабочего газа, напряженности электрического СВЧ-поля, величины B_c . При этом частотный спектр основной гармоники уширяется относительно величины, соответствующей наличию СВЧ-разряда и отсутствию характеристического излучения. Также было установлено, что при возбуждении резонатора пульсирующим СВЧ-полем, создаваемым путем детектирования СВЧ-волны, в спектре сигнала из резонатора наблюдается аналогичный пик на второй гармонике.

Для выявления причины изменения в спектрах СВЧ-излучения из резонатора был проведен вычислительный эксперимент, показавший, что высадка электронов на электрод-мишень происходит в пульсирующем режиме (рис. 2, а) и преимущественно на один из ее краев (рис. 2, б). Представленные на рис. 3 результаты расчетов зависимости величины, пропорциональной изменению интенсивности характеристического излучения ΔI , от E_n при различных B_c показывают "пороговый" характер эффекта влияния пульсирующего электрического поля и нелинейность зависимости ΔI от E_n . Они находятся в хорошем соответствии с опубликованными ранее в работе [4] результатами экспе-

риментального исследования зависимости интенсивности характеристического излучения от СВЧ-мощности $W_{\text{СВЧ}}$, поступающей в резонатор (рис. 4). Эти же расчетные результаты (см. рис. 3) близки с результатами соответствующих расчетов (вычислительный эксперимент) [4] без учета влияния пульсирующего электрического поля при $B_c = 0,02 \cdot B_{\text{ЭЦР}}$ и от B_c при $W_{\text{СВЧ}} = 60$ Вт (см. рис. 4). На этом же рисунке присутствует расчетное значение, обозначенное как \square , которое ранее не было представлено ввиду отсутствия объяснения несоответствия его экспериментально полученному результату. Полученные зависимости показывают наличие порогового значения магнитного поля B_c , соответствующего отклонению экспериментальных значений от расчетных (в расчетах учет влияния пульсаций электрического СВЧ-поля отсутствует), которое при $B_c = 0,02 \cdot B_{\text{ЭЦР}}$ составляет $\approx 24\%$, а также что при варьировании напряженности электрического поля $W_{\text{СВЧ}}$ отклонение не наблюдается.

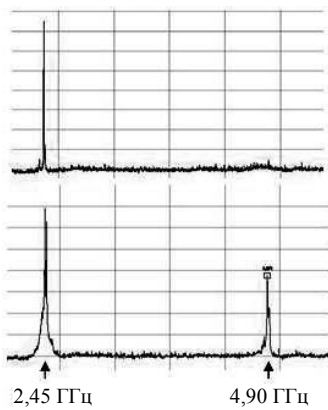


Рис. 1. Экспериментальные спектры СВЧ-излучения из резонатора при отсутствии (верхний график) и наличии характеристического рентгеновского излучения (нижний график).

Давление $P = 0,4 \cdot 10^{-5}$ Торр, магнитное поле $B_c = 0,02 \cdot B_{\text{ЭЦР}}$, мощность СВЧ-излучения $W_{\text{СВЧ}} = 40$ Вт

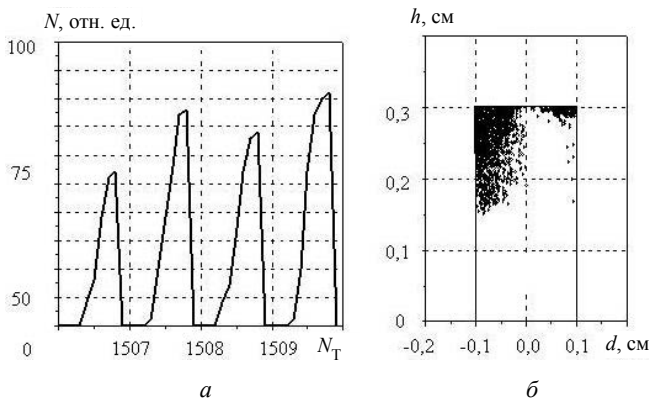


Рис. 2. Вычислительный эксперимент:

a — зависимость числа электронов N , высаживаемых на электрод-мишень, от времени; b — локализация высаживаемых электронов на мишени. $E_0 = 250$ В/см, $B_c = 0,02 \cdot B_{\text{ЭЦР}}$, N_T — номер периода колебаний СВЧ-поля

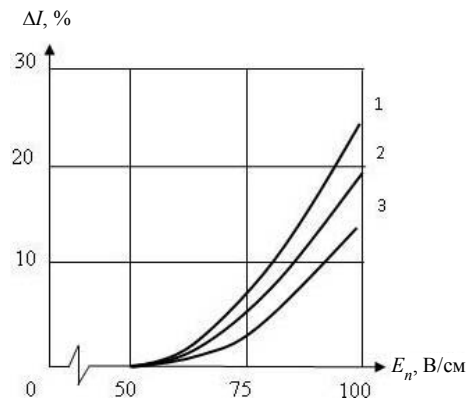


Рис. 3. Вычислительный эксперимент—изменение интенсивности характеристического рентгеновского излучения ΔI от амплитудного значения пульсирующего электрического поля E_n для различных B_c :
1 — $B_c = 0,018 \cdot B_{\text{ЭЦР}}$; 2 — $B_c = 0,019 \cdot B_{\text{ЭЦР}}$;
3 — $B_c = 0,02 \cdot B_{\text{ЭЦР}}$. Везде $E_0 = 250$ В/см

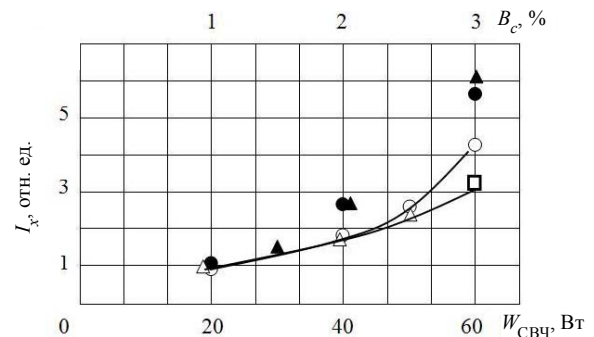


Рис. 4. Экспериментальные зависимости от B_c интенсивности в линиях характеристического рентгеновского излучения I_x и результаты соответствующих расчетов (вычислительный эксперимент) без учета влияния пульсирующего электрического поля:
при $W_{\text{СВЧ}} = 60$ Вт: \circ — эксперимент; Δ и \square — вычисления;
от $W_{\text{СВЧ}}$ при $B_c = 0,02 \cdot B_{\text{ЭЦР}}$: \bullet — эксперимент; \blacktriangle — вычисления [4]

Представленные результаты (см. рис. 4) полностью соответствуют логике изучаемого эффекта, так как увеличение B_c приводит к преимущественному уширению спектра электронов в низкоэнергетическую область [4]. Это создает условие для незначительного роста величины характеристического излучения за счет малого увеличения частиц с энергией, превышающей 8,9 кэВ, но обеспечивает значительное увеличение числа низкоэнергетических электронов, высаживаемых на электрод-мишень и определяющих величину E_n . При этом увеличение $W_{\text{СВЧ}}$ сопровождается преимущественным увеличением числа электронов с энергией, превышающей 8,9 кэВ, которые доминирующим образом определяют интенсивность излучения [4].

Таким образом, можно констатировать, что результаты вычислительного эксперимента находятся в соответствии с ранее экспериментально полученными результатами и демонстрируют возможность существенного влияния возникающего пульсирующего (с частотой поля накачки) элек-

трического поля на генерацию характеристического излучения в CERA-RX(C).

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что высадка электронов на электродмишень приводит к возникновению пульсирующего с частотой СВЧ-волны накачки электрического поля, способного оказывать существенное влияние на генерацию характеристического рентгеновского излучения в источнике CERA-RX(C). При этом, в отличие от ранее проводимых исследований влияния пульсирующего электрического поля на ЭЦР-нагрев [7], в исследуемом случае реализуется автосинхронизация процесса взаимодействия.

Результаты работы могут представлять практический интерес в виду возможности реализации изучаемого процесса в системах с ЭЦР-нагревом частиц.

Продолжение начатой работы предполагается в направлении более детального изучения физических процессов, протекающих в генераторе характеристического рентгеновского излучения CERA-RX(C).

Литература

1. Рабочее совещание "Рентгеновская оптика—2008". РФ, Черногловка, 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., Калашиников А. В., Степина С. П., Умнов А. М. // Там же. 2011. № 6. С. 100.
5. Балмашинов А. А., Калашиников А. В., Степина С. П., Умнов А. М. // Тез. док. VI Междунар. симпозиум по теоретической и прикладной плазмодимии. (ISTAPC-2011). — Иваново. 2011. С. 361.
6. Балмашинов А. А., Калашиников А. В., Калашиников В. В., Степина С. П., Умнов А. М. // Тез. док. XXXIX Междунар. (Звенигородская) конф. по физике плазмы и УТС. — Звенигород. 2012. С.168.
7. Балмашинов А. А., Умнов А. М. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 40.

Generation of the 2.45 GHz pulsating electric field in the CERA-RX(C) source and its influence on X-ray generation efficiency

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

The mechanism of the occurrence of the electric field pulsations at the frequency of 2.45 GHz is found out. The influence of the pulsations on the efficiency of characteristic X-ray generation in CERA-RX(C) is shown.

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

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

Bibliography — 7 references.

Received July 20, 2012