

УДК 533.9

ЭЦР-источник рентгеновского излучения CERA-RX

В. В. Андреев, А. А. Балмашинов, А. В. Калашников, А. М. Умнов
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Разработана новая схема электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) — источника радиального, азимутально-симметричного потока рентгеновского излучения малой мощности (до 50 Р/ч) с энергией квантов до 20 кэВ, в котором используются коаксиальный резонатор и постоянные кольцеобразные магниты. Экспериментально установлены зависимости интенсивности и спектральных характеристик излучения от типа и давления рабочего газа, а также от СВЧ-мощности (до 100 Вт), вводимой в резонатор. Результаты исследований указывают на возможность создания энергетически эффективного компактного ЭЦР-источника рентгеновского излучения с регулируемой интенсивностью потока квантов и их энергией.

Наряду с такими широко используемыми в различных областях науки и техники устройствами, генерирующими рентгеновское излучение, как рентгеновские трубки различных типов, серьезный интерес представляют источники, в которых ускорение электронов осуществляется в условиях ЭЦР [1].

Компактность и энергетическая эффективность, а также отсутствие в устройствах соответствующей жесткости излучения статической разности потенциалов, ускоряющей электроны, определяют перспективность их использования.

В ЭЦР-источниках рентгеновского излучения традиционно применяются полые резонаторы, помещенные в зеркальную магнитную ловушку, что определяет их габаритные размеры. В случае генерации как тормозного, так и характеристического излучений энергетическая эффективность их работы определяется распределением по энергии нагретой фракции электронов, которое, как показывают расчеты и эксперименты работы [2], является в сильной степени размытым. Разработанный и представленный в данной работе ЭЦР-источник рентгеновского излучения лишен этого недостатка.

Цель работы — разработка, создание и исследование возможности оптимизации режима работы нового типа ЭЦР-источника рентгеновского излучения (CERA-RX), отличающегося от известных компактностью и реализацией условий, при которых на электрод-мишень могут быть высажены электроны определенной энергии.

Описание источника CERA-RX и средств диагностики параметров рентгеновского излучения

Источник CERA-RX разработан на базе источника радиального, азимутально-симметричного потока микроволновой плазмы CERA-R [3] и является продолжением начатых еще в 80-х годах работ по созданию микроволновых источников плазмы серии CERA. Основное отличие CERA-RX [4] от CERA-R состоит в уменьше-

нии диаметра центрального электрода резонатора (электрод-мишень — латунь, подводящие электроды — медь и молибден) до 0,5 см и в изменении способа его возбуждения — применена штыревая антенна. Диаметр источника 9 см, его длина 14 см.

Схематически CERA-RX представлен на рис. 1. Он состоит из коаксиального резонатора переменного сечения и системы кольцеобразных магнитов, формирующих вдоль оси резонатора (ось Z) магнитное поле, профили которого представлены на рис. 2, а, б.

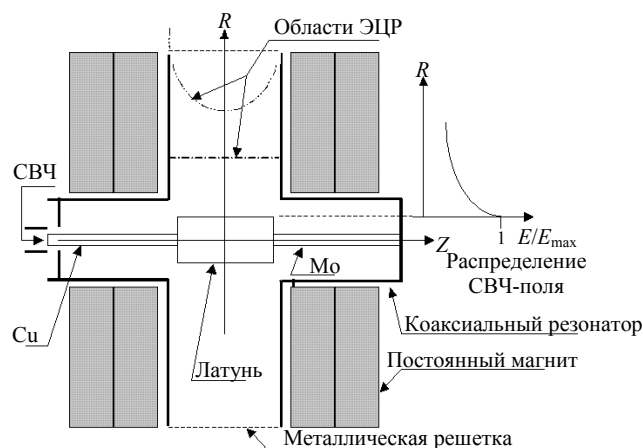


Рис. 1. Схема ЭЦР-источника рентгеновского излучения CERA-RX

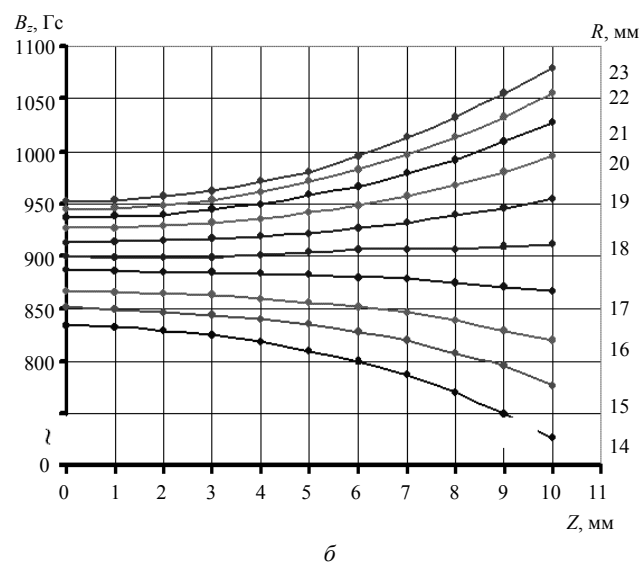
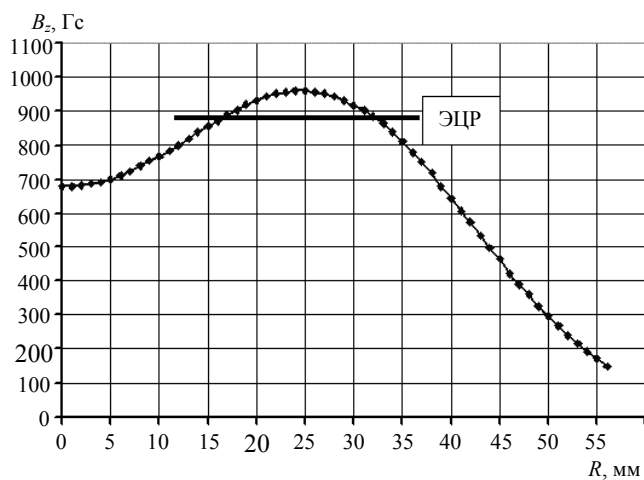


Рис 2. Зависимость:

a — продольной компоненты магнитного поля (B_z) от расстояния до оси симметрии источника для $Z=0$;
б — распределение магнитного поля (B_z) вдоль системы (ось Z) для различных расстояний от ее оси (R)

В работе использовался магнетронный генератор (М-107), работающий в непрерывном режиме на частоте $f = 2,47$ ГГц, мощность которого плавно варьировалась. Добротность ненагруженного резонатора составляла 280.

В отличие от CERA-R в источнике рентгеновского излучения CERA-RX формирование плазмы осуществлялось в ближней к оси системы области ЭЦР, расположенной на расстоянии 1,7 см ($Z = 0$) от нее (в CERA-R использовалась дальняя ЭЦР-зона), что обеспечивало как нагрев электронной компоненты плазмы, так и возможность высадки энергетических частиц на центральный электрод.

Диагностика параметров рентгеновского излучения осуществлялась с помощью прибора ДРГЗ-01 (диапазон 15—1250 кэВ) и сцинтилляционного (NaI(Tl), 24×24) спектрометра. Для спектрального анализа использовали многоканальный амплитудный анализатор импульсов АИ-1024, а также спектрометр, созданный на основе РХИ-5122. Результаты калибровки спектрометра: энергетическое разрешение по γ -линии (59,65 кэВ) ^{241}Am —

16 % с эффективностью регистрации 92 % для энергий не выше 30 кэВ, линейность амплитудно-частотных характеристик блоков регистрации установлена их калибровкой по эталонным источникам излучения (комплект образцовых спектрометрических изотопов ОСГИ-10 № 89461994) ^{241}Am и ^{133}Ba .

Результаты экспериментов

Экспериментально установлено, что независимо от типа рабочего газа в диапазоне рабочих давлений $P_g = (2—9) \cdot 10^{-5}$ Торр при мощности СВЧ-генератора более $P = 25$ Вт в разрядной камере формируется хорошо локализованное в ближней зоне ЭЦР плазменное кольцо и регистрируется пик рентгеновского излучения, энергия квантов которого не зависит от условий разряда (тип рабочего газа, его давление, СВЧ-мощность) и составляет $(8,5 \pm 1,0)$ кэВ, что соответствует характеристическому излучению с K -уровней следующих элементов: Cu: ($K \rightarrow L$) — 8,05 кэВ, ($K \rightarrow M$) — 8,93 кэВ; Zn: ($K \rightarrow L$) — 8,64 кэВ, ($K \rightarrow M$) — 9,6 кэВ, входящих в состав электрода-мишени (латунь). При этом работа источника CERA-RX более 10 мин привела к появлению в спектре излучения дополнительного пика, соответствующего характеристическому излучению с K -уровня молибдена (($K \rightarrow L$) — 17,5 кэВ, ($K \rightarrow M$) — 19,7 кэВ), что свидетельствует о распылении подводящего молибденового электрода.

Для проверки этого предположения была проведена обработка электродов источника плазмой СВЧ-разряда в условиях относительно высокого давления ($P_g = (5—10) \cdot 10^{-4}$ Торр, водород, $P = 90$ Вт) в течение 5 мин, которая, как мы предполагаем, привела к значительному распылению подводящего электрода из молибдена, что сопровождалось регистрацией в спектре рентгеновского излучения ($P_g = (2—9) \cdot 10^{-5}$ Торр, водород, аргон) пика, соответствующего энергии квантов ≈ 18 кэВ, значительно большей, чем ранее амплитуды. При этом было установлено:

- максимум интенсивности излучения (ДРГЗ-0,1) смещается в область более высоких давлений при увеличении СВЧ-мощности (рис. 3);
- линейный рост интенсивности излучения с увеличением СВЧ-мощности (рис. 4);
- плотность потока рентгеновского излучения на расстоянии 40 см от оси источника после прохода через выходное окно вакуумной системы (плексиглас, толщина 0,5 см) составляет $40 \text{ мкР}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ при давлении водорода в системе $9 \cdot 10^{-5}$ Торр и мощности СВЧ-генератора 90 Вт. Расчет показывает, что в этих условиях ввиду азимутальной симметрии источника интегральная мощность рентгеновского излучения более 50 Р/ч.

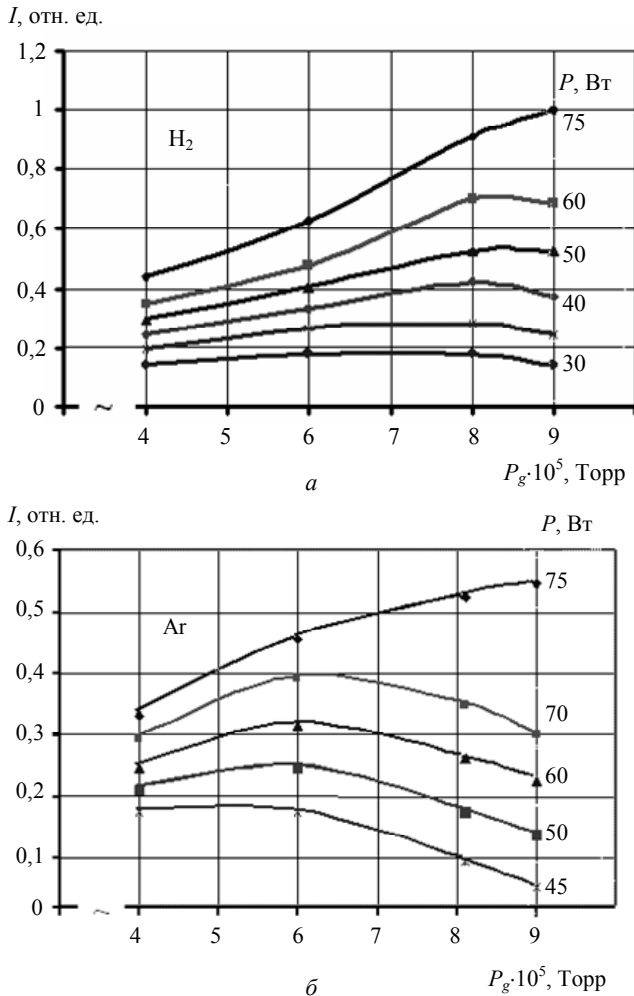


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения (I) от типа и давления рабочего газа в системе для различных значений СВЧ-мощности, поступающей в источник:
а — H_2 ; б — Ar

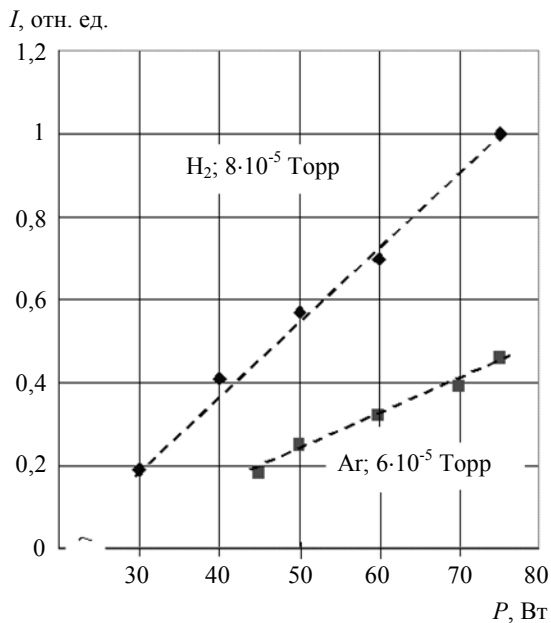


Рис. 4. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения (I) от СВЧ-мощности, поступающей в источник

Заключение

Представленные результаты подтверждают идею, положенную в основу работы источника рентгеновского излучения CERA-RX, заключающуюся в создании условий, при которых ЭЦР-нагрев электронов плазмы в азимутально-симметричном, радиально неоднородном стационарном магнитном поле приводит к попаданию на центральный электрод коаксиального резонатора частиц, энергия которых определяется соотношением

$$LB = \sqrt{2} \frac{m_0 c^2}{e} \sqrt{\frac{W}{m_0 c^2}},$$

где L — расстояние между зоной ЭЦР и центральным электродом резонатора;

B — величина индукции магнитного поля вблизи поверхности центрального электрода;

m_0 — масса покоя электрона;

c — скорость света в вакууме;

W — поперечная по отношению к силовым линиям магнитного поля энергия электронов.

Из представленной формулы видно, что геометрия системы и профиль магнитного поля однозначно определяют не только энергию высаживаемых частиц, но и пространственную локализацию области их взаимодействия с электродом. Эти два фактора снижают тепловую нагрузку на электрод-мишень и увеличивают энергетическую эффективность работы источника CERA-RX по сравнению с традиционными ЭЦР-источниками рентгеновского излучения, в которых используются полые резонаторы. Ширина спектра энергии высаживаемых на электрод-мишень электронов зависит в основном от осевой симметрии параметров элементов источника.

Установлено, что наряду с вышесказанным, энергетическая эффективность работы источника CERA-RX также определяется типом рабочего газа, и что в условиях проводимых экспериментов предпочтительным является водород (см. рис. 4).

Показана возможность управления интенсивностью излучения и его энергетическим спектром путем выбора материала электрода мишени и условий СВЧ-разряда.

Считаем, что на основе CERA-RX могут быть созданы компактные источники азимутально-симметричного и направленного потоков рентгеновского излучения с варьируемой жесткостью и интенсивностью для использования в различных областях, в частности, в медицине и биологии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Л и т е р а т у р а

1. Сергеев А. Ф., Сычев И. А.// Геомагнетизм и аэронавигация. 2002. Т. 42. № 4. С. 550.
2. Андреев В. В., Умнов А. М., Балмашинов А. А., Никитин Г. В., Саванович В. Ю.// Известия Академии наук. Сер. физическая. 2003. Т. 67. № 9. С. 1314.
3. Андреев В. В., Балмашинов А. А., Калашников А. В., Умнов А. М.// Прикладная физика. 2005. № 6. С. 38.
4. Андреев В. В., Балмашинов А. А., Калашников А. В., Умнов А. М.: Тез. докл. XXXIII Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. — Звенигород, 2006.

Статья поступила в редакцию 18 июля 2006 г.

X-ray creation in ECR plasma source CERA-RX

V. V. Andreev, A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, A. M. Umnov
People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

The coaxial vacuum cavity and permanent disk magnets are used to form azimuthally symmetric flux of X-ray radiation. It has been found experimentally dependence of X-ray intensity on type and pressure of working gas as well as microwave power. We suppose that this type of a source can be used to create X-ray with variable intensity and quantum energy in a wide region.