

УДК 537.531.2

Волноводный ЭЦР-источник рентгеновского излучения для малодозовой интроскопии

К. Ф. Сергейчев, В. Ю. Иониди, Д. М. Карфидов, Н. А. Лукина

Показано, что "точечная" мишень в стандартном вакуумированном волноводе в магнитном поле зеркальной ловушки, образованной двумя дисковыми магнитами, намагниченными соосно в направлении, перпендикулярном вектору электрического поля, является источником тормозного рентгеновского излучения электронов, ускоренных в ЭЦР-разряде, причем с широким спектром энергий квантов до 0,8 МэВ. Мощность дозы источника ~ 1 Р/ч. Источник, питаемый от бытовой СВЧ-печи, имеет небольшие размеры и вес, прост в эксплуатации и пригоден в качестве лабораторного инструмента, в частности, в радиобиологии и интроскопии. Проходя через объект, поле рентгеновского излучения регистрируется цифровой камерой с помощью высокочувствительного рентгенофлуоресцентного экрана, который преобразует его в оптическое изображение.

PACS: 52.50.Sw, 52.25.Os, 07.85.Fv

Ключевые слова: СВЧ, волновод, вакуум, зеркальная ловушка, плазма, электрон, постоянный магнит, ЭЦР, тормозное рентгеновское излучение, флуоресцентный экран, цифровая регистрация изображения.

Введение

В работах [1—5] показана возможность генерации тормозного рентгеновского излучения с широким спектром энергий $\epsilon \leq 0,8$ МэВ за счет ускорения электронов плазмы в поле зеркальной ловушки поперечным электромагнитным полем СВЧ-волны при электронном циклотронном резонансе (ЭЦР) между гирочастотой электронов в объеме ловушки и частотой ускоряющего электромагнитного СВЧ-поля [6].

В работах [1—5] ловушка была образована либо полем катушек, питаемых постоянным (или импульсным током), либо полем постоянных дисковых магнитов [2], намагниченных в направлении их оси. В [1, 3] вакуумируемая ускорительная камера (предельный вакуум $\sim 10^{-6}$ мм рт. ст.) с размером в поперечнике $\sim 0,4$ м располагалась между двумя идентичными объемными катушками. СВЧ-излучение, генерируемое магнетроном бытовой печи, вводилось через радиопрозрачные окна как

вдоль, так и поперек продольной оси ловушки, в последнем случае при условии, чтобы электрическая составляющая СВЧ-поля была ориентирована перпендикулярно оси ловушки. Режим распространения бегущей волны в камере допускал возбуждение волноводных мод высокого порядка.

В [2] в пространстве между дисковыми магнитами помещалась небольшая камера цилиндрической формы, которая одновременно играла роль резонатора СВЧ-колебаний типа TE_{111} с возбуждением через боковое отверстие связи с прямоугольным волноводом, питаемым магнетроном. Тормозное рентгеновское излучение электронов от мишени или стенок камеры, бомбардируемых ускоренными электронами, выводилось через окно. В этих экспериментах частота магнетрона — 2,45 ГГц, средняя мощность изменялась в пределах 700—150 Вт.

Ускорение электронов в ЭЦР-устройствах происходит в поверхностных резонансных зонах магнитного поля при выполнении условия:

$$\omega_{Be} = \omega_0, \tag{1}$$

когда электронная гирочастота

$$\omega_{Be} = eB(r, z) / \gamma m_0 \tag{2}$$

и круговая частота греющего СВЧ-поля $\omega_0 = 2\pi f_0$ оказываются равными. Здесь B — магнитная индукция; e, m_0 — заряд и масса покоя электрона, а

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{\perp}^2}{c^2}}} = 1 + \frac{w_{\perp}}{m_0 c^2} \tag{3}$$

Сергейчев Константин Фёдорович, заведующий лабораторией.

Карфидов Дмитрий Михайлович, старший научный сотрудник.

Лукина Наталия Александровна, научный сотрудник.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. 8 (499) 503-82-39. E-mail: kserg@fpl.gpi.ru

Иониди Василий Юрьевич, руководитель НТЦ, АО "Агрогаз".

Россия, 141190, Фрязино, Заводской проезд, д. 2.

Статья поступила в редакцию 20 июля 2012 г.

© Сергейчев К. Ф., Иониди В. Ю., Карфидов Д. М., Лукина Н. А., 2012

релятивистский фактор; v_{\perp} и w_{\perp} — поперечные составляющие скорости и энергии электрона, соответственно, c — скорость света.

Для электронов с энергией $w_{\perp} \sim 1$ МэВ, рождающих тормозное рентгеновское излучение, это соответствует двукратному увеличению релятивистской массы электрона ($\gamma \sim 2$) и снижению резонансной магнитной индукции и гирочастоты в соответствии с (2). В нерелятивистском случае ($\gamma \approx 0$) для частоты магнетрона $f_0 = 2,45$ ГГц резонансное значение индукции магнитного поля $B_{ECR} = 875$ Гс. В [2] резонансное условие (1) выполнялось, в частности, в центральном сечении камеры, где амплитуда поперечной электрической составляющей ускоряющего поля колебаний TE_{111} максимальна. В этом случае резонансная магнитная поверхность вблизи оси ловушки лежит в центральной секущей плоскости. Если индукция в центре ловушки меньше резонансного значения, $B_{0,0} < B_{ECR}$, как в [1, 3, 4], то резонансные поверхности принимают вид двуполостного гиперboloида вращения относительно ее оси, что также отмечено в [2].

Известно, что в отсутствие сторонних полей и столкновений с остаточным газом электрон обладает магнитным моментом [6]:

$$\mu = \frac{w_{\perp}}{B}, \quad (4)$$

который в нерелятивистском случае является адиабатическим инвариантом его движения. В продольно неоднородном магнитном поле, изменяющемся вблизи оси ловушки по параболическому закону

$$B(0, z) = B_{0,0}(1 + kz^2), \quad (5)$$

электрон испытывает действие возвращающей силы

$$F = -\mu \frac{dB_z}{dt}, \quad (6)$$

пропорциональной смещению центра его орбиты от положения равновесия, т. е. при $z = 0$. Это значит, что ведущий центр орбиты электрона с начальным моментом (4) при $|z| > 0$ будет совершать в ловушке продольные гармонические осцилляции (bounce-колебания) относительно $z = 0$ с частотой

$$\Omega = \sqrt{\frac{2k\mu B_{0,0}}{m}} = \sqrt{\frac{2kw_{\perp}}{m}}. \quad (7)$$

В отсутствие внешних сил полная энергия электрона w и, соответственно, его полная скорость v остаются постоянными. В частности, справедливо соотношение:

$$v^2 = v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2 = \text{const}. \quad (8)$$

Все электроны (независимо от того, обходят они ось ловушки или нет) сохраняют адиабатическую инвариантность магнитного момента элек-

трона, т. е. $\mu = \text{const}$. Сказанное справедливо, если изменение магнитного поля на одном витке траектории электрона мало. Из инвариантности в нерелятивистском случае вытекает то, что изменение радиуса орбиты ρ следует за изменением магнитного потока так, что поток, охватываемый циклотронной орбитой с ларморовским радиусом, также является инвариантным [7]:

$$J = \pi \rho^2 B = \text{const}. \quad (9)$$

Двигаясь в ловушке в присутствии поперечного электрического поля СВЧ-волны E_{\perp} и проходя область резонанса за конечное время Δt , электрон ускоряется и набирает энергию

$$\Delta w_{\perp} = 2(eE_{\perp})^2 \Delta t^2 / m, \quad (10)$$

с которой он движется к противоположной резонансной области. Последовательно получая приращение энергии, определяемое соотношением (10), электроны периодически осциллируют между зонами ускорения при $|z| \geq 0$, участвуя в bounce-колебаниях с нарастающей частотой (8).

Bounce-колебания подобны движению маятника между точками приложения вынуждающей силы. Особенность этого "адиабатического маятника" заключается в том, что в нерелятивистском пределе с ростом энергии электрона его амплитуда не меняется, но увеличивается частота его колебаний [3, 4]. Рост поперечной энергии и магнитного момента способствует лучшему удержанию электронов в ловушке, снижая вероятность их столкновений и попадания в конус потерь. Уход электронов в конус потерь возможен лишь вследствие их рассеяния в остаточном газе и плазме из-за столкновений. Зоны ЭЦР-ускорения оказываются "привязанными" к точкам старта и остановки "адиабатического маятника", где энергия СВЧ-поля направленно преобразуется в поперечную составляющую энергии электронов w_{\perp} . Лучшему удержанию электронов в ловушке способствует экспоненциальное уменьшение сечений как упругих, так и неупругих столкновений электронов с нейтральными частицами с ростом энергии в области энергий $w_{\perp} \approx 10^2 - 10^6$ эВ, в которой электроны удерживаются ловушкой практически без рассеяния и ускоряются в режиме "убегания" [8]. В [3] на основании наблюдаемого темпа ускорения электронов высказано предположение об автофазировке актов ускорения в резонансных зонах, хотя было бы более естественным полагать, что ускорение в резонансных зонах должно быть стохастическим.

За счет редких, но, тем не менее, имеющих место ионизирующих соударений электронов в газе при давлении $\sim 10^{-5}$ мм рт. ст. в ловушке рожда-

ются вторичные электроны, т. е. развивается электронная лавина, переходящая в самостоятельный ЭЦР-разряд с образованием плазмы высокой степени ионизации. Характерное время развития такого разряда составляет $\sim 10^{-6}$ с.

Суммарное магнитное поле электронов плазмы направлено противоположно внешнему полю, что известно как диамагнетизм плазмы, который понижает магнитную индукцию на оси ловушки, тем самым сдвигая при этом области ЭЦР-ускорения от центра к "пробкам" (сгущениям магнитного потока). Таким образом, в общем случае ЭЦР-ускорение электронов происходит в значительном объеме ловушки между самосогласованными резонансными зонами, сопровождаясь продольными bounce-колебаниями электронных орбит. Отметим, что инвариантность магнитного момента сохраняется только на полупериодах продольного дрейфа между актами ускорения.

В релятивистском приближении ($\gamma > 1$) радиус орбиты электрона ρ выражается формулой:

$$\rho = \frac{mc^2}{eB} \sqrt{\gamma^2 - 1}. \quad (11)$$

При этом адиабатический инвариант (9) принимает вид:

$$J = \frac{\pi(m_0c)^2(\gamma^2 - 1)}{eB}. \quad (12)$$

Для попадания теперь в резонанс с частотой ускоряющего поля (1) электрону с возросшей массой согласно (2) нужно находиться в γ раз более сильном магнитном поле ловушки. Однако рост w_{\perp} с изменением γ в пределах $1 < \gamma < 1,618$ не возможен, так как инвариант (12) не дает электрону при bounce-колебаниях продвинуться к резонансной поверхности. Формально соотношения (1), (2) и (12) удовлетворяются при $(\gamma^2 - 1) = \gamma$ [3]. Корень этого уравнения $\gamma = 1,618$. Соответствующая этому значению γ энергия электрона близка к 300 кэВ. То, что электронам все же удается ускоряться до этой энергии, преодолевая инвариант (12), можно предположить, связано с релятивистскими механизмами коллективного взаимодействия частиц плазмы, например, с неустойчивостью отрицательной массы (НОМ) [9, 10]. Механизм неустойчивости отрицательной массы в [9] был продемонстрирован на примере релятивистской группы протонов заданной энергии, вращающихся в магнитном поле.

В [5] исследовалось удержание плазмы и ЭЦР-нагрев электронов в открытой магнитной ловушке "Огра-4" при накачке энергии от мощного (0,5 МВт) импульсного гиротрона с длиной волны 8 мм при длительности импульса ~ 50 мс. Основной результат работы [6] связан с исследованием

трех основных групп электронов плазмы разряда: холодных (~ 100 эВ), теплых (1—10 кэВ) и релятивистских (~ 100 кэВ) электронов, причем концентрации холодных и релятивистских электронов $\sim 10^{11}$ см⁻³, а теплых электронов $\sim 10^{12}$ см⁻³. Холодные электроны распределены во всем пространстве ловушки, а теплые электроны — внутри резонансной поверхности, определенной для нерелятивистского случая. Было показано, что эти группы не взаимодействуют с СВЧ-полем. Единственной составляющей, интенсивно поглощающей СВЧ-энергию, оказалась группа горячих, т. е. релятивистских электронов. Об этом свидетельствует тесная корреляция между работой гиротрона и потоком горячих электронов из ловушки. Таким образом, можно предполагать, что ЭЦР-ускорение электронов происходит с участием релятивистских процессов типа НОМ. Интересно, что, несмотря на различные масштабы зеркальных ловушек в работах [5] и [2, 3] и на мегаваттные или киловаттные источники греющего СВЧ-излучения, получаемые спектры тормозного рентгеновского излучения электронов оказываются близкими по масштабам энергии. Разница наблюдается лишь в интенсивности рентгеновских источников.

Исходя из вышесказанного, цель данной работы состояла в создании СВЧ ЭЦР-источника рентгеновского излучения малых размеров для его широкого лабораторного использования в биологии, медицине или дефектоскопии. Ранее разработанный рентгеновский источник [2], в котором зеркальная ловушка образована постоянными магнитами, а не электромагнитами, как в [1, 3], имеет явное перспективное преимущество по размерам, весовым и энергетическим характеристикам. Однако существенным недостатком [2] является использование резонатора для усиления ускоряющего поля. Дело в том, что резонатор, настроенный на рабочую частоту СВЧ-генератора без плазмы, подвержен рассогласованию при появлении плазмы и его надо вновь подстраивать, а также варьировать его связь, чтобы максимально использовать подводимую СВЧ-мощность.

В данной работе реализован ЭЦР-разряд в волноводе в режиме бегущей волны в ловушке, образованной постоянными магнитами, как и в [2]. Такая система, в отличие от [2], не требует усилий по согласованию тракта, к тому же открытый волновод не снижает скорость вакуумной откачки.

Размер узкой стенки волновода $b = 4,5$ см определяет предельный диаметр ларморовской орбиты электрона. Этому размеру отвечает $\gamma \sim 1,5$ (11) и кинетическая энергия электрона для максимальной вписанной в волновод орбиты $w \sim 0,27$ МэВ.

Экспериментальная установка

Схема лабораторного рентгеновского источника представлена на рис. 1. СВЧ-волна типа TE_{10} , генерируемая магнетроном 1 от бытовой микроволновой печи Samsung OM75P(31) с частотой $f = 2,45$ ГГц и средней мощностью $P_{cp} \sim 0,7$ кВт, распространяется по стандартному медному волноводу прямоугольного сечения ($a = 90$ мм, $b = 45$ мм), проходит через циркулятор 2, аттенюатор 3 в виде тефлоновой трубы с проточной водой, пересекающей широкие стенки волновода под углом 30° , и далее через кварцевое окно 4 входит в вакуумированную часть волновода 5. На границе с откачной системой 6 волна отражается от преграды из металлических элементов азотной ловушки для улавливания паров диффузионного масла.

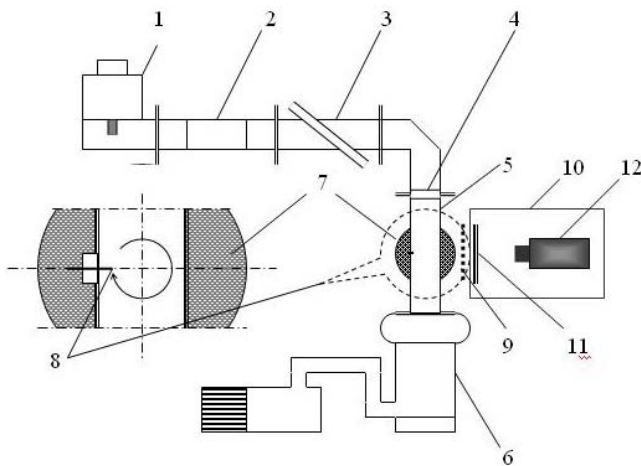


Рис. 1. Схема волноводного ЭЦР-источника рентгеновского излучения:

- 1 — магнетрон; 2 — циркулятор; 3 — аттенюатор; 4 — вакуумное волноводное окно; 5 — участок вакуумированного волновода в поле магнитной ловушки; 6 — агрегат диффузионного и механического насосов откачки волновода; 7 — постоянные дисковые магниты; 8 — вольфрамовый стержень — "анод"; 9 — просвечиваемый объект; 10 — "черный" ящик; 11 — рентгеноскопический экран; 12 — цифровые фотокамеры, фотоэлектронный умножитель

До зажигания разряда в волноводе устанавливается режим стоячей волны. Система вакуумной откачки 6 включает в себя форвакуумный и диффузионный насосы с азотной адсорбционной ловушкой. К узким стенкам волновода в его вакуумированной части соосно приложены идентичные дисковые магниты 7 на основе: неодим—железо—бор (Nd·Fe·B) диаметром 97 и толщиной 17 мм, формирующие в волноводе поле зеркальной ловушки. Напряженность поля на поверхности магнитов ~ 2000 Гс. Распределение магнитного поля между узкими стенками волновода имеет параболический профиль с настроенным резонансным значением магнитной индукции 875 Гс в центре ловушки (в минимуме распределения). Магниты снабжены рубашкой водяного охлаждения.

Поток ускоренных ЭЦР-электронов плазмы (на рис. 1 показан круговой стрелкой) имеет вид кольца, удерживаемого в области резонансного магнитного поля. Вольфрамовая игла 8 диаметром 2 мм с косым срезом на торце, введенная внутрь волновода через широкую стенку, выполняет роль "анода", перехватывающего поток ускоренных электронов и испускающего тормозное рентгеновское излучение с широким телесным углом. Излучение проходило через стенку медного волновода толщиной 2 мм, испытывая сильное поглощение в длинноволновой области спектра (при $\epsilon \leq 100$ кэВ). На рис. 2 показан коэффициент ослабления потока рентгеновского излучения в зависимости от энергии квантов, рассчитанный по данным [11].

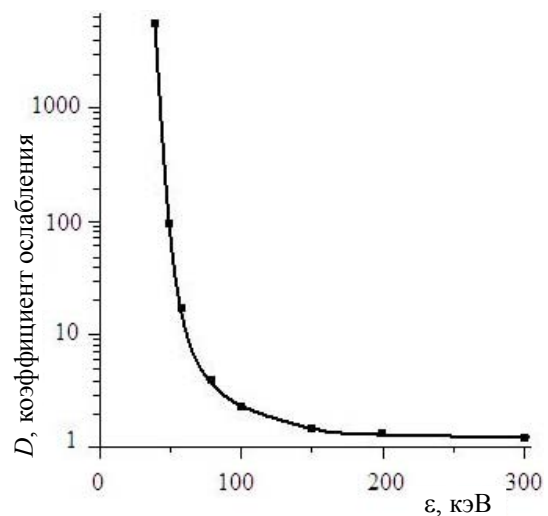


Рис. 2. Коэффициент ослабления потока излучения в зависимости от энергии рентгеновских квантов для медного фильтра толщиной 2 мм по данным [11]

Режим генерации — импульсно-периодический, а именно, длительность импульсов ~ 8 мс, частота следования 50 Гц, скважность $\sim 2,5$. Максимальная электрическая напряженность поля на оси волновода $E \sim 300$ В/см.

Тормозное рентгеновское излучение электронов регистрировалось рентгеновским (гамма) детектором фирмы BYCRON (модель 2,5M2,5/3LP-X) с кристаллом NaI(Tl) диаметром 76 мм, фотоэлектронным умножителем и усилителем сигнала. Диапазон чувствительности гамма-детектора по энергии квантов 0,05—1 МэВ. Амплитуда сигналов детектора линейно связана энергией поглощенных гамма-квантов, что дает возможность амплитудного анализа энергетического спектра гамма-излучения. Детектор был помещен на расстоянии 20 см от камеры в свинцовый цилиндрический экран с коллиматором, направленным на волновод между магнитами. Измерения энергетического спектра рентгеновского излучения проводились с помощью пропорционального счетчика — многоканального анализатора "Аспект"

АЦП-1К-В2. Измерение мощности и мощности дозы рентгеновского источника проводилось калиброванным дозиметром типа ДКС-90У.

ЭЦР-генерация рентгеновского излучения

Генерация рентгеновского излучения (РИ) начинается при давлении в волноводе $\geq 10^{-6}$ мм рт. ст. сразу с включением СВЧ-мощности. Радиационный фон рождает первичные электроны, от которых развивается самостоятельный разряд в первом импульсе. В цуге импульсов постоянно присутствует фон электронов, остающихся в ловушке от предшествующих разрядов. Под воздействием излучения плазмы импульсно-периодических разрядов возможна десорбция газа из стенок волновода, интенсивность которой зависит от качества вакуумной обработки поверхности, системы вакуумной откачки и от величины вводимой в волновод СВЧ-мощности. Давление в волноводе в процессе работы источника может повышаться, и тогда по мере ухудшения динамического вакуума из-за гажения стенок волновода интенсивность излучения может уменьшаться. Длительная генерация РИ сопровождается разогревом стенок волновода из-за поглощения СВЧ-мощности плазмой и поглощения энергии ускоренных электронов молибденовым "анодом".

При выполнении условий ЭЦР плазма разряда эффективно поглощает энергию СВЧ-волны. В этом случае поглощающая нагрузка ферритово-

го циркулятора, используемого для защиты магнетрона, не нагревается, что косвенно свидетельствует об отсутствии отраженной волны. При нарушении условия резонанса, например, при сближении магнитов, когда индукция магнитного поля в центре ловушки становится выше ее резонансного значения, разряд ослабевает, СВЧ-волна отражается назад и поглощается в нагрузке циркулятора. В этом случае нагрузка сильно нагревается, а волновод остается холодным. В режиме ЭЦР с установлением давления динамического вакуума при непрерывной откачке волновода генерация РИ стабилизируется.

Спектр излучения РИ измерялся в режиме установившегося давления газа в волноводе. Изменение состава газа в волноводе в присутствии плазмы ЭЦР-разряда не изучалось, поскольку ранее [3] было выяснено, что состав газа заметно не влияет на генерацию тормозного РИ, и поэтому, в частности, наполнять волновод каким-то определенным газом не было необходимости. Важно было только контролировать давление динамического вакуума, чтобы оно сильно не превышало уровня 10^{-4} мм рт. ст., когда ускорение электронов прекращается из-за растущей частоты столкновений электронов в газе, хотя концентрация собственно плазмы в самом разряде может при этом расти.

Типичный вид спектра РИ, измеренный в режиме устойчивой генерации РИ, представлен на рис. 3.

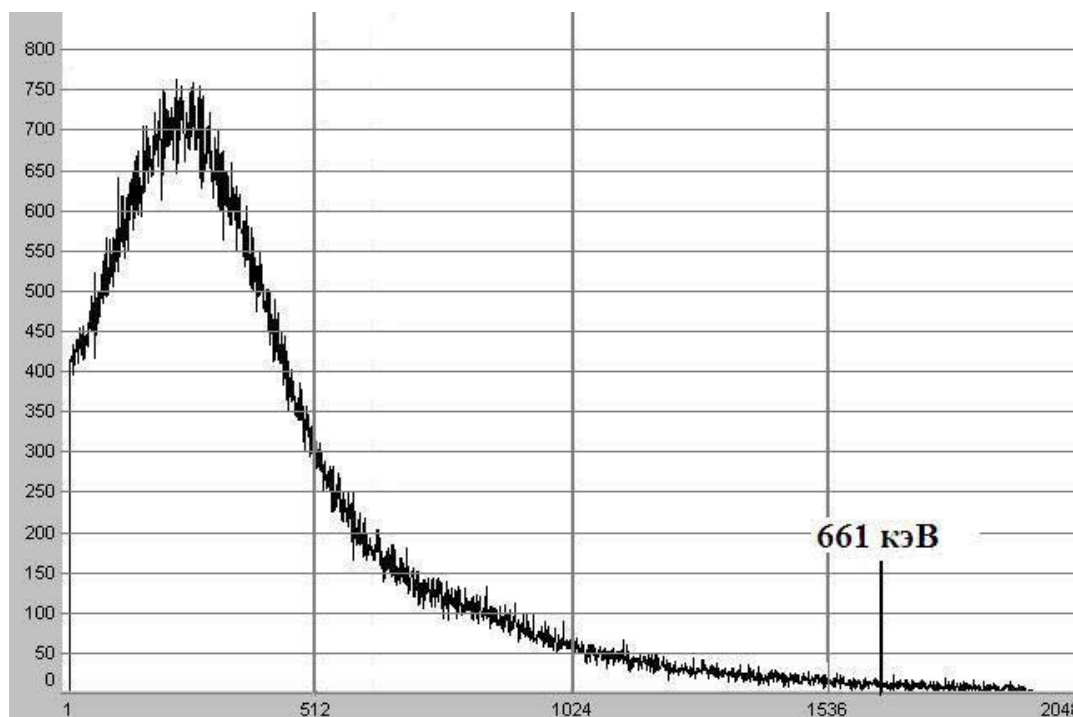


Рис. 3. Типичный спектр рентгеновского излучения волноводного ЭЦР-источника. Вертикальная ось графика — интенсивность; горизонтальная — номера каналов счетчика

Спектр калибровался по линии гамма-излучения изотопа ^{137}Cs с энергией квантов 661 кэВ, которая соответствует 1650 каналу счетчика. Вся энергетическая шкала составляет ~ 830 кэВ. Видно, что в низкоэнергетической части спектра, т. е. при $\epsilon < 100$ кэВ, интенсивность излучения с уменьшением энергии падает, что следовало ожидать в соответствии с зависимостью коэффициента ослабления потока от энергии (см. рис. 2). В пределе $\epsilon > 100$ кэВ интенсивность рентгеновского излучения также снижается по закону, близкому к экспоненте, вследствие уменьшения интенсивности электронного потока с ростом энергии. Хвост спектра РИ тянется до энергии ~ 770 кэВ, видимо, это значение соответствует максимальной энергии ускоренных электронов [12]. Известно, что электроны одной заданной энергии дают широкий рентгеновский спектр, почти экспоненциально растущий с уменьшением энергии квантов. Лучевая отдача электронов при этом растет с энергией электронов [13]. КПД преобразования энергии электронов в тормозное рентгеновское излучение находится в пределах 10^{-3} — 10^{-2} [13]. Как было показано измерениями [3], функция распределения ускоренных ЭЦР-электронов в области энергий $20 < \epsilon < 90$ кэВ имеет вид убывающей показательной функции, из чего следует, что значительная часть рентгеновского потока с энергиями квантов $\epsilon \leq 70$ кэВ поглощается стенкой волновода, т. е. отсутствие окна из материала с низким Z для выпуска излучения заметно снижает эффективность РИ.

Угловое распределение интенсивности рентгеновского излучения было измерено с помощью дозиметра ДКС-90У, перемещаемого по углу φ на расстоянии 1 м от "анода" РИ. На рис. 4 представлены измерения углового распределения потока рентгеновского излучения источника по азимуту φ (в плоскости, перпендикулярной оси волновода).

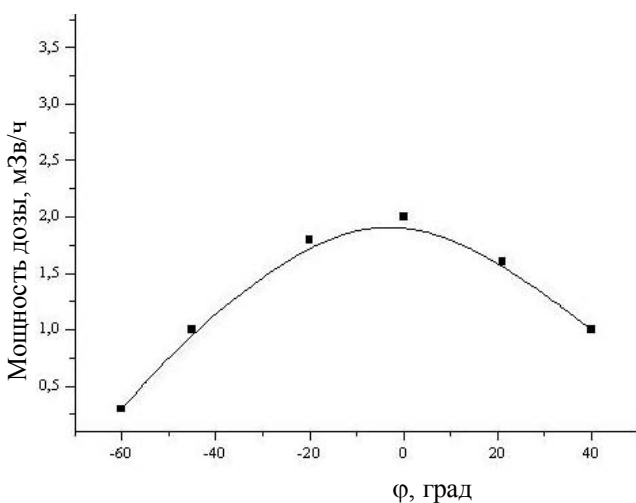


Рис. 4. Распределение потока рентгеновского излучения по азимуту φ

Расходимость излучения по полуширине потока имеет угол $\sim 90^\circ$. Снижение интенсивности рентгеновского излучения, проходящего стенку под углом, может быть связано увеличением его поглощения из-за углового фактора.

Вопрос о том, можно ли считать кончик вольфрамового "анода" точечным источником тормозного рентгеновского излучения, как это имеет место в обычной рентгеновской трубке, исследовался с помощью флуоресцентных экранов, действие которых основано на конвертировании люминофором части рентгеновского излучения в оптическое. Обычная фотопленка поглощает около 1 % прошедшего через нее рентгеновского излучения, тогда как экран имеет значительно большую поглощающую способность ~ 20 %. Теперь возникающее в экране свечение почти полностью поглощается пленкой, что и определяет усиливающее действие флуоресцентных экранов. Для получения рентгеновского отпечатка на фотопленке в кассете размером 13×18 см были использованы 2 стандартных экрана РЕНЕКС ЭУ-ГЗ на основе $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}^{3+}$ (оксисульфида гадолиния, активированного тербием), излучающих в зеленой области спектра с максимальной интенсивностью свечения на длине волны $\lambda \approx 0,5$ мкм. Фотопленка помещалась между экранами. Разрешение экранов — 10 пар линий на мм.

В качестве объекта съемки был взят аптечный стеклянный флакон диаметром 3 см, частично заполненный водой, в который опущен стальной винт М6 со стандартной резьбой (шаг резьбы — 1 мм), удерживаемый сверху массивной гайкой. Объект располагался непосредственно перед кассетой на расстоянии 20 см от волновода. Фото снимок, полученный в условиях мощности дозы ~ 2 мЗв/ч, при длительности экспозиции 1 мин показан на рис. 5. На снимке отчетливо виден сам флакон, металлические детали, зубчатый профиль резьбы винта, контрастно выделяется вода, которая при слое толщиной 3 см поглощает более половины интенсивности падающего на него потока радиации с $\epsilon = 100$ кэВ.



Рис. 5. Фотография стеклянного флакона с металлическими предметами и водой, снятая в рентгеновском потоке на пленке в кассете между двумя люминесцентными экранами

Получение цифровых изображений объектов в рентгеновских лучах ЭЦР-источника

В отсутствие экрана для преобразования рентгеновских квантов в фотоны видимого света для непосредственной регистрации требуется большая, примерно, в 10—20 раз интенсивность рентгеновского излучения. Преимуществом этого метода является повышенная разрешающая способность, позволяющая видеть мельчайшие детали изображения. Однако в стремлении снизить поглощенную радиационную дозу, в частности, при просвечивании биологических объектов приходится использовать чувствительный метод косвенной регистрации рентгеновского излучения через его преобразование в оптическое излучение с помощью люминесцентных экранов. Оптическое изображение экрана фиксируется на фотопленке или снимается с помощью цифровых камер с ПЗС-матрицами. Сейчас цифровая фотография постепенно вытесняет традиционную фотографию с ее медленными процессами обработки негативов.

Учитывая достаточно низкие значения потоков рентгеновского излучения из СВЧ-ЭЦР-источника, в экспериментах с цифровой съемкой также использовался усиливающий экран, с которого изображение просвечиваемого объекта фотографировалось цифровыми аппаратами с выводом видеоизображения на дисплей персонального компьютера. Для этого тот же экран РЕНЕКС ЭУ-Г3 помещался на торцевой стенке внутри черного ящика, в котором размещалась одна из цифровых камер (см. рис. 1). Всего было использовано 3 камеры, параметры которых сведены в таблицу. Камера 1 имела асферический объектив М12 с фокусным расстоянием $f = 4,3$ мм. Камеры 2 и 3 оснаща-

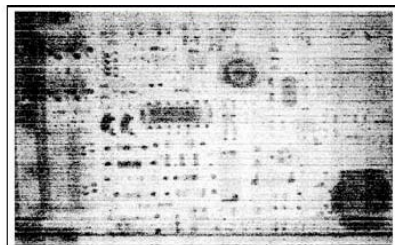
лись варифокальным объективами C/CS-Mount фирмы Tamron с ИК-фильтром, $1/2"$, $f = 4—12$ мм. Камера 2 отличалась прогрессивной разверткой и охлаждением ПЗС-матрицы. Камера 3 обладала широкими диапазонами автоматической регулировки усиления до 30 дБ при изменении экспозиции от $2 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-5} с.

Все три камеры показали способность фоторегистрации в условиях низкоуровневого и слабоконтрастного изображения, создаваемого усиливающим экраном. При использовании программного обеспечения и драйверов самих камер, включая существующие инструменты графической обработки сигнала, удается улучшать изображения и делать их приемлемыми для изучения при относительно коротком времени создания кадра и его обработки (не более нескольких секунд на одно измерение). В качестве примера цифровой съемки на рис. 6, а показана одна из плат персонального компьютера в качестве тестового рентгеновского объекта, а на рис 6, б — ее рентгеновское отображение в цифровом формате. Поскольку лицевая сторона платы, располагающейся на внешней стороне черного ящика, была обращена в сторону РИ, ее фотография здесь зеркально перевернута для удобства сравнения изображений. Трансформатор в правом нижнем углу создает тень в рентгеновском потоке из-за концентрированного содержания в нем железа и меди. Черный цилиндр в середине кадра — катушка индуктивности с ферритовым сердечником — также создает характерную тень. Многочисленные пленочные конденсаторы с тонкими фольгами, покрытыми алюминием, практически не оставляют теней, зато на плате четко выделяются места пайки оловом.

Матрица ПЗС	Цифровые камеры		
	1	2	3
	SONY CCD ICX205AL	SONY CCD ICX285AL	SONY ICX-429AL
Оптический формат, дюйм	1/3	2/3	1/2
Размер ПЗС, мм	6,32×4,76	8,77×6,6	—
Размер пикселя, мкм	4,65×4,65	6,45×6,45	8,6×8,3
Разрешение	1392×1032	1392×1032	752×582
Максимальная частота съемки, кадр/с	100	7,5	50
Пределы установки экспозиции	5 мкс — 4,5 мин	5 мкс — 60 мин	В ручном режиме при освещенности 0,00001 лк (время экспозиции 10 с)
Пределы установки периода съемки	—	140 мс — 60 мин	
Предельная температура охлаждения ПЗС	—	На 60 градусов ниже $T_{окр}$	—
Точность установки и поддержания температуры ПЗС, °C	—	1	—



а



б

Рис. 6. Фотография сетевой платы персонального компьютера в качестве тестового объекта (а) и ее рентгеновское изображение, полученное цифровой камерой (б)

Обсуждение результатов экспериментов с ЭЦР-источником РИ

Важным отличительным свойством СВЧ-ЭЦР-источников рентгеновского излучения от традиционных электростатических рентгеновских трубок является то, что ускоренные ЭЦР-электроны имеют не монохроматический, а широкий энергетический спектр с интенсивностью, нарастающей в сторону низких энергий. Измерение энергетического спектра электронов, вращающихся в кольцевом потоке в узком пространстве волновода, представляет большие трудности. Однако использование различных рентгеновских фильтров, встроенных в выпускное окно для РИ и "отсекающих" кванты с низкой энергией, позволит исследовать зависимость выхода (мощности дозы) рентгеновского излучения от энергетической границы пропускания фильтра и, тем самым, оптимизировать источник под различные задачи.

Вопросу оптимизации рентгеновского спектра в медицине уделяется большое внимание. Результаты исследований [14] показывают, что для каждого вида обследования есть оптимальная величина энергии квантов. Например, для самого массового вида обследований, а именно, флюорографии легких, в прямой проекции оптимальная энергия квантов составляет 32 кэВ. Превышение оптимальной энергии ухудшает качество изображения и сопровождается ростом поглощенной дозы пациентом. При обследовании легких рентгеновские кванты со слишком низкой и высокой энергиями наносят неоправданный радиационный вред организму, поэтому щадящим энергетическим диапазоном признается диапазон с энергией

квантов $25 \leq \varepsilon \leq 60$ кэВ, который в рассматриваемом источнике практически полностью отсекается медной стенкой волновода. Для уменьшения количества квантов с энергией менее 25 кэВ в спектре обычной рентгеновской трубки применяются специальные фильтры. Стандартный фильтр — пластина из алюминия толщиной 2 мм. Фильтр из титана толщиной 300 мкм позволяет полностью заменить стандартный, при этом поток квантов с оптимальными энергиями 30—50 кэВ дополнительно возрастает на 5 %. Применение подобных фильтров в волноводном источнике позволит значительно (возможно на порядки) увеличить мощность источника за счет снижения поглощения в области $\varepsilon \geq 25$ кэВ, по сравнению с данными, представленными рис. 2. При увеличении мощности дозы станет целесообразным перевод работы источника в импульсный режим с управлением длительностью и импульсной мощностью магнетрона.

Применение волноводных СВЧ-ЭЦР-источников РИ станет возможным и широко доступным после реализации (по аналогии с рентгеновскими трубками) серийного выпуска отпаянных вакуумированных волноводных камер РИ, наполняемых инертным газом низкого давления. При однократной настройке магнитного поля в центре ловушки на резонанс можно далее не беспокоиться о повреждении магнетрона высоким уровнем мощности отраженной волны, поскольку плазма разряда эффективно поглощает падающую СВЧ-мощность, что, в принципе, позволяет отказаться от дорогостоящего крупногабаритного и тяжелого циркулятора. В случае использования РИ в режиме непрерывной или импульсно-периодической генерации с потреблением высокой средней мощности нужно обеспечить волноводную камеру достаточно эффективным воздушным охлаждением подобно тому, как это решается с охлаждением магнетрона.

Задача снижения радиационной нагрузки на пациента заставляет вести поиск высокоэффективных детекторов, обеспечивающих регистрацию максимального числа попадающих в них рентгеновских квантов. В флуоресцентных усиливающих экранах преобразуется до 15 % энергии фотонов на основе гадолиния и до 18 % — на основе иттрия. Вероятность достижения рентгеновскими квантами пленки обычно равна 0,5. При энергии падающих рентгеновских квантов 50 кэВ для экранов на основе оксисульфида гадолиния, излучающего в зеленой области спектра, число световых фотонов, достигающих эмульсии, определяется как отношение энергий рентгеновского и светового квантов, умноженное на эффективность образования фотонов и эффективность их регистрации, что, примерно, равно 1500 световых фотонов при поглощении одного рентгеновского кванта [14].

Толщина флуоресцентного слоя 0,2 мм определяется стандартными требованиями разрешающей способности. В случаях рентгеноскопии, когда высокое разрешение не нужно, толщина экрана может быть увеличена, и, соответственно, доза облучения может быть снижена. Чтобы выяснить, насколько можно увеличить толщину люминесцентного слоя, был поставлен эксперимент с порошком оксисульфида гадолиния $Gd_2O_2S:Tb^{3+}$, которым наполнялись плоские прозрачные ячейки блистерной упаковки таблеток диаметром 8 и глубиной 3 мм. Разные навески порошка уплотнялись "пробкой" — такой же блистерной ячейкой или прозрачным скотчем — и представляли собой образцы слоев разной толщины. Образцы помещались перед зрачком фотоэлектронного умножителя ФЭУ-106, закрытого со всех сторон свинцовым экраном от прямого воздействия рентгеновского излучения. Открытым было только отверстие в торце экрана, за которым помещались испытуемые образцы люминофора, облучаемые потоком рентгеновского излучения. При фиксированной мощности генерации рентгена была построена зависимость интенсивности свечения слоев от их толщины, которая варьировалась в пределах $0,25 \leq S \leq 3$ мм. Полученная зависимость (рис. 7) имеет немонотонный характер, а именно, рост свечения люминофора с увеличением толщины слоя продолжается до $S \approx 1,2$ мм, затем при дальнейшем увеличении толщины интенсивность свечения монотонно снижается.

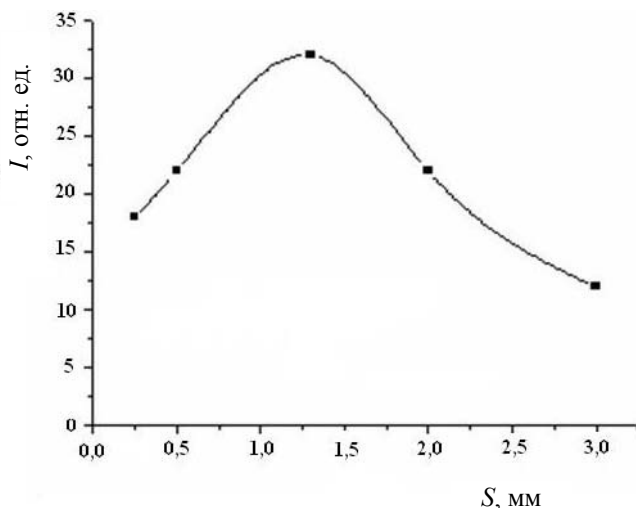


Рис. 7. Зависимость интенсивности свечения люминесцентных слоев оксисульфида гадолиния I, возбуждаемых рентгеновским излучением, в зависимости от толщины слоя люминофора S

Поскольку потеря интенсивности потока радиации в люминесцентном слое экрана 0,2 мм составляет 15 %, то при прохождении слоя в 1 мм

поток теряет более 60 % энергии фотонов. Кроме того, увеличение толщины слоя сопровождается более активным рассеянием световых фотонов на частицах люминофора и их поглощением внутри слоя, что и объясняет немонотонное поведение зависимости. Эксперимент показал, что использование экранов с увеличенной толщиной в определенных случаях может способствовать снижению радиационной дозы.

Заключение

Цель работы — показать возможность применения СВЧ-ЭЦР-разряда в волноводе для генерации рентгеновского излучения и перспектив создания новой рентгеновской техники, не требующей больших материальных затрат и достаточно простой в эксплуатации. Использование рентгеновских источников такого рода открывает, возможность применения в составе комплексного оборудования недорогих ССТV ПЗС-камер для визуализации рентгеновских изображений, в частности, для анализа скрытых охранных меток, предназначенных для учета материальных объектов в промышленности, в музейном деле и в иных важных приложениях.

Литература

1. *Сергейчев К. Ф., Сычев И. А.* // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2002. Т. 42. № 4. С. 550.
2. *Dougar-Jabon V. D.* // Physica Scripta. 2004. V. 69. 4. P. 313.
3. *Сергейчев К. Ф., Карфидов Д. М., Лукина Н. А.* // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 5. С. 1.
4. *Карфидов Д. М., Сергейчев К. Ф.* // Прикладная физика. 2007. № 6. С. 102.
5. *Жильцов В. А., Куянов А. Ю., Скворода А. А., Тимофеев А. В.* // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 3. С. 267.
6. *Роуз Д., Кларк М.* Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции. — М.: Госатомиздат, 1963.
7. *Джексон Дж.* Классическая электродинамика. — М.: Мир, 1965.
8. *Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupre R.* // Phys. Lett. A. 1992. V. 165. P. 463.
9. *Gibson G., Jordan W., Lauer E.* // Phys Fluids. 1963. V. 6. P. 116.
10. *Иоффе М. С., Кадомцев Б. Б.* // УФН. 1970. Т. 100. С. 601.
11. www.docload.ru/basesdoc/4/4048/index.htm (ГОСТ СССР 20426-82. Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные).
12. *Добромыслов В. А., Румянцев С. В.* Радиационная интроскопия. — М.: Атомиздат, 1972.
13. *Хараджа Ф. Н.* Общий курс рентгенотехники. — М.—Л.: Энергия, 1966.
14. www.medtek.ru (ООО "Медтек". Оптимизация режимов и дозы облучения пациентов для получения адекватной рентгенографической информации.)

Waveguide ECR source for the low doze X-ray introscopy

K. F. Sergeichev, D. M. Karfidov, N. A. Lukina
General Physics Institute named after A. M. Prohorov, RAS
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: kserg@fpl.gpi.ru

V. Yu. Ionidi
Agrogaz Co
2 Vokzalny proezd, Fryazino, 141190, Russia

It is shown that point target in standard evacuated waveguide in a magnetic mirror trap of two disk magnets magnetized axially in a direction perpendicular to the electric vector of a waveguide field presents itself source of X-ray bremsstrahlung owing to high energetic electrons accelerated in the ECR discharge, with a wide range of X-ray photon energies up to 0.8 MeV. Its intensity rate ~ 1 R/h. The source, powered by a standard microwave oven has a small sizes and light weight, easy to use and is suitable as a laboratory tool, particularly in radiobiology, and X-ray imaging. Passing through the object the X-ray flow is recorded with a digital camera via using a highly sensitive X-ray fluorescent screen, which converts it into an optical image.

PACS: 52.50.Sw, 52.25.Os, 07.85.Fv

Keywords: microwave, waveguide, vacuum, mirror, plasma, electron, permanent magnet, ECR, X-ray bremsstrahlung, fluorescent screen.

Bibliography — 14 references.

Received July 20, 2012