

# ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА

В. М. Атаманов<sup>1</sup>, А. А. Иванов<sup>1</sup>, А. В. Переславцев<sup>1</sup>, Л. И. Елизаров<sup>1</sup>, Ал. А. Иванов<sup>1</sup>,  
Т. А. Биман<sup>2</sup>, А. О. Ливадный<sup>2</sup>, М. В. Пальтов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РНИЦ «Курчатовский институт»

<sup>2</sup>Российский университет Дружбы Народов, кафедра экспериментальной физики

## 1. Введение

В последние годы существует интерес к преимуществам пучково-плазменного разряда [1]. Существуют такие условия в пучково-плазменном разряде, когда возникает группа горячих электронов с энергиями намного выше, чем энергия электронов пучка. Эти электроны высокой энергии могут генерировать высокоэнергетичные рентгеновские кванты. Возможность генерации рентгеновского излучения электронами, нагревающимися в плазменном разряде, и создавать источники рентгеновского излучения на этом основании для практического применения в технологии и медицине была продемонстрирована в ряде экспериментов, которые были выполнены в 60–70-х годах. Сперва мы должны отметить экспериментальную работу Алексева и др. [2]. Электронная температура 32 кэВ и электронная плотность  $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  были получены в пучково-плазменном разряде в зеркальной магнитной ловушке при постоянной инжекции пучка. Ток электронов пучка составлял 0.5 А, энергия электронов пучка была 5 кэВ. В работе [3] было показано, что электроны высокой энергии образуются в зеркальной магнитной ловушке с высоким пробочным отношением при взаимодействии импульсного пучка электронов с плазмой плотностью  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  в объеме 20 литров. Энергия электронов была 200 кэВ при магнитном поле 1.65 кГс в центре ловушки, и энергия электронов составляла 40 кэВ, когда магнитное поле было 0.5 кГс [3]. Плазма с электронной температурой 550 кэВ и плотностью  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  в объеме 4.2 литра была получена в установке ПН-2 посредством адиабатического сжатия плазмы [4]. Интенсивность рентгеновского излучения составляла до 1 МэВ. Горячая плазма удерживалась зеркальным магнитным полем без распада в течение нескольких секунд в эксперименте. Мощный пучково-плазменный усилитель описан в работе [5]. Усилитель изготовлен как отдельное вакуумное устройство. В усилителе ускоряющее напряжение электронного пучка было  $U_0 = 15\text{--}25 \text{ кВ}$ , ток пучка был  $I = 3\text{--}5 \text{ А}$ , величина магнитного поля соленоида составляла 2–3 кГс, диапазон давления рабочего газа (водород) в месте взаимодействия  $10^{-6}\text{--}10^{-3} \text{ Торр}$ . Этот эксперимент подтверждает возможность генерации горячих электронов в отдельном устройстве. Фактический выбор метода получения рентгеновского излучения с помощью пучково-плазменного разряда в зеркальной магнитной ловушке основывается на его энергосберегающей способности, простоте реализации, возможности создать компактный рентгеновский источник без использования высокого питающего напряжения энергии (5–6, но не 100 кВ). Между тем, для тропических стран, из-за влажности, из-за высокого напряжения возможны такие несчастные случаи, как пожар. Замена рентгеновских трубок (питающее напряжение  $\cong 100 \text{ кВ}$ ) нашим экспериментальным устройством (питающее напряжение  $\cong 6 \text{ кВ}$ ) может устранить этот недостаток. Серии экспериментов по генерации рентгеновского излучения из неравновесной плазмы с помощью пучково-плазменного разряда проводятся на плазменно-химической установке «Оратория-10» [6]. Эксперименты проводятся в стационарном режиме при постоянной инжекции пучка. Рентгеновское излучение было получено в аргоновой и в водородной плазме. В течение стационарного процесса некоторые параметры (такие как магнитное поле, энергия пучка, давление рабочего газа, тип газа) изменялись для получения оптимальных результатов. Выход рентгеновских квантов измерялся через алюминиевую диафрагму с толщиной 1.4 мм. Доза рентгеновского излучения была измерена посредством двух термолюминесцентных таблеток LiF толщиной 1 мм, расположенных одна над дру-

гой. Первая таблетка измеряла дозу излучения и одновременно выполняла роль фильтра для второй таблетки. Измерения показали, что доза рентгеновского излучения составляла 1.7 Р/ч в экспериментах с аргоновой плазмой и 3.7 Р/ч в экспериментах с водородной плазмой. Доза излучения, измеренная второй таблеткой, составляла 82–84 % дозы излучения, измеренной первой таблеткой.

## 2. Механизм нагрева электронов

Анализ экспериментальных и теоретических исследований нагревания пучка электронов в зеркальной магнитной ловушке закончен работой [7]. Когда электронный пучок вводится в зеркальную магнитную ловушку [7], имеет место сильное пучково-плазменное взаимодействие, в результате чего увеличивается поперечный размер плазмы и происходит сильное нагревание горячих электронов, удерживаемых ловушкой. Электронный пучок возбуждает ленгмюровские колебания при взаимодействии с плазмой [8]. Нагревание горячих электронов имеет место из-за их взаимодействия с электронными ленгмюровскими колебаниями при  $\omega_{pe} > \omega_{Oh}$ . Ширина пучка в пространстве скоростей  $\Delta v$  становится порядка начальной скорости пучка и на расстоянии 20÷30 см от входа пучка в систему. Характерный инкремент неустойчивости  $\gamma \sim \omega_{pe} n_{0b}/n_0$ . Электронный пучок возбуждает колебания главным образом с волновыми векторами, параллельными его оси. Спектр ленгмюровских колебаний существенно не изотропен. Если электроны при взаимодействии с шумами не будут уходить в конус потерь в пространстве скоростей, они диффундируют в обычном пространстве к периферии установки, и их энергия будет медленно увеличиваться. Таким образом, для получения горячих электронов необходимо удовлетворить ряду условий для удержания электронов в зеркальной магнитной ловушке и для их нагрева до высоких энергий, а именно:

$$\omega_{pe} > \omega_{Oh},$$

$$\gamma \sim \omega_{pe} n_{0b}/n_0,$$

$$R > 1/\cos^2 \theta_0,$$

где  $\arctg \theta = k_{\perp}/k_{\parallel}$ , и  $\theta_0$  – некоторый предельный угол.

Если принять во внимание, что радиус пучка  $a \sim 1$ , и характерный волновой вектор возбуждаемых колебаний  $k \sim \omega_{pe}/v \approx 5 \text{ см}^{-1}$ , то  $ka \gg 1$ . Это означает, что для оценок можно использовать результаты теории безграничного пучка.

Энергия колебаний в поперечном направлении передается с групповой скоростью

$$\frac{\partial \omega}{\partial k} \sim \left( \frac{\omega_{He}^2}{\omega_{pe}^2} \right) v_{\phi}.$$

Время распространения колебаний до диафрагм, ограничивающих плазму, много меньше времени затухания на горячих частицах, которое определяется декрементом затухания ленгмюровских колебаний. На частоту, волновое число  $k$  и скорость горячих электронов  $v$  накладывается условие

$$\omega_{pe} = kv \cos \varphi,$$

где  $\varphi$  является углом между  $k$  и  $v$ . Энергичные электроны будут эффективно взаимодействовать только с теми колебаниями, чьи волновые вектора будут почти перпендикулярны их скоростям.

На основе вышеизложенного можно наблюдать зависимость энергии горячих электронов от величины магнитного поля. Электроны, вовлеченные в процесс ускорения, уве-

личивают энергию и диффундируют от пучка до внешней стенки ловушки. Энергия электрона определяется временем его жизни в ловушке  $\tau$ , которое можно написать как

$$\tau \sim (\tau_D^{-1} + \tau_S^{-1})^{-1},$$

где  $\tau_S$  – время рассеяния в конус потерь, и  $\tau_D$  – время диффузии электрона до внешней границы плазмы. Таким образом, время ухода электрона в конус потерь определено конфигурацией магнитного поля (пробочное отношение) и не зависит от его силы. Время диффузии электрона поперек магнитного поля пропорционально квадрату плазменного радиуса и обратно пропорционально эффективному коэффициенту диффузии или пропорционально квадрату величины магнитного поля. Таким образом, в области малых магнитных полей пока  $\tau_D < \tau_S$  время жизни определяется временем диффузии и растет пропорционально квадрату напряженности магнитного поля. При некотором значении напряженности магнитного поля время диффузии сравнивается со временем рассеяния. При дальнейшем увеличении магнитного поля время жизни перестает зависеть от магнитного поля и определяется только уходом «горячих» электронов в конус потерь.

### 3. Экспериментальная установка

Эксперименты по созданию плазмы и нагреву электронов в пучково-плазменном разряде были выполнены на плазменно–химической установке «Оратория-10», показанной на рис. 1. Установка «Оратория-10» позволяет выполнять исследования с неравновесной плазмой с плотностью  $10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , полученной в пучково-плазменном разряде. Рабочая вакуумная камера (1) диаметром 0.5 м. и длиной 1 м сделана из нержавеющей стали. Вся камера находится в магнитном поле, созданным катушками (2). Магнитная конфигурация установки «Оратория-10» представляет собой систему типа «зеркальная магнитная ловушка» и позволяет получать магнитное поле с напряженностью 600 Э в середине ловушки и пробочным отношением  $R \sim 3.5$ .

Величина магнитного поля может варьироваться от 300 до 600 Гс. Максимальное значение магнитного поля приблизительно 800–900 Гс в коротком промежутке времени (10–15 минут). Электронный пучок цилиндрической геометрии максимального диаметра до 4 см сформирован посредством электронной пушки (3) с током пучка до 2 А и его энергии до 6 кэВ. Электронный пучок, сформированный электронной пушкой, вводится в рабочую камеру (1) по оси магнитного поля через систему диафрагм (5) с маленькими отверстиями. Электронный пучок инжектируется в камеру с одной стороны и попадает на приемник электронов (4) с другой. Система дифференциальной откачки используется для обеспечения необходимых вакуумных условий для работы электронной пушки. Необходимые вакуумные условия обеспечиваются диффузионными вакуумными насосами с охлажденными жидким азотом ловушками. Остаточное давление не более чем  $3 \cdot 10^{-7}$  Торр с охлаждаемыми жидким азотом ловушками и не более  $3 \cdot 10^{-6}$  Торр без охлаждения жидким азотом. Максимальное рабочее давление  $\sim 10^{-3}$  Торр. Система напуска газа на базе пьезоэлектрического натекателя обеспечивает и непрерывную, и импульсную подачу рабочего газа в камеру. Электроны высокой энергии, нагретые пучково-плазменным взаимодействием в разряде, производят рентгеновские кванты при кулоновском рассеивании в плазме и при столкновениях со стенками. Кванты рентгеновского излучения достигают сцинтилляционного датчика (7), проходя через тонкую бериллиевую диафрагму и отверстие в свинцовом коллиматоре. Кванты излучения регистрируются датчиком (7) на основе калий-иодного кристалла. ФЭУ позволяет измерить сигнал и определить спектр рентгена излучения. Для определения спектра использовался 1024-канальный амплитудный анализатор АИ-1024. Плазменная плотность была измерена ленгмюровским зондом (8). Рабочий плазмообразующий газ вводится в рабочую камеру через пьезоэлектрический натекатель (9).

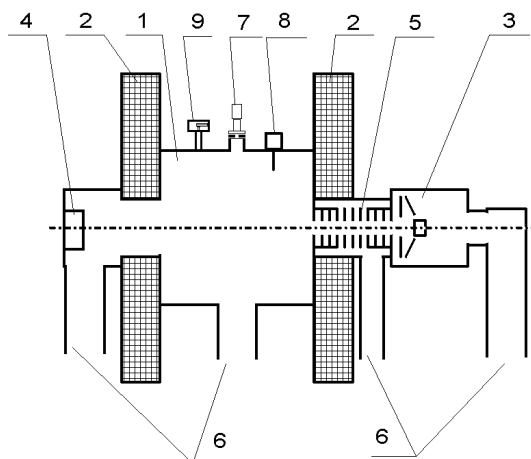


Рис. 1. Схема установки «Оратория- 10»: 1 – вакуумная камера; 2 – магнитные катушки; 3 – электронная пушка; 4 – приемник электронов; 5 – диафрагмы; 6 – вакуумный насос; 7 – рентгеновская диагностика; 8 – ленгмюровский зонд; 9 – пьезоэлектрический натекатель

#### 4. Результаты эксперимента

Эксперименты были выполнены для двух целей – чтобы измерить интегральную интенсивность рентгеновского излучения и выявить зависимость спектрального распределения энергии квантов от величины магнитного поля, параметров электронного пучка, начального давления газа в рабочей камере и состава плазмообразующего газа. В наших исследованиях мы использовали два плазмообразующих газа: аргон и водород. Такой выбор можно объяснить тем, что было интересно изучить генерацию рентгеновского излучения в плазме газа с минимумом возбужденных состояний молекул (водород) и излучения из плазмы более сложного состава с множеством возбужденных состояний атомов.

Типичный эксперимент по изучению генерации рентгеновского излучения в пучково-плазменном разряде в установке «Оратория-10» представляет собой следующее. Начальное давление остаточного газа в рабочей камере приблизительно  $5 \cdot 10^{-6}$  Торр. Магнитное поле включено. Номинальный ток в магнитных катушках – приблизительно 200 А – соответствует величине магнитного поля приблизительно 600 Гс в центре магнитной ловушки. Электронный пучок введен в рабочую палату по оси магнитного поля. Ток пучка приблизительно 1 А, энергия электронов пучка приблизительно 3–4 кэВ. Водород подается через пьезоэлектрический натекатель в рабочую камеру. Входной поток водорода отрегулирован так, чтобы получить максимум интегральной интенсивности рентгеновского излучения. Входной поток водорода соответствует полному газовому давлению в рабочей камере около  $(7-9) \cdot 10^{-5}$  Торр. Тогда спектр рентгеновского излучения измеряется с использованием сцинтилляционного датчика, ФЭУ и амплитудного анализатора. Эксперименты по изучению рентгеновского излучения были выполнены в соответствии с вышеупомянутой последовательностью при различных параметрах разряда: величине магнитного поля, энергии и токе электронного пучка, давлении плазмообразующего газа. Типичные экспериментальные спектры рентгеновского излучения в водородной плазме пучково-плазменного разряда показаны ниже на рисунках.

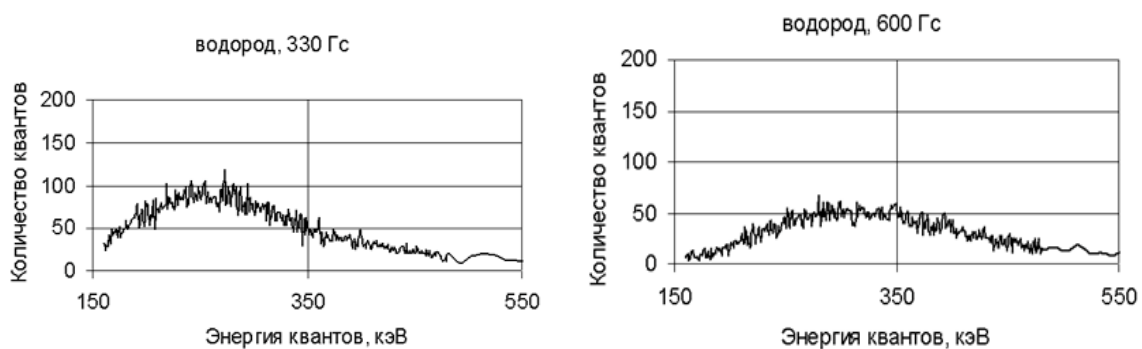


Рис. 2. Спектр рентгена в водородной плазме. Начальное давление  $\sim 8.5 \cdot 10^{-5}$  Торр, поток пучка  $\sim 0.75$ А, электронная энергия пучка 3 кэВ при  $H = 330$  Гс и  $H = 600$  Гс

Можно видеть, что максимум распределения энергии рентгеновского излучения в экспериментах с водородной плазмой приблизительно 230–250 кэВ при силе магнитного поля  $H = 330$  Гс и приблизительно 270–300 кэВ при  $H = 600$  Гс.

Типичный экспериментальный спектр рентгеновского излучения в плазме аргона пучково-плазменного разряда устройстве можно видеть на рис. 3.

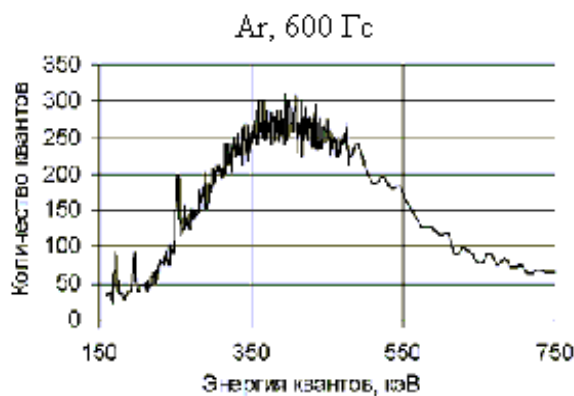


Рис. 3. Спектр рентгена в плазме аргона  $H = 600$  Гс, начальное давление  $\sim 8.5 \cdot 10^{-5}$  Торр, поток пучка  $\sim 0.75$ А, электронная энергия пучка 3 кэВ

В случае аргоновой плазмы максимум распределения энергии рентгеновского излучения составляет приблизительно 350 кэВ.

Система рентгеновской диагностики (сцинтилляционный детектор, фотоумножитель, амплитудный анализатор спектра) была калибрована по известным изотопам  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

Мы выполняем ряд экспериментов с аргоном и водородной плазмой. Все эти кривые по виду были аналогичны распределению Максвелла. Наши эксперименты демонстрируют интересные зависимости: интегральная интенсивность наиболее высока в экспериментах с водородной плазмой и максимальная энергия квантов достигается, когда аргон использовался как плазмообразующий газ.

## 5. Обсуждение

Прежде всего мы должны отметить некоторые новые физические результаты наших экспериментов.

В наших экспериментах мы получили довольно высокую энергию горячих электронов, которая составляет приблизительно 250–350 кэВ в максимуме распределения энергии.

Генерация рентгеновского излучения в водородной плазме появляется при величине поля в 330 Гс.

Энергия горячих электронов и ее количества зависит от вида плазмообразующего газа.

## 6. Заключение

Исследование генерации высокоэнергетического рентгеновского излучения в пучково-плазменном разряде в зеркальной магнитной ловушке проводилось при поддержке INTAS (грант 97-0094) и Федеральной программы «Интеграция науки и высшего образования» (гранты И0602/1378 и Я0068/2137).

### Литература:

1. Ivanov A. A. The present state and development trends of discharges. Physics and chemistry of plasmas // Phenomena in Ionized Gases (XXII ICPIG). Hoboken, NJ July-Aug. 1995. P. 41–74.
2. Alexeff I., Neidigh R. V. et al. Hot-electron plasma by beam-plasma interaction // Phys. Rev. Letters. 1963. R. V. 10. № 7. P. 273–276.
3. Закатов Л. П., Плахов А. Г., Рютов Д. Д., Шапкин В. В.. Исследование высокотемпературной электронной компоненты плазмы в системе плазма-пучок. // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. № 4. С. 1088–1098.
4. Закатов Л. П., Иванов А. А., Плахов А. Г., Шапкин В. В. Получение релятивистской плазмы адиабатическим сжатием в системе плазма–пучок // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. № 1. С. 16–20.
5. Митин Л. А., Перевозчиков В. И., Завьялов М. А., Цхай В. Н., Шапиро А. Л.. Мощные широкополосные пучково-плазменные СВЧ усилители и генераторы // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7-8. С. 733–746.
6. Атаманов В. М., Биман Т. А., Елизаров Л. И. и др. Генерация рентгеновского излучения в плазме пучково-плазменного разряда в стационарных условиях // Вопр. Ат. науки и техн. Сер. Термояд. синтез. № 3. С. 30–36.
7. Иванов А. А. Физика сильнонеравновесной плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 350 с.
8. Файнберг Я. Б. Взаимодействие заряженных частиц с плазмой // Атомная энергия. 1961. Т. 11. С. 313.