

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ЭЛЕКТРОНОВ В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ В ЗЕРКАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

*В.М.Атаманов¹, Т.А.Биман², Л.И.Елизаров¹, А.А.Иванов¹, Ал.А.Иванов¹,
А.О.Ливадный², М.В.Пальтов², А.В.Переславцев¹*

¹*Российский научный центр «Курчатовский институт», г.Москва, Россия;
pere@ard.kiae.ru;*

²*Российский университет дружбы народов, г.Москва, Россия*

Выполнено экспериментальное исследование нагрева электронов в пучково-плазменном разряде в зеркальной магнитной ловушке. Показано, что существуют условия, при которых происходит нагрев электронов до высоких энергий. Измерены экспериментальные спектры энергии квантов рентгеновского излучения из плазмы разряда. Результаты могут быть использованы для создания источника рентгеновского излучения на основе пучково-плазменного разряда.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проявляется интерес к преимуществам пучково-плазменного разряда [1]. В пучково-плазменном разряде существуют условия, когда появляется группа горячих электронов с энергиями много выше, чем энергия электронов пучка. Эти высокоэнергетические электроны могут генерировать высокоэнергетические рентгеновские кванты. Присутствие высокоэнергетических электронов в пучково-плазменном разряде отмечено в экспериментах в 60-е и 70-е годы. Прежде всего необходимо отметить работу Алексеева и др. [2]. В пучково-плазменном разряде в зеркальной магнитной ловушке при непрерывной инжекции пучка электронов с энергией 5 кэВ и током 0,5 А была получена плазма с плотностью $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Средняя температура группы горячих электронов составляла 32 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 л. Энергия электронов была 200 кэВ при магнитном поле 1,65 кГс в центре ловушки и составляла 40 кэВ, когда магнитное поле было 0,5 кГс [3]. Плазма с электронной температурой 550 кэВ и плотностью 10^{11} см^{-3} в объеме 4,2 л была получена в установке ПН-2 посредством адиабатического сжатия плазмы [4]. Энергия квантов рентгеновского излучения достигала 1 МэВ. Горячая плазма удерживалась зеркальным магнитным полем без распада в течение нескольких секунд. Мощный пучково-плазменный усилитель описан в работе [5]. Усилитель выполнен в виде отдельного вакуумного устройства. Энергия электронов пучка – 15...25 кэВ, ток пучка – 3...5 А, магнитное поле соленоида с индукцией 2...3 кГс, диапазон давления рабочего газа (водорода) в месте взаимодействия – $10^{-6} \dots 10^{-3}$ Торр.

Этот эксперимент подтверждает возможность генерации горячих электронов в отдельном устройстве. Серии экспериментов по генерации рентгеновского излучения из неравновесной плазмы пучково-плазменного разряда выполнены на экспериментальной плазмохимической установке "Оратория-

10" [6]. Эксперименты проводятся в стационарном режиме при непрерывной инжекции пучка. Рентгеновское излучение было получено в аргоновой и водородной плазме. Выход рентгеновских квантов измерялся через алюминиевую диафрагму толщиной 1,4 мм. Доза рентгеновского излучения была измерена посредством сэндвича из двух термолюминесцентных таблеток LiF толщиной 1 мм, расположенных одна над другой. Первая таблетка измеряла дозу излучения и одновременно играла роль фильтра для второй таблетки. Измерения показали, что мощность дозы 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, измеренной первой таблеткой. В предположении моноэнергетического распределения энергия рентгеновских квантов составляет приблизительно 20 кэВ. В предположении распределения Максвелла для среды горячих электронов полученная энергия тепловых электронов была приблизительно 30 кэВ. В данной работе для измерения спектров рентгеновского излучения из плазмы использован сцинтилляционный детектор.

2. МЕХАНИЗМ НАГРЕВА ЭЛЕКТРОНОВ

Анализ экспериментальных и теоретических исследований нагрева электронов пучком в зеркальной магнитной ловушке приведен в работе [7]. Когда электронный пучок вводится в зеркальную магнитную ловушку [7], наблюдается сильное пучково-плазменное взаимодействие, в результате чего увеличивается поперечный радиус плазмы, и происходит сильный нагрев электронов, удерживаемых ловушкой. Электронный пучок возбуждает ленгмюровские колебания при взаимодействии с плазмой [8]. Нагрев горячих электронов происходит вследствие их взаимодействия с электронными ленгмюровскими колебаниями при $\omega_{pe} > \omega_{0n}$. Ширина пучка в пространстве скоростей Δv становится порядка начальной скорости пучка u на расстоянии 20...30 см от входа пучка в систему. Характерный инкремент неустойчивости $\gamma \sim \omega_{pe} n_{0b}/n_0$. Электронный пучок воз-

буждает колебания главным образом с волновыми векторами, параллельными его оси. Спектр ленгмюровских колебаний существенно неизотропен. Если электроны при взаимодействии с шумами не уходят в конус потерь в пространстве скоростей, они диффундируют в обычном пространстве к периферии установки, и их энергия медленно увеличивается. Таким образом, для получения горячих электронов необходимо удовлетворить ряду условий для удержания электронов в зеркальной магнитной ловушке и их нагрева до высоких энергий, а именно:

$$\begin{aligned} \omega_{pe} &> \omega_{0n}; \\ \gamma &\sim \omega_{pe} n_{0b} / n_0; \\ R &> 1 / \cos^2 \theta_0, \end{aligned}$$

где $\arctg \theta = k_{\perp} / k_{\parallel}$ и θ_0 - некоторый предельный угол.

Если принять во внимание, что радиус пучка $a \sim 1$, и характерный волновой вектор возбуждаемых колебаний $k \sim \omega_{pe} / u \approx 5 \text{ см}^{-1}$, то $k \cdot a \gg 1$. 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 плазменную частоту, волновое число k и скорость горячих электронов v накладывается условие:

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

где φ является углом между k и v . Энергичный электрон будет эффективно взаимодействовать только с теми колебаниями, чьи волновые векторы будут почти перпендикулярны его скорости.

На основе вышеизложенного можно выявить зависимость энергии горячих электронов от величины магнитного поля. Электроны, вовлеченные в процесс ускорения, увеличивают энергию и диффундируют от границы пучка до внешней стенки ловушки. Энергия электрона определяется временем его жизни в ловушке τ , которое можно записать как:

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

где τ_S - время рассеяния электрона в конус потерь; τ_D - время диффузии электрона до внешней границы плазмы. Таким образом, время ухода электрона в конус потерь определяется конфигурацией магнитного поля (пробочным отношением) и не зависит от его величины.

Время диффузии электрона поперек магнитного поля пропорционально квадрату радиуса плазмы 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 вре-

менем 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 нагреву электронов в пучково-плазменном разряде были выполнены на установке "Оратория-10", показанной на рис. 1.

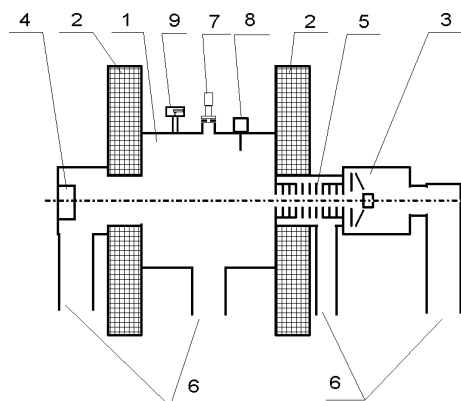


Рис. 1. Схема установки «Оратория - 10»:

1 - вакуумная камера; 2 - магнитные катушки; 3 - электронная пушка; 4 - приемник электронного пучка; 5 - диафрагмы; 6 - вакуумные насосы; 7 - рентгеновская диагностика; 8 - электронные зонды

Установка "Оратория-10" позволяет выполнять исследования с неравновесной плазмой с плотностью $10^{10} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$, полученной в пучково-плазменном разряде. Рабочая вакуумная камера (1) диаметром 0.5 м. и длиной 1 м выполнена из нержавеющей стали. Вся камера находится в поле магнитных катушек (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. В течение короткого времени (10...15 мин) может поддерживаться значение магнитного поля 800...900 Гс. Электронный пучок цилиндрической геометрии диаметра до 4 см сформирован посредством электронной пушки (3) с током пучка до 2 А и энергией электронов до 6 кэВ. Электронный пучок инжектируется в рабочую камеру (1) по оси магнитного поля через диафрагмы (5) системы дифференциальной откачки. Система дифференциальной откачки используется для обеспечения вакуумных условий, необходимых для работы электронной пушки. Необходимые вакуумные условия обеспечиваются диффузионными вакуумными насосами с охлаждаемыми жидким азотом ловушками. Остаточное давление - не более $3 \cdot 10^{-7}$ Торр с охлаждаемыми жидким азотом ловушками и не более $3 \cdot 10^{-6}$ Торр без охлаждения ловушек жидким азотом. Максимальное рабочее давление $\sim 10^{-3}$ Торр. Система напуска газа на базе пьезоэлектрического нагревателя обеспечивает непрерывную и импульсную подачу рабочего газа в камеру. Электроны с высокой энергией, нагретые пучково-плазменным взаимо-

действием 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 на основе кристалла калий-йод. Для определения спектра использовался 1024-канальный амплитудный анализатор. Плотность плазмы измерялась ленгмюровским зондом (8). Плазмообразующий газ вводится в рабочую камеру через пьезоэлектрический натекатель (9).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью настоящих экспериментальных исследований было изучение процессов нагрева электронов в пучково-плазменном разряде. Как и в работах [2-4], в качестве основного метода исследования был выбран метод измерения спектрального состава и интенсивности рентгеновского излучения, генерируемого в пучково-плазменном разряде.

Измерения проводились при различных значениях параметров электронного пучка (энергии электронов и тока пучка), величины магнитного поля, начального давления и состава плазмообразующего газа. В наших исследованиях мы использовали два плазмообразующих газа: аргон и водород.

Типичный эксперимент по изучению генерации рентгеновского излучения в пучково-плазменном разряде в установке "Оратория-10" проводился следующим образом. Начальное давление остаточного газа в рабочей камере - приблизительно $5 \cdot 10^{-6}$ Торр. Номинальный ток в магнитных катушках - приблизительно 200 А соответствует величине магнитного поля приблизительно в 600 Гс в центре магнитной ловушки. Электронный пучок инжектируется в рабочую камеру по оси магнитного поля. Ток пучка - приблизительно 1 А, энергия электронов пучка - приблизительно 3...4 кэВ. Водород подается в рабочую камеру через пьезоэлектрический натекатель. Поток водорода выбирается таким образом, чтобы получить максимум интегральной интенсивности рентгеновского излучения. Поток напускаемого водорода соответствует полному давлению газа в рабочей камере $\sim (7...9) \cdot 10^{-5}$ Торр. Регистрируется спектр рентгеновского излучения с использованием сцинтилляционного детектора и анализатора спектра.

Эксперименты по изучению рентгеновского излучения были выполнены в соответствии с вышеупомянутой последовательностью при различных параметрах разряда: величине магнитного поля, энергии и токе электронного пучка и давлении плазмообразующего газа.

Типичные экспериментальные спектры рентгеновского излучения в водородной плазме пучково-плазменного разряда показаны на рис. 2 и рис. 3.

Можно увидеть, что максимум распределения рентгеновских квантов по энергиям в эксперименте с водородной плазмой лежит около 230...250 кэВ при магнитной индукции поля $H=330$ Гс и около 270...300 кэВ при $H=600$ Гс. Т.е. при увеличении

магнитного поля максимум распределения рентгеновских квантов смещается в область более высоких энергий.



Рис.2. Спектр рентгеновского излучения в водородной плазме. Начальное давление $\sim 8.5 \cdot 10^{-5}$ Торр, ток пучка ~ 0.75 А, энергия электронов пучка 3 кэВ, магнитная индукция $H=330$ Гс

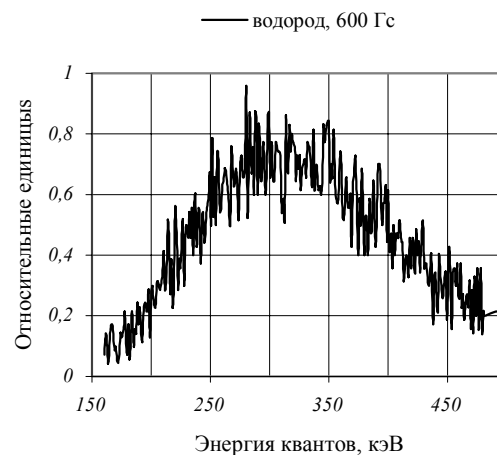


Рис.3. Спектр рентгеновского излучения в водородной плазме. Начальное давление $\sim 8.5 \cdot 10^{-5}$ Торр, ток пучка ~ 0.75 А, энергия электронов пучка 3 кэВ, магнитная индукция $H=600$ Гс

Типичный экспериментальный спектр рентгеновского излучения в плазме аргона пучково-плазменного разряда в установке "Оратория-10" можно видеть на рис. 4.



Рис.4. Спектр рентгеновского излучения в аргонной плазме. Начальное давление $\sim 8.5 \cdot 10^{-5}$ Торр, ток пучка ~ 0.75 А, энергия электронов пучка 3 кэВ, магнитная индукция $H=600$ Гс

В случае аргоновой плазмы максимум распределения рентгеновских квантов по энергиям лежит около 350 кэВ.

Система регистрации излучения (сцинтилляционный кристалл, ФЭУ и амплитудный анализатор спектра) калибровалась по изотопам ^{241}Am , ^{60}Co и ^{137}Cs .

Была выполнена серия экспериментов с аргоновой и водородной плазмой. Все кривые распределения рентгеновских квантов по энергиям имеют «максвеллоподобный» вид. Наши эксперименты демонстрируют интересную зависимость: интегральная интенсивность наиболее высока в экспериментах с водородной плазмой, в то время как максимум распределения энергия квантов по энергиям соответствует более высоким энергиям в экспериментах с аргоновой плазмой.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего мы должны отметить некоторые новые физические результаты экспериментов.

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

Генерация рентгеновского излучения в водородной плазме наблюдается при существенно меньших магнитных полях (300...330 Гс), чем для аргоновой плазмы (550...600 Гс).

Таким образом, наблюдается зависимость интенсивности и состава рентгеновского излучения от вида плазмообразующего газа.

Увеличение максимума распределения рентгеновских квантов по энергиям при увеличении напряжённости магнитного поля в экспериментах с водородной плазмой можно объяснить зависимостью скорости поперечной диффузии горячих электронов от величины магнитного поля.

И если можно объяснить меньшую интенсивность рентгеновского излучения в экспериментах с аргоновой плазмой с позиций увеличения потерь энергии, вкладываемой в плазму электронным пучком, на возбуждение атомов аргона, имеющего большее количество уровней возбуждения в сравнении с водородом, то этот механизм не объясняет увеличения "температуры" горячих электронов в аргоновой плазме. Таким образом, необходимо предположить существование другого механизма, ответственного за это явление.

Можно, например, предположить существование зависимости поперечной скорости распространения горячих электронов от вида ионов в плазме (отношение массы к заряду). Для более тяжелых ионов в плазме скорость поперечного дрейфа электронов - меньше, время поперечного дрейфа - больше, время жизни в ловушке - также больше. Результатом будет уменьшение количества горячих электронов и увеличение их средней энергии. Возможно предположить и существование иных механизмов генерации рентгеновских квантов в плазме пучково-плазменного разряда, связанных с проявлением коллективных эффектов в плазме и ускорением горячими электронами ионной компоненты.

С другой стороны, выполненные эксперименты демонстрируют возможность получить горячие электроны в плазме ППР. Температура горячих электронов в плазме намного выше, чем температура электронов в пучке. Чтобы сравнить полученные экспериментальные результаты с более ранними экспериментами на установках, работающих в импульсном режиме, интересно продолжить изучение нагрева электронов ППР и исследовать динамику формирования спектра рентгеновского излучения во времени при импульсной инжекции электронного пучка в тех же условиях, что и при непрерывной инжекции пучка.

Другое направление исследований - получение высокотемпературных релятивистских электронов при адиабатическом сжатии плазмы ППР, содержащей горячие электроны. Существование горячих электронов в экспериментах с водородной плазмой при индуктивности магнитного поля приблизительно 300 Гс позволяет нам предположить возможность получения электронов достаточно высокой энергии при адиабатическом сжатии плазмы.

Еще одно перспективное направление в изучении нагрева электронов в ППР - исследование распада плазмы после прекращения инжекции электронного пучка в зеркальную магнитную ловушку и, прежде всего, изучение горячих электронов, которые покидают магнитную ловушку через магнитную пробку.

Все эти результаты будут очень полезны для применения в науке, технике и медицине.

Существует возможность создания источника рентгеновского излучения с изменяемой энергией квантов и интенсивностью излучения. Такой рентгеновский источник может использоваться в медицине для рентгенотерапии. Горячие электроны, полученные в ППР, могут использоваться для получения многозарядных ионов. Источники многозарядных ионов применяются в науке и промышленности.

Электроны и ионы, покидая ловушку через магнитную пробку в процессе распада плазмы, могут принимать участие в коллективных процессах расширения плазмы в вакуум. При этом может наблюдаться ускорение ионов до скоростей, близких к скоростям электронов. Принимая во внимание высокую скорость горячих электронов и отношение массы ионов к массе электронов (для протона - 1840), можно предположить возможность осуществления коллективного ускорения. Это открывает перспективу к созданию коллективных ускорителей на основе полученных результатов и вышеупомянутых процессов.

Возможность нагрева электронов в ППР имеет также и обратную сторону, а именно, фактически в любом устройстве с ППР существует режим, в котором рентгеновское излучение может быть достаточно интенсивно. Это - проблема безопасности персонала в установках ППР, где рассмотренный режим не является основным, например, в плазмохимических исследованиях.

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. A.A. Ivanov. 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. I. Alexeff, R.V. Neidigh, et all. Hot-electron plasma by beam-plasma interaction. // *Phys. Rev. Letters*, 1963, V.10. #7, p.273-276.
3. Л.П. Закатов, Л.П. Закатов, А.Г. Плахов, Д.Д. Рютов, В.В. Шапкин. Исследование высокотемпературной электронной компоненты плазмы в системе плазма-пучок // *ЖЭТФ*, 1968, т. 54, # 4, с. 1088-1098.
4. Л.П. Закатов, А.А. Иванов, А.Г. Плахов, В.В. Шапкин. Получение релятивистской плазмы адиабатическим сжатием в системе плазма – пучок // *Письма в ЖЭТФ*. 1972, т. 15, #1, с. 16-20.
5. Л.А. Митин, В.И. Перевозчиков, М.А. Завьялов, В.Н. Цхай, А.Л. Шапиро. Мощные широкополосные пучково-плазменные СВЧ-усилители и генераторы // *Физика плазмы*. 1994. т. 20. # 7-8, с. 733 - 746.
6. В.М. Атаманов, Т.А. Биман, Л.И. Елизаров и др. Генерация рентгеновского излучения в плазме пучково-плазменного разряда в стационарных условиях // *Вопр. ат. науки и техн. Сер. Термояд. синтез. 2000*. #3 с. 30–36.
7. А.А. Иванов. *Физика сильнонеравновесной плазмы*. М.: Атомиздат, 1977, 350 с.
8. Я.Б. Файнберг. Взаимодействие заряженных частиц с плазмой // *Атомная энергия*. 1961, т.11, с. 313.