

# РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА

А.В. Переславцев<sup>1</sup>, М.В. Пальтов<sup>2</sup> Т.А. Биман<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский научный центр "Курчатовский Институт"  
123182, Москва, пл. Курчатова, 1

<sup>2</sup>Российский Университет Дружбы Народов  
117198 ГСП, Москва, ул. М.-Маклая, 6. PaltovMK@mail.ru

Рассматривается возможность получения горячих электронов для генерации рентгеновского излучения на основе пучково-плазменного разряда в зеркальной магнитной ловушке. В пучково-плазменном разряде в зеркальной магнитной ловушке можно получить горячие электроны с энергией 40 - 200 кэВ. На установке "Оратория-10" выполняется экспериментальная программа по генерации рентгеновского излучения. Получено рентгеновское излучение со спектром горячих электронов в диапазоне энергий от 8 до 20 кэВ.

## Введение

Существует интерес к возможности генерации рентгеновского излучения электронами, нагретыми в плазме разряда и создания на этой основе источники рентгеновского излучения для практического применения в технологии, науке и медицине. Получение высоко энергетического рентгеновского излучения с энергией 100 кэВ и выше в рентгеновских трубках связано с необходимостью использования анодного электропитания с теми же самыми напряжениями.

В 60-е - 70-е годы был выполнен ряд экспериментов, демонстрирующих возможность получения горячих электронов в пучково-плазменном разряде. В работе [1] показано, что при пучково-плазменном взаимодействии могут генерироваться горячие электроны, при взаимодействии которых с остаточным газом и стенками камеры, генерировались, в свою очередь, рентгеновские кванты с энергией вплоть до 250 кэВ. Средняя "температура" электронов 32 кэВ и плотность  $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  получены из общего потока квантов и их распределения по энергиям.

В работе [2] показано, что высоко энергетические электроны генерируются в зеркальной магнитной ловушке с большим пробочным отношением при взаимодействии электронного пучка с холодной плазмой с плотностью  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  в объеме 20 литров. Температура горячей электронной компоненты была 200 кэВ, плотность плазмы -  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Плазма с температурой электронов 550 кэВ и плотностью  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  в объеме 4,2 литра была получена в установке ПН-2 посредством адиабатического сжатия [3], при этом имела место генерация рентгеновского излучения с энергией до 1 МэВ. В этом эксперименте горячая плазма удерживалась зеркальным магнитным полем без распада в течение нескольких секунд.

## 1. Механизм нагрева.

Анализ экспериментальных и теоретических исследований нагрева электронов пучком в зеркальной магнитной ловушке приведен в работе [4]. Когда электронный пучок вводится в зеркальную магнитную ловушку [4], имеет место сильное пучково-плазменное взаимодействие, что приводит к увеличению поперечного размера плазмы и сильному нагреву электронов, удерживаемых в ловушке. Электронный пучок возбуждает ленгмюровские колебания при взаимодействии с плазмой [5]. Нагрев электронов имеет место при их взаимодействии с электронными ленгмюровскими колебаниями при  $\omega_{pe} > \omega_{He}$ . Ширина пучка в пространстве скоростей  $\Delta v$  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 возбуждает колебания,

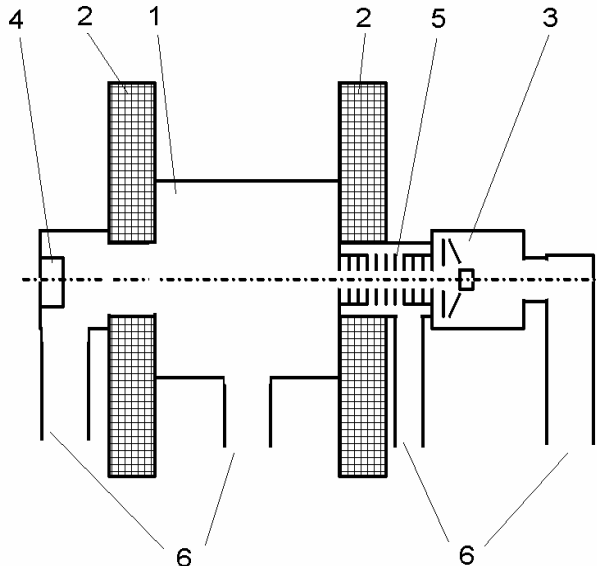
главным образом, с волновыми векторами, параллельными его оси. Спектр ленгмюровских колебаний существенно не изотропен. Если электроны при взаимодействии с шумами не уходят в конус потерь в пространстве скоростей, они диффундируют в обычном пространстве к периферии установки, и их энергия медленно увеличивается. Таким образом, чтобы получить горячие электроны, необходимо удовлетворить ряду условий для удержания электронов в зеркальной магнитной ловушке и их нагрева до высоких энергий, а именно,  $\omega_{pe} > \omega_{He}$ ,  $\gamma \sim \omega_{pe} n_{об} / n_0$  и  $R > 1 / \cos 2\theta_0$ , где  $\arctg \theta = k_{\perp} / k_{\parallel}$  и  $\theta_0$  - некоторый предельный угол,  $L$  - длина взаимодействия пучка с плазмой,  $r$  - максимальный радиус плазмы.

Эксперименты по нагреву электронов пучково-плазменным разрядом проводятся на установке "Оратория-10" с параметрами  $L \geq 0,3$  м,  $n_0 \sim 10^{12}$  см<sup>-3</sup>,  $r > 0,12$  м,  $H \sim 600$  Э,  $R \sim 3,5$ ;  $I_b \sim 2$  А,  $u \sim 3 \div 6$  кВ. Для вышеупомянутых параметров:

$$\begin{aligned} \omega_{He} &= 1,05 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}, \\ \omega_{pe} &= 5,64 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}, \\ n_b &= (1,54 \div 2,18) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}. \end{aligned}$$

## 2. Экспериментальная установка

Установка "Оратория-10" позволяет, выполнять исследования неравновесной плазмы с плотностью  $10^{10} - 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, полученной в пучково-плазменном разряде. Магнитная система типа "зеркальная магнитная ловушка" позволяет получать магнитное поле с максимальной напряженностью 600 Э в середине ловушки и пробочным отношением  $R \sim 3,5$ . Цилиндрический электронный пучок с максимальным диаметром до 4 см сформирован посредством электронной пушки с током пучка до 2 А энергией до 6 кВ. Необходимые вакуумные условия обеспечиваются диффузионными вакуумными насосами с охлаждаемыми жидким азотом ловушками. Остаточное давление - не более  $5 \cdot 10^{-7}$  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 обеспечивает, и непрерывную, и импульсную подачу рабочего газа в камеру. Схема установки "Оратория - 10" приведена 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.

### 3. Результаты исследований

Экспериментально подтверждена возможность получения рентгеновского излучения с энергией выше, чем энергия электронов пучка в постоянном режиме на установке "Оратория-10".

Измерения проводились с помощью термолюминесцентных таблеток  $LiF$ . Две таблетки, расположенные одна над другой, помещались на расстоянии 250 мм от оси пучка. Роль дополнительного фильтра играла алюминиевая диафрагма толщиной 1,4 мм. Наибольшая мощность дозы рентгеновского излучения из плазмы через окно из алюминия, полученная в экспериментах с пучково-плазменным разрядом в водороде на установке "Оратория-10", составляет 3,7 Р/час при напряженности поля 600 Э в центре ловушки. Оценка средней энергии рентгеновских квантов дает ~20 кэВ. Т.о., мощность дозы рентгеновского излучения внутри камеры при этом составляла не менее 11,6 Р/час. Был выполнен также эксперимент с разрядом в водороде при напряженности поля 300 Э. При этом мощность дозы составляла 2,6 Р/час. Эксперимент был выполнен в интересах проведения дальнейших исследований с адиабатическим сжатием плазмы.

В последующих экспериментах кассета с таблетками помещалась внутрь камеры. Над каждой парой таблеток помещались фильтры из различных материалов и различной толщины. В результате измерений были получены результаты, свидетельствующие о наличии в спектре излучения квантов с энергией от 8 до 20 кэВ. В дальнейшем предполагается провести экспериментальные исследования спектра рентгеновского излучения в зависимости от параметров разряда и состава плазмообразующего газа.

### Заключение

В настоящей работе приведена программа исследований, направленных на создание источника рентгеновского излучения на основе пучково-плазменного разряда в зеркальной магнитной ловушке. Дальнейшие исследования, выполняемые на экспериментальной установке «Оратория – 10» позволят получить экспериментальные данные, необходимые для проведения прикладных работ, направленных на создание такого источника. Дальнейшие исследования горячих электронов, получаемых в плазме пучково-плазменного разряда, могут быть направлены на другие прикладные аспекты использования горячих электронов, например: получение многозарядных ионов, исследование процессов коллективного ускорения при разлете плазмы в вакуум и др.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Alexeff, R.V. Neidigh, W.F. Peed, E.D. Shipley, and E.G Harris. *Hot-electron plasma by beam-plasma interaction. Phys. Rev. Letters* V 10, N 7, 1 April 1963, p 273-276.
2. Л.П. Закаатов, А.Г. Плахов, Д.Д. Рютов, В.В.Шапкин. *Исследование высокотемпературной электронной компоненты плазмы в системе плазма-пучок. ЖЭТФ*, 1968, т. 54, No. 4, с. 1088-1098.
3. Л.П. Закаатов, А.А. Иванов, А.Г. Плахов, В.В.Шапкин. *Получение релятивистской плазмы адиабатическим сжатием в системе плазма – пучок. Письма в ЖЭТФ*, 1972, т. 15, No 1, с. 16-20.
4. А.А. Иванов. *Физика сильнонеравновесной плазмы. М. Атомиздат*, 1977, 350 с.
5. Я.Б. Файнберг. *Взаимодействие заряженных частиц с плазмой. Атомная энергия*, 1961, т. 11, с. 313.
6. V.M. Atamanov and others. *Hot electrons in beam-plasma discharge.//Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. No 1, 2000, с. 46–49.*