

УДК 533.9.082

Диагностика аномальной электрон-электронной эмиссии в автоколебательном режиме пучково-плазменного разряда при помощи метода фильтров и термолюминесцентных детекторов

А. В. Баловнев, И. В. Визгалов, Г. Х. Салахутдинов

В работе впервые проведена рентгеновская диагностика автоколебательного вторично-эмиссионного разряда. В качестве основного инструмента рентгеновской диагностики использовался спектрометр на основе термолюминесцентных детекторов. Проведенные исследования указывают на наличие в обратном потоке группы электронов с энергией, значительно (на порядок) превышающей ее возможный прирост при однократном прохождении осциллирующего коллекторного напряжения.

PACS: 52.38 Ph

Ключевые слова: рентгеновское излучение, пучково-плазменный разряд, метод фильтров поглощения, термолюминесцентные детекторы.

Введение

Целью работы является изучение спектра высокоэнергетической группы электронов в автоколебательном режиме пучково-плазменного разряда (ППР) [1—3] методами рентгеновской диагностики.

Применение прямых контактных средств диагностики (зондов и энергоанализаторов) связано с возмущением плазмы, а в области больших энергий еще и с высокими напряжениями. Кроме того, необходимо разделить первичный падающий пучок и обратный поток, включающий отраженные и эмитированные поверхностью коллектора электроны. В таком случае использование рентгеновских методов диагностики представляется наиболее оптимальным. При этом спектр высокоэнергетичной (>4 кэВ) группы электронов восстанавливается по рентгеновскому излучению. Использование многоканальной системы регистрации позволяет обеспечить сбор наиболее полной информации о параметрах плазмы за один опыт.

Описание установки

Аномально высокая эмиссия вторичных электронов (АВЭР) лежит в основе механизма по-

ложительной обратной связи, приводящей к генерации автоколебаний на резонансных частотах. Для АВЭР [4] прикладываемое к коллекторной пластине отрицательное напряжение постоянного источника составляет 100—600 В, а амплитуда импульсов возбуждаемых автоколебаний может многократно превышать это значение, определяя особенности спектра высокоэнергетичной группы электронов.

В данной работе исследовался несамостоятельный режим АВЭР в продольном магнитном поле с использованием автономной электронной пушки для зажигания первичного ППР.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Для разделения первичного и обратного вторично-эмиссионного потоков использован поперечный центробежный дрейф в слабо искривленном магнитном поле.

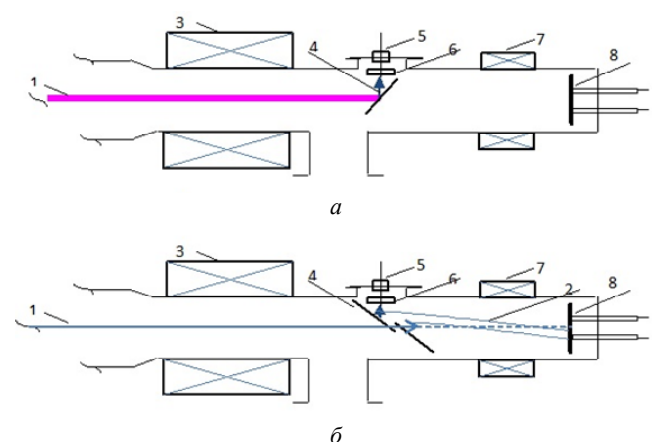


Рис. 1. а) Схема измерений на ППР; б) Схема измерений на АВЭР. 1 — первичный пучок; 2 — обратный поток вторичных и отраженных электронов; 3, 7 — катушки магнитного поля; 4 — молибденовая диафрагма; 5 — шлюзовое устройство; 6 — кассета с ТЛД; 8 — коллекторная пластина

Баловнев Алексей Владимирович, аспирант.

Визгалов Игорь Викторович, доцент.

Салахутдинов Гаяр Харисович, профессор.

Тел. 8 (495) 324-79-39.

E-mail: saip07@mail.ru; alexisvb@mail.ru

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе. 31.

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2014 г.

© Баловнев А. В., Салахутдинов Г. Х., 2015

Как показано на рисунке 1, б первичный пучок электронов 1 проходит через отверстие в диафрагме 4. Она наклонена в сторону детектора 6 для регистрации излучения под действием только обратного потока отраженных и эмитированных электронов. Магнитная ось на выходе из ловушки имеет небольшое отклонение от геометрической оси. Оно может регулироваться специальной боковой катушкой. При заземленном коллекторе 8 плазменный шнур вместе с первичным пучком следует этому закружению, поскольку поляризация шнура под действием центробежного дрейфа подавляется за счет хорошего электрического контакта между плазменным шнуром и коллектором по тепловому электронному компоненту. При отрицательном смещении потенциала коллектора с помощью внешнего источника контакт по тепловому электронному компоненту нарушается, и развивается желобковая неустойчивость [5], приводящая к спрямлению плазменного шнура. При этом обратный электронный поток также испытывает дрейф в скрещенных магнитном и индуцированном электрическом полях. Он смещается по радиусу кривизны магнитной трубки и попадает на сплошную часть диафрагмы, что позволяет регистрировать сопутствующее рентгеновское излучение.

В работе впервые проведена рентгеновская диагностика АВЭР. Для измерения параметров автоколебания применялись высокочастотные делители напряжения, пояса Роговского, высокочастотные шунты. В качестве регистрирующей аппаратуры использовались высокочастотные осциллографы и методы рентгеновской диагностики. Обычные контактные зондовые и спектрометрические методы исследования энергетического распределения высокоэнергетичной группы электронов в плазменном шнуре вносят значительные возмущения. Кроме того, они не позволяют разделить первичный падающий пучок и обратный поток, включающий отраженные и эмитированные поверхностью коллектора электроны. Спектр высокоэнергетичной группы электронов восстанавливается по рентгеновскому излучению.

В данной работе использован спектрометр на основе термолюминесцентных детекторов (ТЛД) [6]. Он содержит 13 каналов регистрации, укомплектованных сборками таблеток ТЛД из фтористого лития, расположенных один за другим. Сборки размещаются в углублениях кассеты и закрываются фильтрами ослабления из алюминиевой фольги различной толщины. Тип и толщина используемых фильтров ограничивают чувствительность спектрометра. Минимально измеряемая энергия регистрируемых рентгеновских квантов составляет порядка 4 кэВ. Показания с ТЛД считывались с помощью прибора ДВГ-02ТМ. Уровни сигналов термолюминесценции не превышали паспортных показаний, приведенных изготовителем ТЛД. В ходе измерения спектра рентгеновского излучения использовались метод фильтров (сигналы соборок за фильтрами различной толщины) и метод поглощенной энергии (анализ сигналов ТЛД одной сборки) [7].

Полученные результаты

В первых экспериментах диафрагма была развернута к ТЛД датчикам таким образом, чтобы регистрировать излучение от первичного пучка при бомбардировке мишени первичным потоком электронов (схема на рис. 1, а). Данный режим ППР был получен при ускоряющем напряжении электронной пушки 5 кВ (ток 0,1 А) без напуска рабочего газа (давление в камере 10^{-6} Торр). В этом положении удобно проводить настройку и калибровку регистрирующей аппаратуры, поскольку в вакуумном режиме транспортировки первичного пучка ток и энергия электронов могут быть точно определены. Взаимодействие первичного пучка с водородной плазмой (напуск водорода, давление в камере 10^{-4} Торр) приводит к бесстолкновительному торможению основной части электронов и доускорению небольшой доли (порядка процента) сверх энергии первичного пучка. Эти электроны и дают высокоэнергетический "хвост" в распределении. На рис. 2 представлена кривая поглощения рентгеновского излучения ППР. Форма кривой обусловлена характерным строением спектра излучения. Несколько точек на кривой, полученных при соответствующей толщине фильтра, образуют прямые линии, которые соответствуют определенной энергии рентгеновского излучения.

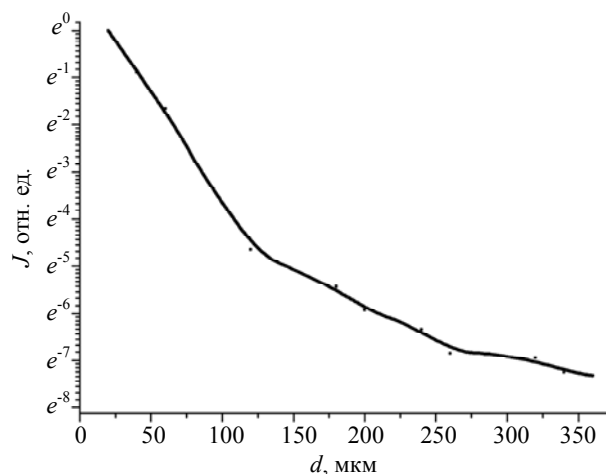


Рис. 2. Кривая поглощения рентгеновского излучения в режиме ППР

В последующих экспериментах проводились измерения в режиме АВЭР, для чего мишень была развернута на 90° , а затем проплавлена насквозь мощным первичным пучком. В результате пространственного разделения, датчиком регистрировались рентгеновские кванты только от вторичного потока эмиссионных электронов. Ускоряющее напряжение пушки 1,5 кВ, ток эмиссии пушки 0,1 А, давление такое же, как и в предыдущем эксперименте — 10^{-4} Торр, напряжение смещения коллекторной пластины — 600 В, амплитуда полученных автоколебаний — 600 В, частота — 3 МГц. Энергия вторично-эмиссионных электронов не могла превышать 1200 эВ, но обработка кривой поглощения показывает наличие аномального, т.е. значительно более жесткого компонента рентгеновского излучения. На рис. 3 сведены вместе участки спектров, полученные в режимах ППР и АВЭР. Их сравнение показывает, что в условиях ППР доля высокоэнергетических доускоренных электронов очень мала, на что указывает резкий спад относительной интенсивности рентгеновского излучения при превышении энергии первичных электронов (5 кэВ). В режиме АВЭР спектр рентгеновского излучения отличается принципиально, а именно, в его спектре проявляется значительно большее (на порядок) относительное количество многократно доускоренных электронов.

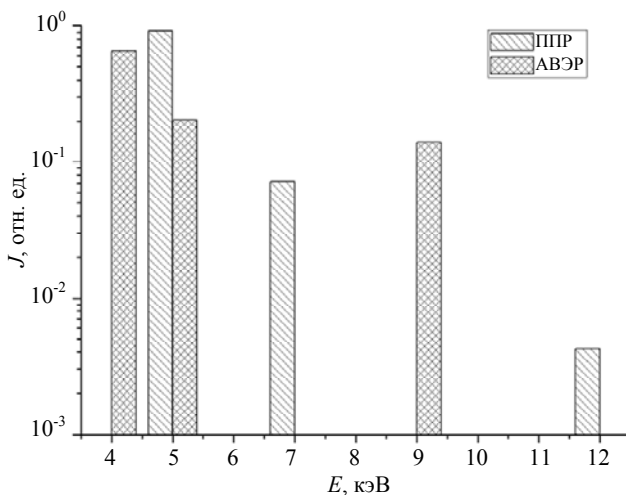


Рис. 3. Спектры полученные в режимах ППР и АВЭР

Отметим, что при пучково-плазменном взаимодействии небольшая доля первичных электронов может ускоряться и удерживаться между пробками, набирая весьма большую энергию. В условиях эксперимента с АВЭР такие электроны попадают либо на расположенный в глубокой полости коллектор, либо на обратную по отношению к датчику сторону диафрагмы, и генерируемое ими излучение не регистрируется. Таким образом, в режиме АВЭР при пространственном разделении

прямого и обратного потоков доускорение должно происходить только за один пролет между эмиттером и мишенью.

Заключение

В работе впервые проведена рентгеновская диагностика АВЭР. В качестве основного инструмента рентгеновской диагностики использовался спектрометр на основе ТЛД. Был измерен спектр как первичного потока электронов в режиме ППР, так и от вторичного потока эмиссионных электронов в режиме АВЭР, для чего было реализовано пространственное разделение пучков при помощи диафрагмы.

Проведенные исследования указывают на наличие в обратном потоке группы электронов с энергией, значительно (на порядок) превышающей ее возможный прирост при однократном прохождении осциллирующего коллекторного напряжения. Однако в отношении природы механизма ускорения пока нет полной ясности.

Это может быть связано с эффектом группирования. Экспериментальные и расчетные осциллограммы напряжений на коллекторе показывают, что для АВЭР характерно нарастание производной по времени на переднем фронте импульса отрицательного напряжения. И благодаря этому можно достичь эффекта группирования эмитированных коллектором электронов. В результате пространственного и временного сжатия электронного сгустка в АВЭР может происходить более эффективное по сравнению с обычным режимом ППР пучково-плазменное взаимодействие, и, соответственно, усиление доускоренной группы электронов.

Кроме того, аномальное ускорение вторичных электронов может быть связано с очень высокочастотными модами автоколебаний. Падения напряжения в неустойчивом слое приповерхностного объемного заряда, обладающего емкостными свойствами, и вдоль плазменного шнура, обладающего индуктивными свойствами, могут оказаться в последовательном резонансе и в противофазе. В результате реальное ускоряющее напряжение может быть значительно больше измеряемого потенциала приемной пластины относительно корпуса установки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №14-12-00784.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев П. М., Онищенко И. Н., Ткач Ю. В. и др. // Физика плазмы, 1976. Т. 2. Вып. 3. С. 407.
2. Smullin L. D. / The international workshop on relation between laboratory and space plasmas, Tokyo, 1980. P. 2.

3. *Lowson J. D.* The Physics of Charged-particle Beams - Oxford, 1988.

4. *Акел М., Визгалов И. В.* Вторично-эмиссионный автоколебательный разряд на частоте собственного резонанса / Научная сессия МИФИ-2004. Т. 4. С. 103.

5. *Арцимович Л. А., Сагдеев Р. З.* Физика плазмы для физиков. — М.: «Атомиздат», 1979.

6. *Иванов В. И.* Курс дозиметрии. — М.: Атомиздат, 1978.

7. *Кушин В. В., Ляпидевский В. К., Пережогин В. Б.* Ядерно-физические методы диагностики плазмы. — М., 1985.

Abnormal electron-electron emission diagnostics in autooscillation regime of a beam plasma discharge by the filter method and termoluminescent detectors

A. V. Balovnev, I. V. Vizgalov, and G. H. Salahutdinov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia
E-mail: alexisvb@mail.ru; saip07@mail.ru

Received December 24, 2014

In this work, the X-ray diagnostics of autooscillation secondary emission discharge was conducted for the first time. Spectrometer based on termoluminescent detectors was the main part of the X-ray diagnostics. The investigations show us high energy group of electrons in the reverse flow, their increment exceeds energy, that they get from oscillating collector's voltage by one turn.

PACS: 52.38 Ph

Keywords: X-rays, beam plasma discharge, gray filters method, termoluminescent detectors.

REFERENCES

1. P. M. Lebedev, I. N. Onishchenko, Yu. V. Tkach, et al., *Plasma Physics Reports* **2**, 407 (1976).
2. *Smullin L. D.* in *Proceedings of the International Workshop on Relation between Laboratory and Space Plasmas* (Tokyo, 1980). P. 2.
3. *J. Lowson*, *The Physics of Charged-particle Beams* (Oxford, 1980).
4. *M. Akel and I. V. Vizgalov*, *Secondary-Emission Self-Oscillating Discharge* (Scientific Session "MEPhi-2004", Moscow, 2004). P. 103 [in Russian].
5. *L. A. Artsimovich and R. Z. Sagdeev*, *Plasma Physics for Physicists* (Atomizdat, Moscow, 1979) [in Russian].
6. *V. I. Ivanov*, *Course of Dosimetry* (Atomizdat, Moscow, 1978) [in Russian].
7. *V. V. Kushin, V. K. Lyapidevsky, and V. B. Perezhugin*, *Nuclear Physics Methods of Plasma Diagnostics* (Moscow, 1985) [in Russian].