

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛОМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ФОТОДИОДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКОВ

А. Д. Ибляминова, С. Ю. Толстяков
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,
г. Санкт-Петербург (Россия)

Введение

Существующие в настоящее время методы производства энергии не способны удовлетворить мировые потребности в длительной перспективе [1], а загрязнение окружающей среды продуктами сгорания органического топлива и радиоактивными отходами ядерной энергетики осложняют непростую экологическую ситуацию в мире. В этой связи одна из важнейших задач заключается в поиске и освоении новых источников энергии.

В основе одного из альтернативных методов получения энергии лежит термоядерный синтез – реакция слияния легких ядер. Термоядерная энергетика имеет немало преимуществ, среди которых – отсутствие выработки веществ, угрожающих ядерной безопасности, сравнительно малая активация конструкций [2], исключение возможности взрыва в силу малого запаса энергии и рабочих веществ.

Наиболее перспективным из разрабатываемых на сегодняшний день устройств по осуществлению термоядерного синтеза является токамак (Тороидальная Камера с Магнитными Катушками). Основная задача термоядерных исследований состоит в осуществлении реакции синтеза с положительным выходом энергии. Для решения данной проблемы необходимо решить ряд физических и технологических задач, связанных, в том числе, с детальным изучением баланса энергии. Одним из существенных каналов потерь энергии из плазмы являются радиационные потери.

Для оценки излучения плазмы токамака необходимо определить мощность радиационных потерь из всего объема плазмы. Мощность излучения плазмы измеряется болометрами – детекторами с равномерной спектральной характеристикой в широком диапазоне длин волн.

В последнее время для такого рода задач стали применяться детекторы на основе фотодиодов: SPD (Silicon Precision Detector, диапазон энергии измеряемых квантов 1,13 эВ до 60 кэВ), разработанные в Физико-Техническом институте им. А. Ф. Иоффе [3], и AXUV (Absolute eXtreme UltraViolet, диапазон энергии измеряемых квантов 1,12 эВ до 100 кэВ), разработанные компанией IRD Inc. (США) [4]. В данной работе рассмотрены диагностические системы, с помощью которых

осуществлялось изучение радиационных потерь плазмы на различных токамаках.

Токамак Т-10, Россия

На токамаке Т-10 (Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия) для измерения радиального распределения мощности излучения плазмы в плоскости полоидального сечения установлена 16-ти канальная камера-обскура с детекторами AXUV.

В проведенном эксперименте область наблюдения обеспечивала полный обхват плазмы в поперечном сечении. Пространственное разрешение детекторов AXUV определялось шириной хорды, составлявшей 4 см в средней плоскости камеры, временное разрешение ограничивалось амплитудно-цифровым преобразователем и составило 16 мкс.

Значения абсолютной мощности p_i (мощность, излученная в единицу тороидальной длины) рассчитаны с использованием средней чувствительности фотодиодов $\langle \eta \rangle = 0,24 \text{ А/Вт}$. Расчет полной излученной мощности был произведен с помощью формулы:

$$P = 2\pi R \sum_{i=1}^{16} p_i,$$

где R – это большой радиус токамака, суммирование производится по всем элементам линейки, i – номер канала.

Для заданной геометрии измерения радиационных потерь на Т-10 был разработан код для восстановления локальных значений плотности мощности излучения из хордовых измерений. Пример полученных зависимостей мощности из i -го канала и соответствующего коэффициента излучения от малого радиуса приведен на рис. 1 [5].

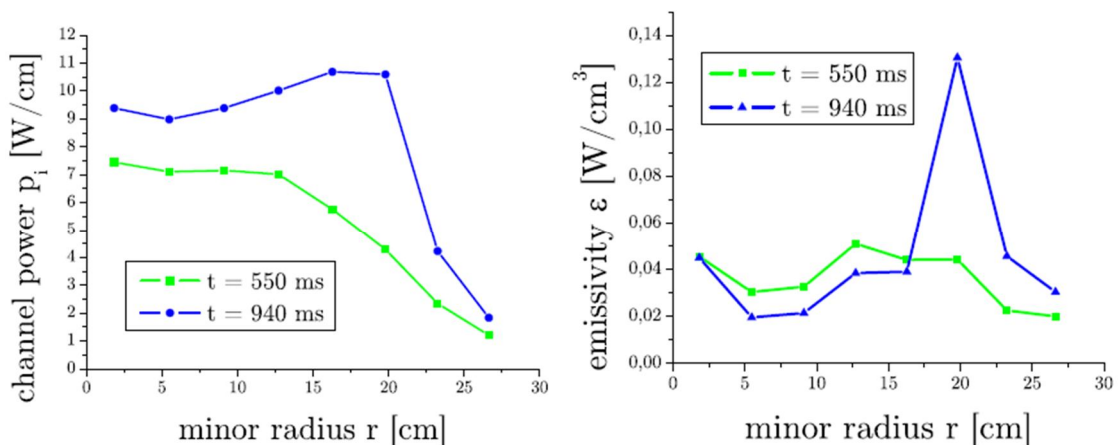


Рис.1. Графики зависимости детектируемой мощности, деленной на длину хорды наблюдения, и соответствующего коэффициента излучения от малого радиуса. Разряд № 31899 (Т-10 режим Н-моды)

Приведенный рисунок демонстрирует резкое увеличение коэффициента излучения плазмы с периферии на 940 мс одновременно с его падением в центре плазменного шнура. Таким образом, в рассматриваемом разряде профиль мощности излучения становится провальным с максимумами на периферии.

Токамак ADITYA, Индия

На токамаке ADITYA (Institute for Plasma Research, Gujarat, India) плазма ограничивается полоидальным лимитером, содержащим 14 дискретных графитовых плиток.

На токамаке была установлена камера-обскура на основе 16ти-канальной линейки детекторов AXUV-16ELG для обеспечения полного обзора полоидального сечения плазмы. Пространственное разрешение детектирующей системы составило 10 см, временное разрешение – 0,4 мс.

Профиль коэффициента излучения плазмы, полученный посредством математической обработки, показан для типичного разряда ADITYA на рис. 2. Кривая показывает провальный профиль с небольшим уровнем излучения из центральной части плазменного шнура и радиационным пиком на границе. Этот пик обусловлен присутствием примесей с низким Z и очень малой концентрации металлов. Пунктирная кривая – это профиль излучения для плазмы разряда со сдвигом шнура примерно на 1 см в вертикальном направлении и 1,25 см в радиальном направлении. Характер распределения аналогичен предыдущему, но с меньшим малым радиусом плазмы.

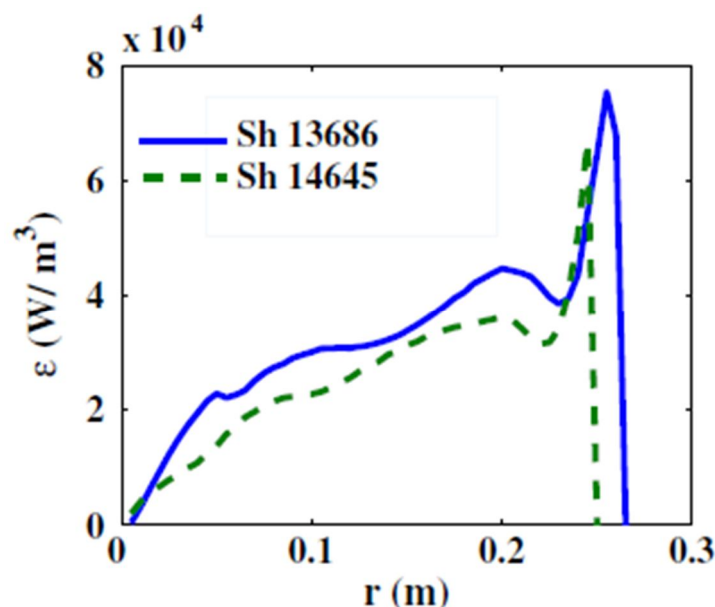


Рис. 2. Распределение коэффициента излучения по малому радиусу токамака ADITYA

Восстановленный профиль показывает наличие радиационного пика на границе в большинстве разрядов и малое излучение из центральной части. Авторы работы полагают, что это связано с полной ионизацией при-

месей с низким Z (углерод и кислород). Они также полагают полную ионизацию примесей с низким Z для центральной электронной температуры 300–400 эВ [6].

Токамак NSTX, США

Диагностическая система на сферическом токамаке NSTX (Princeton University, Princeton, USA) построена на основе линейки детекторов, которая включает 16 фотодиодов AXUV-16LO/G. Регистрация излучения плазмы осуществляется через камеру-обскуру вдоль 16-ти хорд наблюдений, которые равномерно откладываются по диаметру плазмы в средней экваториальной плоскости.

На рис. 3 приведен профиль плотности мощности радиационных потерь в разряде на NSTX.

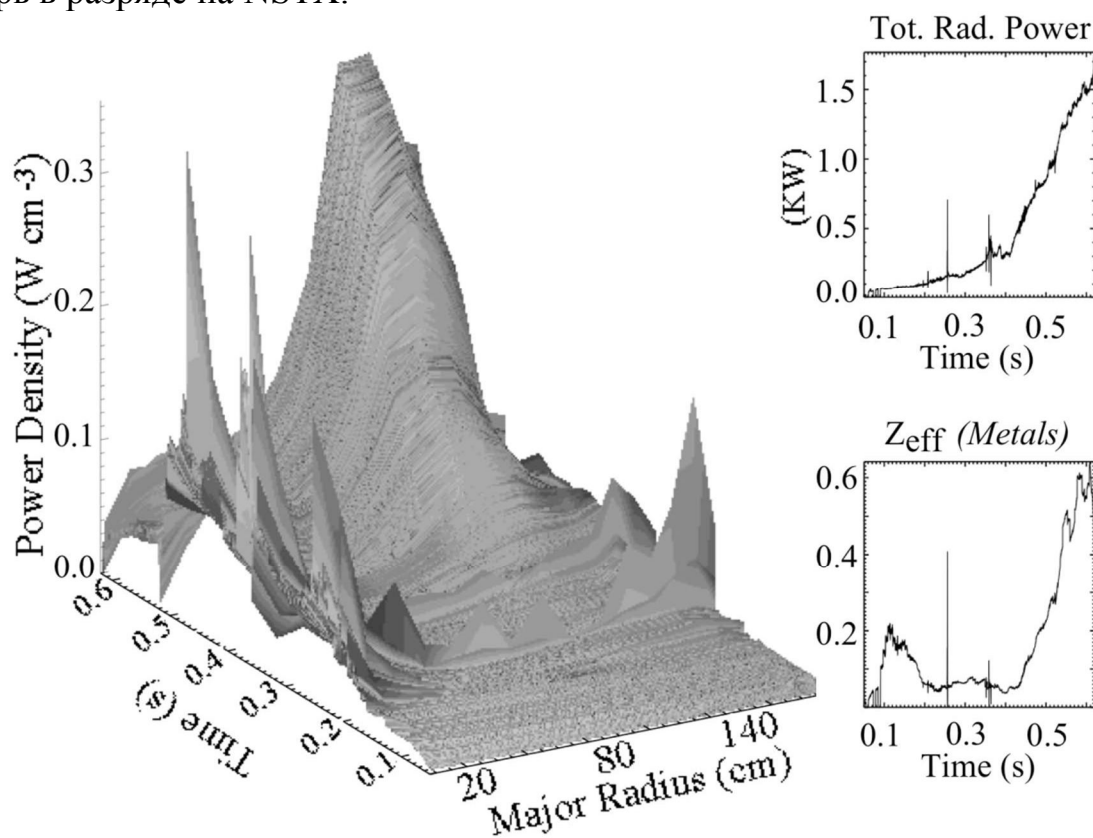


Рис. 3. Разряд № 124312. Слева профиль полных радиационных потерь, полученный с помощью инверсии Абеля, и их временная эволюция; справа сверху временная эволюция полных радиационных потерь плазмы; справа снизу временная эволюция эффективного зарядового числа плазмы [7]

Из рисунка видно, что в полные радиационные потери наибольший вклад вносит центральная часть плазмы, излучение же на границе незначительно. Из данных спектрометров XUV авторами было установлено, что вклад в излучение металлических примесей в наибольшей степени дает железо.

Токамак Глобус-М, Россия

Сферический токамак Глобус-М (ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия) представляет собой уникальную экспериментальную установку для отработки режимов управления высокотемпературной плазмой.

Для изучения радиационных потерь на токамаке Глобус-М были установлены детектирующие системы на основе фотодиодов SPD-8UVHS (UVHS – UltraViolet High Speed). Четыре дискретных фотодиода были размещены на различные патрубки установки, что обеспечивало регистрацию излучения из различных областей плазмы.

Один из детекторов был направлен коллимированно вдоль большого радиуса токамака. Данные с этого детектора использовались для расчета полных радиационных потерь плазмы токамака в предположении различных профилей распределения мощности излучения. Другой детектор имел область наблюдения вниз по касательной к периферии плазменного шнура, обеспечивая локальные измерения мощности с внешней границы плазмы. Данный детектор позволял регистрировать процессы, приводящие к изменению мощности излучения на границе плазмы. Также был установлен фотодиод, область наблюдения которого охватывала почти все полоидальное сечение плазмы, таким образом, он служил для обзорной диагностики плазмы. Данный детектор обеспечивал качественную оценку и контроль полученных измерений.

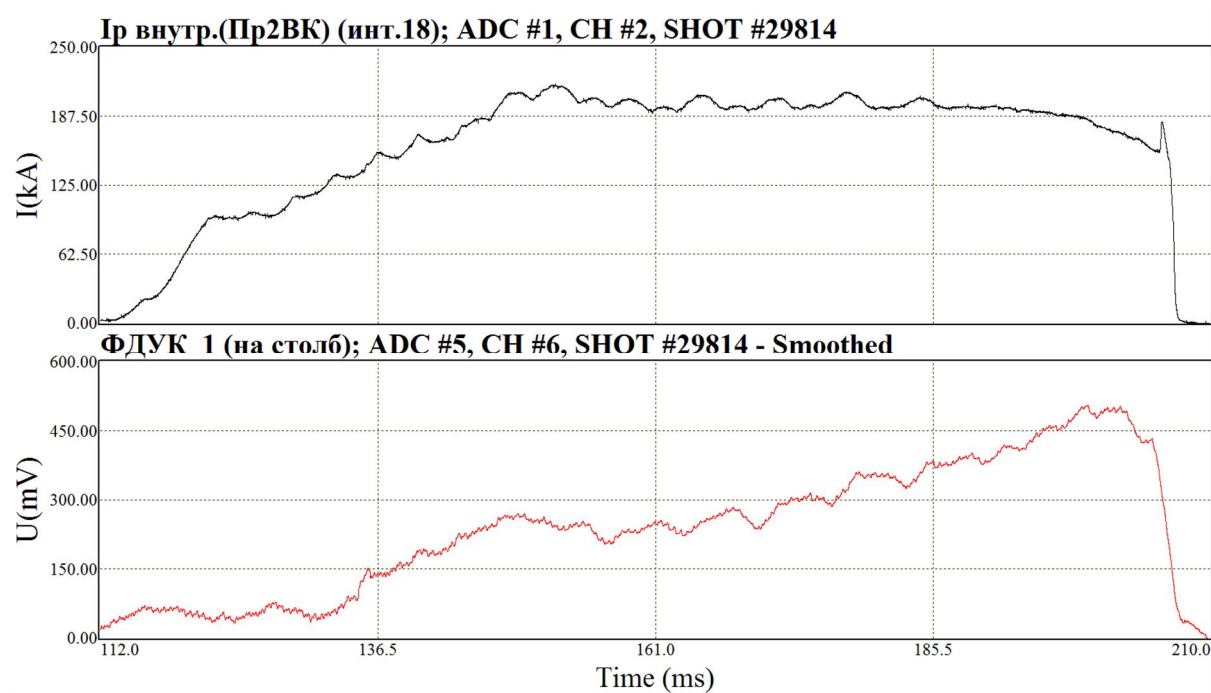


Рис. 4. Ток плазмы в токамаке Глобус-М (верхний график) и сигнал с детектора SPD, смотрящего на столб (нижний график), в разряде № 29814

Один из четырех фотодиодов был помещен за бериллиевую фольгу толщиной 50 мкм, что обеспечивало пропускание электромагнитного излучения с энергией квантов выше ~ 2 кэВ. Таким образом, детектор SPD, помещенный за такую фольгу регистрировал мягкое рентгеновское излучение в диапазоне 2–40 кэВ.

Пример формы сигнала с SPD, смотрящего в радиальном направлении вдоль большого радиуса, для разряда №29814 приведен на рис. 4.

Исходя из данных о распределении мощности излучения плазмы на других токамаках, а также теоретических данных, расчет полной мощности излучения производился в предположении параболического и провального с максимумами на границах профилей распределения радиационных потерь на токамаке Глобус-М.

Выводы

Приведенные данные о применении детекторов AXUV и аналогичных им детекторов SPD [8] для диагностики плазмы токамака позволяют утверждать о целесообразности использования детекторов такого типа для изучения радиационных потерь плазмы токамака. Высокие чувствительность и временное разрешение приемников обеспечивают измерения эволюции пространственных распределений интенсивности излучения плазмы, а также полных радиационных потерь в различных режимах работы термоядерных устройств.

Работа выполнена с использованием оборудования С-3 РЦКП «Материаловедение и диагностика для передовых технологий» на УСУ «Глобус-М» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (контракты № 16.552.11.7002; № 16.518.11.7003; № 14.518.11.7004) и РФФИ (грант № 10-02-01421-а)

Литература

1. Wesson, J. Tokamaks / John Wesson, D. J. Campbell. – New York : Oxford University Press Inc., 2004.
2. Ongena, J. Energy for future centuries. Will fusion be an inexhaustible, safe and clean energy source? / J. Ongena and G. Van Oost // Transactions of Fusion Science and Technology. – March 2004. – Vol. 45 (2T). No. 3.
3. Zabrodsky, V. V. Silicon precision detectors for near IR, visible, UV, XUV and soft X-ray spectral range / V. V. Zabrodsky, P. N. Aruev, V. L. Sukhanov, N. V. Zabrodskaya, B. J. Ber, D. Ju. Kazantsev, A. G. Alekseyev // Proceeding of the 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments. – 2009, Saint-Petersburg, Russia.
4. Korde R., Cable J. S., Canfield L. R. // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1993. Vol. 40. International Radiation Detectors, Inc. (Torrance, USA), <http://www.ird-inc.com>
5. Schlatter, Ch. Radiation loss studies on T-10 tokamak using AXUV-detectors / Christian Schlatter // Presentation of the diploma work.
6. Tahiliani Kumudni. Radiation power measurement on the ADITYA tokamak Institute for Plasma Research, Bhat, Gandhinagar-382428, India / Tahiliani Kumudni, Jha Rat-

neshwar, M. V. Gopalkrishana, Doshi Kalpesh, Rathod Vipal, Hansalia Chandresh and the ADITYA team // *Plasma Phys. Control. Fusion* 51, 085004 (13pp), 2009.

7. Bitter, M. Passive Spectroscopy Bolometers, Grating- and X-ray Imaging Crystal Spectrometers / M. Bitter, K. W. Hill, S. Scott, S. Paul, A. Ince-Cushman, M. Reinke, J. E. Rice, P. Beiersdorfer, M. F. Gu, S. G. Lee, Ch. Broennimann and E. F. Eikenberry // *Academic Journal, AIP Conference Proceedings*, 2008. – Vol. 988, Issue 1. – P. 155.

8. Aruev, P. N. Characterization of spatial homogeneity of sensitivity and radiation resistance of semiconductor detectors in the soft X-ray range *Nuclear instruments and methods in physics research* / P. N. Aruev, Yu. M. Kolokolnikov, N. V. Kovalenko et al. – 2009. A 603. – P. 58–61.