

## Рентгеновская диагностика для измерения спектров тормозного излучения плазмы токамака ФТ-2 с высокой скоростью счета фотонов

© М.К. Буц, М.Ю. Кантор, Л.А. Есипов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: m.buts@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 5 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Представлена новая система рентгеновской диагностики для измерения спектров тормозного излучения высокотемпературной плазмы, установленная на токамаке ФТ-2. Описываются конструкция и технические характеристики диагностики. Показано значительное увеличение скорости счета при сохранении спектрального разрешения разработанной системы в сравнении с промышленным образцом.

**Ключевые слова:** плазма, тормозное излучение, рентгеновский спектрометр, SDD-детектор.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59440.6596k

На малом токамаке ФТ-2 разработана рентгеновская диагностика для измерения спектров излучения в области энергий от 0.6 до 200 keV для изучения динамических плазменных процессов в режимах омического нагрева и генерации тока нижнегибридными волнами. Возможность работы диагностики в коротком разряде (40 ms) при относительно низкой электронной температуре плазмы (300 eV) обеспечивается высокой скоростью счета фотонов (более  $10^6 \text{ s}^{-1}$ ) при высоком энергетическом разрешении (менее 150 eV). Планируется применение диагностики для измерения динамики электронной температуры [1,2] с частотой до 1 kHz, эффективного заряда плазмы, продольного электрического поля и электронной функции распределения при нижнегибридной генерации тока [3,4].

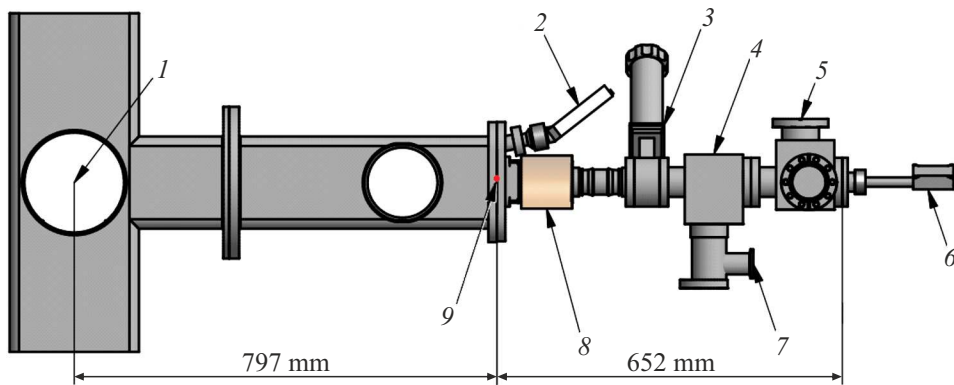
В диагностике используется один из лучших кремниевых дрейфовых детекторов FAST SDD<sup>®</sup> с площадью сенсора 70 mm<sup>2</sup>, который установлен в модуль XR100-SDD с зарядочувствительным усилителем и управляется блоком управления и обработки сигналов PX-5 от компании AMPTEK [5,6]. Модуль PX-5 преобразует импульсные сигналы детектора в трапецевидную форму [7], их амплитуда пропорциональна энергии фотона и измеряется стандартными алгоритмами счета импульсов [8]. Коэффициент пропорциональности определяется по калибровке. Максимальная выходная скорость счета квантов ограничена сильным временным наложением трапецевидных импульсов, при котором становится невозможным определение их амплитуд. Увеличение скорости счета требует сокращения длительности трапецевидных импульсов, при этом происходит искажение их формы, что значительно ухудшает энергетическое разрешение спектрометра и влечет за собой искажение измеряемых спектров. Выбранный детектор с заявленной скоростью счета до  $10^6 \text{ s}^{-1}$  при спектральных измерениях излучения плазмы токамака фактически работает при скорости счета менее  $10^5 \text{ s}^{-1}$ , чтобы сохранить высокую долю регистрируемых фотонов и приемлемое

энергетическое разрешение  $< 200 \text{ eV}$  [9]. Таким образом, указанный спектрометр оказался неприменим в заданных условиях эксперимента на токамаке ФТ-2, поскольку не позволяет достичь временного разрешения, достаточного для изучения динамики спектров плазмы.

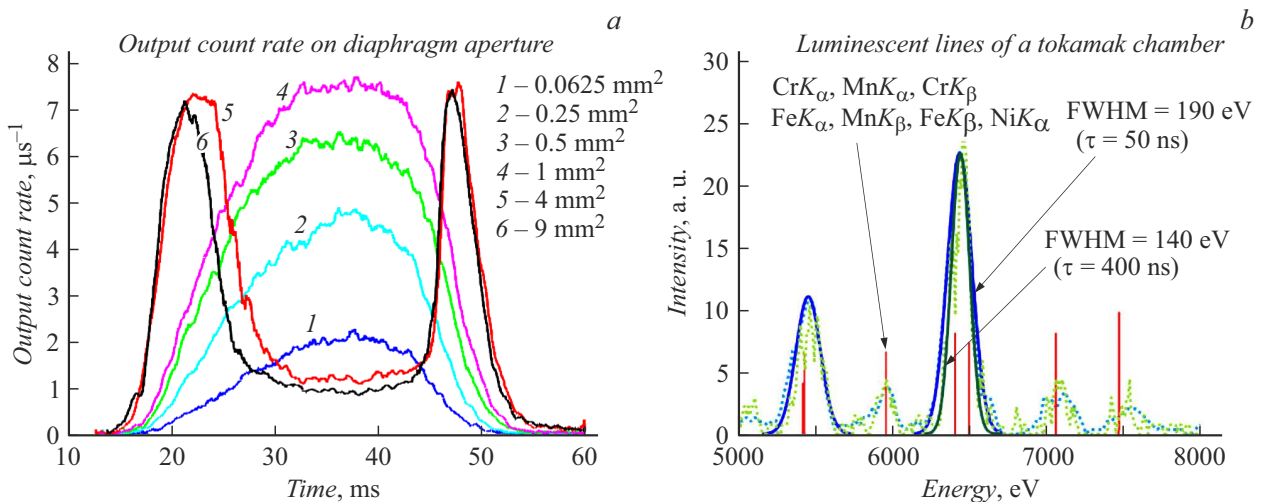
Поэтому спектрометр AMPTEK был модернизирован с целью достижения требуемых параметров с помощью аппаратных [10,11] и программных [12,13] средств. Для новой системы регистрации разработан дифференцирующий усилитель-формирователь импульсов с длительностью фронта нарастания от 10 до 90%, равной 45 ns (против 90 ns в усилителе модуля PX-5). Усилитель имеет два независимых канала с коэффициентами усиления 8–87 и 2–12, что позволяет расширить динамический диапазон определения энергий фотонов до 200 keV. Усиленные импульсы в течение разряда токамака оцифровываются быстрым 14-разрядным аналого-цифровым преобразователем с частотой дискретизации 250 MHz. Детектирование и измерение амплитуд записанных импульсов обычно проводятся после их цифровой фильтрации к трапецевидной форме с применением стандартных алгоритмов детектирования трапецевидных импульсов. Для повышения скорости счета при сохранении энергетического разрешения детекторные импульсы преобразуются в гауссову форму, и для их счета применяются специальные алгоритмы.

Для калибровки детектора используется изотопный источник <sup>55</sup>Fe, излучающий фотоны с энергией 5.9 keV. Для проверки калибровки во время разряда тот же источник устанавливается в вакуумный объем спектрометра так, чтобы облучать детектор со средним потоком около 10 квантов в миллисекунду, что значительно меньше измеряемого потока излучения из плазмы.

Для ограничения входного потока квантов на детектор и смещения спектральной области измерения применяется система сменных фильтров (бериллиевые толщиной 50, 100, 150, 200, 250 μm и алюминиевый толщиной 8.85 μm), установленных на расстоянии 1198 mm от



**Рис. 1.** Трехмерная модель системы диагностики. 1 — камера токамака, 2 — калибровочная рентгеновская трубка Mini-X2 AMPTEK, 3 — шиббер, 4 — отсек с фильтрами и круглыми диафрагмами, 5 — отсек с ножевыми диафрагмами, 6 — детекторный модуль XR100-SDD AMPTEK, 7 — выход в систему откачки спектрометра, 8 — сильфон, 9 — ось вращения стола.



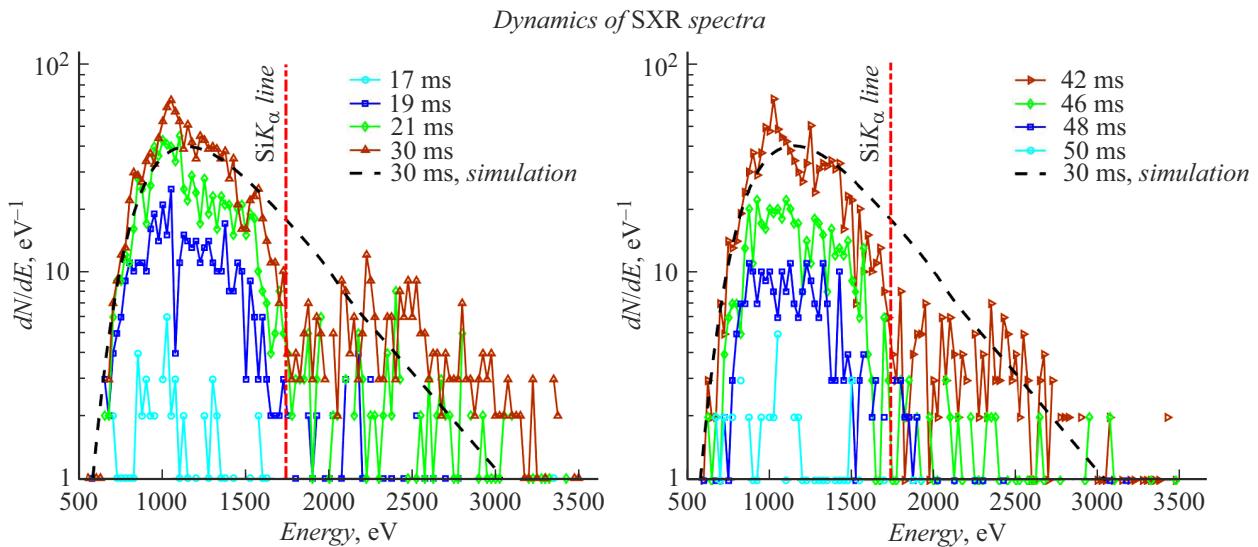
**Рис. 2.** *a* — зависимость выходной скорости счета квантов от площади отверстия ножевых диафрагм в повторяющихся разрядах. *b* — спектр люминесценции камеры токамака во время разряда, спектрометр направлен по касательной к плазме. Два спектра построены при различных настройках ширины импульса  $\tau$  в методе гауссовой фильтрации.

центра плазмы (рис. 1). Также для ограничения потока излучения из плазмы применяется система круглых диафрагм диаметром 0.75, 1, 2, 3, 6 мм и регулируемых ножевых диафрагм (горизонтальной и вертикальной) с точностью установки 0.01 мм. Круглые диафрагмы расположены на расстоянии 1213 мм, а горизонтальная и вертикальная ножевые — на расстоянии 1370 и 1385 мм соответственно от центра плазмы. Детектор находится на расстоянии 1430 мм от центра плазмы. Для проведения измерений по различным хордам наблюдения прибор установлен на подвижном столе с регулируемым углом наклона к горизонтالي в пределах  $\pm 6^\circ$ . Точка поворота стола совпадает с входной диафрагмой диагностической системы сечением  $22 \times 6.5$  мм, ориентированной горизонтально и установленной на расстоянии 797 мм от центра плазмы.

Максимальная выходная скорость счета квантов, которую способна обеспечить диагностика, определялась путем изменения размеров ножевой диафрагмы, уста-

новленной перед детектором, в повторяющихся разрядах токамака (рис. 2, *a*). С увеличением диафрагмы выходной поток квантов растет, достигая предельного значения в  $7.5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ , после чего резко падает. Спектральное разрешение прибора, определяющееся как ширина спектральной линии железа 6.4 keV на половине высоты (FWHM), составляет до 140 eV [14] (рис. 2, *b*).

Пример динамики спектров приведен на рис. 3. Спектры собирались в течение одного разряда токамака при наблюдении по центральной хорде. Время накопления каждого спектра 1 мс, за это время регистрируется более 1500 фотонов. Измеренные спектры в стационарной части разряда хорошо ложатся на смоделированный согласно [15] среднечордовый спектр, излучаемый плазмой с максвелловским распределением электронов с профилями температуры и плотности, определенными методом томсоновского рассеяния в исследуемых разрядах. На измеренных спектрах виден провал ниже  $K$ -края полосы поглощения кремния, вызванный падением



**Рис. 3.** Динамика измеренных спектров плазмы в одном разряде токамака. Время накопления спектров 1 мс. Электронная плотность  $4.2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , центральная электронная температура 550 eV, выходная скорость счета квантов до  $2.2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ .

эффективности регистрации в этой области энергий. Для восстановления спектра излучения плазмы необходим численный расчет или измерения эффективности регистрации.

Таким образом, на токамаке ФТ-2 разработан и испытан спектрометр мягкого рентгеновского излучения для измерения спектров тормозного излучения плазмы, обеспечивающий повышение скорости счета фотонов более чем на порядок по сравнению с заявленной производителем. При этом спектрометр сохраняет высокое энергетическое разрешение, необходимое для выполнения поставленных физических задач.

### Финансирование работы

Разработка и установка спектрометра были поддержаны Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе в рамках государственного контракта 0034-2021-0001. Анализ данных поддерживался Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе в рамках государственного контракта 0040-2024-0028.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] P. Xu, S. Lin, L. Hu, Y. Duan, J. Zhang, *Plasma Sci. Technol.*, **11** (4), 468 (2009). DOI: 10.1088/1009-0630/11/4/21
- [2] Z.Y. Chen, B.N. Wan, Y.J. Shi, L.Q. Hu, S.Y. Lin, Q.S. Hu, S.X. Lui, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **527** (3), 604 (2004). DOI: 10.1016/j.nima.2004.03.177
- [3] J. Younis, B.N. Wan, S.Y. Lin, Z.Y. Chen, Y.J. Shi, J.F. Shan, F.K. Liu, *Plasma Sci. Technol.*, **10** (5), 529 (2008). DOI: 10.1088/1009-0630/10/5/02
- [4] D.F. da Cruz, A.G. Peeters, A.J.H. Donne, N.J. Lopes Cardozo, E. Westerhof, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **35** (6), 693 (1993). DOI: 10.1088/0741-3335/35/6/004
- [5] T. Pantazis, J. Pantazis, A. Huber, R. Redus, *X-Ray Spectrom.*, **39** (2), 90 (2010). DOI: 10.1002/xrs.1227
- [6] N. Krawczyk, J. Kaczmarczyk, M. Kubkowska, L. Ryc, *Nukleonika*, **61** (4), 409 (2016). DOI: 10.1515/nuka-2016-0067
- [7] V.T. Jordanov, G.F. Knoll, A.C. Huber, J.A. Pantazis, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **353** (1-3), 261 (1994). DOI: 10.1016/0168-9002(94)91652-7
- [8] G.F. Knoll, *Radiation detection and measurement* (John Wiley & Sons, Inc., 2010), p. 647–668.
- [9] P. Xu, L.Q. Hu, S.Y. Lin, Y.M. Duan, J.Z. Zhang, G.Q. Zhong, K.Y. Chen, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **52** (7), 075013 (2010). DOI: 10.1088/0741-3335/52/7/075013
- [10] Yu.V. Tuboltsev, Yu.V. Chichagov, A.A. Bogdanov, M.Yu. Kantor, A.V. Sidorov, *St. Petersburg Polytech. Univ. J. — Physics and Mathematics*, **16** (1.1), 438 (2023). DOI: 10.18721/JPM.161.175
- [11] M.Yu. Kantor, A.V. Sidorov, A.A. Bogdanov, Yu.V. Tuboltsev, Yu.V. Chichagov, *St. Petersburg Polytech. Univ. J. — Physics and Mathematics*, **16** (1.1), 484 (2023). DOI: 10.18721/JPM.161.182
- [12] M.Yu. Kantor, A.V. Sidorov, *JINST*, **14**, P01004 (2019). DOI: 10.1088/1748-0221/14/01/P01004
- [13] M.Yu. Kantor, A.V. Sidorov, *JINST*, **15**, P06015 (2020). DOI: 10.1088/1748-0221/15/06/P06015
- [14] D.M. Schlosser, P. Lechner, G. Lutz, A. Niculae, H. Soltau, L. Strüder, R. Eckhardt, K. Hermenau, G. Schaller, F. Schopper, O. Jaritschin, A. Liebel, A. Simsek, C. Fiorini, A. Longoni, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **624** (2), 270 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2010.04.038
- [15] N. Itoh, T. Sakamoto, S. Kusano, S. Nozawa, Y. Kohyama, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **128** (1), 125 (2000). DOI: 10.1086/313375