

## КОМБИНИРОВАННАЯ ДИАГНОСТИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ, ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ В ТОКАМАКЕ TRT

© 2022 г. А. Г. Алексеев<sup>а</sup>, В. В. Забродский<sup>б</sup>, Д. В. Сарычев<sup>а</sup>,  
Н. А. Соловьев<sup>а</sup>, А. В. Сушков<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

<sup>б</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: alexey-sushkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.08.2022 г.

После доработки 27.09.2022 г.

Принята к публикации 05.10.2022 г.

Рассматриваются требования к диагностикам радиационных потерь, экстремального ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучений для токамака с реакторными технологиями (TRT). Представлены предложения по геометрическому расположению датчиков, типу и количеству используемых детекторов. Обсуждается возможность размещения данных диагностик в одном поперечном сечении токамака.

*Ключевые слова:* радиационные потери плазмы, экстремальное ультрафиолетовое излучение (XUV) мягкое рентгеновское излучение, болометр, пироэлектрический детектор, XUV-детектор, многопроволочный пропорциональный детектор

DOI: 10.31857/S0367292122601035

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Данные о радиационных потерях плазмы на установках УТС необходимы для решения задач получения и контроля плазменных разрядов с требуемыми параметрами, поэтому болометрия относится к списку диагностик физического пуска. В то же время пространственные распределения радиационных потерь плазмы существенны для проведения разнообразных физических программ, связанных с изучением энергобаланса и теплопроводности плазмы, процессов переноса, плазменно-поверхностного взаимодействия и физики дивертора, изучения и контроля срывов. Комбинация тепловых болометров с быстродействующими и высокочувствительными детекторами экстремального ультрафиолетового (в английской аббревиатуре XUV) и мягкого рентгеновского излучения с одинаковыми или близкими полями обзора дает синергетический эффект получения более детального объема информации по спектральному составу и динамике поведения примесей в плазме, например, в условиях развития МГД-возмущений.

### 2. СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ БОЛОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ УСТАНОВОК УТС

**Тепловые детекторы.** Для измерения радиационных потерь должны использоваться датчики, обладающие постоянной чувствительностью во всех представленных в токамаке диапазонах спектра (фактически от видимого до излучения рентгеновского диапазона). В достаточной мере данному требованию удовлетворяют только тепловые детекторы, измеряющие мощность поглощенного излучения по возрастанию температуры абсорбера детектора. Несмотря на разнообразие применимых для болометрии датчиков температуры (включая полупроводниковые термисторы, термопары, пироэлектрические детекторы, измерители ИК-излучения), в условиях значительных радиационных нагрузок на крупных установках УТС практически единственным выбором является использование металлических резистивных болометров. При этом малая по сравнению с термисторами температурная чувствительность металлических резисторов потребовала значительных усилий для обеспечения приемлемых отношений “сигнал–шум” в экспериментальных условиях токамака [1]. Так, для снижения тепло-

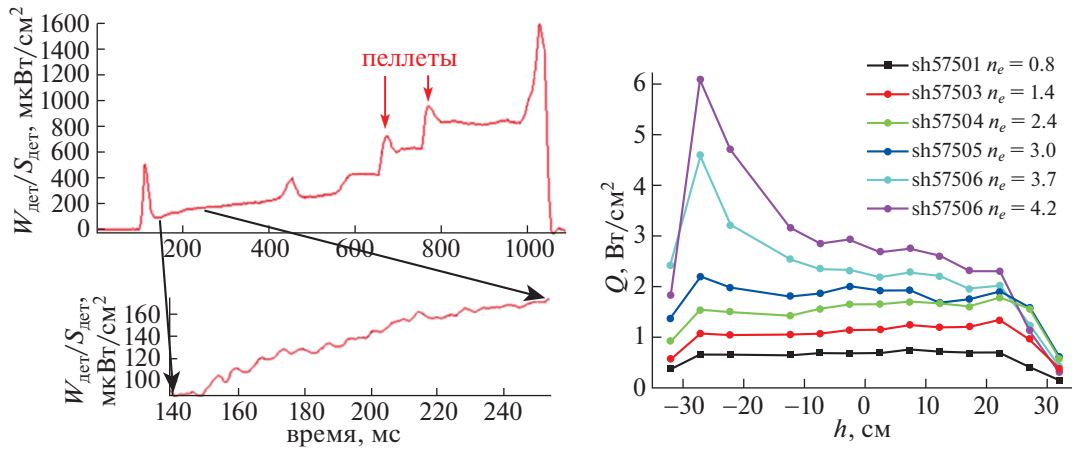
емкости и повышения сопротивления измерительные резисторы наносятся на подложку по специальной технологии в виде весьма тонких и узких металлических лент типа “змеек” (толщина  $\sim 0.5$  мкм, ширина  $\sim 30$  мкм). С другой стороны, для компенсации наводок и температурного дрейфа в каждом канале болометра применяется устройство типа “мост”, состоящее из двух “переплетенных” измерительных резисторов и двух аналогичных референсных резисторов, закрытых от излучения плазмы. Этот “мост” возбуждается переменным напряжением с последующей синхронной демодуляцией сигнала. Такие меры позволили в условиях лаборатории достичь значения плотности мощности (эквивалентной шумам) (Noise-equivalent power density NEPD) на уровне  $1$  мкВт/см<sup>2</sup> при временном разрешении около  $5$  мс, которое лучше, чем для всех других типов тепловых детекторов, включая полупроводниковые термисторы.

В настоящее время миниатюризированные 4-канальные модули описанных резистивных болометров [2], выполненные на основе резисторов и абсорберов из золота на каптоновой подложке с площадью активной поверхности детектора  $6$  мм<sup>2</sup>, с блоками электроники выпускаются за рубежом на коммерческой основе и стали стандартным выбором для крупных установок УТС. Болометры такого типа взяты за основу при разработке датчиков радиационных потерь для проектируемых установок реакторного класса. Однако адаптация таких болометров к уровням радиационных и тепловых нагрузок в термоядерном реакторе требует дополнительной модернизации их конструкции и совершенствования технологии изготовления (см., например, [3]). В частности, для установки ИТЭР рассматривается замена ленточных резисторов из напыленного золота на платиновые или никелевые из-за трансмутации золота при нейтронном облучении. Также предполагается замена широко применяемой подложки из каптона на нитрид кремния, при этом для электрических соединений резисторов применяется специальная сварка вместо пружинных контактов. В настоящее время совершенствование технологии изготовления резистивных болометрических датчиков для ИТЭР продолжается.

Другим типом болометров, принципиально применимых в реакторных условиях, являются формирующие изображение ИК-болометры (IR imaging bolometers), в которых инфракрасная камера используется для измерения распределения температуры тонкой металлической фольги, экспонируемой в потоке излучения плазмы через входное отверстие камеры-обскуры. Такой метод имеет ряд преимуществ – получение двумерного “изображения” плазмы в режиме реального времени, отсутствие необходимости вывода электри-

ческих сигналов от датчиков при возможности размещения ИК-камеры за пределами систем радиационной защиты посредством использования лабиринта с зеркалами. Однако существуют весьма серьезные ограничения и технологические сложности на пути применения этого метода в установках реакторного класса. В частности, достижимые при использовании существующих ИК-камер значения отношения “сигнал–шум” оказываются достаточно низкими – величина NEPD масштаба  $50$ – $500$  мкВт/см<sup>2</sup> для порядка ста “каналов” и временного разрешения около  $10$  мс [4, 5]. В то же время с развитием ИК-технологий ожидается значительное улучшение чувствительности такой диагностической аппаратуры. К другим трудностям метода ИК-болометрии относятся сложность обработки сигнала и его калибровки, включая проблему отделения паразитного сигнала, связанного с объемным радиационным нагревом фольги в реакторе. Следует отметить, что для резистивных многоканальных болометров эта проблема решается вычитанием из сигнала каждого рабочего канала сигналов от референсных каналов болометра, идентичных измерительным, но закрытых от излучения плазмы специальными экранами. В поле зрения ИК-камеры также может находиться референсная фольга, но точность компенсации нагрева фольги будет ниже, чем отдельно для каждого канала резистивных болометров. Также необходимы дальнейшие исследования возможностей обеспечения механической прочности тонкой свободно расположенной фольги (абсорбера) при электромагнитных нагрузках и перепадах давления, характерных для крупных установок УТС. Следует отметить, что конфигурация ИК-болометров с одним ракурсом наблюдения и с большим количеством каналов в поперечном сечении не является оптимальной для задачи томографии плазмы, для которой предпочтительным является распределение каналов вокруг плазмы. Более адекватным в этом случае представляется наблюдение плазмы в тангенциальном направлении с соответствующей томографической реконструкцией изображения в предположении о ее торoidalной симметрии [6]. Таким образом, можно заключить, что техника формирующей изображение ИК-болометрии является весьма перспективной для применения в установках УТС, но в настоящее время она требует дополнительных исследований в направлении повышения надежности получаемой информации и обеспечения совместимости с реакторными условиями.

**Пироэлектрические детекторы** являются еще одним типом детекторов радиационных потерь, которые хорошо зарекомендовали себя на установках УТС (см., например, [7, 8]), и продолжают успешно использоваться до настоящего времени. В частности, недавно на токамаке T-10 с помо-



**Рис. 1.** Примеры данных многоканальной системы пироболометров на токамаке Т-10. Слева – осциллограмма сигнала центральной хорды в разряде с влетом пеллет. Масштаб по вертикали в единицах плотности падающей на детектор мощности радиационного излучения плазмы; выделенный фрагмент осциллограммы в увеличенном масштабе демонстрирует достижимое значение NEPD. Справа – хордовые профили энергетической светимости  $Q$  в серии разрядов с нарастающей плотностью плазмы при кондиционировании литием:  $h$  – прицельный параметр хорды наблюдения ( $h = 0$  соответствует центру плазменного шнура),  $n_e$  – среднечордовая плотность в единицах  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

стью совместного применения многоканальных систем на основе пироэлектриков и детекторов AXUV было изучено поведение радиационных потерь плазмы в экспериментах по переходу от графитовых к вольфрамовым лимитерам и по кондиционированию стенки литием [9]. Многоканальные болометрические системы на основе пироэлектрических детекторов также разработаны и изготовлены для токамака Т-15МД.

Принцип действия пироэлектрических детекторов основан на зависимости спонтанной поляризации пироэлектрических материалов от температуры [10]. В результате изменение температуры детектора приводит к возникновению в его цепи тока, пропорционального скорости изменения температуры. Таким образом, для процессов, достаточно быстрых, чтобы можно было пренебречь тепловыми потерями детектора, его отклик оказывается непосредственно пропорциональным поглощаемой мощности излучения. Это отличает пироэлектрические детекторы от резистивных болометров, сигнал которых пропорционален температуре и поэтому требует дифференцирования для восстановления мощности излучения в быстрых процессах. Возможность применения пиродетекторов для определения мощности излучения в “медленных” процессах в плазме на установках с квазипостоянными характеристиками разряда анализируется ниже в разд. 5. К достоинствам пироэлектрических детекторов также относятся достаточно высокое временное разрешение, высокая надежность, низкая цена и широкий диапазон рабочих температур. К недостаткам же пироэлектриков можно отнести паразитный пьезоэлектрический эффект, приводя-

щий к существенному снижению отношения “сигнал–шум” в условиях работы в установках УТС, а также малую чувствительность. Последнее свойство пироэлектриков обусловлено тем, что характерные активные токовые сигналы таких детекторов при измерениях потоков радиационного излучения из плазмы в токамаках с достаточно подробным пространственным разрешением составляют не более сотен пикоампер. Это обстоятельство требует расположения электроники, осуществляющей первоначальное усиление сигнала, в камере плазменной установки в непосредственной близости от детекторов. Тем не менее, при обеспечении соответствующих виброзащиты и экранировки в условиях токамака Т-10 были получены значения NEPD на уровне  $10 \text{ мкВт/см}^2$  при временном разрешении порядка  $10 \text{ мс}$ , что практически оказалось достаточным для получения пространственных распределений радиационных потерь во всех представляющих интерес режимах разряда. Примеры осциллограммы сигнала радиационных потерь плазмы одного из каналов и хордовых профилей светимости плазмы с многоканальной системы пиродетекторов токамака Т-10 представлены на рис. 1.

### 3. БОЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ TRT

На начальной “безнейтронной” стадии работы токамака TRT, которая составляет существенную часть его экспериментальной программы [11], предпочтительным представляется использование для измерения полных радиационных потерь пироэлектрических детекторов. Это связано с на-

личием опыта успешного применения этих детекторов на отечественных установках, их доступностью, относительно низкой стоимостью и простотой эксплуатации. Высокая надежность детекторных блоков на основе пироэлектриков дает возможность длительной эксплуатации в условиях отсутствия доступа к ним в течение экспериментальной кампании, причем необходимо только по одному электрическому выводу на канал в отличие от резистивных болометров, требующих 4-х выводов для каждого резистивного моста.

В то же время, использование пироэлектрических детекторов в режимах с высоким потоком нейтронов, по-видимому, не представляется возможным. Даже несмотря на то, что некоторые сегнетоэлектрические материалы демонстрируют достаточно высокую радиационную стойкость [12], основной проблемой является малость сигналов и, как следствие, указанная выше необходимость размещения преусилителей в непосредственной близости от детекторов, что невозможно в “нейтронных” режимах работы установки TRT.

Таким образом, к началу стадии работы с высокими радиационными и нейтронными нагрузками должен быть осуществлен переход к радиационно-стойким металлическим резистивным болометрам. В ходе первой стадии работы TRT может осуществляться постепенное дополнение и замена пироэлектриков модулями реакторно-совместимых резистивных детекторов, аналогичных применяемым в установке ИТЭР (детекторы “ИТЭР-класса”), разработка технологии которых, как ожидается, будет к этому моменту завершена.

В будущем при условии успешного решения проблем разработки, также может рассматриваться возможность применения на установке TRT формирующих изображение ИК-болометров.

#### 4. КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА TRT

Предполагаемая геометрия наблюдения плазмы в TRT системой измерения радиационных потерь представлена на рис. 2. Две широкообзорные камеры обскуры обеспечивают наблюдение всех областей центральной плазмы с двух ракурсов с пространственным разрешением около 10 см. При расстоянии от камер до центра плазмы около 1.5 м и характерном размере детектора 0.5 см, это приводит к размеру камер обскур вдоль луча зрения примерно 7 см. В работе [13] приведен масштаб мощности радиационных потерь основной плазмы TRT:  $P_{rad} > 0.5$  МВт. Исходя из этого значения, можно оценить, что для получения плот-

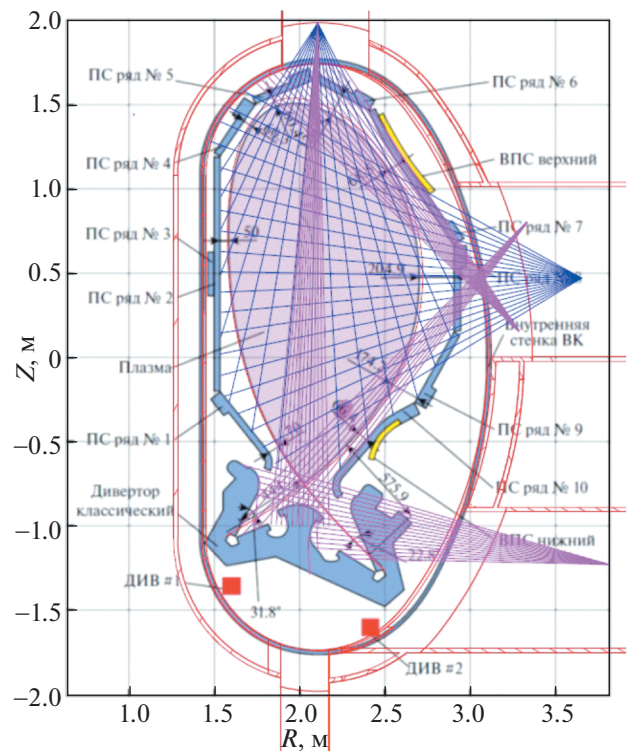
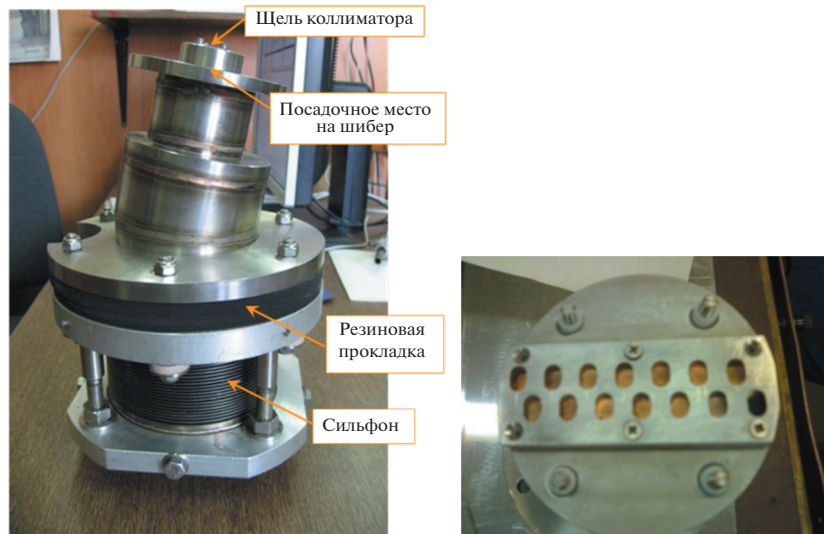


Рис. 2. Предполагаемая геометрия наблюдения системы измерения радиационных потерь плазмы в поперечном сечении TRT.  $R$  и  $Z$  – радиальная и вертикальная координаты соответственно в системе с началом отсчета в центре тора вакуумной камеры. ВК – вакуумная камера, ПС – панели первой стенки, ВПС – витки пассивной стабилизации, ДИВ – диверторные витки.

ности мощности на детекторах более  $1 \text{ мВт/см}^2$ , что эквивалентно  $100 \times \text{NEPD}$ , достаточно тороидальная ширина наблюдения в плазме около 12 см, что вполне допустимо с точки зрения возможности пренебрежения тороидальной кривизной и неоднородностью плазменного шнура вдоль тора.

Области дивертора и пристеночной плазмы, характеризующиеся повышенной мощностью излучения, должны наблюдаться с лучшим пространственным разрешением и с большего числа ракурсов. Это, с одной стороны, необходимо для исследований процессов в этих областях, таких как переизлучение энергии в диверторе (при выполнении экспериментов с газовой мишенью в диверторе [14]), плазменно-поверхностное взаимодействие на первой стенке и радиационная неустойчивость (явление MARFE) [15], возникающая на внутреннем обводе плазмы в режимах с высокой плотностью (см., например, профили на рис. 1). С другой стороны, как минимум двухракурсное наблюдение всех областей плазмы и повышенное число углов наблюдения для областей



**Рис. 3.** Фотография многоканальной болометрической системы для токамака Т-10: слева – внешний вид сильфонной камеры (полная высота камеры 260 мм), справа – детекторный модуль (диаметр детекторного модуля 85 мм).

с резкими градиентами требуется для корректного восстановления распределения локальных мощностей излучения центральной плазмы методами томографии [1].

На первом этапе предполагается два ракурса наблюдения дивертора – сверху и сбоку через пологидальную щель между диверторными кассетами. Также предусмотрены две камеры в боковом патрубке, направленные на области вблизи защитных лимитеров на внешнем обводе плазмы [14]. Пространственное разрешение, например, верхней “диверторной” камеры составляет около 3 см, что при расстоянии до дивертора около 2.5 м приводит к глубине камеры обскуры примерно 40 см. Если такой размер недопустим по соображениям интеграции, возможно применение для подсистем с высоким разрешением пластинчатых коллиматоров Соллера, позволяющих кратно уменьшить длину коллиматора без снижения лучевой емкости, определяющей величину сигнала детекторов [16].

В ходе последующего развития системы с целью увеличения числа ракурсов наблюдения дивертора и пристеночной плазмы может рассматриваться добавление детекторных блоков (резистивных болометров) с небольшим числом каналов, размещаемых в щелях панелей первой стенки.

## 5. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ В ТОКАМАКЕ

Вследствие свойственного пироэлектрическим детекторам паразитного пьезоэффекта тре-

буется их защита от вибраций, передаваемых детекторам от элементов конструкции токамака. Для обеспечения виброразвязки детекторы размещаются на массивном основании, соединенном с опорами через элементы с малой жесткостью и демпфирующими свойствами (см., например, на рис. 3 вид сильфонной камеры для пироэлектрических детекторов для токамака Т-10).

В силу малости сигнала пиродетекторов существует необходимость защиты электрической цепи детекторов от фотоэмиссионных токов, эффективно генерируемых излучением плазмы токамака в диапазоне вакуумного ультрафиолета [17]. Для этого сигнал должен сниматься с задних поверхностей детекторов, а передние обращенные к плазме поверхности должны быть покрыты сплошным металлическим электродом и заземлены. Конструкция детекторного модуля (рис. 3) должна исключать попадание излучения и фотоэлектронов на элементы электрической цепи детекторов.

Существенной трудностью для применения пироэлектрических детекторов на ТРТ является большая длительность разряда – до 150 с. Действительно, сигнал пиродетекторов пропорционален мощности излучения только на коротких временных промежутках  $\Delta t < \tau_c$ , где  $\tau_c$  – время охлаждения детектора. Для более длинных промежутков в приближении линейного локального теплообмена мощность излучения  $P_{rad}$  связана с током детекто-

$$\text{ра } I_{det} \text{ как } P_{rad}(t) \propto \left( I_{det}(t) + \frac{1}{\tau_c} \int_0^t I_{det}(t') dt' \right) [10].$$

Так как характерные времена охлаждения пиродетекторов в зависимости от их размера находятся в интервале 2–20 с, для учета влияния охлаждения необходимо иметь детальную информацию о характеристиках теплообмена детекторов, на который могут оказывать влияние также изменения давления окружающего газа. Для их контроля может использоваться закрытый от излучения плазмы референсный детектор, засвечиваемый контрольным источником излучения. Кроме того, восстановление среднего уровня сигнала в разрядах большой длительности в токамаке TRT может производиться посредством кратковременного закрытия защитной шторки перед детекторами. Еще более эффективным подходом, который дополнительно позволяет повысить отношение “сигнал–шум” посредством синхронной демодуляции, является непрерывная модуляция падающего на детекторы излучения специальным затвором с пьезоэлектрическим приводом [18].

К заключительным замечаниям общего характера относятся следующие.

Необходима защита тепловых детекторов от непоглощенного СВЧ-излучения систем дополнительного нагрева плазмы, например, это может быть сделано посредством металлических сеток с ячейкой менее  $\lambda/4$ , при этом желательно размещение болометрических систем в таком сечении токамака, в котором отсутствуют системы СВЧ-нагрева и источники газонапуска.

При температурах свыше  $120^\circ\text{C}$ , достигаемых в области детекторных блоков в рабочем режиме или режимах кондиционирования камеры, требуется принудительное охлаждение детекторных модулей для защиты размещенных на них преусилителей.

Должны быть предусмотрены также защитные шторки, прикрывающие детекторы в режимах кондиционирования камеры длительным разрядом в токамаке TRT.

## 6. XUV-ДИАГНОСТИКА

Кремниевые фотодиоды XUV-диапазона на основе AXUV и SPD-детекторов американского и российского производства весьма популярны в плазменных исследованиях благодаря их быстродействию ( $\sim 1$  мкс) и высокой чувствительности ( $\geq 0.1$  А/Вт) в широком спектральном диапазоне энергии фотонов радиационного излучения плазмы 1–5000 эВ (рис. 4) [19, 20]. Подобные характеристики позволяют создавать многоканальные диагностические средства на основе внутривакуумных камер-обскур с хорошим угловым разрешением при сохранении удовлетворительного отношения сигнал/шум в широкой полосе сигнальных частот.

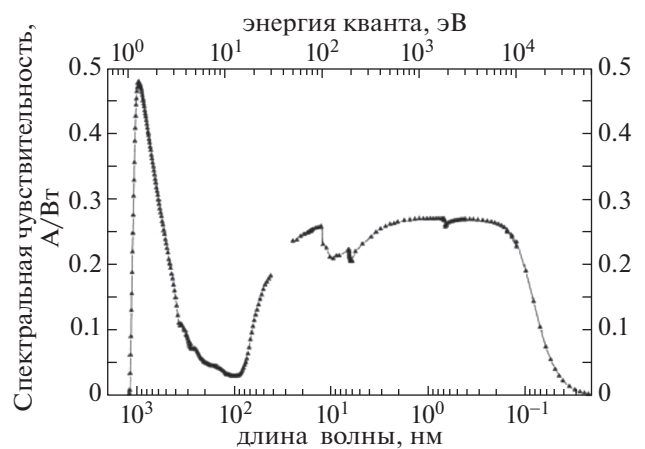
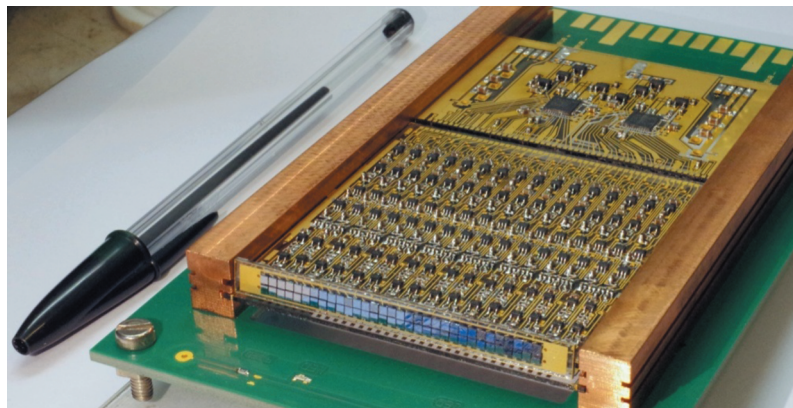


Рис. 4. Типовая характеристика спектральной чувствительности SPD диодов в диапазоне длин волн  $10^3$ – $10^{-1}$  нм.

Помимо одиночных фотодиодов и линейных матриц были разработаны и гибридные двумерные сборки на основе SPD-линеек размерностью  $2 \times 16$  фоточувствительных элементов (ФЧЭ), конструкция которых позволяла собирать матрицы формата  $16 \times 16$  ФЧЭ с кадровой частотой до 1 МГц. Такие детекторы были успешно применены в токамаках HL-1M, T-11M, T-10, NSTX, DIII-D, Глобус-М для визуализации быстрых процессов поперечного переноса примесей. Однородная чувствительность в диапазоне энергий фотонов от 40 эВ до 10 кэВ позволяет оценивать не только динамику переноса, но и энергетические характеристики радиационного излучения плазмы. В комплексе с классическими тепловыми болометрами и многоордовыми рентгеновскими системами, XUV-диагностика обеспечивает детализацию поведения примесей при МГД-неустойчивостях, срывах и других высокоскоростных процессах в плазме.

Внутривакуумный модуль для XUV-матриц детекторов обычно состоит из минимального комплекта электроники, состоящий до  $2 \times 16$  ФЧЭ (двухрядные линейки) или 256 ФЧЭ (матрицы формата  $16 \times 16$ ), с фактором заполнения до 25%, при необходимости включая набор малощумящих преусилителей и быстродействующих 8-канальных аналоговых мультиплексоров, которые позволяют осуществить опрос всех 256 элементов матричного детектора формата  $16 \times 16$  за время 0.8 мкс, и передать на внешнюю систему сбора данных по 32-м соединительным линиям. В качестве внешней системы сбора данных используется 32-канальный синхронный регистратор (АЦП) с частотой дискретизации до 40 МГц с бортовой памятью в каждом канале на 32М выборков. Максимальная продолжительность цикла набора данных при такой скорости составляет 3.2 сек.



**Рис. 5.** Разрабатываемый модуль SPD-линейки формата  $2 \times 32$  на сапфировой плате с интегрированными аналоговой и цифровой системами регистрации.

В настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе разрабатывается конструкция более сложных гибридных сборок следующего поколения на основе гибридных линеек формата  $2 \times 32$  из SPD-детекторов. Гибридные линейки на сапфировых платах также содержат аналоговую часть из быстродействующих усилителей, а также цифровую часть из АЦП (12 бит) и микросхем для LVDS (Low Voltage Differential Signaling) технологии передачи данных, расположенными непосредственно в вакуумном модуле (рис. 5). Такое построение значительно повышает помехоустойчивость и динамический диапазон системы за счет передачи цифровых данных, что в 16 раз минимизирует количество сигнальных линий, проходящих через вакуумную границу, однако при этом значительно возрастает энергопотребление и выделяемая тепловая мощность. В условиях вакуума это требует принятия специальных мер для предотвращения перегрева электронного блока. Тем не менее, при реализации системы ожидается получение возможности записи 2D-изображения плазмы в формате  $32 \times 32$  ФЧЭ с разрешением 12 бит и временем непрерывной записи 5–10 с. Ограничение по длительности записи определяется объемом памяти и возможностью перегрева электронного блока. Возможен вариант линеек из SPD-детекторов в режиме back-illuminated, позволяющий создание линеек с интегрированными XUV-фильтрами из слоев различных металлов с толщинами от 3 до 2000 нм, а также с увеличением коэффициента заполнения до 40%.

Для применения в токамаке TRT на первом этапе работы предлагается размещение как минимум двух линейных SPD-матриц формата  $1 \times 32$  или  $2 \times 32$ , обеспечивающими полный обзор полоидального сечения плазмы, с хордами наблюдения, совпадающими или близкими к направлениям обзора болометров и рентгеновских детекторов (рис. 2, 8). Ширина экваториальных

патрубокв TRT позволяет разметить все три системы в одном и том же патрубке, что обеспечивает идентичность их зон наблюдения и возможность дифференциации источников излучения по спектральному составу. В идеале та же зона наблюдения должна быть перекрыта обычными камерами видимого излучения, чтобы иметь возможность отделить вклад линейчатого излучения видимого диапазона атомов водорода и примесей.

## 7. ДИАГНОСТИКА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Системы измерения мягкого рентгеновского излучения плазмы являются стандартной диагностикой любого современного токамака [25–27]. Регистрация быстрых флуктуаций радиального профиля интенсивности мягкого рентгеновского излучения плазмы дает сведения о флуктуациях электронной температуры плазмы, развитии МГД-неустойчивостей центральной области плазменного шнура и радиусе переворота фазы пилообразных колебаний. Многокурсовые измерения радиального профиля мягкого рентгеновского излучения позволяют получать информацию о положении плазменного шнура и форме плазменного шнура, необходимую для управления плазмой в токамаке и предотвращения развития ее срыва. Для многоканальной регистрации мягкого рентгеновского излучения обычно используются камеры обскура с полупроводниковыми детекторами (ППД). Последние годы также стали применяться GEM (Gas Electron Multiplier)-детекторы, которые позволяют проводить двумерные измерения спектра рентгеновского излучения. Преимуществами ППД и GEM-детекторов является высокое быстродействие, что позволяет регистрировать одиночные фотоны и использовать их для анализа спектра мягкого рент-

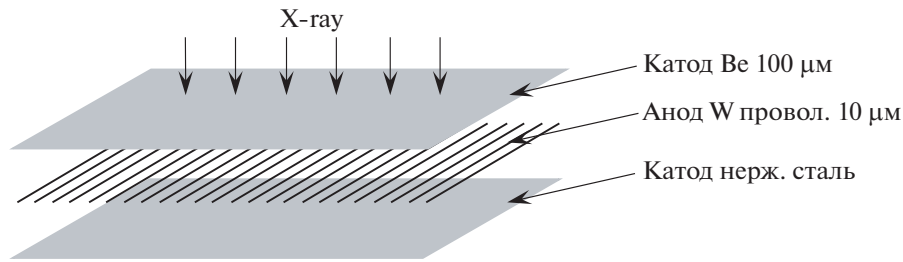


Рис. 6. Схема конструкции МПД-детектора.

геновского излучения. Основным недостатком таких систем является высокая стоимость и низкая радиационная стойкость, даже в экспериментах с дейтериевой плазмой в токамаках средних размеров характеристики ППД-детекторов значительно ухудшаются за время экспериментальной кампании из-за радиационных повреждений, и тогда требуется их регулярная замена.

**Газовые многопроволочные пропорциональные детекторы (МПД)** являются альтернативой полупроводниковым детекторам [27, 28]. МПД-детекторы имеют меньшее быстродействие (50 кГц для описанной в статье [27] версии детектора) и не являются оптимальными для регистрации спектра рентгеновского излучения. Спектрометр мягкого рентгеновского излучения на основе ППД-детекторов для токамака TRT разрабатывается отдельно и в данной работе его конструкция не обсуждается. МПД-детекторы на токамаке TRT предполагается использовать в потоковом режиме для визуализации профиля интенсивности рентгеновского излучения и томографической реконструкции двумерного распределения интенсивности рентгеновского излучения плазмы. В потоковом режиме МПД-детекторы имеют существенное преимущество по сравнению с ППД- и SPD-детекторами за счет высокого газового усиления, — до  $10^5$ , и лучшего отношения сигнал/шум. Величина, газового усиления регулируется напряжением, поданным на детектор, что значительно упрощает схему усиления сигнала. МПД-детектору нужен только предусилитель с постоянным коэффициентом усиления, а амплитуда выходного сигнала регулируется напряжением, подаваемым на детектор, позволяя получить необходимый уровень сигнала в любом режиме токамака TRT. Кроме того, МПД является радиационно-стойким, но в случае перехода экспериментов к стадии с высоким потоком нейтронов, необходимо предусилители, которые находятся внутри корпуса детектора, вынести за криостат. Это позволит обеспечить защиту предусилителей от радиации плазмы.

Другим преимуществом МПД является относительно простая конструкция, в которой отсутствуют дорогостоящие комплектующие. МПД

состоит из анодной плоскости, образованной параллельными вольфрамовыми проволочками, каждая из которых является независимым каналом измерения, и двух катодных плоскостей расположенных на расстоянии 4 мм от анодной плоскости (рис. 6). Один из катодов выполнен из бериллиевой фольги толщиной 100 мкм, и является входным окном для рентгеновского излучения, а второй катод может быть изготовлен из нержавеющей стали. Объем МПД-детектора заполняется газовой смесью, состоящей из криптона (90%Kr) и метана (10%CH<sub>4</sub>) при атмосферном давлении. Расчетная эффективность регистрации фотонов в зависимости от энергии для данной газовой смеси представлена на рис. 7. Практика 20-ти лет использования МПД-детекторов на токамаке T-10 показала, что при условии обеспечения потока газовой смеси через детектор на уровне 2–3 см<sup>3</sup>/мин, характеристики детектора не меняются со временем.

Для измерения радиального профиля интенсивности мягкого рентгеновского излучения плазмы в токамаке TRT предлагается разместить три 64-канальных МПД мягкого рентгеновского

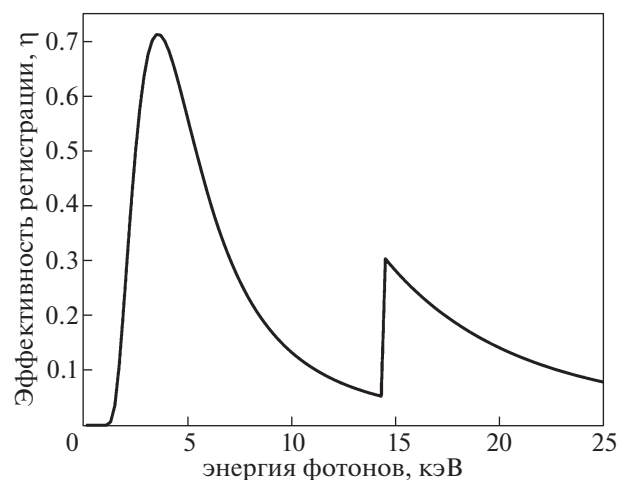
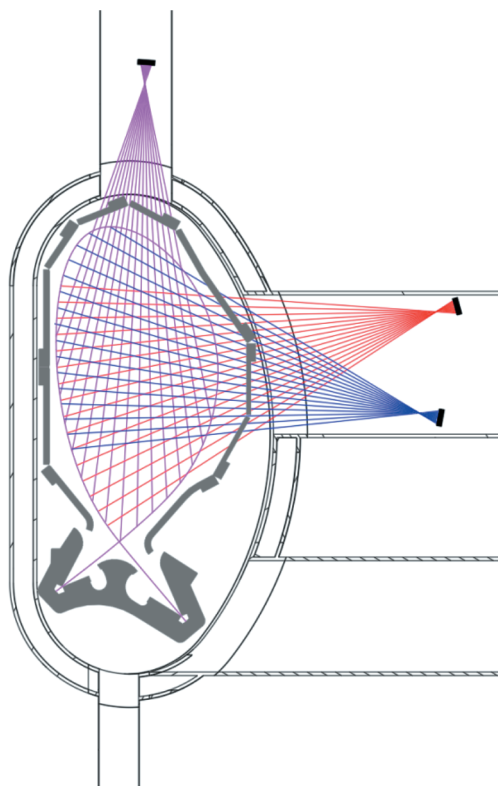


Рис. 7. Расчетная зависимость эффективности регистрации фотонов от их энергии для МПД-детектора, заполненного газовой смесью 90%Kr и 10%CH<sub>4</sub>.





**Рис. 8.** Предлагаемая геометрия наблюдения системы измерения мягкого рентгеновского излучения в полоидальном сечении TRT. МПД-детекторы (черные прямоугольники) размещаются в диагностических патрубках. Регистрация излучения плазмы происходит вдоль линий наблюдения (цветные линии), проходящих через отверстия в камере обскура.

излучения как показано на рис. 8. Такое расположение детекторов позволит обеспечить двумерную томографическую реконструкцию интенсивности мягкого излучения плазмы с пространственным разрешением не хуже 3 см и достаточно высоким временным разрешением, которое обеспечивается регистрацией сигнала с частотой оцифровки не менее 150 кГц. Размеры экваториального патрубка TRT однозначно позволяют обеспечить установку МПД-детекторов совместно с болометрическими детекторами в соответствии с предложенной схемой. Что касается верхнего патрубка, то без тщательной проработки конструкции определить реализуемость совместного размещения детекторов пока не представляется возможным.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для токамака TRT предложена комбинированная многоканальная диагностика радиационных потерь и мягкого рентгеновского излучения на основе пироэлектрических болометров,

матричных полупроводниковых фотодиодов XUV-диапазона, и многопроволочных газовых детекторов мягкого рентгеновского излучения с одинаковыми или близкими полями обзора размещаемая в экваториальном и вертикальном патрубке в одном полоидальном сечении плазмы. Размеры вертикального патрубка токамака TRT не позволяют совместить все три диагностические системы, поэтому, придется ограничиться одной или двумя диагностиками. Точное количество каналов и их расположение будут определены на стадии технического проектирования диагностических систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ingesson L.C., Alper B., Peterson B.J., Vallet J.-C.* // Fusion Science and Technology. 2008. V. 53:2. P. 528.
2. *Mast K.F., Vallet J.C., Andelfinger C., Betzler P., Kraus H., Schramm G.* // Rev. Sci. Instrum. 1991. V. 62. P. 744.
3. *Giannone L., Queen D., Hellman F., Fuchs J.C.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. P. 2123.
4. *Peterson B.J., Kostrioukov A.Yu., Ashikawa N., Liu Y., Yuhong Xu, Osakabe M., Watanabe K.Y., Shimozuma T., Sudo S., and the LHD Experiment Group* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. V. 45. P. 1167.
5. *Peterson B.J., Parchamy H., Ashikawa N., Kawashima H., Konoshima S., Kostrioukov A.Yu., Miroshnikov I.V., Seo D., Omori T.* // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 79. 10E301.
6. *Liu Y., Tamura N., Peterson B.J., Iwama N., Konoshima S., LHD Experimental Group & the JT-60 team* // Plasma Fusion Res. 2007. V. 2. S1124.
7. *Лукьянов С.Ю., Максимов Ю.С., Вертунорох А.Н.* // Физика плазмы. 1980. Т. 6. № 1. С. 14.
8. *Фэн Б., Габдуллин П.Г., Капралов В.Г., Кутеев Б.В., Смирнов А.С., Гусев В.К., Лаукул С.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. № 11. С. 1.
9. *Vershkov V.A., Sarychev D.V., Notkin G.E., Shelukhin D.A., Buldakov M.A., Dnestrovskij Yu.N., Grashin S.A., Kirneva N.A., Krupin V.A., Klyuchnikov L.A., Melnikov A.V., Neudatchin S.V., Nurgaliev M.R., Pavlov Yu.D., Savrukhin P.V. & T-10 team* // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. 102017.
10. *Sarychev D.V.* "Bolometry", in "Fusion Physics / Ed. by: M. Kikuchi, K. Lackner, M.Q. Tran, IAEA Vienna. 2012. P. 378.
11. *Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 970.
12. *Sternberg A., Kundzins K., Zauls V., Aulika I., Čakare L., Bittner R., Weber H., Humer K., Lesnyh D., Kulikov D., Trushin Y.* // Journ. Eur. Ceramic Soc. 2004. V.24 1653.
13. *Леонов В.М., Коновалов С.В., Жоголев В.Е., Кавин А.А., Красильников А.В., Куянов А.Ю., Лукаш В.Э., Минеев А.Б., Хайрутдинов Р.Р.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 986.

14. Мазуль И.В., Гуниятулин Р.Н., Кавин А.А., Лутуновский Н.В., Маханьков А.Н., Пискарев П.Ю., Танчук В.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 1103.
15. Wesson J. *Tokamaks*. Oxford: Oxford University Press, 1997.
16. Ingesson L.C., Wilson D.J. // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73. P. 2890.
17. Côté C., DeSilva A.W. // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. 4146 .
18. Kuteev B.V., Outkine A.A., Gabdullin P.G., Kostrioukov A.Yu., Kapralov V.G. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 4287.
19. Alekseyev A., Perov G., Kurnosov A., Chernoby A., Amosov V., Portnov D., Belov A., Korde Raj // Plasma Dev. & Oper. 1999. V. 7. P. 139.  
<https://doi.org/10.1080/10519999908224466>
20. Прохоров А.С., Алексеев А.Г., Белов А.М., Лазарев В.Б., Мирнов С.В. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. С. 155.
21. Alekseyev A.G., Belov A.M., Zabrodsky V.V., Sukhanov V.L., Sorokin A.A., Peterson B.J. // Plasma & Fusion Research. 2007. V. 2. S1061.  
<https://doi.org/10.1585/pfr.2.S1061>
22. Алексеев А.Г., Белов А.М., Забродский В.В. // ПТЭ. 2010. № 2. С. 58.
23. Sladkomedova A.D., Voronin A.N., Alekseev A.G., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Zabrodsky V.V. // Phys. Scr. 2018. V. 93. 105601.  
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/aadb85>
24. Аруев Р.Н., Бобашев С.В., Красильщиков А.М., Николоаев А.В., Петров Д.Ю., Шерстнев Е.В. // ПТЭ. 2021. № 1. С. 98.
25. Johnson L.C., Bitter M., Chouinard R., von Goeler S., Hill K.W., Liew S.-L., McGuire K., Paré V., Sauthoff N.R., Young K.M. // Review of Scientific Instruments. 1986. V. 57. P. 2133.
26. Bobrovskij G.A., Kislov D.A., Lyadina E.S., Savrukhin P.V. // Review of Scientific Instruments. 1991. V. 62. P. 886.
27. Janicki C., Decoste R., Noël P. Review of Scientific Instruments. 1992. V. 63. P. 4410.
28. Sushkov A., Andreev V., Camenen Y., Pochelon A., Klimanov I., Scarabosio A., Weisen H. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. 023506.
29. Sushkov A.V., Andreev V.F., Kravtsov D.E. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. 10E319.