

Измерение электронной температуры плазмы фольговым рентгеновским спектрометром, установленным на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2

© А.В. Воронин,¹ В.Ю. Горяинов,^{1,2} В.В. Забродский,¹ Е.В. Шерстнев,¹ В.А. Корнев,¹ П.Н. Аруев,¹ Г.С. Курскиев,¹ Н.А. Жубр,¹ А.С. Тукачинский¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
195251 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vgorainov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 18 июня 2021 г.

В окончательной редакции 12 августа 2021 г.

Принято к публикации 24 августа 2021 г.

Представлено техническое решение фольгового спектрометра, установленного на токамаках Глобус-М2 и ТУМАН-3М для измерения электронной температуры плазмы. Проведены измерения зависимости температуры плазмы от времени в центральной области токамаков. Применение интегрированных фотоприемников и уникальных бериллиевых фольг с толщинами 14–80 μm позволило увеличить чувствительность спектрометра. Важным качеством используемых фольг являлись повышенные значения прочности, пластичности, однородности, отсутствие поверхностных и внутренних дефектов. Совместное использование спектрометра с диагностикой томсоновского рассеяния позволило проводить регулярные измерения температуры в токамаке Глобус-М2 с высокими пространственным и временным разрешениями. Проведена оценка влияния примесей на измерение электронной температуры плазмы.

Ключевые слова: фольговая спектрометрия, токамак, плазма, континуум, тормозное излучение, электронная температура, мягкое рентгеновское излучение, кремниевый фотодиод.

DOI: 10.21883/JTF.2021.12.51758.188-21

Введение

Диагностические методы, основанные на измерении спектра и интенсивности рентгеновского излучения, успешно используются в исследовании плазмы. В сочетании с другими методами исследований рентгеновская диагностика весьма полезна для изучения различных процессов, происходящих в плазме токамака. Например, она позволяет исследовать внутренние МГД-колебания плазмы и определять расположение поверхностей с рациональным значением запаса устойчивости [1,2], оценивать потери электронов за счет электронно-циклотронной эмиссии ЕСЕ [3] и убегающих электронов [4], ELM-события [5,6], отслеживать L–H-переходы [7] и многое другое [8–16]. Такие устройства широко применяются на токамаках JET [17], MAST [8], DIII-D [18], Asdex-Upgrade [19], PDX [20], NSTX [21–23], EAST [5], MST [24], TCV [25,26], COMPASS [27,28]. В рентгеновских устройствах измерение производится без вмешательства в ход изучаемого процесса.

Аппаратура для регистрации температуры является одной из самых востребованных при изучении поведения лабораторной плазмы. В настоящее время электронную температуру определяют по величине проводимости плазмы, собственному излучению интенсивности линейчатого и сплошного спектра плазмы, а

также электронно-циклотронной частоты и ее гармоник [29–31].

В настоящей работе представлено техническое решение фольгового рентгеновского многоканального спектрометра, установленного на токамаках Глобус-М2 и ТУМАН-3М для определения электронной температуры плазмы на оси плазменного шнура с высоким временным разрешением.

На сферическом токамаке Глобус-М2 (малый радиус $a = 0.24$ м, большой радиус $R = 0.36$ м, магнитное поле на оси тора $B_T = 0.5–0.9$ Т, плазменный ток $I_p = 150–400$ кА) [32] для измерения электронной компоненты плазмы применяли две взаимодополняющие диагностики — томсоновское рассеяние луча лазера во время его взаимодействия с плазмой [33] и фольговую спектрометрию мягкого рентгеновского излучения. С помощью лазера с частотой импульсов 300 Нз проводилась регистрация температуры в 10 пространственных областях плазменного шнура в течение разряда токамака. Высокая стоимость и ограниченный срок работы лазера не позволяли постоянно использовать эту диагностику. Для разработанного фольгового спектрометра, помимо пассивности измерения, характерны невысокая цена, небольшие габариты, простая эксплуатация по сравнению с томсоновской диагностикой.

Фольговый спектрометр обеспечивал непрерывное измерение температуры с частотой дискретизации ~ 50 kHz и применялся в течение всей экспериментальной кампании. При этом реальная частота спектрометра в составе токамака Глобус-М составляла 30 kHz. Она ограничивалась полосой пропускания оптической связки, встроенной в систему сбора данных токамака. Основным недостатком этой диагностики являлась большая погрешность вычисления электронной температуры. Однако она была существенно дешевле диагностики томсоновского рассеяния. Для проведения измерений электронной температуры водородной/дейтериевой плазмы необходимо предположение о максвелловском распределении электронов по энергиям. Также требуется чистота плазмы от примесей и значение электронной температуры $T_e > 100$ eV.

На токамаке ТУМАН-3М ($a = 0.22$ m, $R = 0.53$ m, $B_T = 1.0$ T, $I_P = 190$ kA) [34] измерение температуры электронов проводилось с помощью двух фольговых спектрометров. Они отличались друг от друга расположением на токамаке, чувствительностью, быстродействием и конструкцией. Датчики и фольги основного спектрометра (всего 9 хорд), установленного ранее на токамак, находились в инертном газе и соединялись с вакуумной камерой через бериллиевую фольгу толщиной $50 \mu\text{m}$. Датчики с предусилителями и тонкие фольги другого спектрометра, разработанного сейчас, располагались внутри вакуумной камеры токамака и имели более высокое временное разрешение, чем датчики основного спектрометра. Электронная температура, измеренная разработанным спектрометром, сравнивалась с измерениями температуры основного спектрометра.

1. Фольговый спектрометр

В свободной от примесей водородной/дейтериевой плазме при электронной температуре более 100 eV тормозное рентгеновское непрерывное излучение, возникающее из-за ускорения электронов в кулоновском поле ионов, играет главную роль по сравнению с рекомбинационным, линейчатым и циклотронным излучениями [35]. Спектральную плотность мощности тормозного излучения в единице объема плазмы dV с учетом максвелловского распределения электронов по энергиям можно описать формулой [13,36]:

$$\frac{dP_{ff}}{dv \cdot dV} \approx 10^{-28} \cdot Z_{\text{eff}}^2 \cdot (g_{ff}) \cdot n_i \cdot n_e \cdot \sqrt{\frac{\chi_H}{T_e}} \cdot \exp\left(-\frac{h\nu}{T_e}\right), \quad (1)$$

где χ_H — потенциал ионизации водорода, T_e — температура электронов, [eV], n_i и n_e — плотности ионов и электронов соответственно, [cm^{-3}], h — постоянная Планка, ν — частота фотонов, Z_{eff} — эффективный заряд плазмы, (g_{ff}) — усредненный по энергиям Гаунт-фактор для свободно-свободных переходов, который может быть вычислен в соответствии с [37]. Если энергия фотона

$\varepsilon = h \cdot \nu$, то интенсивность тормозного излучения можно представить в виде

$$I_{ff} \propto f(T_e, n_e, Z_{\text{eff}}) \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{T_e}\right). \quad (2)$$

Здесь f — функция, зависящая от электронной температуры, плотности, эффективного заряда и фактора Гаунта, энергия фотона ε выражена в eV. Если это излучение попадает на диод с фольгой определенной толщины, то сигнал с детектора можно представить в виде

$$i(t) \propto f(T_e, n_e, Z_{\text{eff}}) \cdot \int_0^{\infty} F^{FPU}(\varepsilon) \cdot F^{foil}(\varepsilon) \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{T_e}\right) d\varepsilon, \quad (3)$$

где F^{FPU} и F^{foil} — спектральные характеристики диода и фильтра соответственно.

При использовании двух детекторов с фольгами разной толщины, принимающих рентгеновское излучение из одной и той же области, можно определить температуру электронов из отношения

$$\frac{i_1}{i_2} = R(T_e) = A \cdot \frac{\int_0^{\infty} F^{FPU}(\varepsilon) \cdot F_1^{foil}(\varepsilon) \exp\left(-\frac{\varepsilon}{T_e}\right) d\varepsilon}{\int_0^{\infty} F^{FPU}(\varepsilon) \cdot F_2^{foil}(\varepsilon) \exp\left(-\frac{\varepsilon}{T_e}\right) d\varepsilon}, \quad (4)$$

где A — коэффициент, учитывающий различие каналов регистрации датчиков, который определялся в результате калибровки прибора по эталонному источнику излучения. Индексы 1 и 2 соответствовали фольгам детекторов различной толщины. Интегрирование по энергии фотона производили по области чувствительности детектора 10 eV–50 keV.

Зная функцию $R(T_e)$ и амплитуды сигналов с детекторов, можно получить значение температуры для каждого момента времени. Изменяя толщины фольг, можно изменять чувствительность прибора к разным диапазонам температур. Использование нескольких каналов (более двух) с различными толщинами фольг позволяло выбрать рабочую область спектра без наличия излучения примесей. С этой целью в настоящей работе представлены четырехканальный и трехканальный спектрометры для токамаков Глобус-М2 и ТУМАН-3М соответственно, которые позволяли проводить измерение температуры плазмы в центральной области плазменного шнура с временным разрешением $\sim 20 \mu\text{s}$. Результаты измерений альтернативных диагностик обеспечивали дополнительную калибровку и сверку настоящих измерений.

Разработанный спектрометр состоял из детекторов, бериллиевых фольг, коллиматоров и стабилизированного источника питания. Внешний вид фланца, оснащенного детекторами, фильтрами и коллиматорами, а также схема спектрометра представлены на рис. 1. Все элементы прибора были смонтированы на фланце ДУ80 на стороне, обращенной в вакуумную камеру токамака.

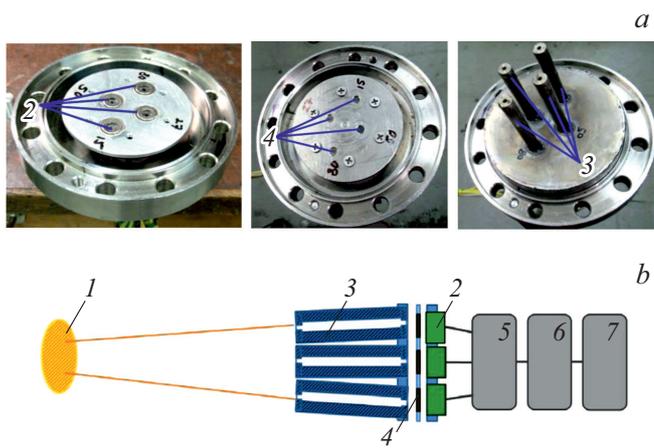


Рис. 1. *a* — элементы четырехканального спектрометра, установленные на вакуумном фланце, слева направо: детекторы, фольги и коллиматоры; *b* — схема фольгового спектрометра: 1 — плазма, 2 — фотодиоды с интегрированными усилителями, 3 — коллиматоры, 4 — бериллиевые фольги, 5 — стабилизированный источник питания, 6 — аналогово-цифровой преобразователь, 7 — компьютер.

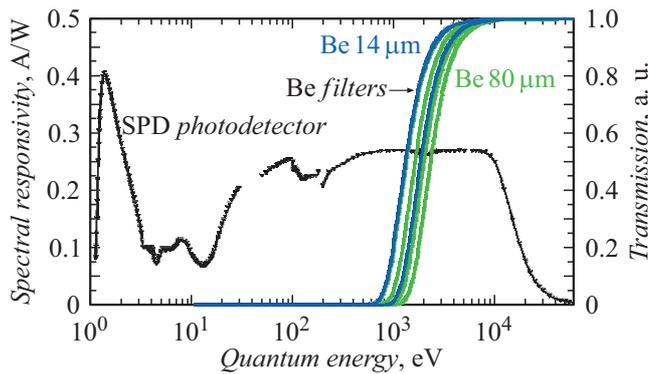


Рис. 2. Спектральная характеристика SPD фотодиода и пропускание бериллиевых фольг различной толщины.

Коллиматоры длиной 60 mm и диаметром входного отверстия 3 mm собирали излучение плазмы в экваториальной области токамака вдоль линии наблюдения с малым телесным углом.

Юстировка коллиматоров проводилась в видимой области спектра на стенде с помощью светодиодов, установленных вместо детекторов и фольг. На экране, расположенном на расстоянии, соответствующему расстоянию от детекторов до центра плазменного шнура (970 mm для Глобус-М2 и 580 mm для ТУМАН-3М), формировались изображения лучей от светодиодов в области их пересечения с экраном. Совмещение изображений производилось механическим изгибанием коллиматоров. Диаметр изображения пятна составлял ~ 20 mm.

Детекторы были изготовлены компанией ЗАО „Техно-эксан“ специально для этого спектрометра [38]. В применяемых детекторах SPD (silicon precision detector) [39,40] был сформирован достаточно тонкий „мертвый слой“,

Основные параметры детектора

Усиление	10^7 V/A
Напряжение шума	< 10 mV
Диаметр активной области	3.2 mm
Отношение сигнал/шум	~ 100
Фронт нарастания	< 20 μs

что позволяло получать большой сигнал на выходе. К каждому детектору был подсоединен трансимпедансный усилитель. Главная особенность разработанных детекторов состояла в их высокой чувствительности и временном разрешении, что позволило регистрировать быстрые процессы, происходящие в плазме токамака. Спектральная характеристика $F^{FPU}(\epsilon)$ детекторов представлена на рис. 2 [40]. В таблице приведены основные электрические и динамические характеристики детектора.

Питание и сигналы с детекторов подключались через вакуумные разъемы, расположенные на фланце. Источник питания на выходе обеспечивал напряжение ± 5 V.

Бериллиевые фольги были изготовлены в Институте машиностроения, материалов и транспорта при Политехническом университете Петра Великого [41,42] с помощью многопроходной горячей прокатки. Важным качеством этих фольг (с минимально возможной толщиной 5 μm) являлись повышенные значения прочности, пластичности, однородности, отсутствие поверхностных и внутренних дефектов. Толщины фольг, установленных на фотодетекторах спектрометра в токамаке Глобус-М2, составляли 15, 27, 50 и 80 μm. На токамаке ТУМАН-3М — 27, 14 и 40 μm. Спектральные характеристики фольг F^{foil} рассчитывали с использованием базы данных [43]. Они представлены на рис. 2 справа.

Калибровка каналов спектрометра проводилась с помощью излучения инфракрасного светодиода на длине

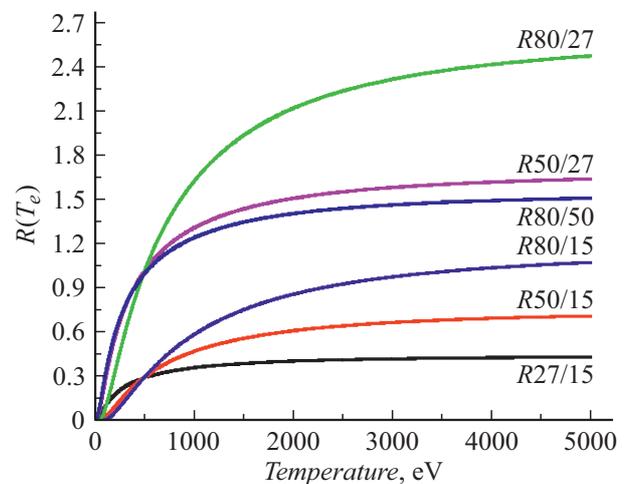


Рис. 3. Зависимости $R(T_e)$ для различных толщин (15, 27, 50, 80 μm) фольг, применяемых на токамаке Глобус-М2 с учетом калибровочного коэффициента А.

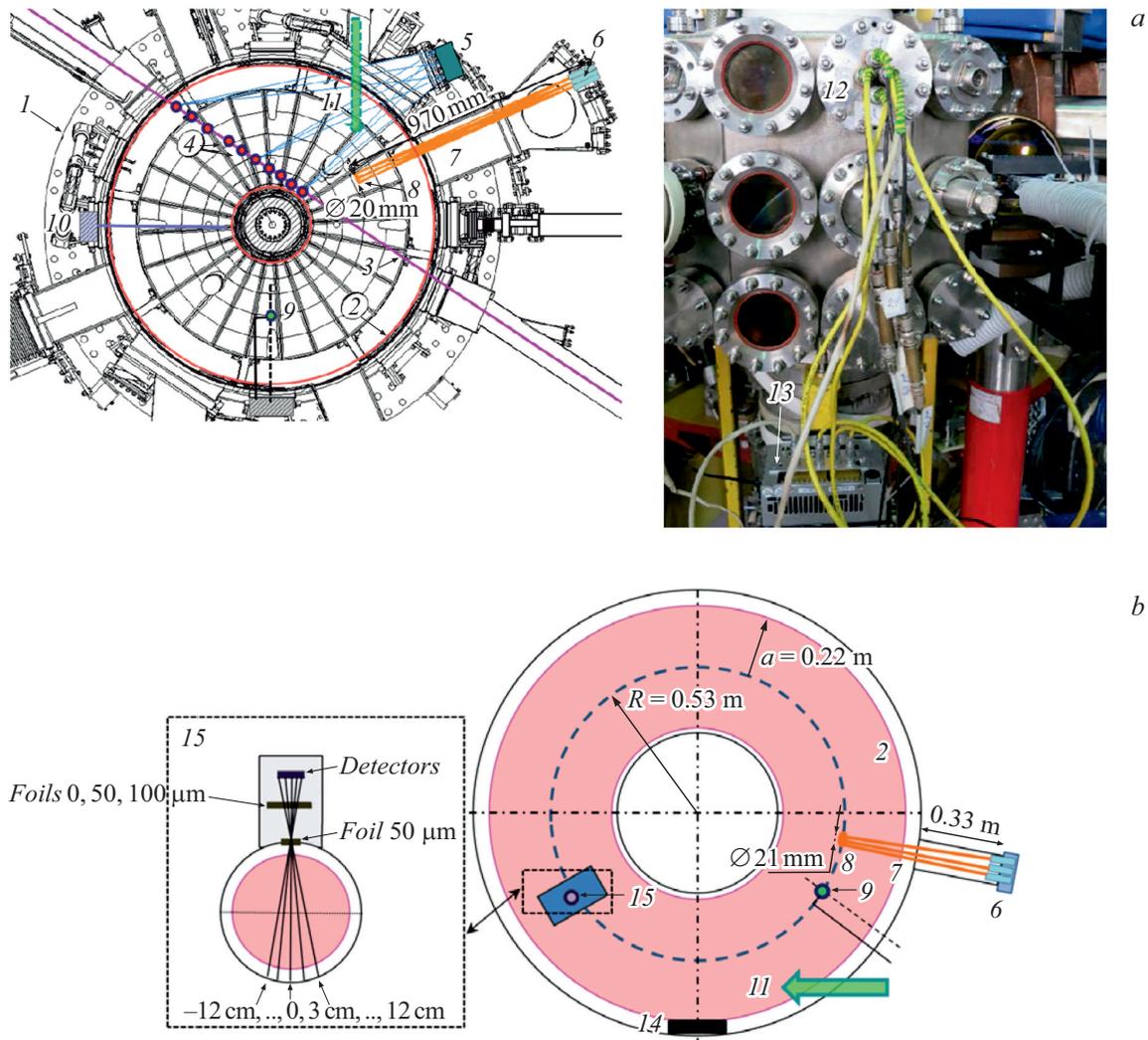


Рис. 4. *a* — расположение диагностик и четырехканального спектрометра, установленных на токамаке Глобус-М2: 1 — сечение камеры в экваториальной плоскости, 2 — внешняя граница плазмы, 3 — зондирующий лазерный луч, 4 — области измерения температуры лазером, 5 — объектив, 6–8 — коллиматоры, границы сбора излучения и область измерения температуры спектрометра, 9 — области измерения среднечордовой плотности СВЧ-интерферометром, 10 — фотоприемники для измерения излучения линии СIII, 11 — расположение и направление нейтральной инжекции NBI, 12, 13 — фланец и источник питания спектрометра; *b* — схема экваториального сечения токамака ТУМАН-3М: 14 — лимитер, 15 — расположение и схема основного спектрометра.

волны 1050 nm. Бериллиевые фольги во время калибровки отсутствовали. Оправка со светодиоидом по очереди надевалась на один из четырех коллиматоров. Проводилось измерение напряжения на выходе детектора каждого канала. С учетом этих измерений определялся коэффициент A , необходимый для расчета зависимости отношения сигналов датчиков $R(T_e)$ от температуры. Результаты вычислений для токамака Глобус-М2 представлены на рис. 3. Видно, что наибольшая чувствительность $R(T_e)$ к температуре проявлялась тогда, когда выбирались пары фольг с наименьшей и наибольшей толщинами, но так, чтобы второй сигнал отличался от шума.

Процедура определения зависимости температуры от времени $T_e(t)$ состояла в сопоставлении расчетной

функции отношения сигналов от температуры $R(T_e)$ с экспериментальной зависимостью отношения сигналов от времени $R(t)$. Эта процедура выполнялась с помощью алгоритма, встроенного в программу Combiscopre, разработанную для сбора и обработки данных токамака Глобус-М2. Аналогичная программа использовалась и на токамаке ТУМАН-3М.

Расположение диагностик и четырехканального спектрометра, установленных на токамаке Глобус-М2, представлено на рис. 4, *a*.

Четырехканальный спектрометр располагался на трубке выше экваториальной плоскости токамака, поэтому коллиматоры были наклонены в сторону экватора на угол $8^\circ 41'$ для сбора излучения плазмы из центральной области вакуумной камеры. Также коллиматоры были

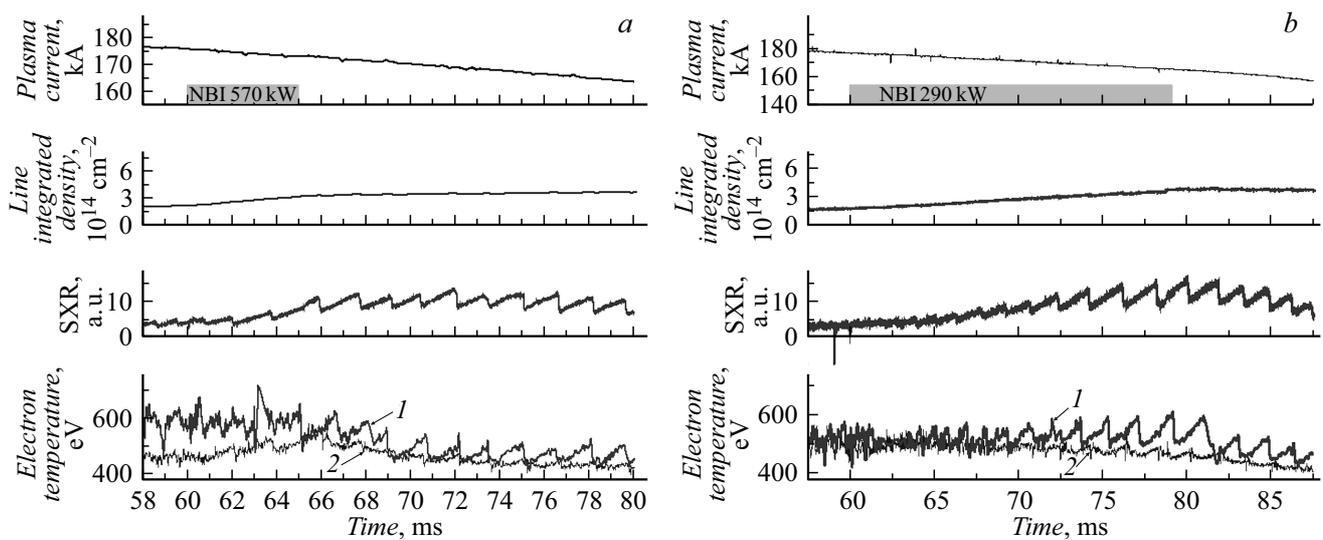


Рис. 5. Эволюции параметров разрядов #19022017 (*a*) и #19022014 (*b*) в токамаке ТУМАН-3М. 1 — температура электронной компоненты плазмы, полученная спектрометром с фольгами толщиной 14 и 27 μm , 2 — то же с фольгами толщиной 100 и 150 μm .

наклонены относительно друг друга для сбора излучения из одной области диаметром 20 mm на расстоянии 970 mm от детекторов (позиция 8 на рис. 4, *a*).

С помощью диагностики томсоновского рассеяния проводилось измерение температуры в 10 пространственных областях плазменного шнура (позиция 4 на рис. 4, *a*) до 35 раз в течение разряда токамака. Длительность зондирующего лазерного импульса составляла $\sim 10\text{--}50$ ns, интервал между импульсами $\sim 2.5\text{--}3$ ms. Лазерный пучок проходил в экваториальной плоскости вблизи столба, система сбора рассеянного излучения также располагалась в экваториальной плоскости.

Схема экваториального сечения токамака ТУМАН-3М с диагностиками представлена на рис. 4, *b*. Трехканальный разработанный спектрометр располагался в экваториальной плоскости. Крупным планом показана схема основной рентгеновской диагностики (позиция 15), с измерениями температуры которой производилось сравнение результатов, полученных трехканальным спектрометром.

2. Результаты

На рис. 5 представлена эволюция параметров разрядов дейтериевой плазмы на токамаке ТУМАН-3М с нейтральной инжекцией водорода различной длительности и мощности пучка. Цифрой 1 обозначена электронная температура, измеренная в радиальном направлении тора с помощью разработанного трехканального спектрометра с толщинами фольг 14 и 27 μm . Линия 2 — температура, полученная основным спектрометром с толщинами фольг 100 и 150 μm . Видно, что во время инжекции пучка измеренные температуры совпадали, когда среднехордовая плотность плазмы превышала $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. После завершения инжекции на обеих

диагностиках наблюдалось уменьшение температуры. Величины, полученные с помощью пар фольг толщиной 40, 27 и 40, 14 μm , на трехканальном спектрометре оказывались заниженными, что могло быть связано с влиянием примесей нержавеющей стали [12], из которой состоял лимитер токамака. Видно, что трехканальный фольговый спектрометр обеспечивал измерение температуры с более высоким разрешением во времени по сравнению с разрешением, полученным с помощью основного спектрометра.

Пример возможностей фольгового спектрометра на токамаке Глобус-М2 продемонстрирован на рис. 6, где представлены процессы различных временных масштабов.

На рис. 6, *a* представлены параметры разряда с пилообразными колебаниями. Измерение температуры электронов в плазме проводилось одновременно с помощью фольгового спектрометра и диагностики томсоновского рассеяния. Максимальная температура радиального профиля, измеренного диагностикой томсоновского рассеяния, была на центральной хорде, наиболее близкой в полоидальной проекции к области измерения спектрометра. В обоих случаях обе диагностики фиксировали колебания температуры на оси плазменного шнура с характерной частотой ~ 300 Hz. Однако фольговый спектрометр обеспечивал измерение температуры с более высоким разрешением во времени по сравнению с разрешением, измеренным диагностикой томсоновского рассеяния. На рис. 6, *b* представлены параметры омического разряда, обусловленные возбуждением моды типа „снейк“. Видно, что фольговый спектрометр регистрировал колебания электронной температуры с характерной частотой ~ 30 kHz.

Несоответствие результатов измерений электронной температуры, полученными спектрометром с различны-

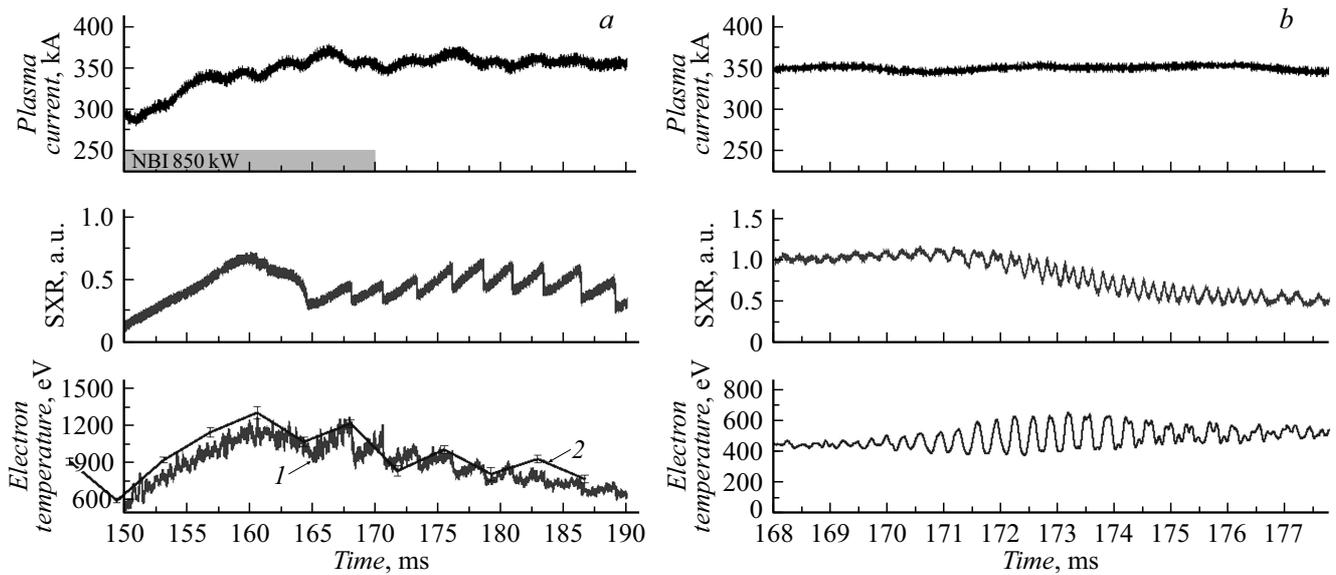


Рис. 6. Эволюции параметров плазменных разрядов в токамаке Глобус-М2. *a* — разряд с пилообразными колебаниями, #38835; *b* — разряд с возбуждением моды типа „снейк“, #38838. Температура электронной компоненты плазмы, полученная с помощью 1 — фольгового спектрометра, 2 — диагностики томсоновского рассеяния.

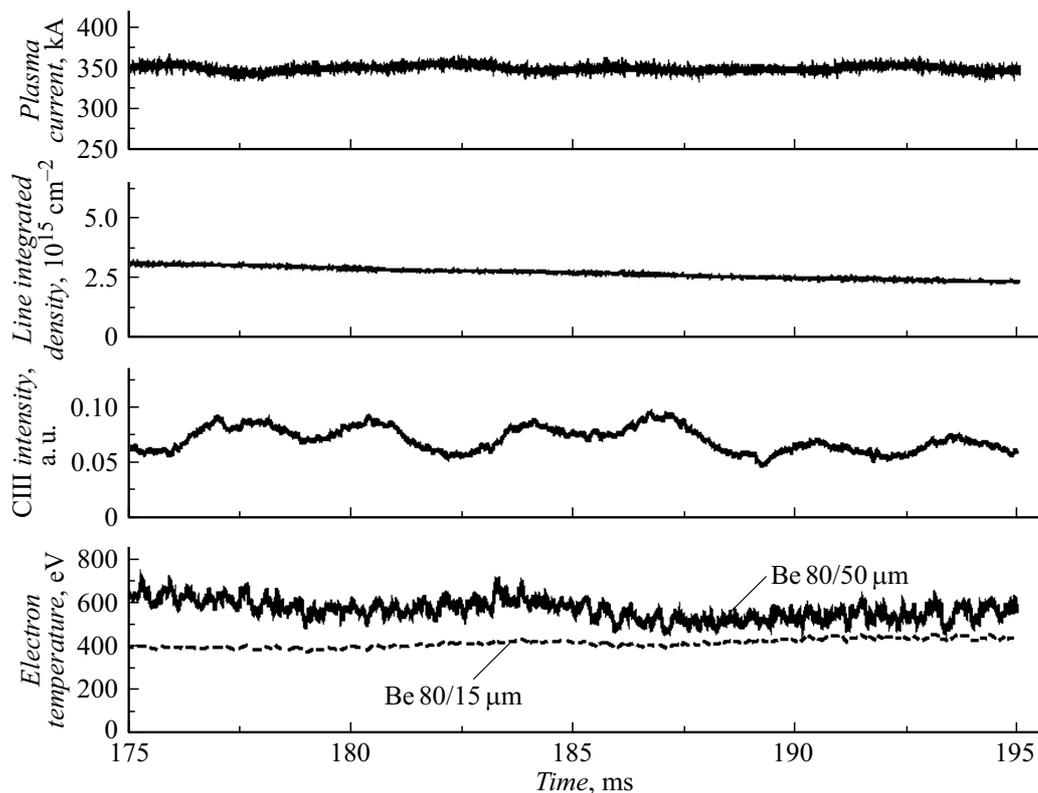


Рис. 7. Параметры разряда #38837 токамака Глобус-М2.

ми толщинами фольг, диагностике томсоновского рассеяния, могло быть вызвано влиянием излучения примесей углерода, так как первая стенка токамака Глобус-М2 была покрыта графитовыми тайлами. На рис. 7 представлены параметры омического разряда с умеренным

количеством углерода в плазме. На нижнем графике показаны значения электронной температуры, измеренные спектрометром с парами бериллиевых фольг различной толщины. Приборная погрешность в измерении не превышала 20%. Видно, что с увеличением тол-

щин фольг измеренная температура заметно возросла. Можно предположить, что влияние излучения углерода уменьшалось по мере увеличения толщины фольг, а измеренная температура приближалась к истинной.

Заключение

Разработан, изготовлен и апробирован фольговый спектрометр для измерения температуры электронов плазмы в токамаках Глобус-М2 и ТУМАН-3М. Применение фотоприемников, интегрированных с усилителями, и уникальных тонких бериллиевых фольг позволило увеличить чувствительность и быстродействие спектрометра. Подготовлен алгоритм вычисления зависимости температуры от времени по измеренным сигналам мягкого рентгеновского излучения. Проведены измерения зависимости электронной температуры плазмы от времени в центральной области токамаков. Измеренные температуры в основном согласуются с температурами, полученными с помощью альтернативных диагностик. Совместное использование фольгового спектрометра с диагностикой томсоновского рассеяния позволило проводить регулярные измерения температуры в токамаке Глобус-М2 с высокими пространственным и временным разрешениями. Сравнение результатов на токамаке ТУМАН-3М показало применимость метода для бериллиевых фольг толщиной менее 100 мкм. Проведена оценка влияния примесей на измерение электронной температуры плазмы фольговым спектрометром.

Финансирование работы

Разработка фольгового спектрометра была поддержана в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2019-0023. Эксперименты проведены на УНУ „Сферический токамак Глобус-М“, входящей в состав ФЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021), а также на УНУ „ТУМАН-3М“. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № 0784-2020-0020.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Xu, L. Hu, K. Chen, E. Li, F. Wang, M. Xu, Y. Duan, T. Shi, J. Zhang, R. Zhou, Y. Chen. *Phys. Plasmas*, **19**, 122504 (2012).
- [2] S. Mirnov. *Physical Processes in Tokamak Plasma* (Atomizdat, Moscow, 1983), p. 116.
- [3] H. Lu, J. Luo, F. Zhong, X. Zha, L. Hu. *Eur. Phys. J. D*, **66**, 213 (2012).
- [4] А.С. Тукачинский, Л.Г. Аскинази, И.М. Балаченков, А.А. Белокуров, Д.Б. Гин, Н.А. Жубр, В.А. Корнев, С.В. Лебедев, Е.М. Хилькевич, И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев. *Письма в ЖТФ*, **42** (24), 72 (2016). [A. Tukachinsky, L. Askinazi, I. Balachenkov, A. Belokurov, D. Gin, N. Zhubr, V. Kornev, S. Lebedev, E. Khil'kevich, I. Chugunov, A. Shevelev. *Tech. Phys. Lett.*, **42** (12), 1167 (2016).]
- [5] K. Chen, L. Xu, L. Hu, Y. Duan, X. Li, Y. Yuan, S. Mao, X. Sheng, J. Zhao. *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 063504 (2016).
- [6] Y. Li, G. Xu, K. Tritz, X. Lin, H. Liu, Y. Chen, S. Li, F. Yang, Z. Wu, L. Wang, H. Lan, X. Li, W. Zhang, G. Hu. *Fusion Eng. Des.*, **137**, 414 (2018).
- [7] L. Askinazi, V. Kornev, S. Krikunov, L. Krupnik, S. Lebedev, A. Smirnov, M. Tendler, A. Tukachinsky, M. Vildjunas, N. Zhubr. *J. Phys.: Conf. Ser.* **123**, 012010 (2008).
- [8] M. Cecconello, O. Jones, L. Garzotti, K. McClements, M. Carr, S. Henderson, S. Sharapov, I. Klimek and the MAST Team. *Nucl. Fusion*, **55**, 032002 (2015).
- [9] T. Onchi, R. Ikezoe, K. Oki, A. Sanpei, H. Himura, S. Masamune. *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 073502 (2010).
- [10] L. Askinazi, M. Vild'zhunas, V. Golant, V. Kornev, S. Krikunov, S. Lebedev, G. Razdobarin, V. Rozhdstvensky, E. Shevkin, A. Tukachinsky, S. Tsaun, N. Zhubr. *29th EPS Conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion, Montreux, 17–21 June 2002 ECA*, vol. 26B, P-2.070 (2002).
- [11] M. Kantor, A. Altukhov, V. Belik, L. Esipov, D. Kouprienko L. Shmaenok, V. Yermolayev. *30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7–11 July 2003 ECA*, vol. 27, A P-2.60 (2003).
- [12] S. von Goeler, W. Stodiek, H. Eubank, H. Fishman, S. Grebenschikov, E. Hinnov. *Nucl. Fus.*, **15** (2), 301 (1975).
- [13] Huddleston R and Leonard S. *Plasma Diagnostic Techniques* (Academic Press, NY.–London, 1965), p. 304.
- [14] V. Andreev, I. Bragin. *Plasma Diagnostics with Conductivity Probes* (St.-Petersburg: SUAI 2000), p. 4.
- [15] K. Nishimura, A. Sanpei, H. Tanaka, G. Ishii, R. Kodera, R. Ueba, H. Himura, S. Masamune, S. Ohdachi, N. Mizuguchi. *Rev. Sci. Instrum.*, **85**, 033502 (2014).
- [16] L. Delgado-Aparicio, J. Wallace, H. Yamazaki, P. VanMeter, L. Reusch, M. Nornberg, A. Almagari, J. Maddox, B. Luethi, M. Rissi, T. Donath, D. Den Hartog, J. Sarff, P. Weix, J. Goetz, N. Pablant, K. Hill, B. Stratton, P. Efthimion, Y. Takase, A. Ejiri. *M. Rev. Sci. Instrum.*, **89** (10), 10G116 (2018). DOI: 10.1063/1.5038798
- [17] B. Alper, S. Dillon, A. Edwards, R. Gill, R. Robins, D. Wilson. *Rev. Sci. Instrum.*, **68** (1), 778 (1997).
- [18] E. Hollmann, L. Chousal, R. Fisher, R. Hernandez, G. Jackson, M. Lanctot, S. Pidcoe, J. Shankara, D. Taussig. *Rev. Sci. Instrum.*, **82** (11), 113507 (2011).
- [19] V. Igochine, A. Gude, M. Maraschek, ASDEX Upgrade team. IPP report, 1/338 Mai, 2010.
- [20] E. Silver, M. Bitter, K. Brau, D. Eames, A. Greenberger, K. Hill, D. Meade, W. Roney, N. Sauthoff, S. Von Goeler. *Rev. Sci. Instrum.*, **53**, 1198 (1982).
- [21] L. Delgado-Aparicio, D. Stutman, K. Tritz, M. Finkenthal, R. Bell, D. Gates, R. Kaita, B. LeBlanc, R. Maingi, H. Yuh, F. Levinton, W. Heidbrink. *Plasma Phys. Control. Fusion.*, **49** 1245 (2007).
- [22] B. LeBlanc, R. Bell, S. Kaye, D. Stutman, M. Bell, M. Bitter, C. Bourdelle, D. Gates, R. Maingi, S. Medley, J. Menard, D. Mueller, S. Paul, A. Roquemore, A. Rosenberg, S. Sabbagh, V. Soukhanovskii, E. Synakowski, J. Wilson and the NSTX Research Team. *Nucl. Fusion*, **44**, 513 (2004).

- [23] B. Stratton, M. Biter, K. Hill, D. Hillis, J. Hogan, *Passive Spectroscopic Diagnostics for Magnetically-Confined Fusion Plasmas*. (United States: N. p., 2007). DOI: 10.2172/962715
- [24] M. McGarry, P. Franz, D. Den Hartog, J. Goetz. *Plasma Phys. Control. Fusion.*, **56**, 125018 (2014).
- [25] I. Furno. *Fast Transient Transport Phenomena Measured by soft X-ray Emission in TCV Tokamak Plasmas*. LRP 703/01, August 2001.
- [26] M. Anton, H. Weisen, M. Dutch, W von der Linden, F. Buhlmann, R. Chavan, B. Marletaz, P. Marmillod, P. Paris. *Plasma Phys. Controlled Fusion.*, **38**, 1849 (1996).
- [27] M. Imříšek, J. Mlynář, V. Löffelmann, V. Weinzettl, T. Odstrčil, M. Odstrčil, M. Tomeš. *Nukleonika*, **61** (4), 403-8 (2016).
- [28] M. Imříšek, V. Weinzettl, J. Mlynář, T. Odstrčil, M. Odstrčil, O. Ficker, J. Pinzon, C. Ehrlacher, R. Panek, M. Hron. *Rev. Sci. Instrum.*, **85**, 11E433 (2014).
- [29] Podgorny M., *Plasma Diagnostic Lectures* (Atomizdat, M., 1968), p. 88.
- [30] Zh. Qiuping, Ch. Cheng, M. Yuedong. *Plasma Sci. Technol.*, **11** (5), 560 (2009).
- [31] В.М. Тимохин, А.И. Рыкачевский, И.В. Мирошников, В.Ю. Сергеев, М.М. Кочергин, А.Н. Коваль, Е.Е. Мухин, С.Ю. Толстяков, А.В. Воронин. *Письма в ЖТФ*, **42** (15), 13 (2016). [V. Timokhin, A. Rykachevskii, I. Miroshnikov, V. Sergeev, M. Kochergin, A. Koval', E.E. Mukhin, S. Tolstyakov, A. Voronin. *Tech. Phys. Lett.*, **42** (8), 775 (2016).]
- [32] V. Minaev, V. Gusev, N. Sakharov, V. Varfolomeev, N. Bakharev, V. Belyakov, E. Bondarchuk, P. Brunkov, F. Chernyshev, V. Davydenko, V. Dyachenko, A. Kavin, S. Khitrov, N. Khromov, E. Kiselev, A. Konovalov, V. Kornev, G. Kurskiev, A. Labusov, A. Melnik, A. Mineev, M. Mironov, I. Miroshnikov, M. Patrov, Yu. Petrov, V. Rozhansky, A. Saveliev, I. Senichenkov, P. Shchegolev, O. Shcherbinin, I. Shikhovtsev, A. Sladkomedova, V. Solokha, V. Tanchuk, A. Telnova, V. Tokarev, S. Tolstyakov, E. Zhilin. *Nucl. Fusion.*, **57**, 066047 (2017).
- [33] G. Kurskiev, S. Tolstyakov, A. Berezutskiy, V. Gusev, M. Kochergin, V. Minaev, E. Mukhin, M. Patrov, Yu. Petrov, N. Sakharov, V. Semenov, P. Chernakov. *Thermonucl. Fusion.*, **2**, 81 (2012).
- [34] S. Lebedev, M. Andrejko, L. Askinazi, V. Golant, V. Kornev, L. Levin, V. Rozhansky, M. Tandler, A. Tukachinsky. *Plasma Phys. Control. Fusion.*, **36**, B289 (1994).
- [35] F. Scholze, R. Klein, R. Müller. *Metrologia*, **43**, 6 (2006).
- [36] S. Luk'yanov. *Hot Plasma and Controlled Nuclear Fusion* (Nauka, M., 1975), p. 154.
- [37] W. Karzas, R. Latter. *Astrophysical J. Suppl. Ser.*, **6**, 167 (1960).
- [38] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://technoexan.ru/en/products/sildet.php>
- [39] P. Aruev, Yu. Kolokolnikov, N. Kovalenko, A. Legkodymov, V. Lyakh, A. Nikolenko, V. Pindyurin, V. Sukhanov, V. Zabrodsky. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **603**, 58 (2009).
- [40] П. Аруев, С. Бобашев, А. Красильщиков, А. Николаев, Д. Петров, Е. Шерстнев, Приборы и техника эксперимента, **1**, 1 (2021). [P. Aruev, S. Bobashev, A. Krassilchichikov, A. Nikolaev, D. Petrov, E. Sherstnev. *Instrumental Experimental Techniq.*, **64**, 93 (2021). DOI: 10.1134/S0020441220060147]
- [41] V. Mishin, I. Shishov, A. Minchena. *Mater. Phys. Mechan.*, **38** (1), 40 (2018).
- [42] V. Mishin, I. Shishov, O. Stolyarov, I. Kasatkin, P. Glukhov. *Mater.*, **11**, 100726 (2020).
- [43] Электронный ресурс. Режим доступа: www.physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html