УДК 621.039.665

ИСПЫТАНИЕ ПОЛИХРОМАТОРА ДЛЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ТОКАМАКА Т-15МД В СОСТАВЕ ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА Т-10

Г.М. Асадулин¹, А.Н. Баженов², И.С. Бельбас¹, А.В. Горшков¹, А.Н. Коваль², Г.С. Курские²,
В.А. Соловей², В.В. Солоха², Ал.П. Чернаков³

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

³ЗАО «Спектрал-Тех», Санкт-Петербург, Россия

Проект тангенциальной системы диагностики томсоновского рассеяния для токамака Т-15МД рассчитан на использование фильтровых полихроматоров. В основе системы будет использоваться первая гармоника лазера Nd:YAG с длиной волны 1064 нм, энергией импульса 3 Дж при длительности 10 нс и частотой следования импульсов 100 Гц. В данной статье представлены результаты испытания прототипа цифрового фильтрового полихроматора, разрабатываемого в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе для диверторной диагностики томсоновского рассеяния установки ИТЭР, в составе диагностического комплекса установки Т-10. Тестируемый полихроматор имеет пять спектральных каналов, настроенных на диапазон измеряемой температуры от 10 эВ до нескольких кэВ. Сбор света вёлся из точки вблизи центра плазменного шнура. В работе представлены результаты измерения параметров плазмы на токамаке Т-10 с помощью диагностики томсоновского рассеяния с фильтровым полихроматором и приведено сравнение результатов с данными других диагностик установки.

Ключевые слова: токамак Т-15МД, токамак Т-10, лазерная диагностика, томсоновское рассеяние, полихроматор, спектрометр.

POLYCHROMATOR TEST FOR THE T-15MD TANGENTIAL THOMSON SCATTERING SYSTEM ON THE T-10 DIAGNOSTICS BASE

G.M. Asadulin¹, A.N. Bazhenov², I.S. Bel'bas¹, A.V. Gorshkov¹, A.N. Koval², G.S. Kurskiev²,
V.A. Solovey², V.V. Solokha², Al.P. Chernakov³

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²A.F. Ioffe Institute of Physics and Technology, St. Petersburg, Russia

³Closed joint-stock company «SpectralTech» Saint Petersburg, Russia

New tangential Thomson scattering system is designed for tokamak T-15MD with a registration system using an interference filter polychromators. The first harmonic of Nd:YAG laser (1064 nm) will be used, pulse energy of 3 J, duration of 10 ns and repetition rate of 100 Hz. This article presents the results of a test of a digital filter polychromator prototype that is under development in Physico-technical Institute A.F. Ioffe for the ITER divertor Thomson scattering diagnostics on T-10 diagnostics base. The polychromator has 5 spectral channels designed for temperature measurements from 10 eV to several keV. Scattered light was collected from a point near center of the plasma. This paper describes the results of plasma parameters measurements in the T-10 tokamak using Thomson scattering diagnostic with the filtered polychromator and comparison of results with another diagnostics.

Key words: tokamak T-15MD, tokamak T-10, laser diagnostics, Thomson scattering, polychromator, spectrometer.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-89-94

ВВЕДЕНИЕ

На модернизированном токамаке Т-15МД планируется установка двух систем диагностики томсоновского рассеяния (ТР) с вертикальным и тангенциальным зондированием. Некруглая форма сечения камеры токамака вызывает интерес к измерению профилей электронной плотности и температуры не только вдоль вертикальной хорды наблюдения, но и вдоль большого радиуса плазмы. Вертикальная система планируется с телевизионной регистрацией аналогично системе, установленной на токамаке Т-10 [1]. Проект тангенциальной системы подразумевает использование первой гармоники Nd:YAG-лазера (рабочая длина волны 1064 нм) и системы регистрации на основе фильтровых полихроматоров [2].

Использование фильтровых полихроматоров с широкими спектральными каналами является одним из самых распространённых методов регистрации спектров рассеянного света в ближней инфракрасной области, так как позволяет достоверно осуществлять регистрацию даже при относительно низкой интенсивности зондирующего излучения. Данный тип спектрометров активно используется на многих токамаках мира. Представленный в данной работе прибор разработан для использования в составе диагностики на ИТЭР [3] и также предлагается для тангенциальной системы диагностики ТР на установке Т-15МД. Он совмещает в себе спектральный прибор, детекторную часть с оцифровкой сигналов, хранение и предварительную обработку данных.

Ожидаемый диапазон температуры в различных режимах работы установки Т-15МД составит от 100 эВ до 17 кэВ при максимальной расчётной мощности дополнительного нагрева. При этом ожидаемая точность измерений разрабатываемой диагностики должна быть не ниже 10% при температуре до 10 кэВ.

ГЕОМЕТРИЯ

Для проведения испытаний прибора использовалась аппаратная база диагностического комплекса ТР установки Т-10. Лазер, работающий в комплексе на второй гармонике, был перестроен на первую гармонику путём удаления узла удвоения частоты из корпуса лазера. При этом в оптическом тракте ввода лазерного излучения в плазму были заменены зеркала для работы на длине волны 1,064 мкм.

Для сбора света использовался объектив, просветлённый в ближней инфракрасной области, который был установлен над узлом сбора основной системы ТР (рис. 1). Объектив наклонён таким образом, чтобы сбор света производился из точки вблизи центра плазменного шнура. Угол рассеяния составил 78° .

Объектив проецировал изображение лазерного луча на торец волоконного коллектора размером $4 \times 1,2$ мм, передающего свет в спектральный прибор, расположенный на расстоянии 8 м от камеры токамака. Отрезок лазерной хорды, с которого ведётся сбор, составлял 2,8 см. Центр отрезка сбора находился на расстоянии ~ 4 см вверх от экваториальной плоскости камеры токамака. Телесный угол сбора рассеянного света при этом составлял 0,002 ср.

Рис. 1. Геометрия сбора света

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПРИБОР

Рис. 2. Спектральная характеристика каналов полихроматора и расчётные спектры рассеяния для температуры 100 эВ (—), 1 кэВ (---)

Спектральный прибор рассчитан на входное волокно круглого сечения диаметром 3 мм с числовой апертурой $NA = 0,22$. Использованное в эксперименте волокно согласовано с прибором ($NA = 0,22$) и имело пропускание $\sim 70\%$.

Каналы прибора были оптимизированы для измерения температуры в диапазоне от 10 эВ до нескольких кэВ. На рис. 2 показаны спектральные характеристики пропускания каналов полихроматора. Пропускание каналов заметно падает в связи с неоптимальными коэффициентами отражения зеркал и неоптимальным просветлением линзовой оптики, установленных в приборе.

Подавление на лазерной длине волны не хуже 10^5 . При этом паразитно-рассеянного излучения из камеры Т-10 не наблюдалось. На рис. 3 показаны

Рис. 3. Лазерный импульс и сигналы в измерительных каналах 1 (—), 2 (—), 3 (—), 4 (—), 5 (—) прибора при выстреле в камеру токамака без плазмы (а) и с плазмой (б): 1 — лазерный импульс; 2 — сигналы в спектральных каналах

лазерный импульс и сигналы в измерительных каналах при выстреле в камеру токамака без плазмы (а) и с плазмой (б).

Регистрация в каждом канале ведётся с помощью лавинных фотодиодов HAMAMATSU S11519-15 диаметром 1,5 мм. Каналы полихроматора оснащены трансимпедансными усилителями на базе транзисторов с высокой электронной подвижностью. Усилители имеют два выхода: высокочастотный (от 1 до 250 МГц) для измерения полезного сигнала томсоновского рассеяния и низкочастотный (от 0 до 1 МГц), используемый для калибровки и измерения медленно изменяющегося фона плазмы. Шумы усилителей на нагрузке 50 Ом не превышали 9 мВ для высокочастотного выхода и 3 мВ для низкочастотного выхода. Для оцифровки сигналов используется осциллографическая запись сигнала с частотой дискретизации 5 ГГц и разрядностью 12 бит.

На рис 4 показаны нормированные сигналы в каналах полихроматора, усреднённые по 20 лазерным импульсам на стационаре плазменного разряда. Хотя формы импульсов несколько отличаются, влияние данных различий на интеграл сигнала составляет <2%.

На рис. 5 показаны примеры сигналов в каналах полихроматора на начальной стадии развития плазменного разряда (№ 69 882) и в стадии с наибольшей плотностью. Сигналы приведены без учёта относительной калибровки каналов. Небольшие различия в форме сигналов обусловлены шумовой составляющей, а также отличием временной задержки, возникающей из-за разницы в оптическом пути для разных спектральных каналов и разной длины кабелей предусилитель—АЦП в приборе.

Относительная калибровка каналов полихроматора осуществлялась по низкочастотному выходу с помощью вольфрамовой лампы накаливания СИРШ 6-40 с известной цветовой температурой. Для моделирования медленно изменяющегося сигнала использовался прерыватель светового потока. Разделение сигнала между низкочастотным и высокочастотным каналами происходит с помощью RC-цепочек перед последним каскадом усиления, который имеет одинаковые параметры для обоих каналов. Поэтому можно говорить о соответствии калибровки, проведённой для низкочастотного канала, и калибровки высокочастотного.

Абсолютная калибровка системы сбора с полихроматором не проводилась, поэтому плотность электронов представлена в относительных единицах. Проводить абсолютную калибровку готовой системы планируется по рамановскому либо в случае невысокого уровня паразитного сигнала рэлеевскому рассеянию.

Рис. 4. Усреднённые нормированные сигналы в каналах полихроматора 1 (—), 2 (—), 3 (—), 4 (—), 5 (—)

Рис. 5. Сигналы в спектральных каналах полихроматора на различных стадиях развития разряда токамака: 120 мс (а), 800 мс (б), каналы 1 (—), 2 (—), 3 (—), 4 (—), 5 (—)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Тестовые измерения проводились при штатном рабочем режиме лазера диагностического комплекса токамака Т-10, при снятом узле удвоения частоты. Лазер работал на частоте 100 Гц на протяжении всего плазменного импульса. Измерения проводились в диапазоне плотности плазмы от $4 \cdot 10^{12}$ до $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при электронной температуре до 2 кэВ.

На рис. 6 показан измеренный диагностикой томсоновского рассеяния временной ход электронной температуры и плотности для импульса № 69 882. Для сравнения на этом рисунке представлены измерения электронной температуры по электронно-циклотронному излучению и по диагностике мягкого рентгена с 500 по 950 мс. Здесь же показан временной ход плотности, измеренной по центральной хорде СВЧ-интерферометром.

Рис. 6. Временной ход электронной температуры и плотности в импульсе № 69 882: *a* — измерения системы томсоновского рассеяния (●, ●), измерения диагностикой мягкого рентгена (●); *b* — измерения излучения плазмы на электронно-циклотронной частоте (—), измерения центральной хорды СВЧ-интерферометра (—)

На рис. 7 показаны аналогичные зависимости для плазменного импульса № 69 893.

Рис. 7. Временной ход электронной температуры и плотности в импульсе № 69 893: *a* — измерения системы томсоновского рассеяния (●, ●); *b* — измерения излучения плазмы на электронно-циклотронной частоте (—), измерения центральной хорды СВЧ-интерферометра (—)

На графиках видно, что характер зависимостей параметров плазмы от времени, измеренных различными диагностиками, хорошо совпадает. Большие ошибки определения температуры в импульсе № 69 893 обусловлены тем, что измерения проводились при очень низкой плотности плазмы. Средняя по хорде электронная плотность составляла $(3\text{—}6)10^{12}\text{ см}^{-3}$. Сама плотность измеряется с точностью порядка 10—20%, и характер снятой временной зависимости хорошо совпадает с измерениями центральной хорды СВЧ-интерферометром. В случае высокой плотности в разряде № 69 882 точность измерения температуры была не хуже 10%.

На всех графиках наблюдается совпадение в характере сравниваемых кривых.

Также сравнение проводилось с данными, полученными от штатной системы томсоновского рассеяния, установленной на токамаке Т-10, только в других подобных разрядах. Измерения штатной системой были проведены в плазменном разряде с параметрами, аналогичными импульсу № 69 882: магнитное поле на оси тора $B = 2,4\text{ Тл}$, ток плазмы $I_p = 220\text{ кА}$ и плотность $n_e = 2,5 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$, а также в отсутствие литиизации камеры. Результаты измерений показаны на рис. 8 (импульс № 72 760). Типичный разброс температуры для подобных импульсов на Т-10 составляет 0,9—1,1 кэВ. Для сравнения на график нанесены данные с измерениями с помощью полихроматора в разряде № 69 882. Приведённые значения температуры усреднены по указанному временному интервалу: для штатной системы по 14 лазерным импульсам, для испытываемой — по 20. Полученные значения совпадают в пределах погрешностей.

Рис. 8. Сравнение электронной температуры, измеренной телевизионной системой в импульсе № 72 760 (•, 720—860 мс), с измеренной полихроматором в импульсе № 69 882 (•, 700—900 мс)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В тангенциальной системе томсоновского рассеяния установки Т-15МД каждая пространственная точка измерений имеет своё значение параметра $Ld\Omega$, который характеризует величину регистрируемого рассеянного света из данной точки [2]. Ближайшая точка к внешней стенке получила большее значение $Ld\Omega$ против приведённого в ранее опубликованной статье после оптимизации собирающего объектива и оптоволокну. В результате наименьшее значение имеет точка, расположенная на краю плазменного шнура вблизи внутренней стенки токамака. При этом оно в 1,5 раза выше, чем при тестировании данного полихроматора на установке Т-10. В центре плазменного шнура на Т-15МД величина $Ld\Omega$ до четырёх раз выше. Это говорит о применимости результатов данного теста к будущей системе.

Также в полихроматорах для томсоновского рассеяния Т-15МД планируется использовать более совершенную оптику, которая позволит поднять пропускание в дальних спектральных каналах в 2—3 раза.

ВЫВОДЫ

Проведены испытания полихроматора на основе высококонтрастных интерференционных фильтров, планируемого для использования в составе тангенциальной системы диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Т-15МД. Прибор испытывался на аппаратной базе диагностического комплекса томсоновского рассеяния токамака Т-10 в сочетании с лазером, также планируемым для использования на Т-15МД.

Прибор прошёл испытание и показал работоспособность при измерениях в широком диапазоне плотности от $3 \cdot 10^{12}$ до $2,5 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$ и при электронной температуре до 2 кэВ. Полученная точность измерений при средней плотности $2,5 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$ составляла не менее 10%, что соответствует оценкам ожидаемой точности для тангенциальной системы Т-15МД.

Система регистрации на основе данного фильтрового полихроматора полностью подходит для использования в системе тангенциального томсоновского рассеяния установки Т-15МД.

REFERENCES

1. **Asadulin G., Bel'bas I., Gorshkov A.** 100-Hz Thomson scattering diagnostics on T-10 tokamak. — In: Proc. of 43rd European Physical Society Conf. on Plasma Physics, 2016.
2. **Asadulin G.M., Bel'bas I.S., Gorshkov A.V.** Tangential thomson scattering system for tokamak T-15. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, vol. 39, issue 2 (in Russian).
3. **Solokha V.V. et al.** Prototipe digital polychromator application for measuring Globus-M tokamak plasma kinetic parameters using thomson scattering. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2017, vol. 40, issue 1 (in Russian).

AUTHORS

Asadulin G.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Bazhenov A.N. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politekhnikeskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Bel'bas I.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; gogabis@yandex.ru

Gorshkov A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; gorshkov_av@nrcki.ru

Koval A.N. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politekhnikeskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Kurskiy G.S. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politekhnikeskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia; gleb.kurskiy@gmail.com

Solovey V.A. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politekhnikeskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Solokha V.V. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politekhnikeskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia; v.solokha@spbstu.ru

Chernakov A.P. JSC «Spectral-Tech», Kurchatova ul. 10, office 40B, 194223 St. Petersburg, Russia

Received 20 July 2018

Revised 4 December 2018

Accepted 18 December 2018

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 1, pp. 89—94