

УДК 533.9.082.5

ТАНГЕНЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15

Г.М. Асадулин^{1,2}, И.С. Бельбас¹, А.В. Горшков¹

¹НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Для D-образной формы плазмы токамака Т-15 будут использоваться две системы томсоновского рассеяния как с вертикальным, так и тангенциальным зондированием. Система с тангенциальным зондированием позволит измерять профили температуры и плотности плазмы вдоль большого радиуса токамака. В данной статье представлен проект тангенциальной системы. В основе системы будет использоваться лазер Nd:YAG с длиной волны 1064 нм, энергией импульса 3 Дж при длительности 10 нс и частотой следования импульсов 100 Гц. Выбранная геометрия позволит собирать свет с 10 равномерно расположенных пространственных «точек». Проведена оптимизация системы регистрации рассеянного света. Передача собранного света будет осуществляться с помощью кварцевых оптоволоконных жгутов (числовая апертура 0,22) диаметром 3 мм. В качестве спектральных приборов выбраны 6-канальные полихроматоры на основе высококонтрастных интерференционных фильтров. Регистрация излучения будет осуществляться лавинными фотодиодами. Описана методика и проведена оценка точности измерения температуры и концентрации электронов. Предлагаемая система позволит проводить измерения температуры электронов с точностью не хуже 10% на периферии шнура на внутреннем обводе тора в диапазоне от 50 эВ до 10 кэВ, в центральной области плазмы — в диапазоне от 20 эВ до 9 кэВ и на периферии шнура на внешнем обводе тора — в диапазоне от 2 до 400 эВ при плотности электронов не менее $2,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Ключевые слова: токамак Т-15, лазерная диагностика, томсоновское рассеяние.

TANGENTIAL THOMSON SCATTERING SYSTEM FOR TOKAMAK T-15

G.M. Asadulin^{1,2}, I.S. Bel'bas¹, A.V. Gorshkov¹

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

For D-shaped plasma cross-section of tokamak T-15 two systems of Thomson scattering diagnostics, both with vertical and tangential probing will be used. The tangential system will allow measuring of the plasma temperature and density profiles along the major radius of the tokamak. This article presents the project of the tangential system. A Nd:YAG laser with 1064 nm wavelength, pulse energy 3 J pulse duration 10 ns and repetition rate 100 Hz will be used in the system. Selected geometry will allow to collect light from 10 evenly spaced points. Optimization of the registration system was made. Collected light will be transmitted through optical fiber bundle with a diameter of 3 mm and quartz fibers (numerical aperture = 0.22). 6-channel polychromator based on interference filters and avalanche photodiodes was selected as spectral instrument. The accuracy of electron temperature and density measurement was evaluated. The proposed layout of the system will allow to measure the electron temperature with accuracy better than 10% from 50 eV to 10 keV at the inner periphery, from 20 eV to 9 keV in central area and from 2 eV to 400 eV in the outer plasma periphery. The estimation was made for electron density of not less than $2.6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

Key words: tokamak T-15, laser diagnostics, Thomson scattering.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-2-91-95

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика томсоновского рассеяния как инструмент определения температуры и плотности плазмы будет использоваться на модернизированном токамаке Т-15. Камера токамака будет иметь некруглое сечение, что вызывает интерес к измерению профилей температуры и плотности не только вдоль вертикальной хорды наблюдения, но и вдоль большого радиуса плазмы. Поэтому планируется установка двух систем диагностики томсоновского рассеяния как с вертикальным, так и тангенциальным зондированием.

Системы томсоновского рассеяния с тангенциальным зондированием редко встречаются на токамаках. Обычно использование подобной геометрии сильно осложняется выбором оптимального расположения узла сбора света и обусловлено невозможностью использования более простой геометрии с вертикальным зондированием и сбора света через экваториальные патрубки из-за конструкционных особенностей установок. Примерами системы с тангенциальным зондированием могут служить диагностики томсоновского рассеяния на токамаках Глобус-М [1] и MAST [2]. Геометрия сбора рассеянного света, похожая на геометрию системы для Т-15, применяется на установке LHD [3].

В данной статье представлен обзор основных параметров, расчётов и аппаратных компонентов проектируемой тангенциальной системы томсоновского рассеяния для токамака Т-15, а также оценка точности измерений.

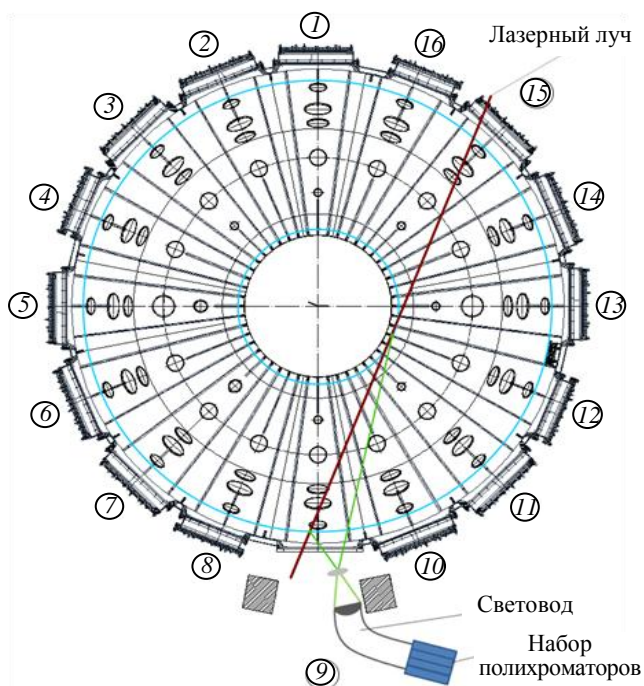


Рис. 1. Экваториальное сечение камеры токамака Т-15. Ввод лазерного луча в камеру. Область наблюдения рассеянного света ограничена зелёными отрезками

всего плазменного шнура от внутренней до внешней периферии и максимальный сбор рассеянного света. Для передачи света в спектральный прибор выбраны оптические волокна типа кварц—кварц (числовая апертура $NA = 0,22$) диаметром $D = 440$ мкм, которые хорошо согласуются с входной апертурой спектрального прибора [4].

При оптимизации системы сбора учитывались изменение диаметра лазерного луча вдоль хорды наблюдения и геометрия приёмного торца оптоволоконного световода.

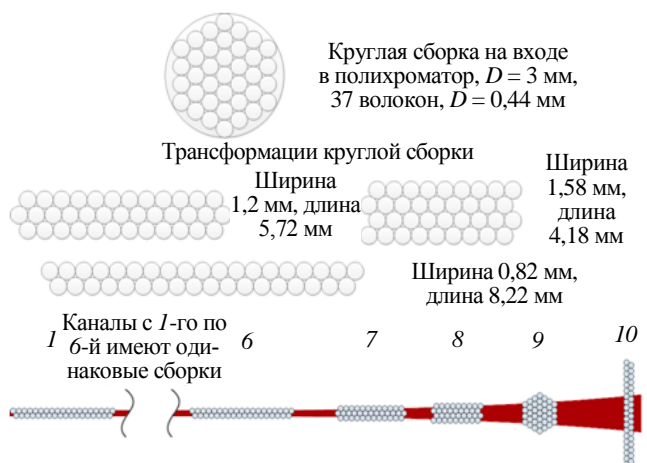


Рис. 2. Варианты сборок торца оптоволоконных каналов и схематичное расположение сборок по изображению луча

собираемого света в зависимости от того, выходная числовая апертура какой пространственной точки согласована с числовой апертурой волокна. Количество зарегистрированных рассеянных фотонов описывается формулой

$$N_0 = N\sigma_{TS}n_eLd\Omega K, \quad (1)$$

где N — общее число фотонов в лазерном импульсе; σ_{TS} — сечение томсоновского рассеяния; n_e — плотность электронов; $d\Omega$ — телесный угол сбора; L — длина лазерного импульса; K — общее пропускание системы регистрации. Здесь $Ld\Omega$ — геометрический фактор, определяющий количество собранного света.

РАЗМЕЩЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ

Основным преимуществом тангенциальной системы зондирования является возможность рассмотреть профиль температуры плазмы по большому радиусу в экваториальной плоскости токамака. На рис. 1 представлен чертёж экваториального сечения токамака. Ввод луча будет производиться через 15-й патрубок, а вывод — через 9-й, что обеспечит захват наибольшей области плазмы от периферии плазменного шнура на внутреннем обводе тора до периферии на внешнем обводе тора.

СИСТЕМЫ СБОРА, ТРАНСПОРТИРОВКИ И РЕГИСТРАЦИИ СВЕТА

Сбор света будет осуществляться с 10 пространственных отрезков лазерной хорды, проекции которых на большой радиус расположены равномерно. Размещение системы сбора света так, как показано на рис. 1, обеспечивает перекрытие всего плазменного шнура от внутренней до внешней периферии и максимальный сбор рассеянного света. Сбор света будет осуществляться с 10 пространственных отрезков лазерной хорды, проекции которых на большой радиус расположены равномерно. Размещение системы сбора света так, как показано на рис. 1, обеспечивает перекрытие всего плазменного шнура от внутренней до внешней периферии и максимальный сбор рассеянного света. Для передачи света в спектральный прибор выбраны оптические волокна типа кварц—кварц (числовая апертура $NA = 0,22$) диаметром $D = 440$ мкм, которые хорошо согласуются с входной апертурой спектрального прибора [4].

При наблюдении под малым углом в плоскости изображения свет с разных точек хорды наблюдения собирается с различными телесными углами. Было проведено сравнение количества собираемого света в зависимости от того, выходная числовая апертура какой пространственной точки согласована с числовой апертурой волокна. Количество зарегистрированных рассеянных фотонов описывается формулой

На рис. 3 показаны графики для трёх различных случаев выбора точки согласования: крайнего канала на периферии плазменного шнура на внутреннем обводе тора (внутренняя периферия), центральной области плазмы и крайнего канала на внешнем обводе тора (внешняя периферия). В каждом из этих вариантов выбиралась оптимальная геометрия входных торцов световодов. По результатам сравнения была выбрана центральная точка, так как она является наиболее выгодной по количеству собираемого света. Наибольшая апертура объектива, позволяющая обеспечить полный захват лазерного луча по ширине для измерения плотности плазмы, составляет 117 мм. Однако для того чтобы избежать ошибок при юстировке, мы выбираем апертурную диафрагму объектива 100 мм.

Объектив будет располагаться вплотную к входному окну камеры токамака на расстоянии 1200 мм от центра камеры. На рис. 4 показаны более подробный чертёж фланца и расположение объектива. Для выбранной геометрии был проведён расчёт собирающего объектива, который дал следующие параметры: фокус 182 мм, светосила 1:1,8, угол обзора $\alpha = 47^\circ$.

Регистрация собранного света будет осуществляться с помощью 6-канальных полихроматоров на основе высококонтрастных интерференционных фильтров и лавинных фотодиодов [4]. Ширина каналов полихроматора подбирается из соображений обеспечения максимального динамического диапазона, сигналы в каждом спектральном канале не должны сильно отличаться, что обеспечит одинаковую точность измерений. На рис. 5 представлены расчётные спектры томсоновского рассеяния для различной температуры и диапазоны чувствительности спектральных каналов полихроматора, оптимизированные для температуры центральной области 1 кэВ, что позволит проводить измерения как в омическом режиме работы установки, так и в режимах с дополнительным нагревом. Для расчётов использовалась работа [5].

Далее мы приведём оценочный расчёт точности измерения электронной температуры для выбранных параметров системы.

ЛАЗЕР

Параметры лазера Nd:YAG, который будет использоваться в системе [6, 7]:

Рабочая длина волны, нм . . .	1064
Энергия импульса, Дж . . .	3
Рабочая частота импульсов, Гц . . .	100
Длительность импульса, нс . . .	10
Диаметр выходного пучка, мм . . .	15
Расходимость, мрад . . .	0,1

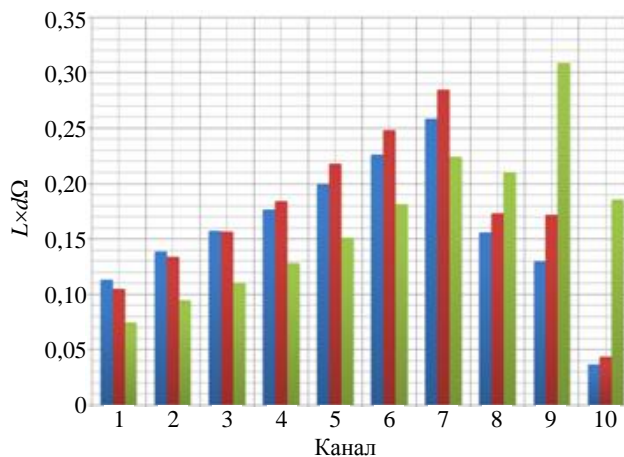


Рис. 3. Геометрический фактор, определяющий количество собираемого света для трёх случаев оптимизации собирающего объектива: ■ — внутренняя периферия; ■ — центр; ■ — внешняя периферия

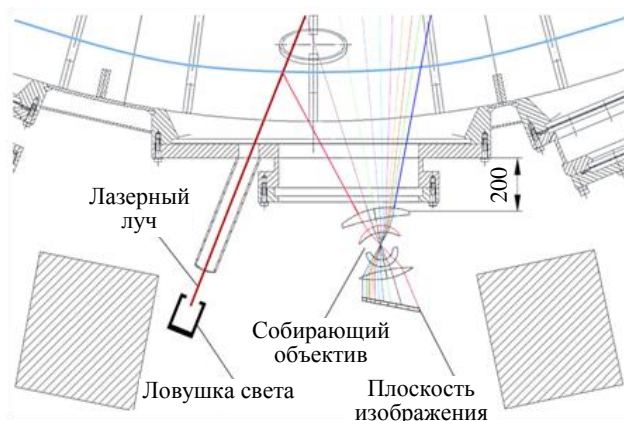


Рис. 4. Расположение собирающего объектива на диагностическом фланце токамака

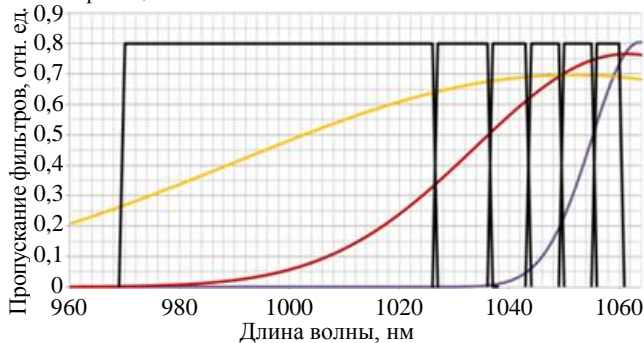


Рис. 5. Характеристики спектральных каналов полихроматора (—) и профили томсоновского рассеяния для разных температур: — 100 эВ; — 1 кэВ; — 5 кэВ

Первое испытание этого лазера будет проводиться в составе диагностики томсоновского рассеяния на установке Т-10.

Для введения лазерного излучения в камеру его необходимо транспортировать на значительное расстояние, которое составит порядка 25 м. На таких расстояниях начинают сказываться дифракционные эффекты. Оценка показывает, что на данной дистанции работает дифракция Френеля, а лазерное пятно из однородного примет форму кольца. При использовании лазерного пучка без изменения его размеров число открытых зон Френеля составит

$$F = \frac{\rho^2}{z\lambda} \approx 2,11,$$

здесь F — число открытых зон Френеля; z — расстояние, на которое необходимо транспортировать пучок; λ — длина волны лазерного излучения; ρ — минимальный диаметр лазерного пучка в тракте. Расширение пучка в 2—3 раза позволит уменьшить влияние дифракции и получить однородный профиль. Для этого будет использоваться расширяющий телескоп в начале тракта, на входе в камеру — фокусирующий телескоп.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Для оценки точности измерения температуры была использована работа [5]. В нашем случае спектр разбит на каналы неравномерно и число фотоэлектронов в заданном диапазоне длин волн будет определяться как

$$N_k = \eta N_0 \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{c}{a} Y \exp\left(-\left(\frac{c}{a}\right)^2 Z\right) dx, \quad (2)$$

где $x = \frac{\lambda_s - \lambda_0}{\lambda_0}$; c — скорость света; λ_s — длина волны рассеянного света, по которой идёт интегрирование; N_0 — число фотонов на весь спектр, определяемое из (1); η — квантовый выход детектора; a — предполагаемая скорость электронов; Y и Z определяются выражениями

$$Y = 2^{-1/2}(1 - 3,5x + 7,4x^2 - 12,5x^3); Z = x^2(1 - x)/2; x = \lambda_k/\lambda_0,$$

где λ_k — центральная длина волны k -го канала, для которой рассчитываются Y и Z ; λ_0 — лазерная длина волны.

Как видно из формулы (2), спектр рассеянного света, построенный в полулогарифмическом масштабе, имеет вид прямой линии. Погрешность измерений оценивается методом наименьших квадратов.

На рис. 6 показаны кривые относительных ошибок измерения температуры и плотности плазмы для выбранного набора спектральных каналов полихроматора. Расчёт проводился для трёх областей: периферии плазмы на внешнем обводе тора, центральной области и периферии на внутреннем обводе тора. Стоит отметить, что в расчёте учитывается только статистическая ошибка фотоэффекта на лавинных фотодиодах. В оценке использовалось значение плотности плазмы, равное $2,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ [8].

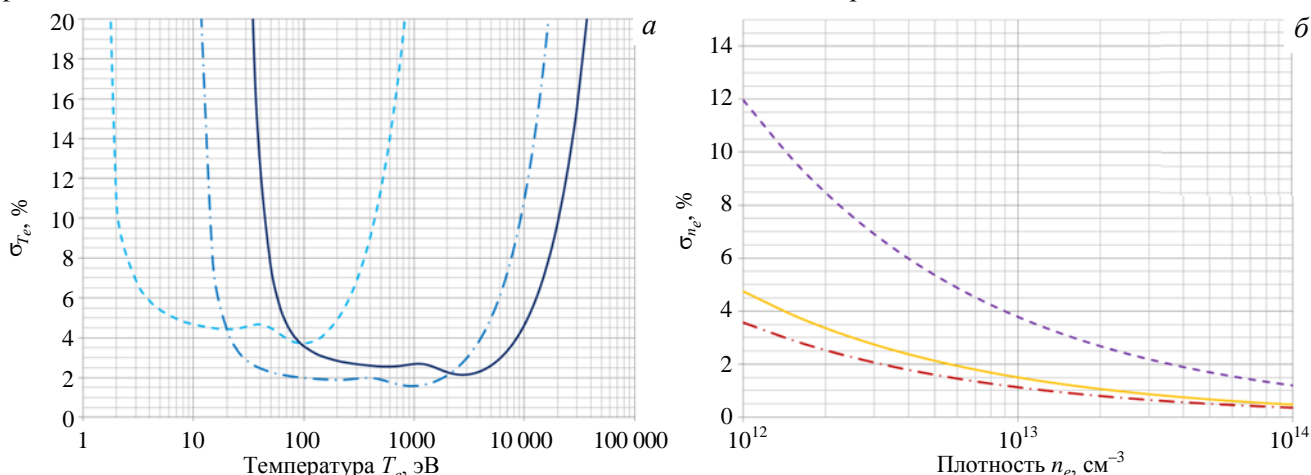


Рис. 6. Кривые ошибок измерения температуры: --- — внешняя периферия; — — центр; - · - — внутренняя периферия (а); плотности: --- — 10 кэВ; - · - — 1 кэВ; — — 100 эВ (б)

Как видно на графиках, предлагаемая система позволяет проводить измерения с точностью выше 10% для температуры электронов на внутренней периферии в диапазоне от 50 эВ до 10 кэВ, в центральной области — в диапазоне от 20 эВ до 9 кэВ и на внешней периферии — в диапазоне от 2 до 400 эВ, а также для плотности более $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ на всей хорде наблюдения.

Для сравнения приведём результаты нескольких диагностик на основе лазеров Nd:YAG. На японской установке JT-60U точность измерения составляет 4—10% для температуры в диапазоне от 100 эВ до 10 кэВ и 2—5% — для плотности $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ [9]. На установке Глобус-М точность измерений составляет 5—10% в пределах от 10 эВ до 2 кэВ [1]. Можно сделать вывод, что проектируемая для установки Т-15М тангенциальная система не уступает в точности измерений уже существующим на других установках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для будущей тангенциальной диагностики томсоновского рассеяния для токамака Т-15 рассчитаны основные параметры и подобраны основные аппаратные компоненты. В настоящее время идёт испытание лазера в составе системы на токамаке Т-10.

Ожидаемый диапазон температуры в различных режимах модернизированной установки Т-15 при средней плотности $2,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ составит от 100 эВ до 17 кэВ (разброс по радиусу) с 8 МВт электронно-циклотронного нагрева и 8 МВт нагрева нейтральным пучком [8]. Сравнивая эти значения с проведёнными оценками, можно сказать, что ожидаемая точность измерения диагностики в основной области рабочих параметров Т-15 как для температуры, так и для плотности будет выше 10%. Однако при измерении температуры выше 10 кэВ точность несколько снизится, но ошибка составит не более 20%.

REFERENCES

1. **Kurskiv G.S. et al.** Thomson scattering diagnostics upgrade at the GLOBUS-M tokamak. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2012, issue 2, pp. 81—88 (in Russian).
2. **Walsh M.J. et al.** Combined visible and infrared Thomson scattering on the MAST experiment. — Rev. Sci. Instrum., 2003, vol. 74, № 3, pp. 1663—1666.
3. **Narihara K. et al.** Design and performance of the Thomson scattering diagnostic on LHD. — Rev. Sci. Instrum., 2001, vol. 72, № 1, pp. 1122—1125.
4. **LLC «Spektral-Tech».** <http://www.spectraltech.ru/product/3/> (in Russian).
5. **Mattioli M., Papoular R.** Analysis of flight scattering data from relativistic plasmas. — Plasma Physics, vol. 17, pp. 165—172.
6. **JSC «Lasers and optical systems».** <http://www.los.su/en/production.html> (in Russian).
7. **Mukhin E.E. et al.** The ITER divertor Thomson scattering system: engineering and advanced hardware solutions. — J. of Instrumentation, 2012, vol. 7(02), p. C02063.
8. **Dnestrovskiy Yu.N. et al.** Operational regimes of the modified T-15 tokamak. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2013, vol. 36, issue 4, pp. 45—63 (in Russian).
9. **Hatae T. et al.** YAG laser Thomson scattering diagnostic on the JT-60U. — Rev. Sci. Instrum., 1999, vol. 70, № 1, pp. 772—775.

AUTHORS

Asadulin G.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia; AsadulinGM@gmail.com

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

Received 9 December 2015
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 2, pp. 91—95.