Ловушка лазерного излучения для диагностики томсоновского рассеяния в диверторе токамака ИТЭР

© *Н.А. Кунгурцев*[1], *А.Н. Коваль*[1], *Е.Е. Мухин*[1], *С.Ю. Толстяков*[1], *А.Г. Раздобарин*[1,2], *И.М. Букреев*[1], *И.Д. Кириенко*[3], *А.А. Жадковский*[3], *В.И. Модестов*[3], *И.А. Попов*[3], *В.А. Петров*[4], *Д.Л. Богачев*[4], *А.Н. Мокеев*[5]

[1] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[2] Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград, Россия
[3] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
[4] ООО „Спектрал-Тех“, Санкт-Петербург, Россия
[5] Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии „Росатом“ „Проектный центр ИТЭР“, Москва, Россия
E-mail: n.a.kungurtsev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2026 г.
В окончательной редакции 19 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

В рамках подготовки документов для производства (Manufacturing Readiness Review, MRR-1) компонентов диагностики томсоновского рассеяния в дивертор ной плазме токамака ИТЭР проведена модернизация ловушки лазерного излучения, размещенной на дивертор ной кассете токамака ИТЭР. Ключевое изменение состояло в замене первого плоского зеркала на цилиндрическое из монокристаллического молибдена, что позволило оптимизировать распределение тепловой нагрузки и обеспечить лазерную стойкость конструкции в условиях экстремальных радиационных, тепловых и электромагнитных воздействий. Комплекс прочностных расчетов в ANSYS позволил оценить работоспособность модернизированной ловушки как в штатных режимах, так и при аварийных сценариях эксплуатации.

Ключевые слова: ИТЭР, томсоновское рассеяние, лазерное излучение, дивертор.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.24.64029.9684k

Диагностика томсоновского рассеяния (ДТР) в дивертор ной плазме токамака ИТЭР обеспечивает измерения динамики пространственных распределений электронной температуры $T_e(r,t)$ и концентрации $n_e(r,t)$ для управления режимами разряда [1]. Другое функциональное назначение диагностики состоит в подготовке базы данных $T_e(r,t)/n_e(r,t)$ для анализа физических процессов и разработки надежных моделей и кодов расчета плазменных параметров. В 2025 г. прошла оптимизация ловушки лазерного излучения для дивертор ной плазмы токамака в рамках подготовки документов для производства (Manufacturing Readiness Review, MRR-1) компонентов ДТР, расположенных на дивертор ных кассетах токамака ИТЭР в непосредственной близости от термоядерной плазмы в зоне экстремальных тепловых, радиационных и электромагнитных нагрузок. Целью работ являлось совершенствование узла ловушки лазерного излучения с учетом требований к лазерной стойкости, технологичности изготовления, последующего монтажа и эксплуатации в экстремальных условиях токамака ИТЭР: воздействие нейтронного флюенса $\sim 10^{21}\,\mathrm{cm}^{-2}$ и гамма-излучения, вызывающее активацию и радиационную деградацию конструкционных и оптических материалов, осаждение продуктами эрозии первой стенки (вольфрамовая пыль и пленочные осаждения), нагрев до $> 300\,^{\circ}\mathrm{C}$ с кратковременными тепловыми ударами при срывах плазмы, а также влияние стационарных магнитных полей $6-9\,\mathrm{T}$ и ударных электромагнитных нагрузок при срывах плазмы. Ключевым изменением в конструкции ловушки лазерного излучения стала замена первого плоского зеркала на выпуклое цилиндрическое, изготовленное из монокристаллического молибдена. Это изменение оптической схемы связано с последовательным снижением плотности энергии и возможностью использовать для последующих отражений корпус из полированной нержавеющей стали. Именно цилиндрическая форма первого зеркала позволила эффективнее управлять отраженным лазерным пучком, распределяя тепловую нагрузку по большей площади на последующих зеркалах, что предотвращает локальный перегрев и повреждение. В качестве материала первого зеркала выбран монокристаллический молибден, так как он обладает высокой термостойкостью, теплопроводностью и необходимой устойчивостью к лазерному излучению, что критически важно для первого элемента, принимающего на себя основную нагрузку излучения диагностического лазера.

Ловушка лазерного излучения ДТР ИТЭР предназначена для поглощения прошедшего через плазму лазерного излучения и подавления паразитной засветки, отраженной от элементов первой стенки и других внутренних поверхностей вакуумной камеры. Также экстремальные условия эксплуатации в реакторной установке требуют устойчивости конструкции к термоциклическим и электромагнитным нагрузкам. В ИТЭР за 20 лет эксплуатации планируется ввести порядка 10^9 лазер-

ных импульсов с энергией 1–2 J каждый, при этом обслуживание внутри вакуумной камеры затруднено из-за радиационной обстановки. Рассмотрим примеры, иллюстрирующие возможные решения перечисленных проблем в конструкциях ловушек лазерного излучения для ИТЭР.

В работе [2] предложена шевронная ловушка лазерного излучения для ITER edge Thomson scattering system. Конструктивно она представляет собой набор изогнутых пластин толщиной 0.5 mm, расположенных параллельно и образующих V-образную форму (шеврон). Лазерный луч вводится в торец этого пакета под большим углом падения. При этом используется s-поляризация излучения, при которой коэффициент поглощения металлической поверхностью максимален. Ключевая идея заключается в распределении энергии лазерного импульса по большой площади поверхности для минимизации локального нагрева и предотвращения повреждений за счет многократных отражений между пластинами. В работе экспериментально показана эффективность такой конструкции.

В [3] предложена ловушка лазерного излучения типа „клин“, включающая первую ловушку для ослабления периферийного луча лазерного излучения, испускаемого источником лазерного луча, и последующую протяженную часть, служащую для ослабления излучения, соответствующего центральной области одного лазерного луча. Внутренняя поверхность изготовлена из углеродного листа, а внешняя поверхность — из нержавеющей стали. Согласно конструктивным характеристикам, не требуется отдельного охлаждающего устройства благодаря воздушному охлаждению, что обеспечивает минимизацию объема ловушки.

Таким образом, ловушка лазерного излучения является критическим компонентом оптических диагностических систем. В таких ловушках молибден служит ключевым материалом для изготовления зеркал в условиях высоких тепловых и электромагнитных нагрузок. Успешная работа ловушки в диверторе ИТЭР требует обеспечения теплоизоляции оптических элементов от нагрева при сохранении эффективного теплового контакта с охлаждаемой кассетой, а также снижения паразитной засветки. Представленный краткий обзор конструктивных решений и материалов, анализ других источников является необходимой основой для понимания целей и задач модернизации ловушки лазерного излучения ДТР ИТЭР, которая подробно рассматривается далее.

В ходе работ этапа MRR-1 конструкция узла была модернизирована с учетом требований к лазерной стойкости, технологичности изготовления и монтажа на диверторную кассету нижнего порта. Устройство предназначено для поглощения излучения зондирующего лазера хорды C с длиной волны 1064 nm, энергией на импульс 2 J, длительностью импульса 3 ns, частотой 50 Hz без термического разрушения, а также для отвода тепла на активно охлаждаемое тело кассеты. Конструкция должна сохранять работоспособность при сочетании радиационного нагрева и электромагнитных нагрузок, характерных для дивертора зоны.

Общий вид разработанной модели представлен на рис. 1. Корпус состоит из двух массивных несущих частей: крышки и основания. Для демонтажа крышки предусмотрены резьбовые отверстия A. Монтаж ловушки на корпус дивертора кассеты осуществляется с помощью резьбовых шпилек с последующей приваркой корпуса узла дуговой сваркой в среде защитного газа. Конфигурация корпуса оптимизирована для обеспечения доступа сварочного инструмента к стыковочным швам в стесненных условиях вакуумной камеры.

В новой версии конструкции первым отражающим элементом служит массивное молибденовое цилиндрическое зеркало толщиной 23.5 mm (радиус кривизны 250 mm). Для компенсации разницы коэффициентов теплового расширения между оптическими элементами и несущей структурой применены независимые крепления зеркал. Это позволяет деталям свободно расширяться при нагреве без возникновения критических механических напряжений. Зеркала и крышка фиксируются винтами, шайбами, стопорными втулками и штифтами из сплава TZM (титан, цирконий, молибден), а также тарельчатыми пружинами (Inconel 718). Пружины создают постоянный натяг, компенсируя тепловое расширение и предотвращая ослабление соединений. Тепловая связь между молибденовыми зеркалами и корпусом из нержавеющей стали реализована через уплотнительные графитовые прокладки.

Оптическая схема ловушки лазерного излучения спроектирована с учетом зависимости коэффициента поглощения от угла падения и поляризации лазерного излучения. Ключевым изменением в модернизированной версии стала замена первого плоского зеркала на цилиндрическое. Также в новой конструкции ловушки только два отдельных зеркала из молибдена, другие отражающие поверхности из нержавеющей стали являются частью корпуса. Такие изменения позволяют эффективнее управлять отраженным лазерным пучком, распределяя тепловую нагрузку по большей площади, что предотвращает локальный перегрев и повреждение. Траектория лазерного излучения показана на вставке к рис. 1.

При моделировании нагрева лазерным излучением значения приложенных плотностей тепловых потоков на отражающих поверхностях получены по формуле

$$\phi_i = \sum_{j=1}^{n} P_j(1-R_j)\exp\left[-\left(\left((x-x_j)/(a_j/\cos\alpha_j)\right)^2 + \left((y-y_j)/b_j\right)^2\right)^{12}\right]\left(\pi b_j a_j/\cos\alpha_j\right)^{-1}, \qquad (1)$$

где ϕ_i — суммарная плотность теплового потока для каждой точки зеркальной поверхности i; j — номер отражения; n — общее количество отражений; P_j — мощность лазерного излучения, соответствующая

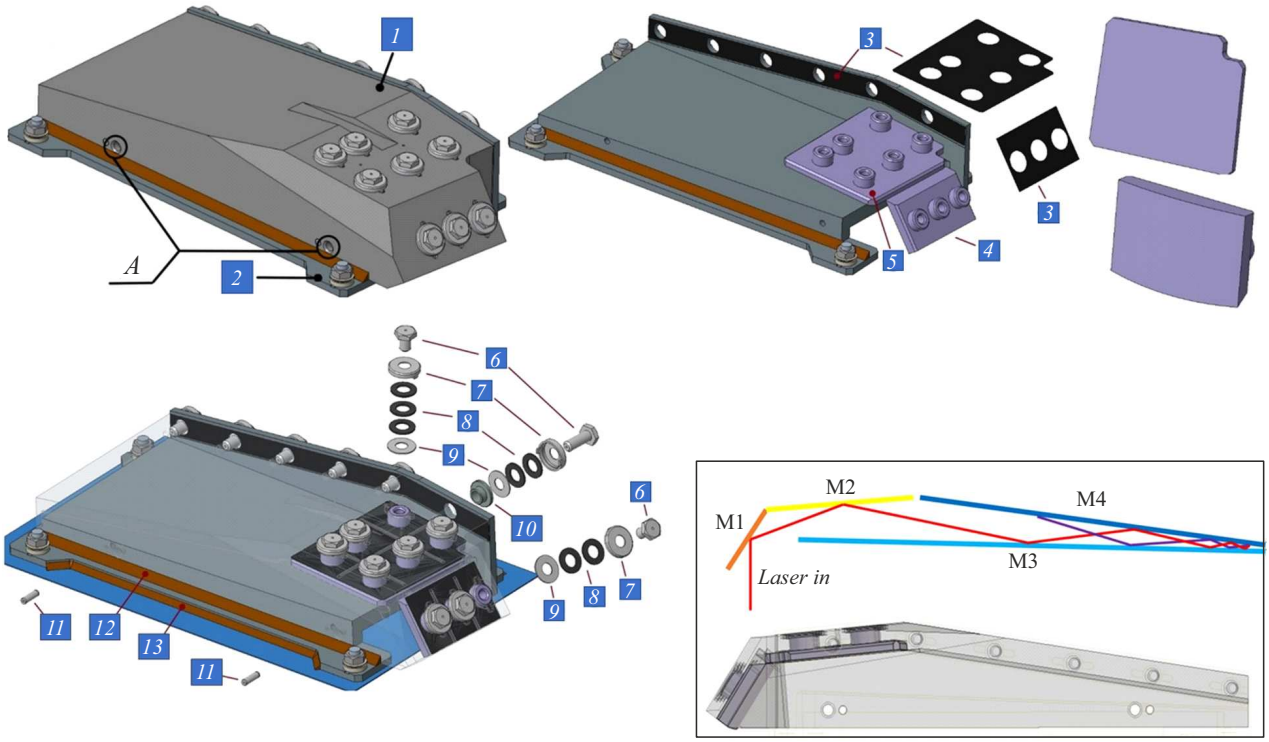


Рис. 1. Конструкция ловушки лазерного излучения. *1* — крышка 316L(N)-IG, *2* — основание 316L(N)-IG, *3* — графитовые прокладки PAPYEX, *4* — зеркало цилиндрическое M1 (молибден), *5* — зеркало плоское M2 (молибден), *6* — винты, *7* — стопорные втулки, *8* — тарельчатые пружины, *9* — шайбы, *10* — втулка *T*-образная, *11* — штифты, *12*, *13* — сварка. На вставке — траектория лазерного пучка в зеркальной ловушке.

отражению j; R_j — коэффициент отражения материала зеркала на длине волны 1064 nm при угле падения α_j; a_j, b_j — размеры лазерного пучка на зеркалах, соответствующие направлениям **x** и **y** соответственно; профиль лазерного излучения в поперечном сечении на входе представляет собой эллипс размером 20×64 mm; x_j, y_j — лазерное отражение j точки падения; x, y — координаты текущей точки поверхности зеркала.

Согласно результатам расчетов, плотность поглощенной энергии лазерного излучения на зеркалах M3, M4 и боковых стенках не превышает 0.01 J/cm^2, а для зеркал M1 и M2 — не превышает 0.069 J/cm^2 (рис. 2). Это лучше достигнутых ранее значений: для зеркал M1, M2 — не более 0.16 J/cm^2, для последующих — менее 0.05 J/cm^2 [4]. Соответственно для изготовления зеркал M3, M4 и боковых стенок возможно применение нержавеющей стали 316L(N)-IG. Зеркала M1 и M2 должны быть изготовлены из монокристаллического молибдена.

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты модернизации ловушки лазерного излучения тракта диагностики томсоновского рассеяния, установленной на диверторной кассете токамака ИТЭР. Работы выполнены в рамках этапа MRR-1 и направлены на обеспечение лазерной стойкости и технологичности конструкции в условиях экстремальных тепловых и электромагнитных нагрузок. Ключевым изменением стало внедрение цилиндрического зеркала из монокристаллического молибдена в качестве первого отражающего элемента оптической схемы. Такое решение позволило распределить плотность энергии лазерного излучения по поверхности последующих зеркал и снизить тепловую нагрузку на критические узлы.

Конструкция ловушки обеспечивает эффективный отвод тепла на охлаждаемый корпус кассеты через графитовые прокладки и минимизирует механические напряжения за счет независимого крепления оптических элементов. Проведенные расчеты распределения плотности энергии показали, что с точки зрения лазерной стойкости возможно применение нержавеющей стали для менее нагруженных зеркал и поверхностей. Для зеркал M1 и M2 необходимо использовать монокристаллический молибден. Разработанный узел спроектирован с учетом требований проекта ИТЭР к надежности и ресурсу эксплуатации в условиях сильного магнитного поля и радиационного нагрева. Дальнейшие этапы работ предполагают переход к изготовлению конструкторской документации и производству компонентов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

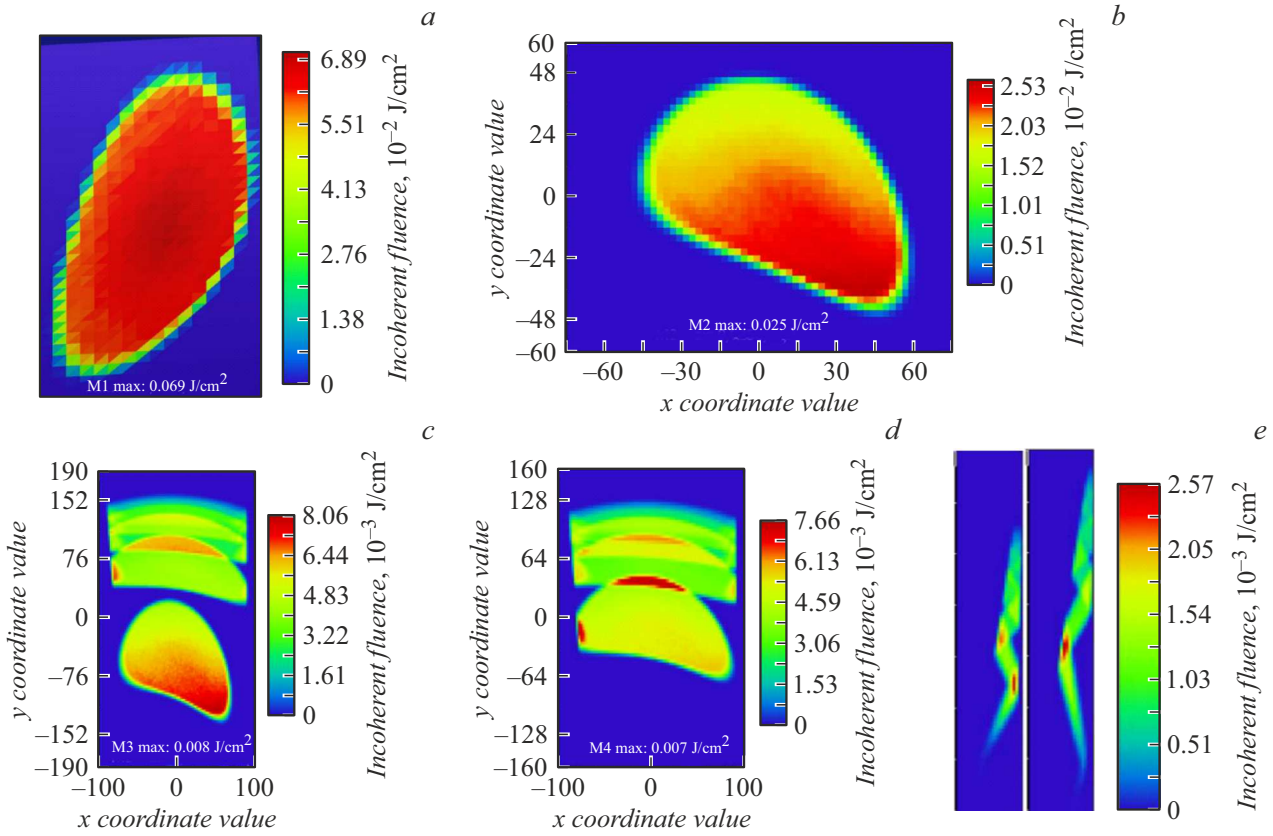


Рис. 2. Распределение плотности энергии лазерного излучения на поверхности зеркал ловушки. *a* — M1 (60 × 90 mm), *b* — M2, *c* — M3, *d* — M4, *e* — боковые поверхности.

Список литературы

[1] E.E. Mukhin, R.A. Pitts, P. Andrew, I.M. Bukreev, P.V. Chernakov, L. Giudicotti, G. Huijsmans, M.M. Kochergin, A.N. Koval, A.S. Kukushkin, G.S. Kurskiev, A.E. Litvinov, S.V. Masyukevich, R. Pasqualotto, A.G. Razdobarin, V.V. Semenov, S.Yu. Tolstyakov, M.J. Walsh, Nucl. Fusion, **54** (4), 043007 (2014). DOI: 10.1088/0029-5515/54/4/043007

[2] E. Yatsuka, T. Hatae, G. Vayakis, M. Bassan, K. Itami, Rev. Sci. Instrum., **84** (10), 103503 (2013). DOI: 10.1063/1.4824141

[3] J.H. Lee, S.T. Oh, H.M. Wi, Rev. Sci. Instrum., **81** (10), 10D528 (2010). DOI: 10.1063/1.3494275

[4] Н.А. Кунгурцев, А.Н. Коваль, Е.Е. Мухин, С.Ю. Толстяков, А.Г. Раздобарин, Д.И. Елец, О.С. Медведев, И.М. Букреев, К.О. Николаенко, И.Д. Кириенко, А.А. Жадковский, В.И. Модестов, Д.Л. Богачев, Письма в ЖТФ, **51** (23), 28 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.23.61675.7891 [N.A. Kungurtsev, A.N. Koval, E.E. Mukhin, S.Yu. Tolstyakov, A.G. Razdobarin, D.I. Elets, O.S. Medvedev, I.M. Bukreev, K.O. Nikolaenko, I.D. Kirienko, A.A. Zhadkovskij, V.I. Modestov, D.L. Bogachev, Tech. Phys. Lett., **51** (12), 24 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.12.62786.7891].