Разработка компонентов оптического тракта диагностики томсоновского рассеяния, расположенных на диверторных кассетах токамака ИТЭР

© Н.А. Кунгурцев[1], А.Н. Коваль[1], Е.Е. Мухин[1], С.Ю. Толстяков[1], А.Г. Раздобарин[1], Д.И. Елец[1], О.С. Медведев[1], И.М. Букреев[1], К.О. Николаенко[1], И.Д. Кириенко[2], А.А. Жадковский[2], В.И. Модестов[2], Д.Л. Богачев[3]

[1] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
[3] ООО „Спектрал-Тех“, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: n.a.kungurtsev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.
В окончательной редакции 28 июня 2025 г.
Принято к публикации 18 июля 2025 г.

Компоненты диагностики томсоновского рассеяния, размещенные на диверторных кассетах ИТЭР, подвержены воздействию радиации, радиационному нагреву, воздействию сильного магнитного поля 6–9 T, а также ударному воздействию при взаимодействии постоянного магнитного поля с вихревыми токами, наведенными в конструкциях при срывах плазменного разряда. Обсуждаются особенности конструкции компонентов, позволяющих сохранять работоспособность в непосредственной близости от термоядерной плазмы с учетом специфических требований диагностики.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2025.23.61675.7891

Диагностика томсоновского рассеяния в диверторной плазме токамака ИТЭР включена в перечень диагностических систем, которые должны заработать на этапе FPO-1 (FPO — first plasma operation) стадии DT-1 (DT — deuterium-tritium), и 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 2024 г. для защиты первого этапа финального проекта диагностики томсоновского рассеяния в диверторе ИТЭР были представлены конструкции диагностических компонентов, расположенных на диверторных кассетах, которые должны быть установлены в токамак на предварительной стадии SRO (start of research operation). Перечень диагностических компонентов, расположенных на диверторных кассетах, включает систему пассивной защиты устройства ввода лазерного излучения — устройство газодинамической защиты; нижние и верхние бленды для экранирования системы сбора рассеянного излучения от свечения поверхности нагретой внутренней диверторной мишени и ловушку лазерного излучения (рис. 1). Их целостность определяет работоспособность диагностики, данные которой могут быть использованы в системе управления, и их отсутствие в конечном счете может сказаться на работоспособности токамака-реактора. Все конструкции разрабатывались с учетом требований топологии процесса установки кассет, обеспечения доступа при монтаже, обеспечения требований температурной развязки деталей из молибдена относительно стальных конструкций диверторных кассет.

Особое внимание было уделено термоинтерфейсу между компонентами и кассетой, а также разгрузке сварных соединений. Для разработанных конструкций был проведен полный набор прочностных анализов в

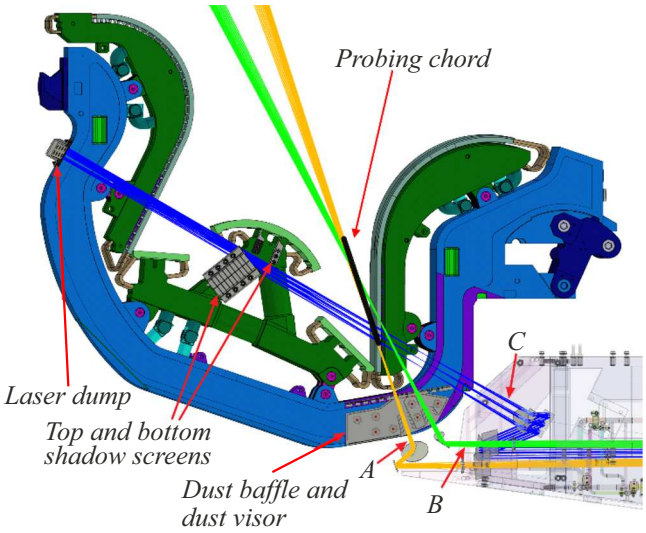

Рис. 1. Диагностические компоненты, расположенные на диверторных кассетах 21 и 22. Лазерные хорды зондирования с первыми лазерными зеркалами, отмеченными стрелками *A*, *B* и *C*.

программном комплексе ANSYS, учитывающих все возможные комбинации нагрузок для нормального режима работы токамака, а также для режима, учитывающего возможные инциденты в ходе работы. Наибольшую сложность вызвала разработка конструкции шторок, расположенных под куполом диверторных кассет. Экстремальные тепловые нагрузки в этом месте сочетаются с требованием иметь минимально возможную температуру поверхностей, находящихся в поле зрения системы сбора рассеянного излучения. Кроме того, использование молибденового сплава, отличающегося высокой теплопроводностью, сочетается с необходимостью учитывать его радиационное охрупчивание.

Ловушка лазерного излучения — это устройство, предназначенное для поглощения мощного лазерного излучения с параметрами 1064 nm/2 J/3 ns/50 Hz, проходящего по оптическому тракту лазерной хорды зондирования C, и передачи поглощенного теплового потока на диверторную кассету. При этом ловушка лазерного излучения должна выдерживать интенсивные тепловые и электромагнитные нагрузки.

Ловушка лазерного излучения монтируется к кассете 21 с помощью резьбовых шпилек и дополнительно фиксируется неразборным соединением с применением дуговой сварки в защитном газе. Общий вид разработанной модели представлен на рис. 2, *a*. Конструкция обеспечивает тепловой контакт с охлаждаемым корпусом диверторной кассеты и позиционирование зеркальной ловушки, поглощающей мощное лазерное излучение. Усилие прижима обеспечивается пакетом тарельчатых пружин. Для того чтобы избежать деформации поверхностей зеркал из молибдена в процессе нормальной эксплуатации, конструкцией предусмотрены независимые крепления зеркал, что позволит им свободно расширяться при сохранении формы. Для обеспечения теплового контакта молибденовых зеркал с корпусом из нержавеющей стали используются углеродные прокладки. Оптическая схема ловушки лазерного излучения спроектирована с учетом зависимости коэффициента поглощения от угла падения и поляризации лазерного излучения. Траектория лазерного излучения показана на рис. 2, *a*.

В работе [2] авторами приведено сравнительное исследование лазерной деградации поликристаллических и монокристаллических молибденовых зеркал с использованием импульсного лазера Nd:YAG с параметрами 1064 nm/0.5 J/12 ns/10 Hz. В исследованиях было показано, что деградация поверхности поликристаллического молибдена начинается с шероховатости на границах зерен, затем следует разрушение зерен и плавление. Сравнение поликристаллического и монокристаллического Mo показало, что после излучения $1.5 \cdot 10^6$ импульсов с плотностью энергии $0.9\,\mathrm{J/cm^2}$ деградации поверхности в монокристаллическом молибдене не наблюдалось. Зеркала из поликристаллического Mo подвержены деградации из-за неоднородности кристаллической структуры, и измеренный порог лазерной стойкости составил $0.2\,\mathrm{J/cm^2}$ для $1.5 \cdot 10^6$ импульсов, что при длительности лазерного импульса 3 ns составит $\sim 0.1\,\mathrm{J/cm^2}$ для $1.5 \cdot 10^6$ импульсов [3]. Согласно результатам расчетов, плотность энергии лазерного излучения на зеркалах M3, M4 и M5 не превышает $0.1\,\mathrm{J/cm^2}$, а для зеркал M1 и M2 — $0.16\,\mathrm{J/cm^2}$ (рис. 2, *b*). Соответственно для изготовления зеркал M3, M4 и M5 возможно применение поликристаллического молибдена. Зеркала M1 и M2 должны быть изготовлены из монокристаллического молибдена.

Для защиты лазерной оптики, предназначенной для инжекции лазерного излучения в плазму дивертора, предложено использовать специальный канал в зазоре между диверторными кассетами. Поверхность диверторных пластин изготавливается из вольфрама и покрывается в процессе работы борсодержащими пленками. Эта поверхность может распыляться, а продукты распыления достигать оптических элементов диагностики томсоновского рассеяния вместе с потоками газа во время скачков давления с длительностью импульса $0.3-01\,\mu$s — длительность ELM-неустойчивостей (ELM — edge localized mode). Работа данной конструкции основана на следующих явлениях: 1) отклонение гидродинамического потока от оптической оси за счет входа в канал, скошенный по отношению к оптической оси; 2) поглощение диффузионных и конвекционных потоков атомов B и W стенками канала. Принцип работы данного устройства описан в [4] (рис. 3, *a*, *b*).

Устройство газодинамической защиты монтируется к кассетам 21 и 22 неразборным соединением, при этом втулки с увеличенной площадью поверхности обеспечивают позиционирование шпилек крепления. Устройство участвует в защите окон диагностической системы от импульсных конвективных потоков [4]. На рис. 3, *a* показан общий вид разработанных моделей. Основные узлы выполнены из листов стали, скрепленных между собой сваркой. Устройства размещаются в щели между диверторными кассетами 21 и 22. В основной части конструкции располагаются дефлекторы, направляющие и распределяющие конвекционные потоки продуктов эрозии внутри устройства.

Верхние и нижние бленды установлены на боковых элементах кассет 21 и 22 дивертора ИТЭР напротив друг друга. Их задача — экранирование системы сбора рассеянного излучения от теплового излучения разогретых диверторных пластин внутреннего дивертора ИТЭР.

Верхние защитные бленды монтируются неразборным соединением к кассетам 21 и 22. Конструкция защитных бленд представлена на рис. 4. Разрезной кронштейн, в отверстия которого позиционируются шпильки, является основным элементом конструкции. Основной материал бленд — сплав TZM (молибден, цирконий, титан), обладающий высокой температурой плавления ($\sim 2600\,^\circ$C), устойчивостью к ползучести, радиационной стойкостью и устойчивостью к нейтронному облучению. Керамические элементы обеспечивают электрическую

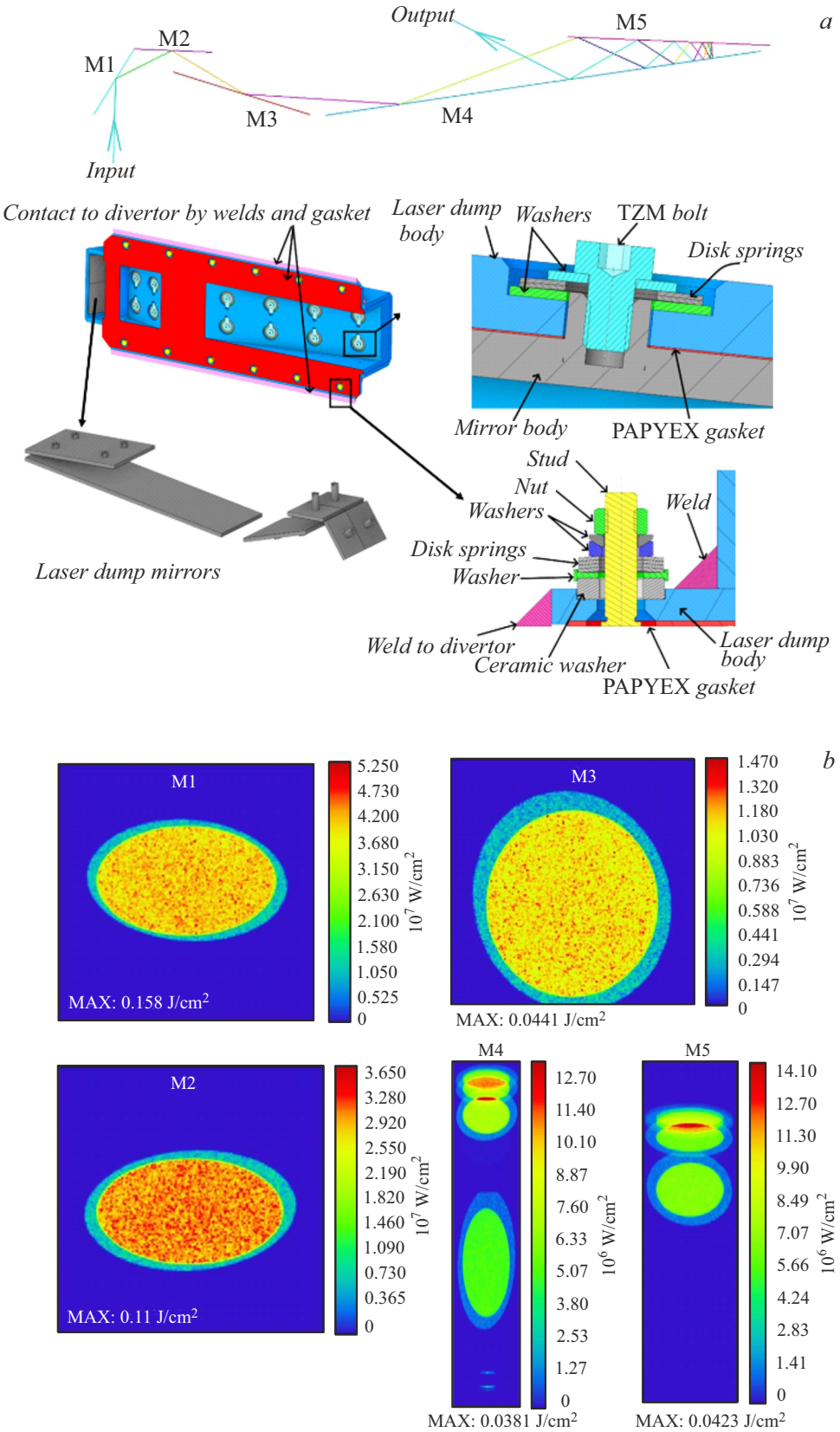

Рис. 2. *a* — общий вид конструкции ловушки лазерного излучения на кассете дивертора 21; *b* — распределение плотности мощности лазерного излучения на поверхности зеркал M1–M5.

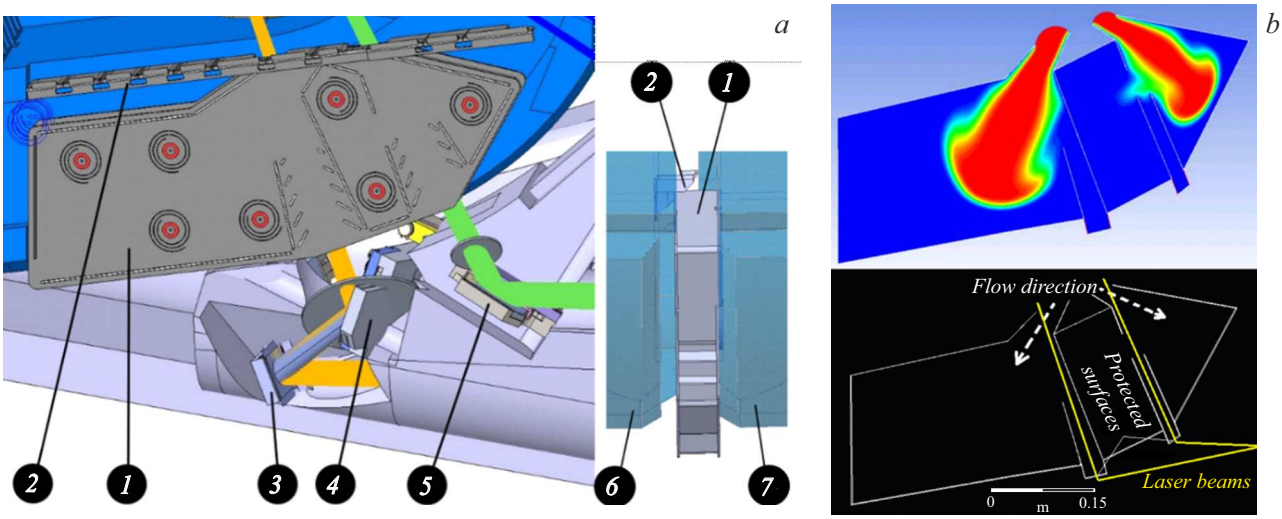

Рис. 3. Устройство газодинамической защиты (Dust visor, Dust baffle). *a* — общий вид конструкции. *1* — Dust baffle; *2* — Dust visor; *3*, *4* — зеркала хорд зондирования *A*; *5* — зеркала хорды зондирования *B*; *6*, *7* — диверторные кассеты 21 и 22. *b* — принцип работы устройства газодинамической защиты [4].

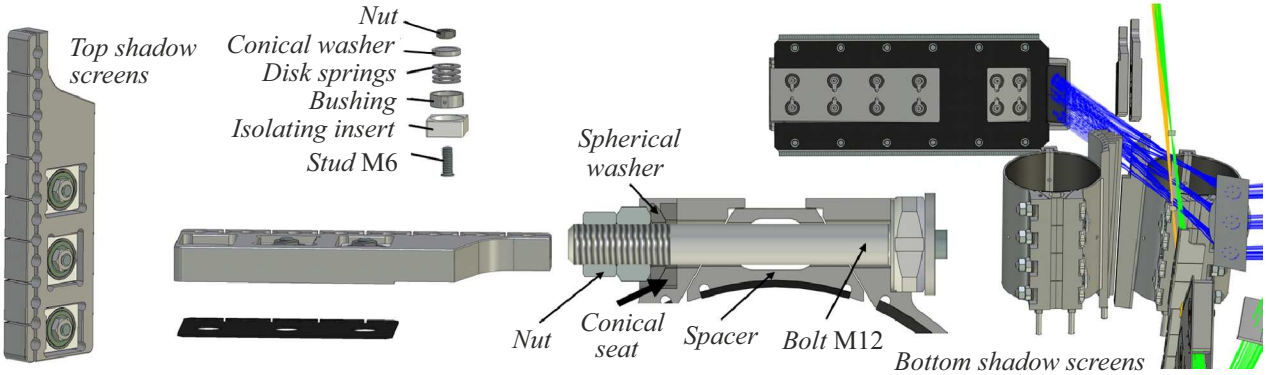

Рис. 4. Общий вид конструкции защитных бленд и их окружение.

изоляцию конструкции, что позволяет значительно снизить влияние электромагнитных сил, вызванных вихревыми токами. Усилие прижима обеспечивается пакетом тарельчатых пружин. Передача тепла осуществляется через графитовые листы PAPYEX, которые обеспечивают тепловой контакт между блендами и охлаждаемой поверхностью кассеты дивертора. В конструкции учтены требования механической устойчивости компонентов. Таким образом, бленды способны противодействовать вибрациям и механическим напряжениям, возникающим при работе токамака. Бленды выполнены модульно, что упрощает инсталляцию на кассеты дивертора.

Нижние защитные бленды монтируются к кассетам 21 и 22 с помощью болтового соединения и охватывают трубы охлаждения, на которых располагается купол кассет дивертора. Бленды выполнены в виде хомутов, воспроизводящих форму трубы после опрессовки. Упругие свойства кронштейнов и графитовых прокладок, используемых между теневыми экранами и кассетными куполами, компенсируют различия в форме контактных поверхностей. Экраны выполнены в виде многоступенчатых гребней для экранирования прямого и рассеянного излучения. Тепловой интерфейс, как и ранее, осуществлен через графитовые прокладки. Конструкция бленд позволяет ограничить температуру поверхностей, находящихся в прямой видимости системы сбора рассеянного излучения, величиной до 500 °C, что минимизирует интенсивность фонового излучения.

В настоящей работе представлены результаты разработки компонентов оптического тракта диагностики томсоновского рассеяния, установленных на диверторных кассетах токамака ИТЭР. Основное внимание уделено конструкциям, обеспечивающим защиту диагностической оптики от экстремальных воздействий, таких как радиация, тепловые нагрузки, магнитные поля и электромагнитные нагрузки, вызванные взаимодействием вихревых токов, наведенных при срыве плазменного разряда, и магнитного поля 6–9 T.

Проведенные расчеты и эксперименты позволили оптимизировать эффективность отвода тепла в ловушке

лазерного излучения, первые зеркала которой будут выполнены из монокристаллического молибдена, так как должны выдерживать плотность энергии до 0.16 J/cm^2 без критической деградации. Конструкция устройства газодинамической защиты, включая Dust baffle и Dust visor, предусматривает пружинную развязку с диверторной кассетой, допускающую независимое расширение при нагреве с сохранением теплового контакта с диверторной кассетой. Защитные бленды из сплава TZM и графитовых прокладок PAPYEX обеспечили устойчивость к тепловым и электромагнитным нагрузкам при сохранении температуры компонентов ниже 500 °C.

Конструкции разработаны с учетом основных требований проекта ИТЭР к обеспечению надежности диагностических систем в условиях длительной эксплуатации. Дальнейшие исследования планируется сосредоточить на оптимизации тепловых интерфейсов и оптимизации описанных конструкций с учетом результатов последующего анализа стойкости к сейсмическим, электромагнитным и тепловым нагрузкам.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

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**, 043007 (2014). DOI: 10.1088/0029-5515/54/4/043007

[2] D.I. Elets, A.G. Razdobarin, A.M. Dmitriev, N.A. Babinov, A.N. Bazhenov, I.A. Khodunov, A.N. Koval, G.S. Kurskiev, A.E. Litvinov, E.E. Mukhin, D.S. Samsonov, V.A. Senichenkov, L.A. Snigirev, V.A. Solovei, I.B. Tereschenko, S.Yu. Tolstyakov, L.A. Varshavchik, P.V. Chernakov, Al.P. Chernakov, An.P. Chernakov, N.S. Zhiltsov, in *Proc. of SOFT 2020* (Dubrovnik, Croatia, 2020).

[3] E. Yatsuka, T. Hatae, G. Vayakis, M. Bassan, K. Itami, M. Walsh, Fusion Eng. Des., **100**, 461 (2015). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.07.018

[4] I.M. Bukreev, E.E. Mukhin, S.V. Bulovich, A.A. Matyushenko, N.A. Babinov, A.M. Dmitriev, A.E. Litvinov, A.G. Razdobarin, D.S. Samsonov, L.A. Varshavchick, P.A. Zatilkin, J. Phys.: Conf. Ser., **1400**, 077040 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077040