

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ДИАГНОСТИКИ ЭРОЗИИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ ТРТ

© 2024 г. А. Г. Раздобарин^{a,b,c,*}, Я. Р. Шубин^a, А. А. Белокур^a, Д. Л. Богачев^b, Д. И. Елец^{a,b,c},
О. С. Медведев^{a,b,c}, Е. Е. Мухин^a, Л. А. Снигирев^a, И. В. Алексеенко^c

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

^b ООО “Спектрал-Тех”, Санкт-Петербург, Россия

^c Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

* e-mail: Aleksey.Razdobarin@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 10.12.2023 г.

После доработки 12.01.2024 г.

Принята к публикации 23.01.2024 г.

Предложен концептуальный проект диагностики эрозии первой стенки и диверторных пластин токамака с реакторными технологиями ТРТ. Разработаны принципы построения диагностического комплекса на основе следующих систем: лазерный радар двухдлиноволновая цифровая голографическая интерферометрия и активная лазерная ИК-термография. Разработана оптическая схема совмещения оптических путей ввода лазерного излучения и сбора рассеянного света диагностических систем. Для обзора максимальной площади первой стенки предложена схема оптического сканирования поверхности первой стенки и дивертора. На основании оптического моделирования построено пространственное распределение плотности мощности и фазы лазерного излучения интерферометрии в освещенной области первой стенки, определены размеры световых полей и плотность мощности для диагностик ИК-термография и лазерный радар. Для методов интерферометрия и ИК-термография предложена схема формирования изображения и определено пространственное разрешение. Проведено экспериментальное исследование функции рассеяния света на макетах облицовки дивертора ИТЭР. На основании полученных экспериментальных данных выполнен расчет энергетики собираемого сигнала для всех трех диагностических методов и сформулированы требования к диагностическому оборудованию.

Ключевые слова: токамак ТРТ, лазерные диагностики, первая стенка

DOI: 10.31857/S0367292124040042, **EDN:** QDRKLY

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка диагностик первой стенки является важным шагом развития термоядерных установок следующего поколения. В условиях длительных разрядов и высокой энергетической нагрузки на обращенные к плазме элементы (ОПЭ) могут приводить к разрушению и/или модификации материалов внутренней облицовки [1,2]. Исследования, проводимые в рамках проекта ИТЭР, показали, что тепловые нагрузки выше 15 МВт/м² с большой вероятностью приводят к возникновению трещин на всю глубину макетов вольфрамовых мишеней [3]. В то же время, импульсные тепловые нагрузки, обусловленные переходными процессами, такими как краевые локализованные моды (ELM) и срывы разряда неизбежно будут приводить к возникновению больших температурных градиентов, и, как следствие, усталостному разрушению защитной облицовки. В случае вольфрамовой облицовки ИТЭР порог усталостного разрушения для

10⁵ импульсов оценивается в 0,1–0,2 МДж/м², а уже при плотности энергии ~0,3 МДж/м² растрескивание сопровождается поверхностным плавлением вольфрама. Для токамака с реакторными технологиями ТРТ ожидаемые тепловые нагрузки на диверторные мишени при мощности дополнительного нагрева >30 МВт будут превышать 10 МВт/м² [4] в стационарном режиме и 0,3–0,5 МДж/м² во время переходных процессов, приближаясь, таким образом, к пределу выносливости используемых материалов.

Эксперименты с вольфрамовыми зондами в токамаках продемонстрировали изменение рельефа поверхности W — формирование нерегулярной шероховатости с масштабами до нескольких десятков микрон [5]. В случае, если шероховатость возникает как следствие поверхностного плавления, ее характерные размеры могут достигать миллиметров [2]. Формирование развитой структуры поверхности с отличными от основного объема теплофизическими

и электрическими свойствами и сложной морфологией может, в свою очередь влиять на характеристики взаимодействия плазмы со стенкой, вызывая увеличенное пылеобразование [6], перераспределение вкладов ионного и электронного потоков на стенку [7] и изменение характеристик удержания водорода.

Таким образом, в ТРТ достаточно остро стоит проблема контроля разрушения и эрозии элементов первой стенки и дивертора. Любое вскрытие вакуумного объема токамака сопряжено с огромными временными и финансовыми затратами особенно в случае использования трития в качестве рабочего газа. Поэтому реализация диагностических методов контроля состояния обращенных к плазме элементов должна обеспечить возможность дистанционного анализа состояния защитной облицовки в режиме реального времени и без развакуумирования установки.

Первым токамаком, в котором разработке таких методов было уделено пристальное внимание, является международный проект ИТЭР. Предлагаемый для ИТЭР набор диагностических методов включает в себя эндоскопы для обзора внутренней поверхности, системы метрологии на основе лазерного радара (LIDAR), монитор эрозии высокого разрешения на основе двухволновой цифровой голографии [8]. Также предусмотрена возможность установки образцов свидетелей и их замены при помощи манипуляторов с последующим анализом. Основной принцип построения систем метрологии поверхности ОПЭ в ИТЭР заключается в максимальном охвате внутренней поверхности и разделении зон наблюдения для различных методов дистанционного мониторинга. Обратной стороной такого подхода является чрезмерное усложнение реализации и интеграции диагностических систем с учетом

специфики их размещения в диагностических порталах и высоких требований к разрешению.

В данной работе описывается ряд универсальных решений, как основы для построения системы диагностики состояния ОПЭ в ТРТ. Предлагаемый подход заключается в объединении взаимодополняющих оптических методов в единый комплекс, задачей которого является получение оперативной информации о возникновении критических разрушений облицовки, таких как трещины и плавление, мониторинг развития рельефа поверхности обращенных к плазме элементов и возникновения модифицированных и рекристаллизованных слоев. Также в круг задач данной системы входит исследование толщины и теплофизических свойств осадений продуктов плазменной эрозии.

В основе диагностического комплекса лежат методы оптического неразрушающего контроля анализа поверхности: частотно-модулированный лазерный радар (FM—LIDAR), двухволновая цифровая голографическая интерферометрия (ДЦГИ) и активная лазерная ИК термография (АЛИТ). При разработке диагностического комплекса планируется сделать упор на объединении элементной базы методов и обеспечении комплементарности проводимых измерений для получения максимально полной картины о локальном состоянии поверхности.

2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

2.1. Диагностические методы

Принцип работы системы FM—LIDAR (частотно-модулированный лазерный радар) с линейной модуляцией оптической частоты лазерного излучения показан на рис. 1. В случае линейной

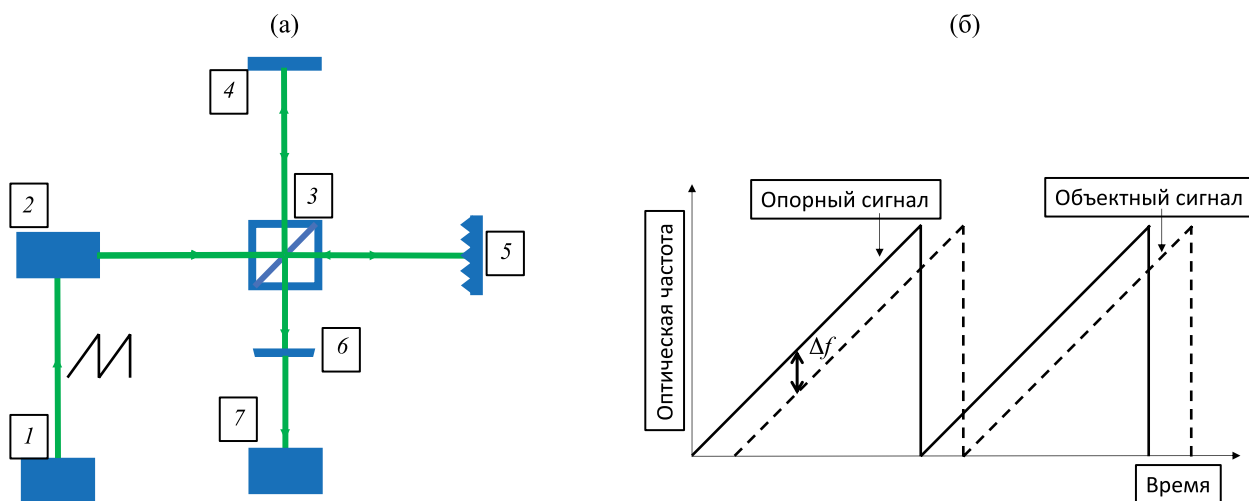


Рис. 1. Принцип работы системы FM—LIDAR: а) — схема системы FM—LIDAR; б) — зависимость оптической частоты опорного и объектного сигналов от времени. 1 — генератор пилообразного сигнала; 2 — перестраиваемый лазер; 3 — светоделительный кубик; 4 — зеркало; 5 — исследуемый объект; 6 — лавинный фотодиод; 7 — частотомер

по времени развертки частоты лазера временная задержка между переданным и принятым сигналами пропорциональна разности соответствующих частот f_1 и f_2 , а также скорости изменения передаваемой частоты. Интерференция когерентного излучения лазера на лавинном фотодиоде приводит к возникновению биений на частоте равной разности оптических частот опорного и объектного сигналов. Таким образом расстояние до объекта вычисляется, как

$$d = \frac{c|f_1 - f_2|}{2df/dt}.$$

Такой гетеродинный способ детектирования позволяет использовать регистрирующую аппаратуру, рассчитанную на работу в частотном диапазоне — кГц для детектирования неоднородностей масштаба ~ 1 мм.

Принципиальная схема второго из предлагаемых методов монитора эрозии ОПЭ — двухволновой цифровой голографии показана на рис. 2.

Когерентное излучение, отраженное от объекта и опорный луч, формируют интерферограмму, которая регистрируется при помощи КМОП-камеры. Две интерферограммы на разных длинах волн записываются одновременно либо последовательно с использованием одного или двух перестраиваемых по длине волны лазеров. Пространственное распределение разности фаз, реконструированных из интерферограмм на двух разных длинах волн, дает информацию о профиле поверхности. Для плоского фронта объектной волны, падающей нормально к поверхности, разность фаз в 2π будет соответствовать глубине профиля объекта

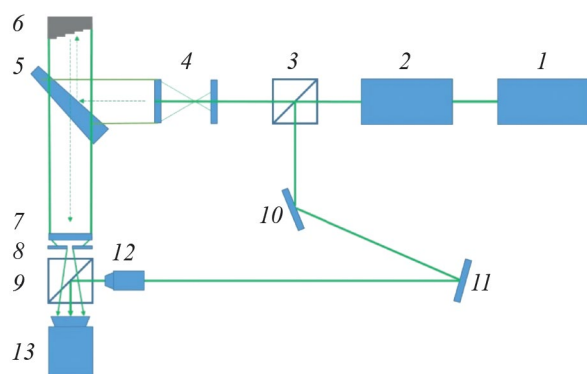


Рис. 2. Схема цифрового голографического интерферометра: 1 — лазер накачки; 2 — перестраиваемый лазер; 3 — светоделитель; 4 — коллиматор; 5 — оптический клин; 6 — объект; 7 — собирающая линза; 8 — диафрагма; 9 — светоделитель; 10, 11 — зеркало; 12 — собирающая линза/микрообъектив; 13 — КМОП-камера.

$$\Delta z = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2|\lambda_1 - \lambda_2|} = \frac{\Lambda}{2},$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн, используемые для записи голограмм, а Λ — т.н. синтетическая длина волны. Применимость метода для контроля эрозии в ИТЭР была продемонстрирована в [9]. При использовании оптической схемы с расстоянием $\sim 0,5$ м между объектом и собирающей оптикой точность измерения системы составила ± 10 мкм. При этом регистрирующая аппаратура была отнесена на расстояние ~ 20 м от объекта.

Принцип метода активной лазерной инфракрасной термографии (АЛИТ) заключается в анализе пространственного распределения температуры поверхности объекта при воздействии на нее импульсным лазером. На основании анализа неоднородностей в температурных распределениях предполагается выявлять локальные приповерхностные дефекты — трещины, поры, расслоения. В зависимости от способа освещения — равномерное, или точечное, методом лазерной термографии разрешают трещины параллельные и перпендикулярные поверхности [10]. Реализация, синхронной лазерной термографии позволяет диагностировать и исследовать параметры модифицированных и осажженных слоев на поверхности обращенных к плазме элементов [11]. Метод лазерной термографии впервые предлагается в качестве диагностики ОПЭ в токамаках. Разрешение метода, предельные размеры детектируемых дефектов и толщины модифицированных слоев являются предметом предстоящих исследований.

2.2. Блок-схема диагностического комплекса

Основной принцип совмещения оптических диагностик первой стенки показан на рис. 3. В условиях ограничений, связанных с необходимостью размещения оптических компонентов в диагностических портах внутри вакуумного объема, использование широкоугольных обзорных систем, представляется нерациональным, поскольку обеспечение одновременно широкого угла обзора и приемлемого оптического разрешения потребует размещения крупногабаритной зеркальной оптики в диагностических патрубках токамака, что существенно увеличит стоимость и сложность интеграции диагностической системы. В связи с этим при проектировании системы выбор был сделан в пользу динамического сканирования первой стенки.

Чтобы обеспечить как можно более широкую область обзора, двухосевая система сканирования внутренней поверхности должна размещаться на минимальном расстоянии от выхода из диагностического



Рис. 3. Блок-схема диагностического комплекса.

патрубка вблизи границы плазмы. Для проекта ИТЭР предложен ряд решений по реализации приводов подвижных элементов, приспособленных для эксплуатации в условиях высоких тепловых и радиационных нагрузок. Уже разработаны приводы на основе биметаллических, пьезоэлектрических, пневматических и электромагнитных актюаторов, предназначенные для юстировки зеркал и управления защитными экранами, которые будут размещаться на границе с плазмой, и потенциально применимые для задачи реализации сканирующей системы.

При разработке функциональной схемы диагностического комплекса были приняты во внимание плюсы и минусы реализации системы, предназначенной для решения аналогичной задачи в ИТЭР. Основным недостатком предлагаемого для ИТЭР подхода является, по мнению авторов, выбор метода LIDAR в качестве основной системы метрологии, обеспечивающей покрытие большей части внутренней поверхности токамака. Как следствие, для обеспечения пространственного разрешения, порядка 1 мм, к системе сканирования первой стенки и дивертора лазерным лучом предъявляются высокие требования по точности позиционирования и угловой точности поворота зеркал, что в свою очередь требует использования угловых энкодеров и подведения световодов. Для защиты диэлектрических материалов световодов от оптической деградации, вследствие радиационного воздействия весь сканирующий узел планируется фиксировать на манипуляторе, который будет убираться вглубь диагностического патрубка на время рабочих импульсов ИТЭР.

Реализацию системы контроля состояния первой стенки можно существенно упростить, если выбрать

в качестве основных систем метрологии методы, обеспечивающие обзор определенной площади стенки в течение одной экспозиции. В качестве таких методов предлагается использовать двухволновую цифровую голографию и активную лазерную ИК-термографию. Данное решение имеет следующие преимущества:

1. Уменьшается число шагов сканирующей системы, необходимых для обзора первой стенки и дивертора токамака. Если площадь обзора составляет 100×100 мм, то при требуемом разрешении 1 мм, число необходимых шагов сканирования уменьшится в 10^4 раз по сравнению со сканированием методом LIDAR.
2. Пространственное разрешение системы определяется только оптическим разрешением, а не шагом сканирования. Следовательно, снижаются требования к точности угла поворота. Приемлемая точность может быть обеспечена путем реализации механизма привода сканатора с фиксированным шагом без необходимости реализации дополнительной системы контроля его углового положения.
3. Одновременное получение оптического изображения исследуемой поверхности. Сшивка отдельных областей обеспечивается стандартными библиотеками обработки изображения, доступными, например, в пакете расширения Image Processing Toolbox среды Matlab.
4. Кросс-проверка данных, полученных независимо тремя методами. Повышение надежности результатов, комбинирование методов для получения более полной информации о состоянии ОПЭ

Обработка данных, полученных методом ДЦГИ, включает в себя последовательное выполнение

прямого и обратного Фурье преобразования с промежуточной фильтрацией спектра и анализ результирующей комплексной амплитуды. Надежность интерпретации данных можно существенно повысить, если иметь определенную априорную информацию относительно формы волнового фронта объектной волны и угла наклона поверхности объекта по отношению к направлению распространения объектной волны. Кроме того, при использовании методов ДЦГИ и АЛИТ построение изображения на матрицах детекторов требует информацию о расстоянии до объекта для фокусировки выходных объективов систем сбора света. Для получения данной априорной информации предлагается использовать метод FM—LIDAR с возможностью независимого сканирования поверхности в пределах площади сбора света ДЦГИ. Такое сканирование планируется осуществлять с использованием двухосевой поворотной подвижки, расположенной вне вакуумного объема токамака, а для того, чтобы область сканирования LIDAR всегда совпадала с областью обзора ДЦГИ и АЛИТ, ввод излучения и сбор света для всех трех диагностик будет выполняться через один и тот же внутривакуумный сканатор, расположенный на границе с плазмой.

3. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДИАГНОСТИКИ

3.1. Общие принципы построения оптической схемы диагностического комплекса

Расчеты оптической схемы, её параметров и характеристик производились в программном

пакете Ansys Zemax OpticStudio. Блок-схема предлагаемого комплекса диагностик первой стенки токамак-реактора показана на рис. 4. Основной принцип построения комплекса — совмещение областей обзора трех диагностических методов: двухволновая цифровая голография, активная лазерная термография и LIDAR. На схеме ход лучей данных диагностик показан зеленым, красным и синим цветами соответственно. Перестройка между различными областями внутренней поверхности объема токамака осуществляется при помощи внутривакуумного сканатора, отмеченного цифрой 8 на рис. 4.

Наибольшее поле зрения из всех трех диагностик имеет метод ДЦГИ. Для подстройки систем LIDAR и АЛИТ в пределах области наблюдения системы ДЦГИ используется вневакуумное поворотное зеркало, отмеченное на схеме на рис. 4 полукруглой стрелкой. Вся регистрирующая часть оптической схемы, а также большая часть систем ввода и сбора лазерного излучения вынесены за границу вакуума. Внутривакуумная часть состоит только из сканатора, используемого одновременно для ввода лазерного излучения и для вывода собираемого света из вакуумного объема. Такая компоновка при расположении сканатора достаточно близко к выходу диагностического порта обеспечит линейный угол развертки $\sim 100^\circ$ и максимальный обзор первой стенки вместе с внутренней и наружной мишенями дивертора (см. рис. 5).

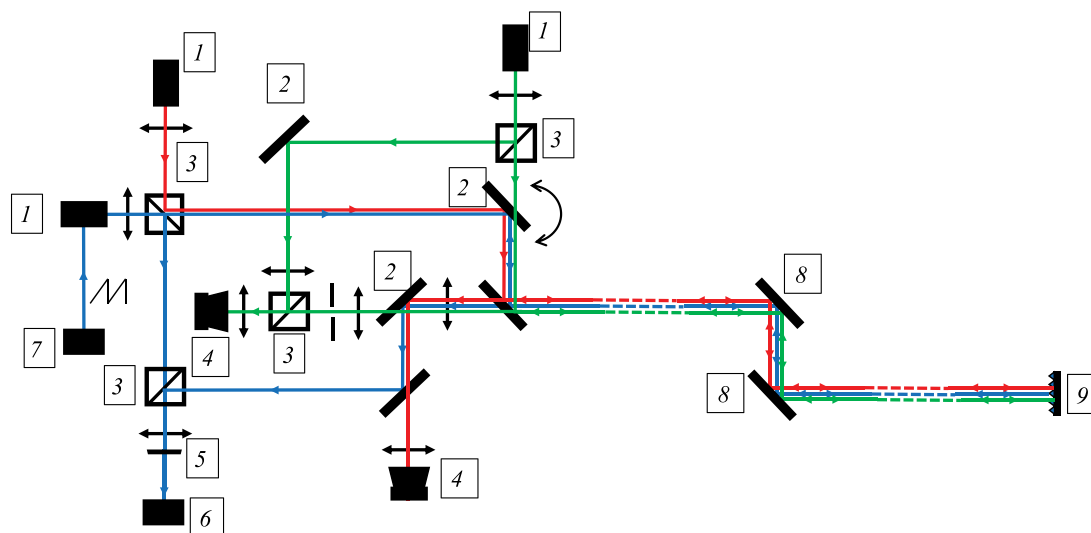


Рис. 4. Блок-схема диагностической системы контроля состояния первой стенки токамак-реактора: 1 — лазеры; 2 — зеркала; 3 — светоделительный кубик; 4 — камеры; 5 — лавинный фотодиод; 6 — частотомер; 7 — генератор пилообразной развертки; 8 — внутривакуумный сканатор; 9 — исследуемая поверхность; зеленый цвет — система ДЦГИ; красный цвет — система АЛИТ; синий цвет — система LIDAR.

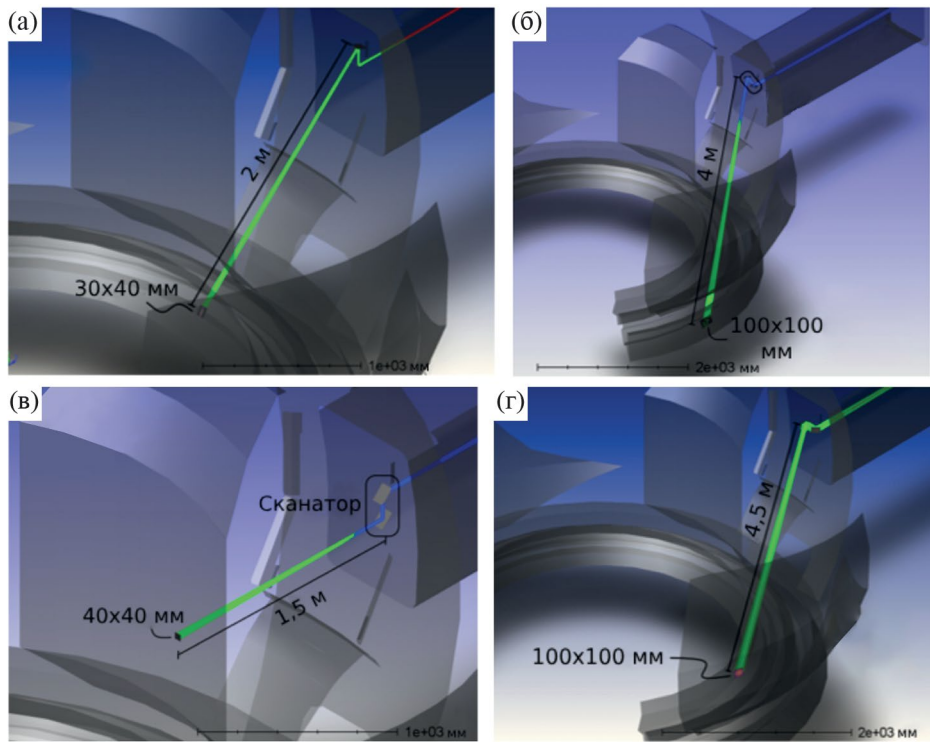


Рис. 5. — Настройка системы сканирования диагностического комплекса разные области внутренней поверхности токамака ТРТ: а) — внутренний дивертор; б) — наружный дивертор; в) — центральная колонна; г) — наружная стенка.

3.2. Система ввода лазерного излучения

Оптические схемы системы ввода излучения и сбора света показаны на рис. 6 и 8. Система ввода излучения состоит из 3 оптических узлов, каждый из которых отвечает за формирование светового поля соответствующей диагностики с заданными параметрами. Общими для всех трех узлов являются поворотное зеркало, совмещенное с малым зеркалом объектива системы сбора света, сапфировое окно порта и узел первого зеркала, который обеспечи-

вает сканирование в пределах полукусуса с углом раствора 100°.

Узел голографии состоит из коллиматора с оптоволоконным входом, лучеделителя и двухлинзового объектива с перестраиваемой первой линзой. Лучеделитель используется для разбиения пучка на опорный и сигнальный, при этом опорный посылается на систему задержки, а сигнальный фокусируется объективом в область порта. После объектива пучок без изменений проходит сквозь дихроическое зеркало,

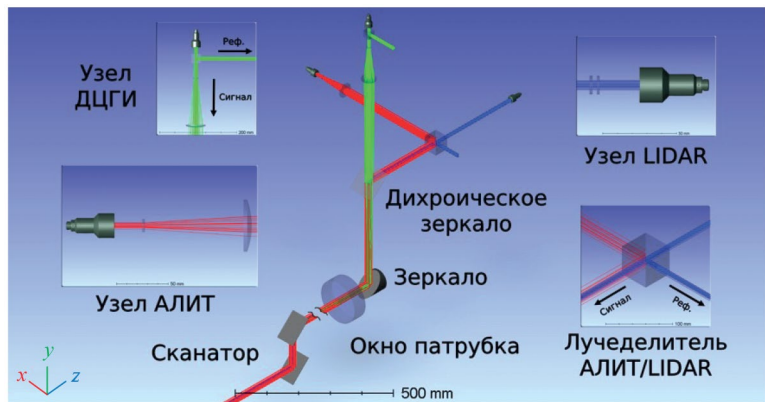


Рис. 6. Оптическая схема ввода лазерного излучения диагностического комплекса: зеленый цвет — система ДЦГИ; красный цвет — система АЛИТ; синий цвет — система LIDAR.

прозрачное в диапазоне длин волн, используемых для голографии, и заводится в порт. В порту пучок проходит через перетяжку, причем ее положение смещается подвижной линзой объектива таким образом, чтобы в область сканирования приходило широкое световое поле с максимальным радиусом кривизны, обеспечивающее равномерную засветку области сканирования и минимальный фазовый сдвиг в ее пределах.

Узел термографии построен по тому же принципу, что и узел голографии. Мощный коллимированный пучок без разделения на опорный и сигнальный проходит через объектив, фокус которого размещается непосредственно в области сканирования. Оптические пути узлов термографии и LIDAR совмещаются при помощи лучеделителя, что позволяет использовать одно общее дихроическое зеркало. Это зеркало настроено на отражение в спектральном диапазоне, используемом для термографии и LIDAR, и при этом размещается на прецизионной двухосевой угловой подвижке (до 1° в обеих осях). Таким образом оно служит для наводки лучей этих диагностик на отдельные точки в пределах большей области обзора ДЦГИ.

Узел LIDAR так же состоит из коллиматора с оптоволоконным входом и двухлинзового объектива, однако

фокус этого объектива зафиксирован ($F = 8500$ мм) так, чтобы перетяжка пучка лежала на среднем расстоянии — 3 м. Лучеделитель в этом узле выполняет двойную функцию: прошедший луч становится сигнальным и следует по пути, общему с системой термографии, а отраженный луч становится опорным и отправляется на систему задержки. Особенностью узла также является малое относительное отверстие объектива, благодаря которому достигается большая глубина резкости и обеспечивается высокая концентрация энергии пучка в поперечном сечении — размеры пятна не превышают 2.5 мм на всех расчетных дистанциях сканирования. Это позволяет использовать LIDAR в качестве реперной системы для остальных диагностик, дающей информацию о расстоянии до исследуемой поверхности, наклоне и крупномасштабном рельефе.

Лазеры, используемые для всех трех диагностик, генерируют излучение на фундаментальной $TEM_{0,0}$ моде, и таким образом на вход системы во всех трех случаях подаются гауссовы пучки. Благодаря расчету оптики на минимум сферических aberrаций при проходе через систему ввода излучения поле сохраняет гауссов профиль распределения интенсивности, а его расчетная фаза хорошо описывается аналитически. Волновой фронт поля ДЦГИ (рис. 7), падающего на

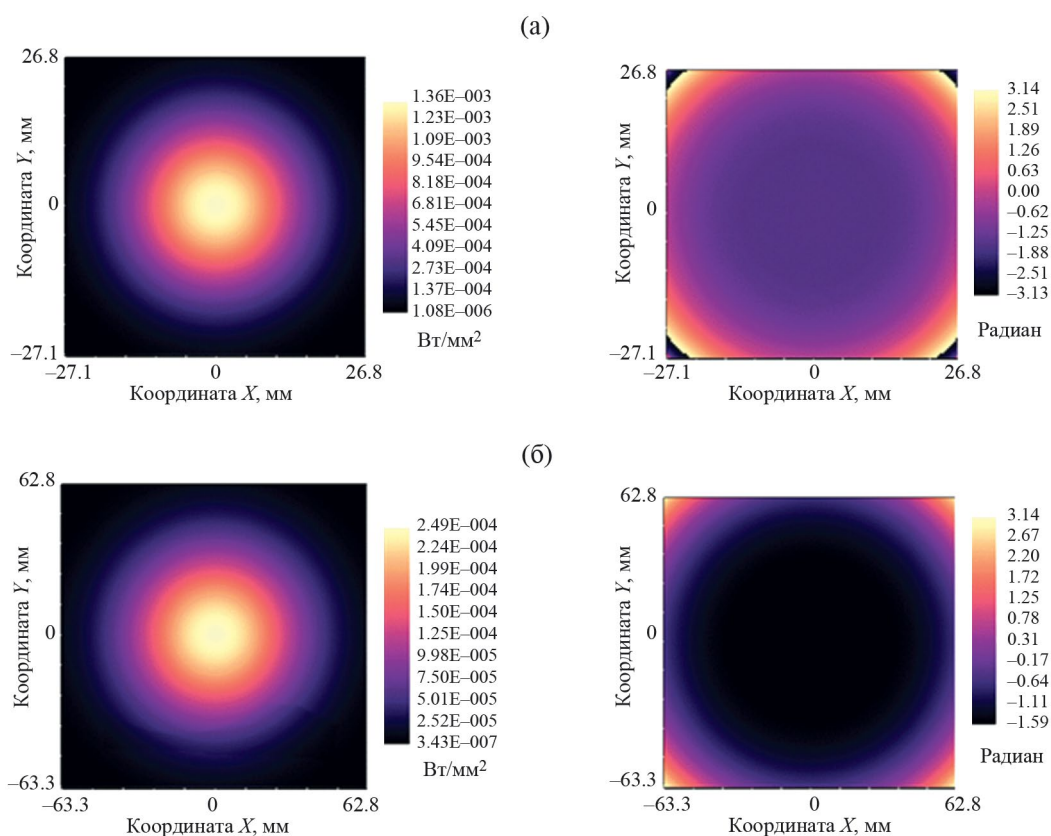


Рис. 7. Распределение плотности мощности (слева) и фазы (справа) поля лазерного излучения ДЦГИ на объекте в зависимости от дистанции сканирования: а) — 1.5 м; б) — 4.5 м.

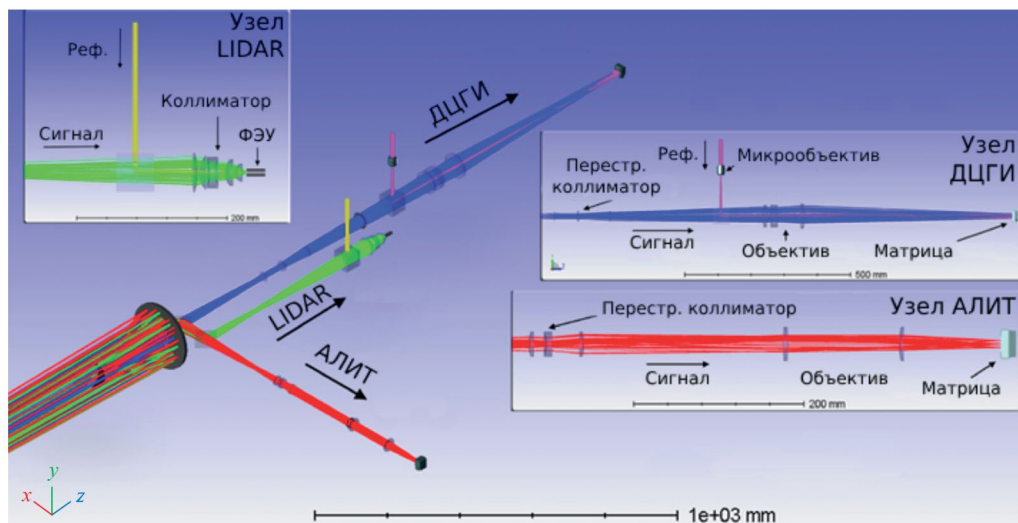


Рис. 8. Оптическая схема системы сбора света диагностического комплекса: зеленый цвет — система ДЦГИ; красный цвет — система АЛИТ; синий цвет — система LIDAR.

область сканирования, имеет сферическую форму, однако, благодаря тому, что расстояние до перетяжки существенно превышает длину Рэлея, радиус кривизны волнового фронта принимает значения порядка единиц метров. Такая маленькая кривизна позволяет достичь отсутствия перескоков фазы в области засветки, что существенно упрощает анализ результирующей голограммы.

Анализ профиля интенсивности поля LIDAR показывает, что вся падающая мощность оказывается сконцентрирована в пределах пятна диаметром 2.5 мм (по уровню e^{-2}) на любой дистанции, а пиковое значение освещенности не опускается ниже 0.5 Вт/мм^2 в пересчете на 1 Вт мощности лазера. Для АЛИТ уширение входного пучка приводит к увеличению выходной числовой апертуры и позволяет стянуть лучи в пятно меньшего диаметра, до 1.5 мм по уровню e^{-2} . В результате становится достижимой более высокая пиковая плотность мощности на уровне порядка десятков Вт/мм^2 в пересчете на 10 Вт мощности лазера.

3.3. Система сбора света

В системе сбора света ключевым элементом является зеркальный объектив типа Кассегрен. Выбор объектива обусловлен работой в широком спектральном диапазоне, в условиях которого использование зеркал полностью исключает существование хроматических aberrаций.

Задача разделения входного пучка по узлам детектирования различных диагностик решается при помощи дихроических зеркал. Первое зеркало, расположенное непосредственно за объективом, настро-

ено на пропускание видимого спектра и отражение в ИК-диапазоне, за счет чего выделяется спектральная полоса, задействованная в голографии. Второе зеркало, настроено на пропускание в среднем ИК и отражение в ближнем ИК-спектрах, при помощи чего разделяются полосы LIDAR и ИК-термографии.

Узел ДЦГИ состоит из перестраиваемого коллиматора, лучеделителя, микрообъектива и объектива-триплета. В функции коллиматора входит не только распараллеливание входного пучка, но также и обеспечение максимального относительного отверстия за счет изображения неподвижной апертурной диафрагмы как можно ближе к объекту, что делает оптическую систему более светосильной и повышает предел разрешения. Выходящие из коллиматора параллельные лучи после прохождения диафрагмы направляются на лучеделитель для смешения с опорным пучком. Опорный пучок, в свою очередь, на выходе из системы задержки преобразовывается микрообъективом в точечный источник света, при этом расстояние от него до лучеделителя должно быть равно дистанции между лучеделителем и диафрагмой для обеспечения максимальной контрастности интерферограммы. Полученное в результате смешения световое поле фокусируется объективом-триплетом на КМОП-матрицу, при этом сигнальный пучок формирует изображение области сканирования, а опорный создает интерференционные кольца поверх изображения.

В методе LIDAR применяется схема смешения сигнального и опорного пучков, схожая с методом ДЦГИ, однако поскольку LIDAR не является изображающей диагностикой, необходимости в фокусировке или перестройке пучков не возникает.

Это позволяет использовать единственный короткофокусный объектив для формирования интерферирующих пятен от сигнального и опорного пучков на матрице фотумножителя.

Узел термографии, как и узел голографии, построен с использованием перестраиваемого коллиматора и объектива с фиксированным фокусным расстоянием. Объектив фокусирует изображение на матрицу ИК-камеры. Линзовая оптика для провода лучей в диагностике АЛИТ, а также вакуумные окна должны быть изготовлены из материала, пропускающего излучение с длиной волны до 5 мкм. В качестве такого материала можно использовать сапфир с полосой пропускания — до 5.5 мкм.

Минимизация aberrаций при расчете оптики позволила на большинстве дистанций сканирования достичь дифракционного предела разрешения для диагностик АЛИТ и ДЦГИ. Разрешающая способность обеих диагностических систем приведена на рис. 9. Сводка по предельной разрешающей способности (по уровню контраста 0.2) приведена в табл. 1.

В методе LIDAR одним из источников неопределенности в определении расстояния до объекта является ошибка волнового фронта на детекторе в связи с тем, что эта диагностика является когерентной. Величины ошибки измерения из-за кривизны волнового фронта регистрируемого излучения для осевой и крайней точек поля сканирования LIDAR приведены в табл. 2.

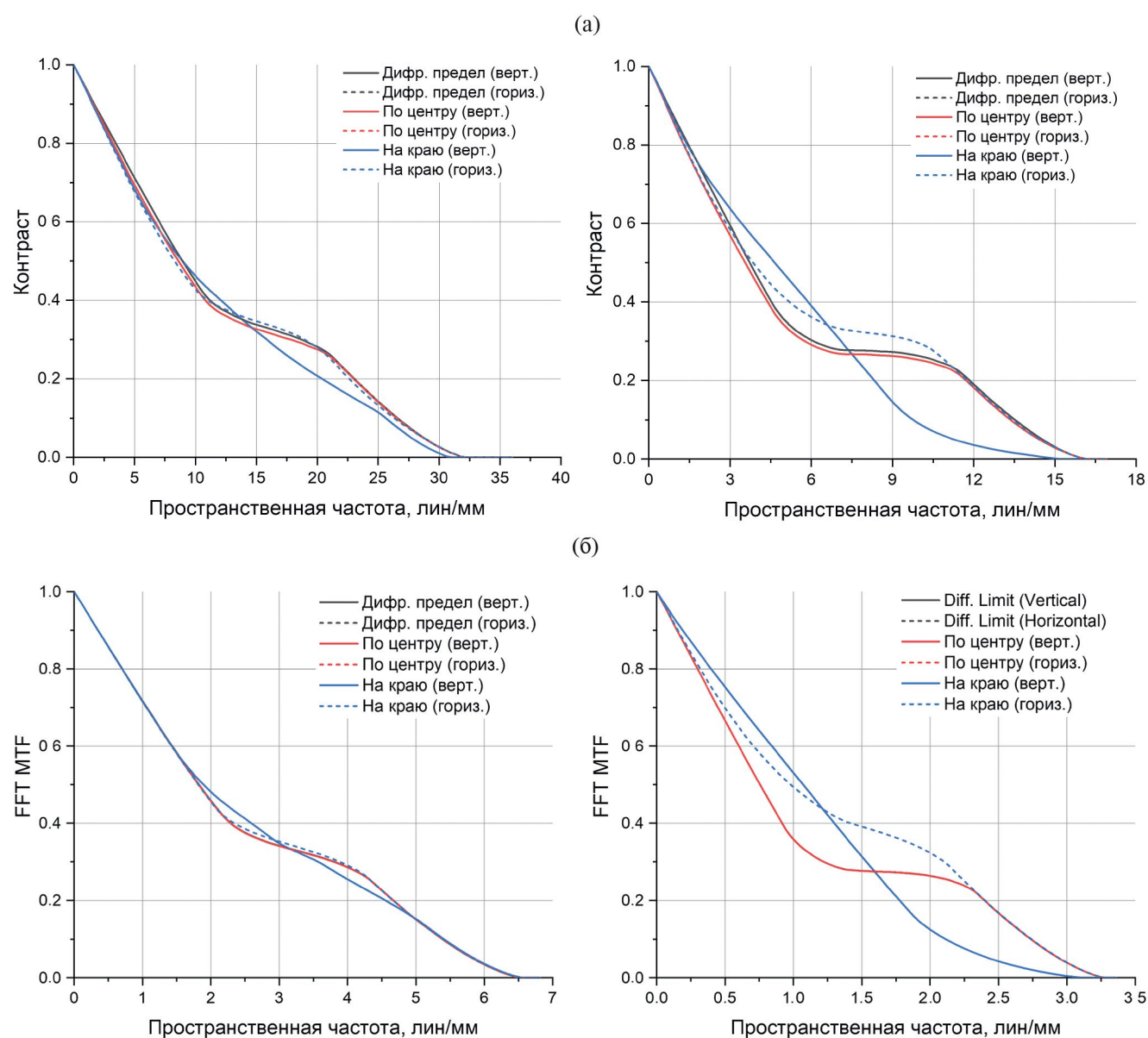


Рис. 9. Частотно-контрастная характеристика диагностических систем на дистанциях 1.5 м (слева) и 4,5 м (справа) на объекте в зависимости от дистанции сканирования: а) — ДЦГИ; б) — АЛИТ.

Таблица 1. Предельная разрешающая способность изображающих диагностик

Диагностика		Разрешающая способность, лин/мм					
		Дифракционный предел		В центре поля		На краю поля	
		Вертикальный	Горизонтальный	Вертикальный	Горизонтальный	Вертикальный	Горизонтальный
ДЦГИ	1.5 м	23.1	23.1	22.9	22.9	20.4	22.7
	4.5 м	11.9	11.9	11.7	11.7	8.3	11.7
АЛИТ	1.5 м	4.7	4.7	4.7	4.7	4.5	4.7
	4.5 м	2.4	2.4	2.4	2.4	1.8	2.4

Таблица 2. Оценка ошибки определения расстояния методом LIDAR, обусловленной ошибкой волнового фронта на детекторе

Дистанция, м	Максимальная ошибка, мкм		Среднеквадратичная ошибка, мкм	
	В центре	На краю	В центре	На краю
1.5	25	33	7	10
3.0	<1	<1	<1	<1
4.5	6	14	2	4

4. АНАЛИЗ УРОВНЯ СИГНАЛОВ,
ФОРМУЛИРОВКА ТРЕБОВАНИЙ
К ОБОРУДОВАНИЮ

4.1. Угловая зависимость интенсивности
рассеянного света

Для формулировки требований к оборудованию был проведен анализ уровня сигналов, регистрируемых приемной аппаратурой всех трех диагностик. Одним из параметров расчета является сила отраженного излучения, рассчитанная с учетом угла падения лазерного луча на исследуемую поверхность. В то время как для теплового излучения угловая зависимость интенсивности подчиняется ламбертовскому закону, в случае диффузного рассеяния лазерного луча индикатриса рассеяния будет зависеть от параметров рельефа рассеивающей поверхности, которые, в свою очередь зависят от технологии шлифовки. Поскольку оценить параметры рельефа поверхности защитных пластин токамака ТРТ в настоящий момент не представляется возможным, было проведено измерение угловой зависимости силы рассеянного излучения с использованием макета облицовочной вольфрамовой плитки дивертора ИТЭР как наиболее близкого по своим характеристикам объекта. Для этого была собрана экспериментальная схема, показанная на рис. 10.

В эксперименте измерялась индикатриса рассеяния света в зависимости от угла падения излучения на макет. Излучение лазера с рабочей длиной волны 532 нм и оптической мощностью 100 мВт падало на исследуемый образец, закрепленный на вращающемся штативе. Штатив был расположен в центре вращающегося столика, а на подвижном лимбе столика крепилась короткая оптическая скамья, на которой был зафиксирован штатив с фотодиодом. Таким

образом, в эксперименте можно было независимо менять угол падения лазерного излучения и сбора рассеянного света.

В ходе измерений было обнаружено, что индикатриса рассеяния на макете облицовки имеет выделенную плоскость. Свет отражается от образцов полосой, направление которой зависит от ориентации образца в держателе. Связанно это с наличием выделенного направления полировочных канавок на поверхности образца. Причем ориентация полосы преимущественного рассеяния оказалась различна на разных тайлах одной сборки. Это делает невозможным предсказание ориентации индикатрисы рассеяния для элементов облицовки в токамаке, что необходимо учитывать при расчете интенсивности собираемого света для диагностик LIDAR и ДЦГИ. Измерения проводились для двух ориентаций образца, соответствующих горизонтальной и вертикальной плоскости преимущественного рассеяния света.

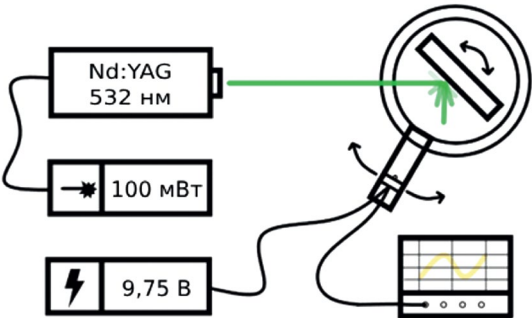


Рис. 10. Схема эксперимента по измерению интенсивности рассеяния лазера на макете элемента облицовки дивертора ИТЭР.

На основании данных, полученных в ходе эксперимента, была построена параметрическая модель рассеяния, зависящая от угла падения лазерного луча на образец i и полярного угла сбора света φ . Модель основана на широко известной модели бликового рассеяния S Кука—Торренса [12], дополненной компонентами постоянного шума A , равномерного ламбертовского рассеяния B и компонентой диффузного пятна D . Как и в оригинальной модели, бликовое рассеяние задается распределением микрограней на поверхности материала по Бекманну [13] с параметром m и амплитудой k_s , которое модулируется фактором Френеля F и функцией геометрического затенения G :

$$S = \frac{k_s}{4 \cos i \cos \varphi} \cdot \frac{e^{-\frac{\tan^2 \frac{\varphi-i}{2}}{m^2}}}{\pi m^2 \cos^4 \frac{\varphi-i}{2}} \cdot F \cdot G.$$

Поскольку в эксперименте использовался неполяризованный лазерный луч, то для учета фактора Френеля применялась аппроксимация Шлика [14]

$$F \approx R_0 + (1 - R_0)(1 - \cos i)^5,$$

где R_0 равен коэффициенту отражения по нормали, что для вольфрама на длине волны 532 нм составит порядка 0.5 [15]. Функция геометрического затенения, обеспечивающая затухание блика при предельно косых углах сбора света, имеет вид

$$G = \min \left(1, \frac{2 \cos \varphi \cos \frac{\varphi-i}{2}}{\cos \frac{\varphi+i}{2}}, \frac{2 \cos i \cos \frac{\varphi-i}{2}}{\cos \frac{\varphi+i}{2}} \right).$$

Диффузное отражение можно описать распределением Лапласа с амплитудой k_d и параметром n , которое также модулируется факторами Френеля и затенения:

$$D = k_d \frac{e^{-\frac{|\tan \frac{\varphi-i}{2}|^n}{n}}}{n} \cdot F \cdot G.$$

Компонентам ламбертовского рассеяния и постоянного шума соответствуют слагаемые $k_b \cos \varphi$ и k_a . Таким образом, общий вид модельной функции рассеяния

$$A + B + D + S = k_a + k_b \cos \varphi + F \cdot G \times \left(k_d \frac{e^{-\frac{|\tan \frac{\varphi-i}{2}|^n}{n}}}{n} + \frac{k_s}{4 \cos i \cos \varphi} \cdot \frac{e^{-\frac{\tan^2 \frac{\varphi-i}{2}}{m^2}}}{\pi m^2 \cos^4 \frac{\varphi-i}{2}} \right).$$

В программном пакете OriginPro была проведена аппроксимация экспериментальных данных описанной выше моделью. Графики аппроксимирующих поверхностей в логарифмическом масштабе приведены на рис. 11. Статистическая оценка значений параметров дана в таблице 3.

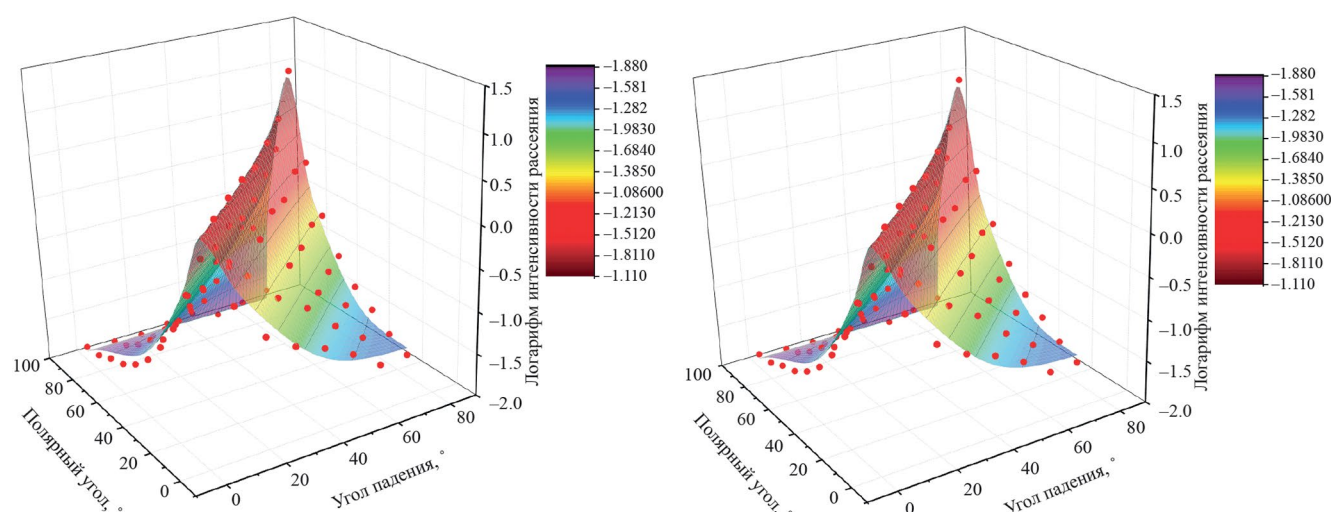


Рис. 11. Аппроксимация экспериментальных данных рассеяния в логарифмическом масштабе. Поверхности соответствуют модельным данным, точки — эксперименту; слева — ориентация штрихов в плоскости падения света, справа — поперек.

Таблица 3. Статистика параметров аппроксимации функции рассеяния излучения лазера на макете облицовки дивертора ITER

Параметр	Ориентация штрихов			
	В плоскости падения света		Поперек плоскости падения света	
	Среднее, ср^{-1}	Станд. отклонение, ср^{-1}	Среднее, ср^{-1}	Станд. отклонение, ср^{-1}
k_a	0.0133	0.0012	0.0116	0.0011
k_b	0.031	0.005	0.0154	0.0034
k_d	0.365	0.032	0.099	0.011
k_s	0.069	0.016	0.0643	0.0010
n	0.082	0.005	0.090	0.009
m	0.0505	0.0035	0.0435	0.0021

4.2. Уровни собираемого сигнала

Расчет энергетики собираемого света для диагностик ДЦГИ и LIDAR проводился для двух дистанций от рассеивающей поверхности до сканатора — 1.5 м и 4.5 м. В первом случае моделировался случай настройки на центральную колонну ТРТ, во втором — на внешнюю стенку токамака. Поверхность в обоих случаях ориентировалась под углом 45° к падающему излучению. При совмещении систем ввода и сбора излучения угол сбора света всегда равен углу падения света по величине и противоположен по знаку. Как следует из полученных угловых зависимостей индикатрисы рассеяния, для углов падения более ~40° компоненты бликового и диффузного пятен практически не оказывают никакого влияния на функцию рассеяния, и единственный вклад вносит ламбертовская компонента

$$f(i \gtrsim 40^\circ, \varphi) \approx k_b \cos \varphi.$$

Оценка проводилась в пересчете на 1 Вт источника излучения и один светочувствительный элемент соответствующей диагностики при регистрации крайней точки области сканирования. Коэффициент пропускания оптической системы ввода принимался с учетом однократного просветления за 99%, системы сбора — 30% (падение пропускания при сборе связано преимущественно с экранированием малым зеркалом объектива Кассегрена). Приходящее в область сканирования излучение рассчитывалось для метода ДЦГИ — по уровню e^{-2} .

Для получения значения яркости излучения в области сканирования необходимо умножить полученное значение интенсивности рассеяния на освещенность, создаваемую источниками с учетом падения под углом 45°. Как известно, яркость в оптической системе модулируется только поглощением и рассеянием на оптике, поэтому возможно сразу получить значение яркости на детекторах. По известной выходной численной апертуре системы сбора света рассчитывается телесный угол, стягиваемый пикселями детектора

$$\Omega = \pi \cdot NA^2.$$

Далее, предполагая характерный размер пикселей, легко получить мощность на 1 пиксель. Таким образом, входные данные и результаты расчетов для детектора ДЦГИ сведены в табл. 4.

Для метода LIDAR мощность света, собираемого на детекторе фотодиода с учетом измеренной индикатрисы рассеяния можно оценить, как $8 \cdot 10^{-7}$ Вт на дистанции 1.5 м и $1.4 \cdot 10^{-7}$ Вт на дистанции 4.5 м.

Оценка энергетического потока на ИК-детектор диагностики АЛИТ выполнена для дистанции 4.5 м и угла падения излучения лазера и, соответственно сбора света — 45°. Также необходимо иметь в виду, что внешний нагрев лазером поверхности происходит в импульсном режиме. Температура в области лазерного пятна описывается формулой

Таблица 4. Параметры светового потока, приходящего на детектор ДЦГИ в пересчете на 1 Вт мощности источника излучения для угла падения 45°

Дистанция, м	1.5	4.5
Размер светочувствительного элемента, мкм×мкм	5×5	
Мощность излучения на 1 светочувствительный элемент, Вт	$9.1 \cdot 10^{-14}$	$1.5 \cdot 10^{-14}$
Энергия фотона, Дж	$1.81 \cdot 10^{-19}$	
Поток фотонов на 1 светочувствительный элемент, фотон/с	$5.1 \cdot 10^5$	$6.1 \cdot 10^4$

$$T(\tau) = \frac{2q(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_0,$$

где T — абсолютная температура поверхности;

τ — длительность лазерного импульса;

q — пиковая плотность мощности при падении под углом 45° ;

$R = 0,68$ — коэффициент отражения вольфрама на длине волны 1 мкм;

$a = 9,38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ — коэффициент температуропроводности;

$k = 190 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ — коэффициент теплопроводности;

$T_0 = 300 \text{ К}$ — начальная температура поверхности.

Спектральная планковская яркость (с учетом коэффициента серости вольфрама при комнатной температуре $\varepsilon = 0,1$) интегрируется по длинам волн от 3 до 3,1 мкм, затем проводятся те же оптические расчеты, что и для двух других диагностик.

$$B_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}.$$

При оценке сигнала следует учесть, что искомым параметром диагностики АЛИТ является не полная мощность, а ее прирост. Графики зависимости температуры поверхности и прироста потока фотонов в ходе импульсного нагрева на 1 пиксель ИК-детектора диагностики АЛИТ от длительности импульса лазера для двух значений мощности лазера — 10 и 100 Вт — приведены на рис. 12.

Здесь следует отметить, что данный расчет справедлив для схемы регистрации излучения, построенной на двух ИК-детекторах с использованием полосовых фильтров на разные спектральные ди-

апазоны. Такая схема детектирования нужна, когда необходимо отслеживать быструю динамику абсолютных значений температуры в исследуемой области. Если нужны только данные об относительном изменении температуры, то достаточно одного детектора, измеряющего полную мощность излучения. В таком случае чувствительность методики будет заметно выше.

4.3. Вклад рассеянного лазерного излучения в собираемый сигнал

При совмещении систем ввода лазерного излучения и сбора света неизбежно возникает проблема засветки детекторов светом, рассеянным на общих зеркальных элементах систем. В оптической схеме, описанной в разд. 3, такими элементами являются зеркала сканирующей системы. В случае диагностики AFM—LIDAR диффузное отражение на зеркалах сканатора приведет к возникновению дополнительных частот биения регистрируемого сигнала, соответствующих расстоянию до данных зеркал. Эти частоты не будут меняться в ходе сканирования поверхности и могут быть отфильтрованы в ходе постобработки. Для метода АЛИТ лазерное излучение необходимо только для нагрева поверхности и длина волны зондирующего лазера может быть выбрана вне спектрального диапазона ИК-камеры (например, 1064 нм). В таком случае опасность будет представлять не рассеянный свет, а планковское излучение зеркал, нагретых лазерным излучением. В предложенной оптической схеме плотность лазерного излучения на зеркалах, а следовательно, и изменение температуры в импульсе в 50 раз меньше, чем на исследуемой поверхности облицовки то-камака ТРТ при фокусировке на 4.5 м, что позволит пренебречь эффектом нагрева зеркал в измерениях.

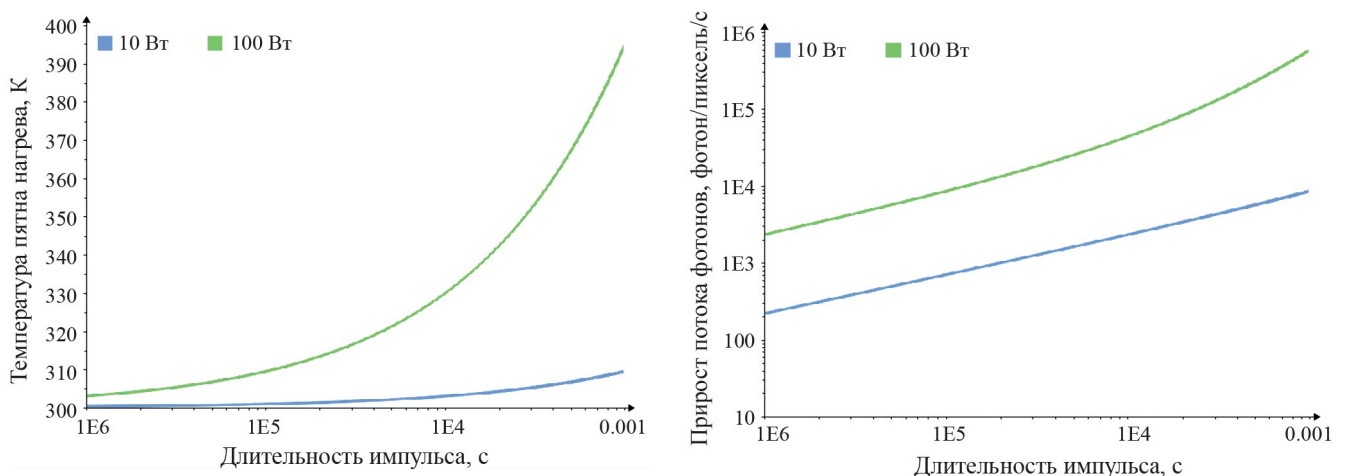


Рис. 12. Зависимость температуры поверхности (слева) и прироста потока фотонов на 1 пиксель ИК-детектора диагностики АЛИТ (справа) от длительности импульса лазера для двух значений мощности лазера — 10 и 100 Вт.

В методе ДЦГИ собираемое излучение имеет частоту зондирующего лазера, что делает невозможным спектральную разделку сигналов. Для вычисления уровня паразитной засветки модель системы сбора света в программном пакете Zemax была дополнена двумя дополнительными конфигурациями, в которых мнимый источник засветки располагался на первом и втором зеркалах сканирующей системы. По численным расчетам были определены телесные углы, стягиваемые от этих источников входным зрачком системы, а также доля энергии, достигающая матрицы детектора с учетом потерь в системе, включая виньетирование выходным окном и экранирование малым зеркалом Кассегрена.

Сходясь далеко от фокуса, рассеянные лучи в первом приближении равномерно засвечивают матрицу, благодаря чему возможно построить линейную математическую модель зависимости интенсивности паразитной засветки I (ламбертовское рассеяние) от доли диффузного отражения зеркал d

$$I(d) = \frac{\tau I_0}{S} \cdot d \frac{\Omega}{\pi} \cos(45^\circ),$$

где I_0 — энергия, падающая на зеркало, в пересчете на 20 мДж энергии импульсного лазера;

τ — доля энергии, приходящей на матрицу;

S — площадь матрицы;

Ω — телесный угол, стягиваемый зрачком системы.

Полученные зависимости, а также уровень сигнала, отраженного от первой стенки в худшем случае фокусировки на 4.5 м и угле падения 45° в диапазоне параметра d от 0 до 10% приведены на рис. 13.

Анализ зависимостей показывает, что основной вклад в засветку ожидаемо вносит второе от плазмы зеркало, поскольку для него падающая мощность, а также телесный угол почти вдвое больше, чем для первого. Точка пересечения линии суммарного рассеяния с уровнем сигнала ($d \sim 0,07\%$) определяет требования к качеству поверхности зеркал. При доле диффузного рассеяния — 1%, вполне достижимого для монокристаллических молибденовых зеркал, [17] сигнал от рассеянного на зеркалах излучения примерно в 20 раз превышает полезный сигнал. Один из возможных путей решения данной проблемы — использование источников света с ограниченной длиной когерентности, что позволит исключить вклад засветки в интерференционную картину, а только добавит постоянный фон. Тогда единственным ограничением на интенсивность паразитного сигнала будет динамический диапазон приемника. Предполагая глубину цвета регистрирующей матрицы равной 16 бит (65 536 уровней), имеем возможность регистрации сигнала на всех дистанциях сканирования без потери данных при доле рассеяния на зеркалах системы сканирования не хуже 2–3%.

Другое возможное решение заключается в использовании импульсных лазеров с длительностью импульса в нс диапазоне и реализации схемы задержки регистрации детектируемого сигнала. Данный способ применим при достаточной дистанции сканирования. В случае токамака ТРТ, где минимальная дистанция от первого зеркала до стенки составляет ~ 2 м длительность импульса лазера не должна превышать ~ 10 нс.

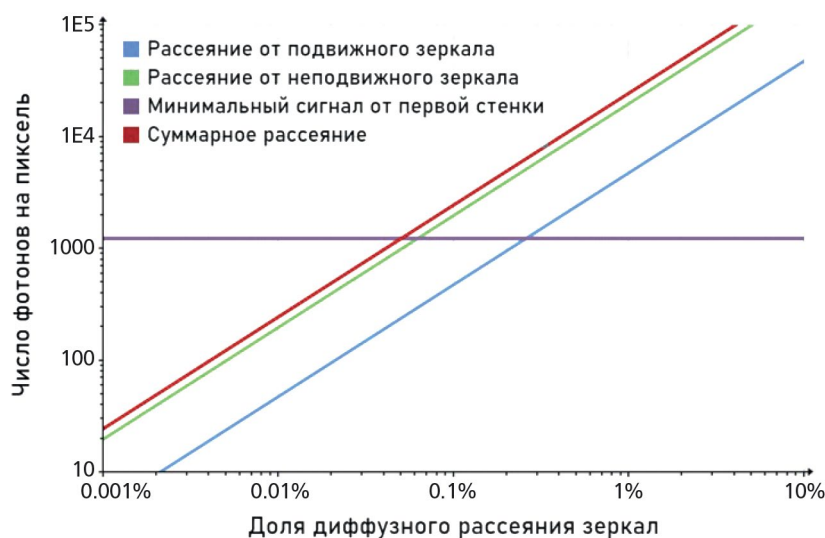


Рис. 13. Зависимость количества сигнальных и рассеянных зеркалами фотонов от доли диффузного рассеяния зеркал при облучении лазером с энергией в импульсе 20 мДж элемента стенки, расположенного на 4.5 м от первых зеркал и угле падения света 45°

4.4. Требования к оборудованию

На основании расчета параметров световых потоков можно сформулировать требования к мощности лазерного излучения, чтобы получить на детекторах надежно регистрируемый сигнал. В первую очередь данные требования относятся к мощности лазерных источников для получения измеримого уровня сигналов на детекторах. Для кремниевых КМОП матриц научных камер, рассчитанных на видимый диапазон с темновым шумом $\sim 1-2\text{e}$ и квантовой эффективностью, близкой к 100% за уровень надежно измеряемого сигнала можно взять 1000 фотонов. Для ИК-камер с заметно более высоким темновым шумом и несколько более низкой квантовой эффективностью измерения можно надежно проводить для 10^4 фотонов. В методе LIDAR, в качестве приемника используется лавинный фотодиод. Типичная кривая фоточувствительности лавинного фотодиода показана на рисунке 14. Для лазера, излучающего на длине волны 1064 нм, уровень сигнала на диоде должен быть не менее $\sim 100\text{ нВт}$.

Требуемые параметры лазерных систем приведены в табл. 5.

Еще одним фактором, который необходимо учитывать при реализации диагностики ДЦГИ для ис-

следования первой стенки токамак-реактора является необходимость крепления элементов оптической схемы на конструкционных элементах токамака, подверженных вибрациям что может привести к возникновению случайных фазовых сдвигов. Уменьшить чувствительность системы к вибрациям можно, обеспечив проведение измерений за время много меньшее, чем период собственных колебаний конструкции. В случае использования постоянного лазера уменьшение времени экспозиции неизбежно потребует увеличения мощности лазера, до значений в несколько кВт и использования быстрой камеры. Другой подход, предложенный ранее в [18] заключается в использовании импульсного лазера в нс—мкс диапазоне. В таком случае, энергии 20 мДж в импульсе будет достаточно для обеспечения надежно измеримого уровня сигнала в макете диагностики ДЦГИ.

Для диагностик LIDAR и ДЦГИ, основанных на эффекте интерференции когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны существенными, являются также требования к ширине линии генерации и диапазону перестройки оптической частоты. Длина когерентности лазерного излучения связана с шириной полосы лазера соотношением:

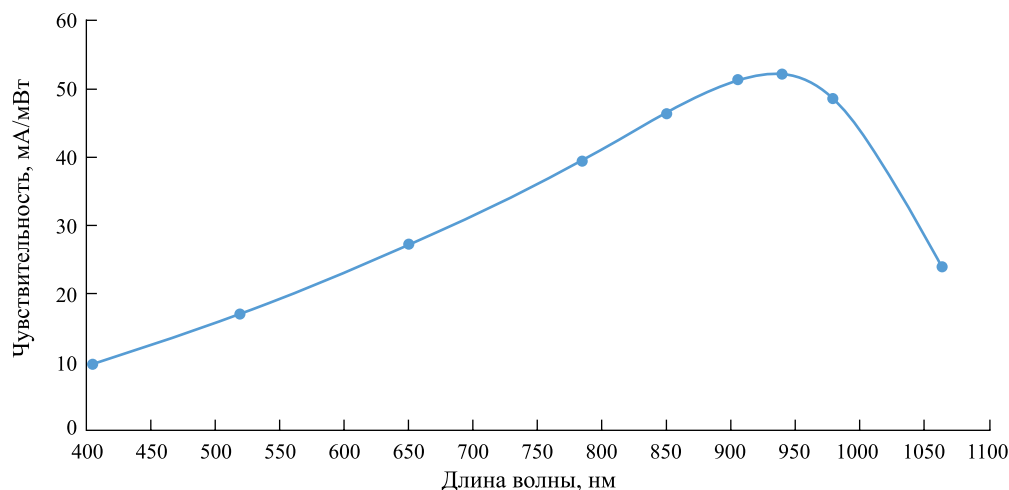


Рис. 14. Типичная спектральная зависимость фоточувствительности кремниевых лавинных фотодиодов [17].

Таблица 5. Требования к лазерным системам диагностического комплекса

Диагностика	LIDAR	ДЦГИ	АЛИТ
Мощность (энергия в импульсе)	Не менее 1 Вт	Не менее 20 мДж	Не менее 1000 Вт
Длина волны	400—1100 нм	400—900 нм	—
Ширина линии	Не более 10 МГц	Не более 3 ГГц	—
Диапазон перестройки	Не менее 0,3 нм	Не менее 3 нм	—
Частота модуляции (длительность импульса)	Не менее 1 кГц	Не более 10 нс	Не менее 1 кГц

$$\Delta\nu = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} = \frac{c}{L},$$

где L — длина когерентности;
 c — скорость света.

Для реализации методов LIDAR и ДЦГИ необходимо, чтобы длина когерентности превышала разность хода опорного и объектного лучей. Если расстояние от лазера до объекта не превышает 15 м, длина когерентности не должна быть меньше 30 м. Следовательно ширина линии $\Delta\nu$ в неперестраиваемой схеме LIDAR должна быть не больше 10 МГц. В методе ДЦГИ требования к когерентности могут быть ниже при добавлении в схему проводки опорного луча регулируемой линии задержки. В таком случае требования к длине когерентности будут определяться линейными размерами осматриваемой области. Для разрабатываемой системы — это квадрат со стороной 10 см. Следовательно для обеспечения когерентности необходимо, чтобы ширина линии $\Delta\nu$ не превышала 3 ГГц.

Ширина полосы перестроения в методе ДЦГИ определяется требованием к динамическому диапазону измерений. Чтобы получить предельный динамический диапазон измерения глубины рельефа в 100 мкм при работе на длине волны 700 нм необходимо иметь возможность перестроения длины волны в диапазоне ~3 нм. Для системы LIDAR частоту сигнала, регистрируемого как результат наложения опорного и объектного поля можно оценить из следующего выражения:

$$\Delta f = \Delta F \cdot \frac{2 \cdot L \cdot \nu}{c},$$

где L — расстояние до объекта;
 ν — частота модуляции оптической частоты лазера;
 ΔF — амплитуда модуляции оптической частоты лазера.

Взяв расстояние до исследуемой поверхности — 15 м, частоту модуляции — 1 кГц и регистрируемую частоту — 1 МГц, получаем необходимую амплитуду модуляции — 90 ГГц, или 0,3 нм для длины волны лазера 1064 нм.

Требования к оборудованию системы регистрации диагностического комплекса, представлены в табл. 6. Основным требованием к матрице приемника диагностик ДЦГИ и АЛИТ является их разрешение. Для объекта размером 100×100 мм с учетом теоремы Шеннона—Найквиста и требуемого разрешения метода ДЦГИ — 100 мкм размер матрицы должен быть не менее 2000×2000 пикселей. Для метода АЛИТ требования к разрешению несколько ниже — 500 мкм, и, следовательно разрешение детектора должно быть не меньше, чем 400×400 пикселей.

Система сбора света метода LIDAR спроектирована для сбора света со всей площади 100×100 мм на матрицу лавинного фотодиода. В соответствии с расчетами для этого размер фоточувствительной матрицы фотодиода должен быть не менее 1.5×1.5 мм.

Для детекторов, используемых в методе АЛИТ, также необходимо при выборе спектрального диапазона учитывать, что граница оптического пропускания материала вакуумных окон в токамаке — сапфира составляет 5.5 мкм.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматриваются принципы построения системы мониторинга эрозии первой стенки и диверторных пластин токамака с реакторными технологиями ТРТ. В основе системы лежат методы: FM—LIDAR, ДЦГИ и АЛИТ. В предложенной концепции метод ДЦГИ обеспечивает обзор площади стенки ~100×100 мм, а поля наблюдения LIDAR и АЛИТ перестраиваются в пределах этой площади. Полное покрытие видимой из диагностического патрубка внутренней поверхности токамака обеспечивается за счет оптического сканирования поверхности первой стенки и дивертора. Метод LIDAR служит для получения априорной информации относительно угла наклона поверхности объекта по отношению к направлению распространения объектной волны ДЦГИ и о расстоянии до объекта для фокусировки выходных объективов систем сбора света. Метод АЛИТ позволяет выявлять локальные приповерхностные дефекты — трещины, поры, расслоения.

Таблица 6. Требования к оборудованию системы регистрации диагностического комплекса

Диагностика	LIDAR	ДЦГИ	АЛИТ
Разрешение (размер матрицы)	Не менее 1.5×1.5 мм	Не менее 2000×2000 пикселей	Не менее 400×400 пикселей
Спектральный диапазон	400—1100 нм	400—900 нм	1,5—5,1 мкм
Динамический диапазон (минимально детектируемая оптическая мощность)	Не менее 0,1 мкВт	Не менее 16 бит	Не менее 12 бит
Дополнительные требования	—	Наличие “глобального затвора”	Возможность записи с частотой не менее 1 кГц

Предложена схема совмещения оптических путей ввода лазерного излучения и сбора рассеянного света диагностических систем при размещении сканирующей системы максимально близко к границе плазмы. На основании оптического моделирования сделаны выводы о распределении плотности мощности и фазы лазерного излучения ДЦГИ в освещенной области первой стенки. Набег фазы от центра к краю не превышает π радиан при радиусе сферической волны — несколько метров падающего излучения. Информация о форме волнового фронта принципиально важна при постобработке данных диагностики ДЦГИ. Для методов ДЦГИ и АЛИТ предложена схема формирования изображения и определено пространственное разрешение в худшем случае на дистанции 4,5 м на краю изображения — 9 штрихов/мм и 2 штриха/мм соответственно. Для оценки энергетики собираемого света, проведено экспериментальное исследование функции рассеяния света на макетах облицовки дивертора ИТЭР, как объекта, наиболее близкого по своим свойствам к облицовке ТРТ. На основании полученных экспериментальных данных выполнен расчет энергетики собираемого сигнала для всех трех диагностических методов, проведена оценка вклада рассеянного лазерного излучения в собираемый сигнал и сформулированы требования к диагностическому оборудованию. На следующем этапе необходимо макетирование предложенной системы для экспериментальной валидации предложенных концептуальных решений.

Кроме мониторинга состояния защитной облицовки в круг задач комплекса диагностик первой стенки является измерение содержания изотопов водорода в ОПЭ ТРТ. Предполагается, что при реализации на установке ТРТ система мониторинга накопления топлива будет объединена с монитором эрозии в единый диагностический комплекс. В частности, планируется использовать общие внутривакуумные элементы ввода лазерного излучения и сбора света. В данной работе описывается только часть, относящаяся к исследованию эрозии ОПЭ. Описанию системы мониторинга накопления топлива в материалах первой стенки и дивертора ТРТ будет посвящена отдельная публикация.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Разработка общих принципов построения диагностического комплекса (разд. 1) выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание, тема № 0034-2019-0001). Разработка оптической схемы (разд. 2), а также анализ уровня сигналов и формулировка требований к оборудованию (разд. 3) выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-00023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *De Temmerman G., Hirai T., Pitts R. A.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60, P. 044018. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aaaf62>
2. *Schweer B., Huber A., Sergienko G., Philipps V., Irrek F., Esser H. G., Samm U., Kempenaars M., Stamp M., Gowers C., Richards D.* // J. Nucl. Mater. 2005. V. 337—339. P. 570. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.10.156>
3. *Pintsuk G., Bobin-Vastra I., Constans S., Gavila P., Rödig M., Riccardi B.* // Fusion Eng. Des. 2013. V. 88. P. 1858. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.05.091>
4. *Кукушкин А. С., Пуенов А. А.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 12. С. 1123.
5. *Будаев В. П.* // ВАНТ. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5.
6. *Autricque A., Peillon S., Gensdarmes F., Sow M., Fedorczak N., Roche H., Pluchery O., Grisolia C.* // Nucl. Mater. Energy. 2018. V. 17. P. 284. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.11.013>
7. *Cohen R., Ryutov D.* // Physics of Plasmas. 1998. V. 5. P. 2194. <https://doi.org/10.1063/1.872926>
8. *Reichle R., Andrew P., Bates P., Bede O., Casal N., Choi C. H., Barnsley R., Damiani C., Bertalot L., Dubus G., Ferreol J., Jagannathan G., Kocan M., Leipold F., Lisgo S. W., Martin V., Palmer J., Pearce R., Philipps V., Pitts R. A., Passedat G., Puiu A., Suarez A., Shigin P., Shu W., Vayakis G., Veshchev E., Walsh M.* // Journal of Nuclear Materials, 2015, V. 463, P. 180. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.01.039>
9. *Pedrini G., Calabuig A., Jagannathan G., Kempenaars M., Vayakis G., Osten W.* // Applied Optics. 2019. V. 58. Iss. 5. P. A147. <https://doi.org/10.1364/AO.58.00A147>
10. *Li T., Almond D. P. and Rees D. A. S.* // Meas. Sci. Technol. 2011, 22, 035701. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/3/035701>
11. *Courtois X., Sortais C., Melyukov D., Gardarein J. L., Semerok A., Grisolia Ch.* // Fusion Engineering and Design. 2011. V. 86, P. 1714. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.04.071>
12. *Cook R. L., Torrance K. E.* // ACM SIGGRAPH Graphics. 1981. V. 15. Issue 3. P. 307. <https://doi.org/10.1145/965161.806819>
13. *Beckmann P., Spizzichino A.* The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. Norwood MA, Artech House Inc., 1987.
14. *Schlick C.* // Computer graphics forum. 1994. V. 13. № 3. P. 233. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.1330233>

15. *Werner W.S. M., Glantschnig K., Ambrosch-Draxl C.* // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2009. V. 38. № 4. P. 1013. DOI: 10.1063/1.3243762
16. *Litnovsky A., Wienhold P., Philipps V., Sergienko G., Schmitz O., Kirschner A., Kreter A., Droste S., Samm U., Mertens Ph., Donn   A. H., TEXTOR Team, Rudakov D.,*
17. <http://www.lightsensing.com/>
18. *Бондаренко А. В., Высоцкий Д. В., Тугаринов С. Н.* // ВАНТ. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. № 1. С. 18.
- Allen S., Boivin R., McLean A., Stangeby P., West W., Wong C., DIII-D Team, Romanyuk A.* // J. Nucl. Mat. 2007. V. 363—365. P. 1395.

Conceptual Project for Diagnostics of Erosion of the First Wall and Divertor of the Tokamak with Reactor Technologies TRT

**A. G. Razdobarin^{a, b, c, *}, Ya. R. Shubin^a, A. A. Belokur^a, D. L. Bogachev^b, D. I. Eletsk^{a, b, c},
O. S. Medvedev^{a, b, c}, E. E. Mukhin^a, L. A. Snigirev^a, I. V. Alekseenko^c**

^a *Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021, Russia*

^b *Spectral-Tech, St. Petersburg, 194223, Russia*

^c *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041, Russia*

* *e-mail: Aleksey.Razdobarin@mail.ioffe.ru*

A conceptual design for diagnosing erosion of the first wall and divertor plates of a tokamak with reactor technologies TRT is proposed. The principles of constructing a diagnostic complex based on the following systems are developed: laser radar, dual-wavelength digital holographic interferometry and active laser IR thermography. An optical scheme is developed for combining the optical paths to input laser radiation and collect scattered light from diagnostic systems. To view the maximum area of the first wall, a scheme for optical scanning of the surface of the first wall and divertor is proposed. Based on optical simulation, the spatial distribution of the power density and phase of interferometry laser radiation in the illuminated region of the first wall is constructed, and the dimensions of the light fields and power density for IR thermography and laser radar diagnostics are determined. An image formation scheme is proposed and the spatial resolution is determined for interferometry and IR thermography methods. The light scattering function on models of the ITER divertor cladding is studied experimentally. The energy of the collected signal is calculated on the basis on the experimental data for all three diagnostic methods and the requirements for the diagnostic equipment are formulated.

Keywords: TRT tokamak, laser diagnostics, first wall