

УДК 533.9.07

КОНЦЕПЦИЯ МОНИТОРА ЭРОЗИИ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА

А.В. Бондаренко, Д.В. Высоцкий, С.Н. Тугаринов

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, Россия

Монитор эрозии предназначен для контроля процессов эрозии и напыления материалов на стенках вакуумной камеры токамака ИТЭР, проходящих под воздействием потоков излучения и частиц со стороны плазмы. Требуемые точность и диапазон измерений могут быть достигнуты с использованием метода двухволновой интерферометрии. Однако из-за вибрации конструкции установки снимки надо сделать за такой короткий промежуток времени, который не обеспечивают существующие фотокамеры. В данной работе предлагается использовать в интерферометре импульсный лазер с перестраиваемой длиной волны и рассматриваются способы регистрации интерферограмм в условиях вибраций. Проводятся оценки требуемых параметров лазера и анализ ожидаемых результатов.

Ключевые слова: эрозия и напыление, первая стенка, интерферометрия, токамак ИТЭР, лазер.

THE CONCEPT OF AN EROSION MONITOR FOR IN-VESSEL ITER COMPONENTS USING A PULSED LASER

A.V. Bondarenko, D.V. Vysotsky, S.N. Tugarinov

JSC «SRC RF TRINITI», Troitsk, Moscow, Russia

The erosion monitor is the ITER diagnostic system designed to control the erosion and deposition of materials on plasma faced components under the influence of particle flows and radiation from the plasma. The required accuracy and range of measurements can be achieved using the method of two-frequency speckle interferometry. However, due to vibration of the installation, the images should be taken in such a short time that existing CMOS cameras do not provide. In this paper, it is proposed to use an interferometer based on a pulse solid-state laser with tunable radiation wavelength, and methods for recording interferograms in vibration conditions are considered. The required laser parameters are estimated and the expected results are analyzed.

Key words: erosion and deposition, first wall, interferometry, tokamak ITER, laser.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-1-18-22

ВВЕДЕНИЕ

Согласно базовым требованиям проекта ИТЭР [1, 2] монитор эрозии является диагностической системой, необходимой для контроля эрозии и напыления материалов на компоненты, обращённые к плазме и подверженные максимальным радиационным и тепловым нагрузкам. Контроль заключается в мониторинге рельефа поверхности внутрикамерных компонентов. Тем самым обеспечивается безопасная работа токамака с точки зрения контроля переноса и накопления радиоактивных загрязнений в вакуумной камере. Максимальные тепловые нагрузки приходятся на стенки диверторных касет, которые и выбраны в качестве одной из контрольных поверхностей.

В рамках проекта ИТЭР были установлены требования к системе диагностики: восстановление картины объекта размером порядка десятков сантиметров по горизонтали и вертикали с пространственным разрешением ~ 1 мм, измерения слоёв эрозии и напыления толщиной от ~ 10 мкм при перепадах рельефа в диапазоне ~ 10 мм. Эти требования являются трудновыполнимыми даже для лабораторной установки. В условиях ИТЭР усложняют задачу удалённость объекта, сложность транспортировки изображения через систему биозащиты, нагрев оптических компонентов при отсутствии доступа для обслуживания. Отметим также, что поверхность исследуемого объекта (стенка диверторной кассеты) не является плоской и перпендикулярной к оптической оси и, кроме того, набрана из вольфрамовых пластин размером 12×28 мм со скошенной фаской 1×28 мм.

Как наиболее перспективный в работах [3—5] был предложен метод спекл-интерферометрии с регистрацией снимков на двух длинах волн и восстановлением методом фазового сдвига опорного пучка. В настоящей работе мы рассматриваем ограничения, накладываемые конструкцией токамака на возможности этого метода, и предлагаем возможные пути его модификации, которые позволят системе монитора эрозии приблизиться к требованиям проекта ИТЭР.

МЕТОД ДВУХВОЛНОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Спекл-интерферометрия с временным сдвигом фазы [6, 7] является хорошо разработанным методом восстановления профиля удалённой поверхности. В работах [3—5] проанализирована возможность выполнения с помощью этого метода перечисленных требований к диагностике и предложено конструктивное решение по его внедрению в ИТЭР.

Принципиальная схема измерений показана на рис. 1, где одно из зеркал интерферометра заменено объектом. Изображение объекта в рассеянном свете строится на ПЗС-матрице. Туда же подаётся пучок из опорного плеча интерферометра. Зеркало в опорном плече интерферометра установлено на пьезоэлектрическом преобразователе, что позволяет вводить контролируемое изменение оптического пути в опорном плече интерферометра. Таким способом записываются несколько интерферограмм, отличающихся дополнительным сдвигом фазы опорного пучка.

Пространственное распределение интенсивности сигнала на ПЗС-камере определяется как

$$I(x, y) = I_B(x, y) + I_M(x, y)\cos\varphi_\lambda(x, y), \quad (1)$$

где I_B — фоновая засветка, равная сумме интенсивностей опорного и предметного пучков; I_M — амплитуда интерферограммы, равная удвоенному среднему геометрическому от интенсивностей двух пучков; $\varphi_\lambda(x, y)$ — разность фаз, пропорциональная разности оптических путей в плечах интерферометра. Для извлечения информации о распределении фазы можно сделать четыре снимка с добавочным сдвигом фазы в опорном пучке $0, \pi/2, \pi$ и $3\pi/2$ радиан с распределениями интенсивности I_1, I_2, I_3, I_4 соответственно. В результате можно получить

$$\varphi_\lambda(x, y) = \arctg\{[I_4(x, y) - I_2(x, y)]/[I_3(x, y) - I_1(x, y)]\}. \quad (2)$$

Восстановленное таким образом распределение фазы позволяет рассчитать отличие исследуемой поверхности от плоской. Однако отражение когерентного пучка излучения с длиной волны λ от шероховатой поверхности создаёт в плоскости изображения случайную спекл-структуру, так что

$$\varphi_\lambda(x, y) = (4\pi/\lambda)h(x, y) + \varphi_{s\lambda}(x, y), \quad (3)$$

где $h(x, y)$ — разность оптического пути, усреднённая по размеру пространственного разрешения; $\varphi_{s\lambda}(x, y)$ — случайное спекл-распределение. Кроме того, сложный рельеф поверхности кассеты дивертора создаёт интерференционную картину, слишком сложную для расшифровки. Если использовать излучение на двух близких длинах волн λ_1 и λ_2 , то в предположении сильной скоррелированности спекл-структур $\varphi_{s\lambda_1}(x, y)$ и $\varphi_{s\lambda_2}(x, y)$ получаем

$$h(x, y) = [\varphi_{\lambda_1}(x, y) - \varphi_{\lambda_2}(x, y)]\Lambda/(4\pi), \quad (4)$$

где $\Lambda = \lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 - \lambda_2)$ играет роль эквивалентной длины волны. Таким образом, для восстановления рельефа поверхности необходимо сделать по четыре снимка на двух длинах волн. Увеличение эквивалентной длины волны до величин порядка миллиметра за счёт сближения λ_1 и λ_2 позволяет анализировать глубоко изрезанный рельеф ценой уменьшения пространственного разрешения.

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ИТЭР

В работе [5] предложена реализация оптической схемы для системы диагностики ИТЭР, вписанной в нижний порт № 08. Лазер, ПЗС-камера и скамья с оптическими элементами расположены в обслуживаемой зоне за биологической защитой.

Луч лазера расщепляется на опорный и зондирующий лучи. Зондирующий коллимированный луч с помощью системы линз и зеркал проходит через недоступную для обслуживания зону в атмосферном воздухе, вакуумное окно в системе биозащиты и участок в вакуумной камере. Последнее зеркало на расстоянии

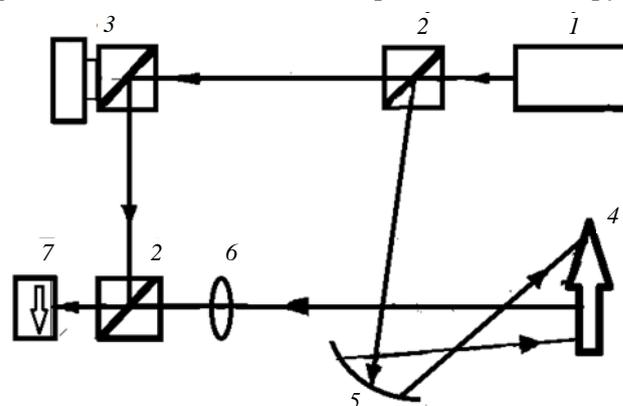


Рис. 1. Схема спекл-интерферометра: 1 — лазер; 2 — полупрозрачное зеркало; 3 — зеркало на пьезоприводе; 4 — объект измерений; 5 — сферическое зеркало; 6 — объектив; 7 — ПЗС-камера

0,5 м от мишени (стенки диверторной кассеты) — вогнутое, так что объект освещается расходящимся пучком. Рассеянный объектом свет собирается и передаётся обратно той же оптической системой и по тому же пути в виде коллимированного пучка. Далее с помощью системы линз и светоделителей изображение объекта строится на ПЗС-матрице, туда же подаётся и опорный пучок. Характерные размеры такой оптической системы: расстояние от детектора до объекта ~15 м, диаметр окна в вакуум в системе биозащиты ~100 мм и размер изображения ~10 мм.

Напомним основные соотношения, определяющие разрешающую способность метода спекл-интерферометрии [8]. Требуемая длина когерентности излучения из-за наклонности поверхности дивертора не менее 30 см (при скомпенсированной разнице длин опорного и предметного пучка). Поэтому ширина спектральной линии излучения лазера, работающего на длине волны 1 мкм, должна быть около 3 пм. Для простейшей оптической системы, содержащей линзу с апертурой a и фокусным расстоянием f , глубина резкости определяется соотношением $L = \lambda (f/a)^2$, что для линзы с фокусным расстоянием 10 м даёт глубину резкости всего ~10 мм, причём для увеличения глубины резкости необходимо уменьшать апертуру. Характерный размер спекла в области изображения составляет $D_{sp} = 2,4\lambda v/a$, где v — расстояние от линзы до плоскости изображения, что приводит к размеру спекла на изображении ~0,2 мм. Принимая во внимание, что интерференционное изображение объекта образовано спекл-пятнами, можно получить, что пропускная способность оптического тракта ограничена размером апертуры окна в вакуум и составляет 4—5 мегапикселей. Таким образом, пропускная способность оптического тракта хотя и позволяет сфотографировать поверхность кассеты дивертора с поперечным разрешением 1 мм, но для записи интерференционных полос уже недостаточна — необходимо уменьшить размер фотографируемой области на порядок.

Кроме того, отклонение поверхности объекта от плоскости, перпендикулярной к оптической оси, приводит к появлению интерференционных полос на изображении. Максимально допустимый наклон предметной плоскости определяется из равенства размера спекла и ширины интерференционной полосы $\chi = \lambda/D_{sp}$ (порядка ma/f , где m — коэффициент увеличения), что значительно больше наклона поверхности на краях поля зрения. Впрочем можно попытаться скомпенсировать этот наклон добавлением специально рассчитанного дифракционного оптического элемента [9] в тракт опорного пучка. Более аккуратное определение разрешающей способности требует дополнительных численных и экспериментальных исследований.

Наконец, экспонирование и фотографирование поверхности диверторной кассеты осуществляется через вогнутое зеркало, находящееся в непосредственной близости от плазмы токамака. Даже определение текущего рельефа этого зеркала, который влияет на качество интерференционной картины, является сложной задачей [10].

Первоочередной проблемой для интерферометра является вибрация мишени относительно приёмника излучения, приводящая к снижению контрастности интерференционной картины и принципиальной невозможности восстановить фазу сигнального пучка. Вибрации для рассматриваемой оптической схемы будут присутствовать даже при проведении измерений в неработающей установке в промежутках между сериями рабочих импульсов. В настоящее время нет данных о характере вибраций в зоне размещения диагностической системы. При обсуждении вариантов диагностики принималось, что частота колебаний конструкции может достигать до 150 Гц, амплитуда — до 1 мкм. Регистрация снимков должна происходить за время значительно меньше периода колебаний. Если период колебаний принять ~6 мс, то за время 0,6 мс надо сделать 8 снимков, т.е. надо снимать с частотой более 10 000 кадров в секунду, что на два порядка превышает возможности современных камер с размером матрицы ~5 мегапикселей. Кроме того, при использовании для освещения мишени непрерывного лазера требуется механический затвор камеры с временем срабатывания не более 1/1500 с. Таким образом, требуемая скорость съёмки в условиях вибрации ограничивает доступный размер ПЗС-матрицы и, как следствие, пространственное разрешение, частоту интерференционных полос и размер поля зрения.

КОНЦЕПЦИЯ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРОМ

Ещё в работе [4] рассматривался вариант использования импульсного лазера на красителе для освещения стенки дивертора. В настоящее время коммерчески доступны двухчастотные твердотельные

импульсные лазеры с требуемой шириной линии ~ 3 пм. Такой лазер с длиной волны излучения около 1 мкм может генерировать однократные импульсы длительностью 10—100 нс и энергией импульса до 50 мДж и больше. Этой энергии будет достаточно для экспозиции четырёх кадров с учётом диффузного рассеяния на объекте и потерь в оптическом тракте. При минимальном сервисном обслуживании лазер стабилен по частоте и при необходимости может быть дополнен внутривибраторным эталоном, стабилизирующим частоту и уменьшающим ширину линии до ~ 1 пм.

Возможны два варианта решения проблемы снятия нескольких спекл-интерферограмм в условиях вибрации. Первый вариант (рис. 2) подходит в случае вибраций с небольшим числом степеней свободы, повторяющейся периодической картины. Поскольку основной вклад в размытие интерференционной картины вносят колебания вдоль оптической оси, предлагается регистрировать восемь кадров (две длины волны и для каждой по четыре значения сдвига фазы опорного пучка) — кадр за кадром в последовательности импульсов. Осевые колебания контролируются по осциллограмме с помощью луча от непрерывного (He—Ne)-лазера, который пропускается через диагностическую систему. В момент, соответствующий одному и тому же положению объекта (одной и той же точке на осциллограмме), с детектора снимается сигнал синхронизации для импульсного лазера.

Второй вариант требует разделения опорных и сигнальных пучков по длинам волн, расщепления со сдвигом по фазе и сведения на ПЗС-матрицах (рис. 3). Сигнальные и опорные лучи расщепляются на ряд пучков с заданным сдвигом по фазе и регистрируются одновременно посредством набора ПЗС-камер. Расщепление по частотам λ_1 и λ_2 удобно производить голографическими брэгговскими решётками, а сдвиг опорной волны на нужное число полувольт — добавлением соответствующих фазовых пластин в оптические пути опорных пучков.

Комбинируя рассмотренные два метода снятия интерферограмм, можно исключить влияние вибрации зеркал и поверхности диверторной кассеты на качество изображения. В то же время стенка диверторной кассеты даже без эрозии и осаждения пыли имеет сложный рельеф с модуляцией высоты ~ 1 мм. Этот рельеф создаст большое количество интерференционных полос даже при компенсации неперпендикулярности поверхности дивертора относительно оптической оси. Возможными путями улучшения разрешающей способности системы являются съёмка объекта по частям с последующей сшивкой и использование более чем двух длин волн, что позволяет создать несколько синтетических длин волн и разделить на интерферограммах неровности рельефа разных пространственных масштабов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование перестраиваемого по частоте или двухчастотного импульсного лазера является перспективным для мониторинга поверхности дивертора ИТЭР методом спекл-интерферометрии. Рассмотренный метод позволяет скомпенсировать влияние вибраций стенки дивертора и зеркал записью восьми изображений при одном и том же положении объекта или одновременной записью интерферограмм с

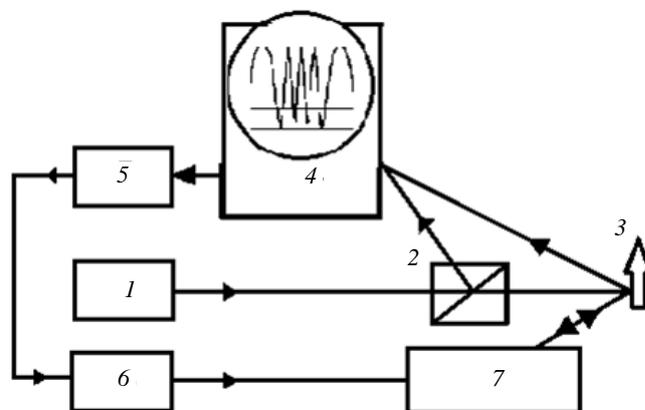


Рис. 2. Первый вариант: 1 — стационарный гелий-неоновый лазер; 2 — светоделитель; 3 — объект; 4 — детектор; 5 — устройство синхронизации; 6 — импульсный лазер; 7 — интерферометр

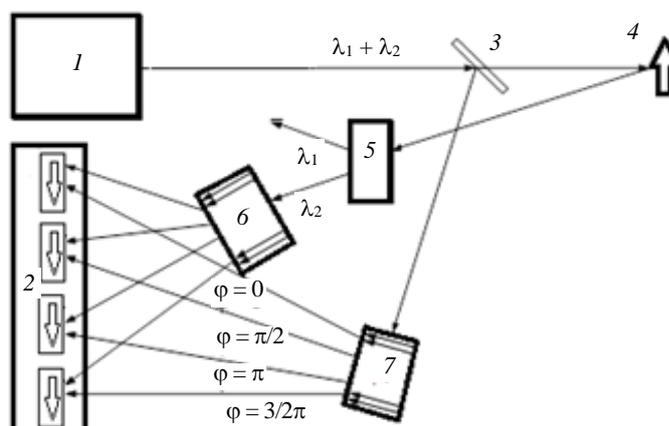


Рис. 3. Второй вариант: 1 — двухволновый лазер; 2 — ПЗС-камеры; 3 — светоделительная пластинка; 4 — объект; 5 — делитель луча по длинам волн; 6 — делитель предметного пучка; 7 — устройство для формирования опорных пучков

соответствующими сдвигами фаз опорных пучков. Выбор конкретной реализации системы записи кадров и определение возможности компенсации разности путей предметного и опорного пучков и наклона объектной плоскости требуют дополнительных экспериментальных исследований на макете установки.

В наибольшей степени пространственное разрешение интерференционной картины, а также объём передаваемой информации ограничены размерами спекл-пятен, которые, в свою очередь, заданы оптическим дизайном. Разрешающая способность оптической системы и сложность рельефа объекта не позволяют провести восстановление профиля объекта с требуемой точностью на поверхности заданного размера. Для определения реально достижимых точности измерения рельефа и пространственного разрешения необходимо численное моделирование в дифракционном приближении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITER Project Requirements, ITER. Bhubaneshwar, India, 2009.
2. Shimada M., Pitts R.A., Ciattaglia S., Carpentier S., Choi C.H., Dell Orco G., Hirai T., Kukushkin A., Lisgo S., Palmer J., Shu W., Veshchev E. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. S996; doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.217.
3. Gauthier E., Roupillard G. — J. Nucl. Mater., 2003, vol. 313—316, p. 701—705; doi 10.1016/S0022-3115(02)01448-4.
4. Gauthier E., Colledani G., Jourd'heuil L., Paterlini J.-C., Migozzi J.-B., Jacquot P. — IEEE Trans. on Plasma Sci., 2014, vol. 42, p. 1785—1789; doi 10.1109/TPS.2014.2315527.
5. Gauthier E., Migozzi J.-B., Paterlini J.-C., Pallier G. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, p. S1182-S1186; doi 10.1016/j.jnucmat.2010.11.014.
6. Creath K. — Progress in Optics, 1988, vol. 26, p. 349.
7. Бадалян Н.П., Кийко В.В., Кислов В.И., Козлов А.Б. — Квант. электр., 2009, т. 38, № 5, с. 477.
8. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. — М.: Мир, 1986.
9. Napartovich A.A., Elkin N.N., Troschieva V.N., Vysotsky D.V., Leger J.R. — Appl. Opt., 1999, vol. 38, p. 3025; doi.org/10.1364/AO.38.003025.
10. Kononov V.G., Voytsenya V.S., Makhov M.N., Ryzhkov I.V., Shapoval A.N., Solodovchenko S.I., Stan A.F., Bondarenko V.N., Donne A.J.H., Litnovsky A. — Rev. Sci. Instr., 2016, vol. 87, p. 093507; dx.doi.org/10.1063/1.4961031,



Александр Владимирович Бондаренко, с.н.с., к.ф.-м.н.; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия
A.Bondarenko@iterf.ru



Дмитрий Владимирович Высоцкий, в.н.с., к.ф.-м.н.; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия



Сергей Николаевич Тугаринов, с.н.с.; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия

Статья поступила в редакцию 17 января 2018 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 18—22.