

УДК 533.9

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХДЛИННОВОЛНОВОЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗНОСА ЗАЩИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

© 2024 г. И. В. Алексеенко^{а, *}, А. М. Кожевникова^а, А. Г. Раздобарин^б,
Д. И. Елец^б, О. С. Медведев^б

^аБалтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

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

*e-mail: IAlekseenko@kantiana.ru

Поступила в редакцию 03.10.2024 г.

После доработки 01.11.2024 г.

Принята к публикации 10.11.2024 г.

Продemonстрирована возможность применения метода двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии для оценки износа защитных элементов сферического токамака Глобус-М2 после рабочих плазменных разрядов. На данном этапе работ защитные элементы были извлечены из разрядной камеры токамака и использовались в качестве образцов в голографическом комплексе. Представлена схема голографического интерферометра для регистрации первичных голографических изображений, в котором управление системами регистрации и контроля длины волны излучения осуществляется через программно-аппаратный комплекс в реальном масштабе-времени. Представлены результаты измерений формы элементов токамака. Показано, что при изменении разности длин волн меняется чувствительность метода измерений, а в предложенной конфигурации оптической схемы возможно определить минимальное значение изменения формы на уровне 10–30 мкм. При этом ошибка определения разности фаз, по которой проводится оценка профиля поверхности, в цифровом методе может достигать порядка $2\pi/40$.

Ключевые слова: токамак, оптический неразрушающий контроль, цифровая голографическая интерферометрия

DOI: 10.31857/S0367292124120054 EDN: EEXBHY

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка диагностик, обращенных к плазме элементы (ОПЭ), является необходимым шагом в развитии термоядерных установок следующего поколения для обеспечения их надежности и безопасности при эксплуатации. В условиях длительных разрядов и высокой энергетической нагрузки, несомненно, могут возникать разрушения и/или модификации материалов внутренней облицовки [1, 2]. Недавние исследования, проводимые в рамках проекта ITER, показали, что тепловые нагрузки выше 15 МВт/м² с большой вероятностью приводят к возникновению трещин на всю глубину макетов вольфрамовых мишеней [3], а им-

пульсные 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 ITER 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 TRT ожидаемые тепловые нагрузки на диверторные мишени при мощности дополнительного

нагрева >30 МВт будут превышать 10 МВт/м² [4] в стационарном режиме и $0.3\text{--}0.5$ МДж/м² во время переходных процессов, приближаясь, таким образом, к пределу выносимости используемых материалов.

Таким образом, достаточно остро стоит проблема контроля разрушения и эрозии элементов ОПЭ. 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 по возможности исключить вскрытие разрядной камеры реактора.

Первым токамаком, в котором разработке таких методов было уделено пристальное внимание, является международный проект ITER. Предлагаемый для ITER набор диагностических методов включает в себя эндоскопы для обзора внутренней поверхности, системы метрологии на основе лазерного радара (LIDAR), монитор эрозии высокого разрешения на основе двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии (ДЦГИ) [5]. В настоящее время проект ИТЭР находится на стадии строительства и еще не закончен. Все приведенные данные об устойчивости внутренних стенок токамака имеют оценочные характеристики и являются результатом моделирования процессов воздействия на защитные стенки. Однако следует отметить тот факт, что в работе [5] проводились исследования защитного элемента, который непосредственно не был извлечен из камеры реактора. Он является модельным образцом, который подвергли искусственной деградации в целях проверки возможности применения голографического метода для оценки износа таких объектов.

В отличие от вышеприведенных исследований в данной работе мы рассматриваем возможность непосредственно на имеющемся рабочем реакторе реализовать метод оценки износа и разрушения защитных элементов сферического токамака Глобус-М2, которые были извлечены из камеры реактора в процессе его регламентного обслуживания. Тем более, что степень разрушения на токамаке Глобус-М2 ниже и, таким образом, чувствительность методов, способных к детектированию

изменений формы поверхности, должна быть выше.

В качестве метода оптического неразрушающего контроля голографическая интерферометрия относится к высокочувствительным и бесконтактным методам [6, 7]. В частности, двухдлинноволновая цифровая голографическая интерферометрия относится к методу, который позволяет проводить измерение и оценку формы поверхности исследуемого объекта [8, 9]. При этом для осуществления такого необходимо использовать когерентные источники электромагнитного излучения с перестраиваемой длиной волны.

Таким образом, использование в качестве метода диагностики ОПЭ техники двухдлинноволновой голографической интерферометрии может создать технологический задел измерительных методик контроля износа стенок токамак-реакторов.

2. ПРИНЦИП ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Основу метода составляет сравнение фаз оптических волновых полей, зарегистрированных и восстановленных с помощью техники цифровой голографической интерферометрии [10]. Голограммы как результат интерференции объектного (изображения исследуемого объекта) и опорного поля регистрируются на цифровую камеру высокого разрешения. Причем запись голографических изображений осуществляется для каждой отдельной длины волны либо последовательно, либо одновременно.

Расчет фазы объектной волны осуществляется с использованием преобразования Фурье. Так, использование преобразования Фурье для зарегистрированной интенсивности позволяет разделить в области пространственных частот интенсивность опорного поля $|R_H(x, y)|^2$, интенсивность объектного поля $|U_H(x, y)|^2$, а также распределение самого объектного поля $R_H^*(x, y) \times U_H(x, y)$. Операция фильтрации и использование обратного преобразования Фурье над таким полем $FFT^{-1}(R_H^*(x, y) \times U_H(x, y))$ позволяет восстановить его фазовое распределение.

Распределение фаз для двух объектных полей $U_{H1}(x, y)$ и $U_{H2}(x, y)$, соответствующих двум различным состояниям описывается выражением [11]

$$\Delta\varphi(x, y) = \arg \left[e^{-i(\varphi_{H2}(x, y) - \varphi_{H1}(x, y))} \right]. \quad (1)$$

В случае регистрации голографических изображений на разных длинах волн восстановленная разность фаз будет соответствовать форме исследуемого объекта. Так, если направление освещения и наблюдения объекта перпендикулярны его поверхности, то для рассчитанной разности фаз в 2π изменение профиля поверхности объекта будет определяться выражением [12]

$$\Delta z = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2|\lambda_1 - \lambda_2|} = \frac{\Lambda}{2}, \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн, используемые для записи голограмм, а Λ — синтетическая длина волн. Важным преимуществом данного метода является возможность изменения чувствительности метода путем изменения разности длин волн.

3. ОПТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ЦИФРОВОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Оптическая схема регистрации голографических изображений сконфигурирована как схема регистрации голограмм сфокусированного изображения. На рис. 1 представлена рабочая схема голографического интерферометра. В качестве источника когерентного излучения использовался непрерывный кольцевой Ti:Sa лазер Техноскан TIS-SF-07 с перестраиваемой длиной волны. Диапазон перестройки длин волн составлял 100 нм и лежал в диапазоне 750–850 нм. Выходная энергия излучения составляла 1.2 Вт, а минимальная

перестройка длины волны составляла 0.085 нм. В качестве лазера накачки использовался лазер Coherent Verdi V-18 с длиной волны излучения 532 нм и выходной мощностью 10 Вт. Перестраиваемый лазер имеет очень узкую ширину линии излучения, что позволяет оценить длину когерентности в 30 м. Таким образом, в лабораторной конфигурации нет необходимости требовать согласования длин опорного и объектного плеч интерферометра. Контроль и измерение длины волны для определения чувствительности метода осуществляется с использованием измерителя длины волны Angstrom WS7 UV. Точность определения длины волны составляет менее 0.01 пм. Регистрация голограмм осуществлялась на камеру Pulnix-1402 CL с матрицей 1040×1390 пикселей и размером пиксела 6.5 мкм.

Измерительный комплекс был полностью автоматизирован и позволял проводить реконструкцию голограмм, расчет и отображение разности фаз при перестройке длины волны в реальном времени. Таким образом, можно непосредственно контролировать чувствительность метода двухдлинноволновой голографической интерферометрии. Автоматизация осуществлялась на базе программно-аппаратного комплекса LabView.

Следует отметить, что освещение объекта осуществлялась коллимированным излучением, а угол между направлением освещения и наблюдения составляет 0° . Данная конфигурация по-

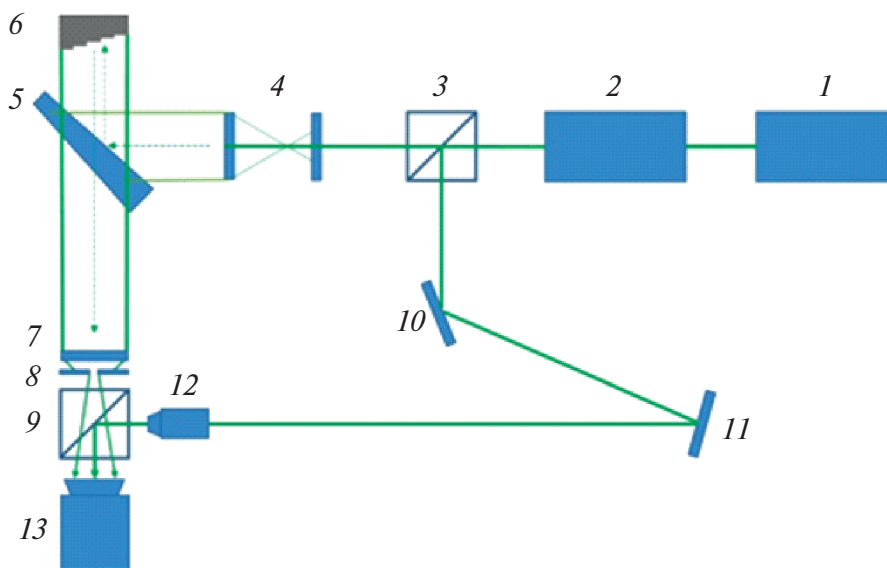


Рис. 1. Схема цифрового голографического интерферометра: 1 — лазер накачки; 2 — перестраиваемый лазер; 3 — светоделитель; 4 — коллиматор; 5 — оптический клин; 6 — объект; 7 — собирающая линза; 8 — диафрагма; 9 — светоделитель; 10, 11 — зеркало; 12 — собирающая линза/микрообъектив; 13 — ПЗС-камера.

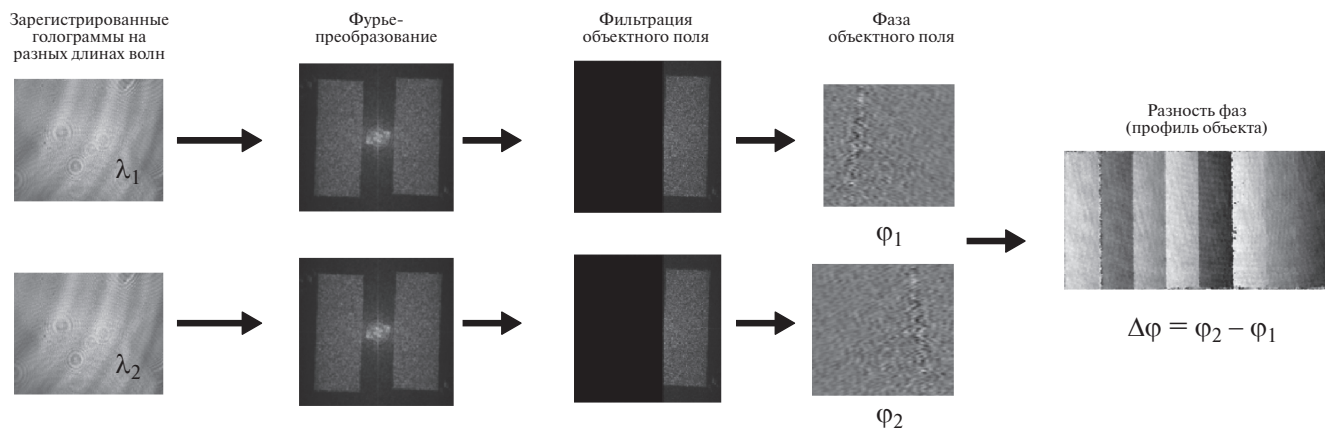


Рис. 2. Алгоритм реконструкции разности фаз в двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии.

звolyет избежать дополнительного набега фаз при перестройке длины волны, что требует численной компенсации такого набега.

Как отмечалось выше, алгоритм реконструкции фазы волнового фронта осуществляется с использованием преобразования Фурье голограмм, зарегистрированных в разные моменты времени и на разных длинах волн. На рис. 2 продемонстрирован алгоритм реконструкции и расчета разности фаз для оценки рельефа исследуемой поверхности.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗАЩИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

Экспериментальная работа была начата с верификации измерительного комплекса путем проведения измерений высоты профиля тест-объекта. В качестве тест-объекта была выбрана ступенчатая структура размерами 40×25 мм, изготовленная из алюминия с диффузно отражающей поверхностью. Высота ступеней варьировалась в определенной последовательности: 2, 1 мм, 400, 200, 100, 40, 20 мкм. В силу точности обработки на станке ошибка по высоте может составлять 2 мкм. Ошибка же метода при условии определения значения разности фаз, например, в $2\pi/50$ может составить для синтезированной длины волны в 600 мкм около 6 мкм.

При измерении профиля тест-объекта с максимальной высотой ступенек 2 мм синтезированная длина волны составляла 7.56 мм, что соответствует разности длин волн 0.09 нм ($\lambda_1 = 825.05$ нм и $\lambda_2 = 825.14$ нм). На рис. 3 изображен тест-объект.

Фазовое распределение на интерферограмме, а также реконструированный профиль тест-объекта показаны на рис. 4а и б соответственно. Нетрудно заметить, что при заданной разности длин волн метод имеет минимальную чувствительность на уровне 100 мкм, а ступеньки на уровне 40 и 20 мкм не разрешаются. Для увеличения чувствительности метода необходимо увеличить разность длин волн, согласно выражению (2).

Анализ ОПЭ, извлеченных из разрядной камеры токамака Глобус-М2 в ходе регламентных работ, проводился на той же оптической схеме. В качестве объектов были выбраны два защитных графитовых элемента с различной степенью износа, которые размещались в области центрального столба первой стенки токамака. На рис. 5а и 7а представлены изображения данных элементов. В нашей оптической схеме область наблюдения объектов составляла 2.5×3 см². Визуальный анализ образцов позволяет сказать, что глубина и степень разрушения поверхности различны. Таким образом, для детектирования и оценки профиля поверхности требуется использовать метод ДЦГИ с различной чувствительностью, для каждого объекта.

Для ОПЭ-1, изображенного на рис. 5а, запись голограмм осуществлялась на длинах волн $\lambda_1 = 780.78$ нм и $\lambda_2 = 782.27$ нм, что соответствует синтетической длине волны $\Lambda = 400$ мкм. На рис. 5б представлена разность фаз, соотнесенная с профилем исследуемой поверхности, согласно выражению (2), а рис. 5в — трехмерное реконструированное изображение поверхности. Для анализа дефектов на поверхности ОПЭ-1 следует обратить внимание на рис. 5г. На данном рисунке исследу-

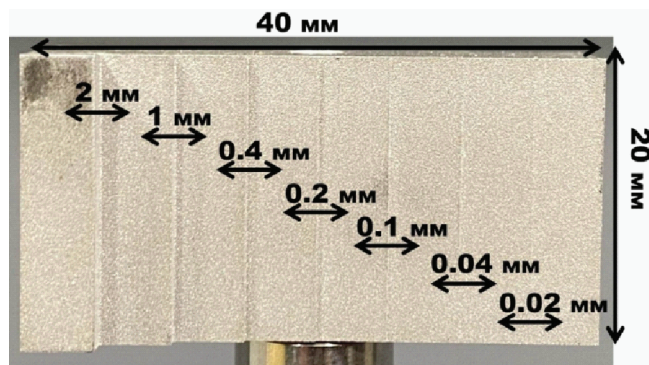
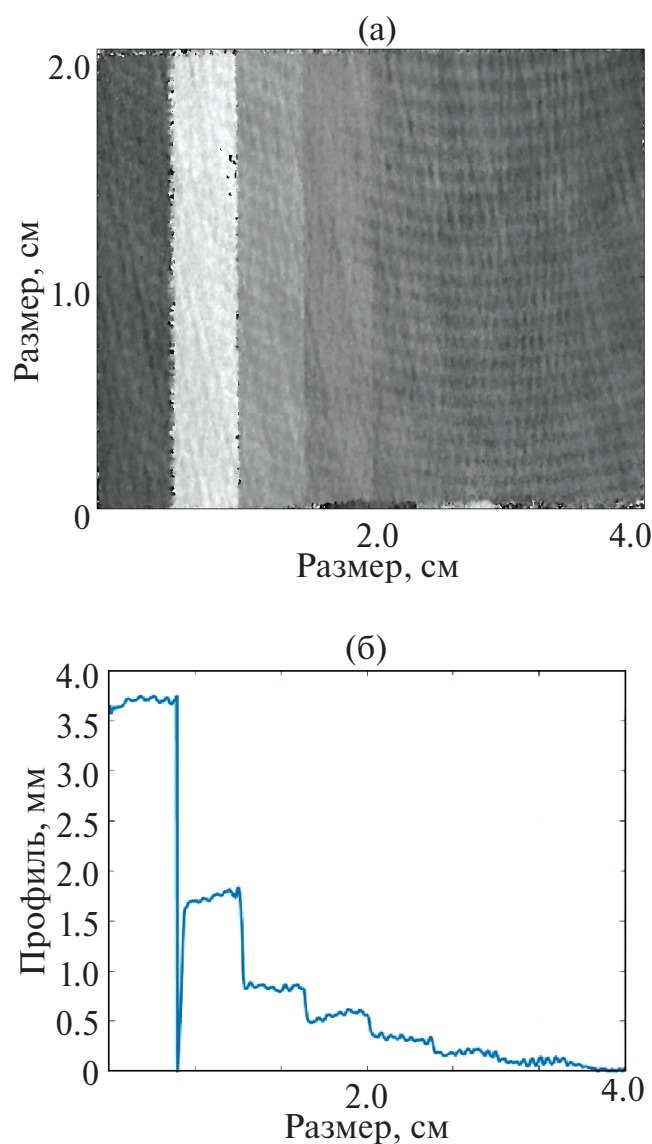


Рис. 3. Тест-объект (ступенчатая структура).


 Рис. 4. Результаты измерения формы тест-объекта: интерферограмма, соответствующая синтезированной длине волны $\Lambda = 7.56$ мм (а); реконструированный профиль ступеней тест-объекта представление поверхности объекта (б).

емая поверхность представлена в виде двумерного распределения интенсивности. Данное представление удобно для идентификации дефектов. На рис. 5а белыми, а на рис. 5г черными линиями с номерами 1 и 2 показаны области, вдоль которых был построен профиль дефекта поверхности. Результат измерения представлен на рис. 6 для линий 1 и 2 соответственно.

Аналогичная процедура оценки степени износа поверхности была применена для второго ОПЭ-2. На рис. 7 и 8 представлены результаты измерений для такого элемента. При этом регистрация голограмм проводилась на длинах волн $\lambda_1 = 780.78$ нм и $\lambda_2 = 781.28$ нм, что соответствует синтетической длине волны $\Lambda = 1.48$ мм. Так же как и в случае с первым элементом, на рис. 7а белыми и на рис. 7г черными линиями с номерами 1 и 2 показаны области, вдоль которых строился профиль дефекта поверхности. Результат измерения представлен на рис. 8 для линий 1 и 2 соответственно.

В качестве проверки метода одна из поверхностей ОПЭ-1 была измерена на промышленном профилометре NanoSystem NV-1800 с вертикальным разрешением 0.1 нм. Измеренный с его помощью профиль вдоль линии 1 (см. рис. 5) дает значение в 150 мкм. В нашем методе профиль составляет около 140 мкм.

В нашем случае диапазон чувствительности метода определялся синтезированной длиной волны при регистрации, что указано в результатах. Можно сказать, что диапазон чувствительности (разность фаз в 2π) варьировался от 3.78 мм до 200 мкм и в диапазоне длин волн от 725 до 825 нм.

В качестве оценки ошибки измерений можно воспользоваться результатами измерений тест-объекта. На рис. 4 минимально детектируемое значение высоты ступеньки соответствует 100 мкм. Таким образом, для синтезированной длины волны $\Lambda = 7.56$ мм разность фаз в 2π будет соответствовать 3.78 мм, и для высоты в 100 мкм составит около $2\pi/40$. За ошибку измерения можно принять минимально детектируемое значение высоты профиля для данной чувствительности метода (разности длин волн) и в пределах $2\pi/40$. Анализ оценок ошибки метода измерения технических поверхностей был рассмотрен в том числе в работе [13].

Следует обратить внимание на трудности при анализе полученных данных. Во-первых, при достаточно глубоких и тонких нарушениях поверх-

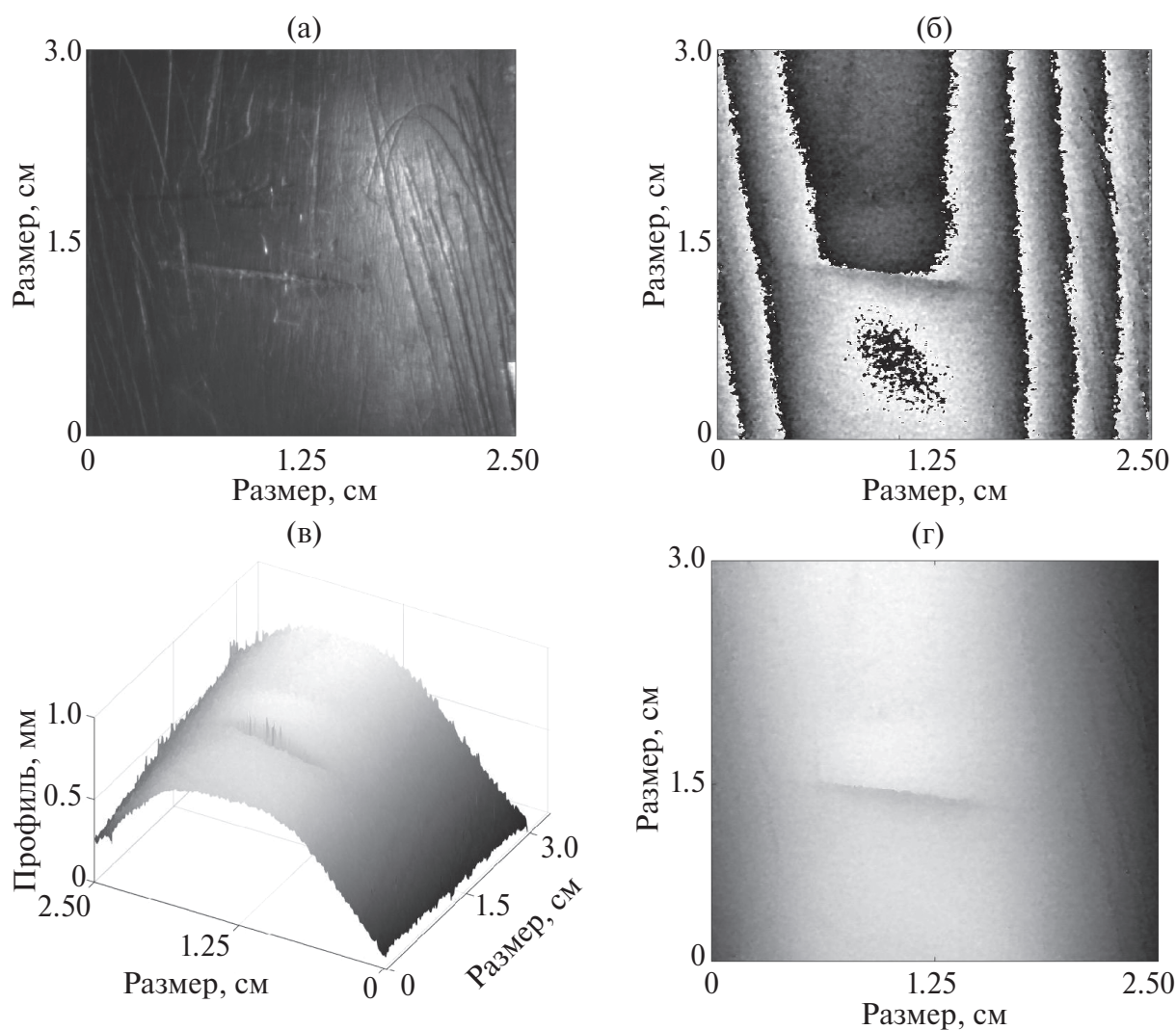


Рис. 5. Результаты измерения формы ОПЭ-1: изображение элемента с проявленными дефектами поверхности (а); интерферограмма, соответствующая синтезированной длине волны $\Lambda = 400$ мкм (б); трехмерное реконструированное представление поверхности объекта (в); двумерное распределение поверхности (г).

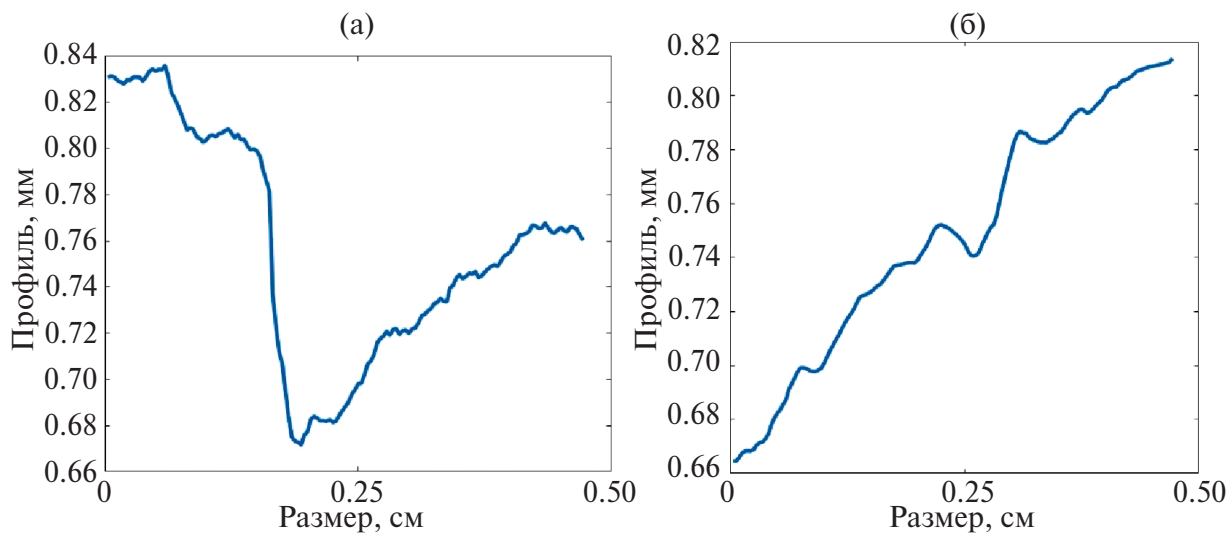


Рис. 6. Результаты измерения профиля ОПЭ-1: вдоль линии 1 (а), вдоль линии 2 (б).

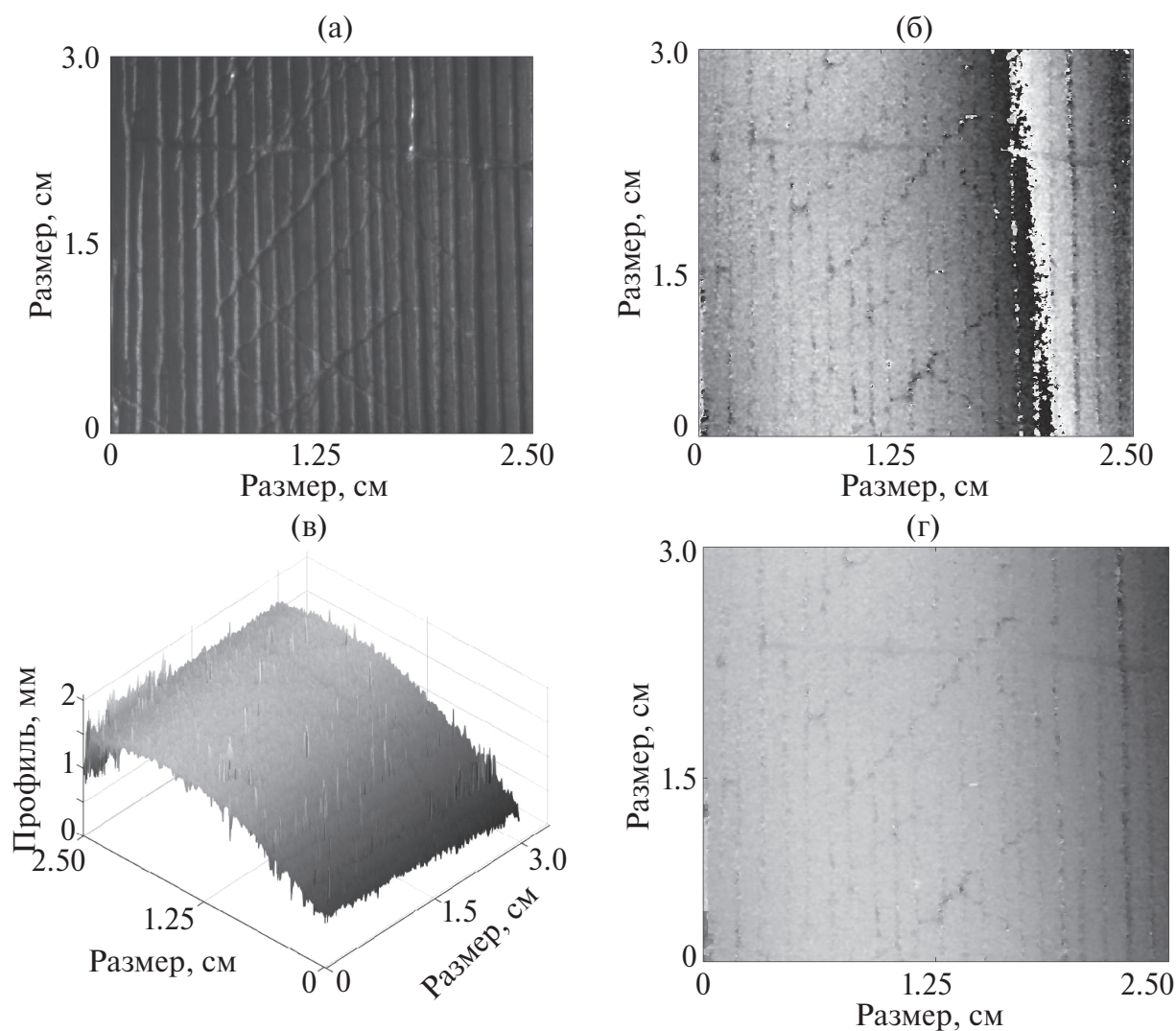


Рис. 7. Результаты реконструкции формы ОПЭ-2: изображение элемента с проявленными дефектами поверхности (а); интерферограмма, соответствующая синтезированной длине волны $\lambda = 1.48$ мм (б); трехмерное реконструированное представление поверхности объекта (в); двумерное распределение поверхности (г).

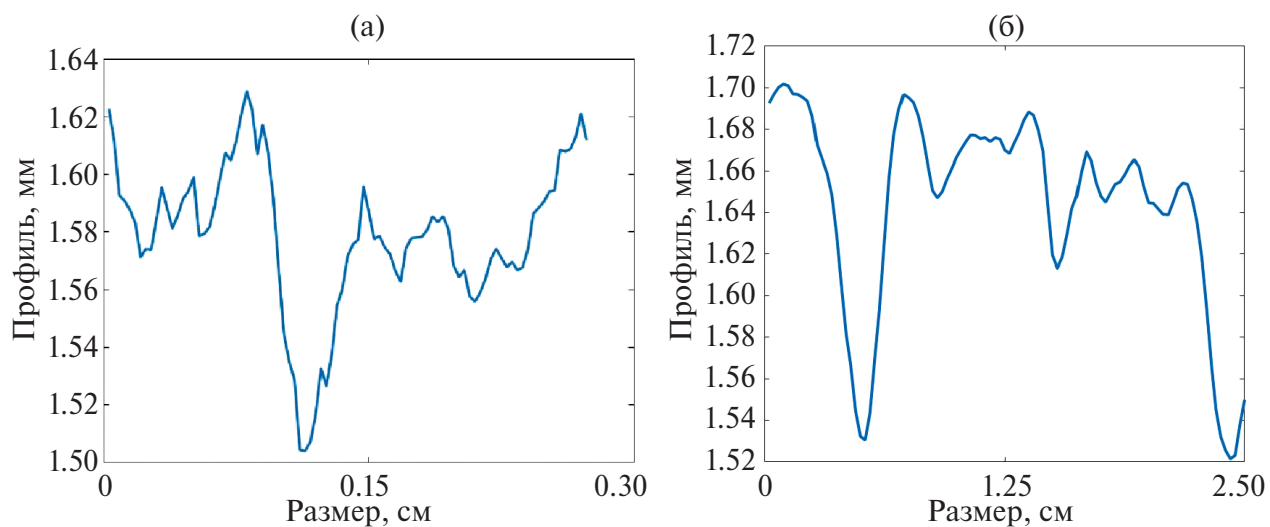


Рис. 8. Результаты измерения профиля ОПЭ-2: вдоль линии 1 (а), вдоль линии 2 (б)

ности объектов излучение лазера может не отражаться от таких дефектов в направлении детектора. Таким образом, дефект можно идентифицировать качественно, но получить достоверную информацию о профиле поверхности будет невозможно. Во-вторых, при построении поверхности из полученной интерферограммы численным методом Unwarp мелкие или частые дефекты на поверхности могут восприняться как шумы, которые могут быть отфильтрованы алгоритмом и не детектироваться при дальнейшем анализе.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной статье показана возможность применения метода двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии для контроля износа и разрушения поверхности обращенных к плазме защитных элементов токамак-реактора на примере реактора Глобус-М2. Использование методов цифровой голографической интерферометрии позволяет проводить бесконтактный и неразрушающий мониторинг поверхности, что позволяет разработать и разместить измерительный комплекс вне разрядной камеры реактора. Метод также обладает достаточной чувствительностью и в данной реализации способен измерить минимальное изменение формы поверхности объекта в диапазоне 10–30 мкм, а ошибка определения разности фаз может оцениваться на уровне $2\pi/40$. Использование программно-аппаратного управления системой захвата изображения позволяет проводить первичное наблюдение в реальном масштабе времени.

Представленные в публикации результаты получены за счет средств 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. DOI: 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. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2004.10.156.
3. Pintsuk G., Bobin-Vastra I., Constans S., Gavila P., Rödiger M., Riccardi B. // Fusion Eng. Des. 2013. V. 88. P. 1858. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2013.05.091.
4. Кукушкин А.С., Пшенов А.А. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 1123.
5. Pedrini G., Alekseenko I., Jagannathan G., Kempenaars M., Vayakis G., Osten W. // Applied Optics. 2019. V. 8(5). P. A147.
6. Belashov A.V., Zhikhoreva A.A., Semenova I.V. // Applied Sciences. 2022. V. 12. P. 1687.
7. Kozhevnikova A.M., Alekseenko I.V., Schitz D.V. // Applied Optics. 2023. Т. 62. С. 7881.
8. Friesem A.A., Levy U. // Applied Optics. 1976. V. 15. P. 3009.
9. Claus D., Alekseenko I., Grabherr M., Pedrini G., Hibst R. // Light: Advanced Manufacturing. 2021. V. 2(4). P. 403.
10. Schnars U., Jueptner W. Digital holography: digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques. Berlin: Springer, 2005.
11. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. // J. Optical Soc. America. 1982. V. 72.1. P. 156.
12. Kreis T. Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods. N.Y.: John Wiley & Sons, 2006.
13. Claus D., Alekseenko I., Grabherr M., Pedrini G., Hibst R. // Light: Advanced Manufacturing. 2021. V. 2. P. 29.

APPLICATION OF DUAL-WAVELENGTH DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR OPTICAL NONDESTRUCTIVE WEAR TESTING OF PROTECTIVE ELEMENTS OF THE SPHERICAL TOKAMAK GLOBUS-M2

I. V. Alekseenko^{a, *}, A. M. Kozhevnikova^a, A. G. Razdobarin^b, D. I. Elels^b, and O. S. Medvedev^b

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

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

**e-mail: IAlekseenko@kantiana.ru*

The possibility of using the method of dual-wavelength digital holographic interferometry to assess the wear of protective elements of the Globus-M2 spherical tokamak after working plasma discharges is demonstrated. At this stage of the work, the protective elements were removed from the tokamak discharge chamber and used as samples in the holographic setup. A diagram of a holographic interferometer for recording primary holographic images is presented, in which control of the radiation wavelength recording and monitoring systems is carried out through a hardware and software complex in real time. The results of measurements of the shape of tokamak elements are presented. It is shown that when the difference in wavelengths changes, the sensitivity of the measurement method changes, and in the proposed configuration of the optical scheme it is possible to determine the minimum value of the shape change at a level of 10–30 μm . At the same time, the error in determining the phase difference, by which the surface profile is assessed, in the digital method can reach about $2\pi/40$.

Keywords: tokamak, optical nondestructive testing, digital holographic interferometry