

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ
MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1106-1113

УДК 53.082.54

Двухдлинноволновая цифровая голографическая интерферометрия
в технических приложенияхИгорь Вячеславович Алексеенко¹, Анастасия Михайловна Кожевникова²^{1,2} Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236041, Российская Федерация¹ IAlekseenko@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8463-3304>² AKozhevnikova1@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6642-5226>

Аннотация

Введение. Исследован метод двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии анализа и контроля формы поверхности для технических приложений. Данный метод является бесконтактным и применим для поверхностей, которые подвержены воздействию, в том числе высокотемпературной плазмы в термоядерных реакторах. Показана возможность применения метода с использованием перестраиваемых по длине волны лазеров и миниатюрных вертикально-излучающих диодов. **Метод.** В основе метода лежит двухдлинноволновая (длины волн 854,000–854,082 нм и 779,900–779,870 нм) цифровая голографическая интерферометрия. Для получения информации о форме объекта выполняется сравнение фазы отраженных от объекта волновых фронтов, зарегистрированных на разных длинах волн. Чувствительность метода определяется величиной синтетической длины волны, которая равна разности длин волн, используемых при записи цифровых первичных голограмм. **Основные результаты.** Показана возможность применения в рассматриваемом методе вертикально-излучающих диодов (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) в качестве когерентного источника лазерного излучения. Установлено, что VCSEL имеют длину когерентности около 20 см, а длина волны излучения линейно зависит от величины проходящего тока. Продемонстрирована стабильность длины волны излучения в пределах 1 % в течение 24 часов непрерывной работы. Показаны возможности метода двухдлинноволновой голографической интерферометрии для измерения формы объектов на примерах элемента кузова автомобиля и защитного элемента внутренней стенки реактора Токамак. **Обсуждение.** Результаты исследований подтвердили возможность применения техники двухдлинноволновой голографической интерферометрии для измерения формы поверхности технических объектов различного типа. Известный и широко применяемый метод проекции полос недостаточно надежно работает на слабо рассеивающих или зеркально отражающих поверхностях. Использование известной системы Лидар требует проводить сканирование поверхности в течение определенного промежутка времени, что при нестабильности объекта (механические перемещения, вибрации) может приводить к ошибкам измерений. В отличие от данных методов исследованный метод позволяет повысить точность измерений за счет малого времени экспозиции камеры (миллисекунды, микросекунды или с использованием импульсов до 10 нс). Недостатком метода двухдлинноволновой голографической интерферометрии является зависимость взаимной корреляции спекл-структур на голограммах от разности длин волн. Для увеличения чувствительности метода необходимо увеличивать эту разность, что ухудшает соотношение сигнал-шум и снижает точность полученных данных.

Ключевые слова

цифровая голографическая интерферометрия, двухдлинноволновая интерферометрия, определение формы поверхности, вертикально-излучающие диоды, цифровая обработка изображений, оптический неразрушающий контроль

Благодарности

Статья представлена в рамках работы над грантом РФФ № 23-79-00023 «Оптический неразрушающий контроль и диагностика первой стенки Токамак-реакторов с использованием метода двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии и системы лазерного сканирования».

Ссылка для цитирования: Алексеенко И.В., Кожевникова А.М. Двухдлинноволновая цифровая голографическая интерферометрия в технических приложениях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 6. С. 1106–1113. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1106-1113

© Алексеенко И.В., Кожевникова А.М., 2023

Dual-wavelength digital holographic interferometry for technical applications

Igor V. Alekseenko¹✉, Anastasiia M. Kozhevnikova²

^{1,2} Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041, Russian Federation

¹ IAlekseenko@kantiana.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8463-3304>

² AKozhevnikova1@kantiana.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6642-5226>

Abstract

A method of dual-wavelength digital holographic interferometry for analyzing and controlling surface shape for technical applications, including surfaces exposed to high-temperature plasma in fusion reactors, is presented. The capability of applying the method both using miniature vertical-emitting diodes (VCSEL) and conventional wavelength-tunable lasers is shown. The research method is based on dual-wavelength digital holographic interferometry, in which the phases of wave fronts reflected from the object detected at different wavelengths are compared to provide information about the shape of the object. Moreover, the sensitivity of the method is determined by the value of synthetic wavelength, which depends on the difference of wavelengths used for acquisition of digital holograms. The method used following wavelengths 854.000–854.082 nm and 779.900–779.870 nm. Implementation of vertical-emitting diodes for dual-wave holographic interferometry methods is shown. It is found that such diodes have a coherence length of about 20 cm and similar to He-Ne laser. The dependence of the emission wavelength of such sources on the current has been examined and it is determined that the output wavelength deviates less than 1 % during 24 hours. The application of the holographic method has been demonstrated for measuring the shape of objects used in various technical applications (a car body part and a shielding element of the internal wall of the Tokamak fusion reactor). The results of the research illustrate the opportunity to apply the technique of dual-wavelength holographic interferometry to measure a shape of the technical objects surface of various types. It should be noted that other method such as fringe projection can also be used to solve such problems, but it does not work sufficiently on low-scattering surfaces, in our case the lacquered surface of the car body, or specular reflecting surfaces. In addition, the LIDAR technique requires scanning the surface over time, which can lead to measurement errors if the object is unstable due to mechanical movements or vibrations. In dual-wavelength holographic interferometry such drawbacks can be reduced by short camera exposure times of milliseconds/microseconds, or by using pulse laser with pulse durations of 10 ns. However, the major disadvantage of the method is the dependence of the mutual correlation of speckle structures of holograms on the wavelength difference. In order to increase the sensitivity of the method, it is necessary to increase this wavelength difference, and this can significantly reduce the signal-to-noise ratio and decrease the accuracy of the obtained data.

Keywords

digital holographic interferometry, digital holography, optical non-destructive testing

Acknowledgements

This article is performed in accordance with the support of the Russian Science Foundation (RSF), Project No. 23-79-00023 “Optical Nondestructive Testing and Diagnostics of the First Wall of Tokamak Reactors Using Dual-Wavelength Digital Holographic Interferometry and Lidar” for the years 2023–2026.

For citation: Alekseenko I.V., Kozhevnikova A.M. Dual-wavelength digital holographic interferometry for technical applications. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 6, pp. 1106–1113 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1106-1113

Введение

Методы цифровой голографической интерферометрии относятся к высокочувствительным и бесконтактным методам оптического контроля [1–7]. В частности, двухдлинноволновая цифровая голографическая интерферометрия с методом, который позволяет проводить измерение и оценку формы поверхности исследуемого объекта [8–10]. В настоящее время с развитием технологий усиливаются требования к точности и уровню контроля на разных этапах производства изделий любого рода, в том числе при создании сложных научных комплексов, в которых необходим дистанционный контроль поверхности. При этом для применения метода двухдлинноволновой голографической интерферометрии необходимы когерентные источники электромагнитного излучения (лазеры) с перестраиваемой длиной волны. Сегодня возможно использование как достаточно мощных источников лазерного излучения в диапазоне от сотен милливатт, так и маломощных не более 1 мВт, у которых перестройка длины волны излучения варьируется в диапазоне 2 нм. Также такие источники излучения могут быть реализованы

как излучающие диоды с хорошей спектральной стабильностью, что позволяет реализовать достаточно компактные интерференционные схемы регистрации голограмм. В настоящей работе рассматривается реализация метода двухдлинноволновой голографической интерферометрии с использованием миниатюрных вертикально-излучающих диодов (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) и обычной лазерной системы с перестраиваемой длиной волны на основе монокристалла сапфира с примесью ионов титана. Применение вертикально-излучающих диодов позволяет, например, применить интерференционный метод в автомобильной промышленности для контроля сочетающихся между собой элементов кузова автомобиля в условиях конвейерной сборки. Титан-сапфировый лазер применен как основное средство для исследования элементов, обращенных к плазме Токамак-реактора. Показана потенциальная возможность применения данного лазера для контроля формы и деградации элементов в реакторе. Известно, что обращенные к плазме элементы первой стенки реактора претерпевают высокие тепловые нагрузки и сдерживают прорыв плазмы из камеры Токамак [11, 12]. Прорыв же плазмы может привести

к разрушению реактора. Таким образом, дистанционный контроль элементов первой стенки необходим для обеспечения безопасности при эксплуатации такого сложного комплекса.

Используемые методы и подходы

Основу метода составляет сравнение фаз оптических волновых полей, зарегистрированных и восстановленных с помощью техники цифровой голографической интерферометрии [13]. Голограммы как результат интерференции объектного (изображения исследуемого объекта) и опорного полей регистрируются на цифровую камеру высокого разрешения. При этом запись голографических изображений осуществлена для каждой отдельной длины волны последовательно или одновременно.

Расчет фазы объектной волны выполнен с использованием преобразования Фурье.

Отметим, что использование преобразования Фурье для зарегистрированной интенсивности позволяет разделить в области пространственных частот интенсивности опорного $|R_H(x, y)|^2$ и объектного $|U_H(x, y)|^2$ полей, а также распределение объектного поля $R_H^*(x, y) \times U_H(x, y)$. Операция фильтрации и использование обратного преобразования Фурье над 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, опишем выражением [14]

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

В случае регистрации голографических изображений на разных длинах волн восстановленная разность фаз будет соответствовать форме исследуемого объекта. Например, если направления освещения и наблюдения объекта перпендикулярны его поверхности, то для рассчитанной разности фаз в 2π изменение профиля поверхности объекта определим выражением [15]:

$$\Delta z = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2|\lambda_1 - \lambda_2|} = \frac{\Lambda}{2}, \quad (1)$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн, используемые для записи голограмм; Λ — синтетическая длина волны.

Важное преимущество исследуемого метода — возможность изменения чувствительности метода путем изменения разности длин волн.

Запишем две голограммы на разных длинах волн одновременно или последовательно с использованием одного или двух лазеров, перестраиваемых по длине волны. Следует обратить внимание на особенности одновременной или последовательной регистрации голограмм. Например, при последовательной регистрации достаточно использовать только один источник лазерного излучения, что существенно удешевляет и упрощает конфигурацию оптической схемы голографического интерферометра. Однако такая система чувствительна к механическим возмущениям исследуемого объекта в реальных условиях измерений [16]. Тем не

менее, в лаборатории при наличии системы виброизоляции данная конфигурация достаточно надежна и может быть использована для поиска оптимальных условий регистрации голографических изображений, повышения отношения сигнал-шум или определения порога чувствительности измерения для различных исследуемых поверхностей.

Конфигурация с одновременной регистрацией голограмм требует использования двух независимых лазеров, что может привести к существенному удорожанию измерительного комплекса. В рамках развития метода контроля формы поверхности данная конфигурация является более оптимальной по следующим причинам: взаимная нечувствительность к механическим возмущениям объекта, что исключает возникновение дополнительного ненужного набега фаз; возможность одновременной перестройки длин волн с последующей регистрацией голограмм; уменьшение времени захвата двух изображений. На рис. 1 представлена обобщенная схема регистрации голограмм. В качестве источника когерентного излучения можно использовать титан-сапфировый лазер, или два VCSEL для одновременной регистрации голограмм на разных длинах волн.

Основные результаты и обсуждение

В настоящей работе применены две возможные технические реализации метода двухдлинноволновой голографической интерферометрии. В первой использованы вертикально-излучающие диоды с перестраиваемой длиной волны для демонстрации применения техники в контроле стыкующихся частей кузова автомобиля. Для подобного типа лазерных диодов изменение длины волны осуществлено путем изменения тока. На рис. 2, *a* показан использованный лазерный диод компании Priolas GmbH (Германия). Установлено, что зависимость длины волны излучения линейно связана с изменением тока на VCSEL-диодах и имеет высокую стабильность во времени. На рис. 2, *b* показаны калибровочные графики зависимостей длины волны от тока диода. Две калибровочные прямые сделаны с разницей в одни сутки. Отметим, что разница значений полученных прямых составляет меньше 1%.

Дополнительно установлено, что излучение VCSEL-диодов имеет высокую спектральную стабильность [17] и определяет длину когерентности в диапазоне 20 см. Максимальное изменение длины волны такого диода может варьироваться в пределах 2 нм, что согласно выражению (1) обеспечивает разность фаз в 2π радиан для высоты профиля 180 мкм и определяет максимальную рабочую чувствительность метода.

Для проверки метода проведены измерения ступенек профиля высотами 1 мм и 2 мм с использованием стандартных высоты, погрешность которых составила $\pm 0,4\mu$. При регистрации голограмм применена конфигурация с одновременной записью изображений на двух разных длинах волн, которые устанавливались согласно калибровочным прямым (рис. 2, *b*). Время экспозиции камеры составило 15 мс, синтезированная длина волны — 8 мм. На рис. 3, *a* показан эталон, по которому

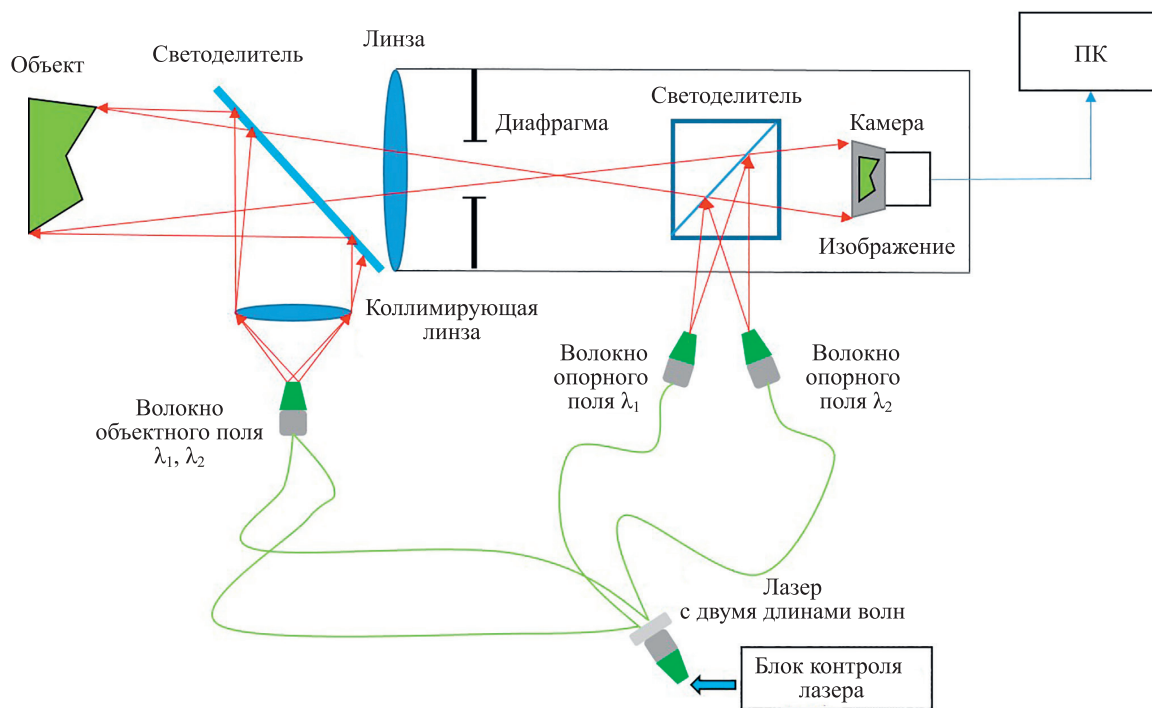


Рис. 1. Схема регистрации цифровых голограмм на двух различных длинах волн (λ_1 и λ_2): ПК — персональный компьютер
 Fig. 1. Experimental setup for the hologram acquisition

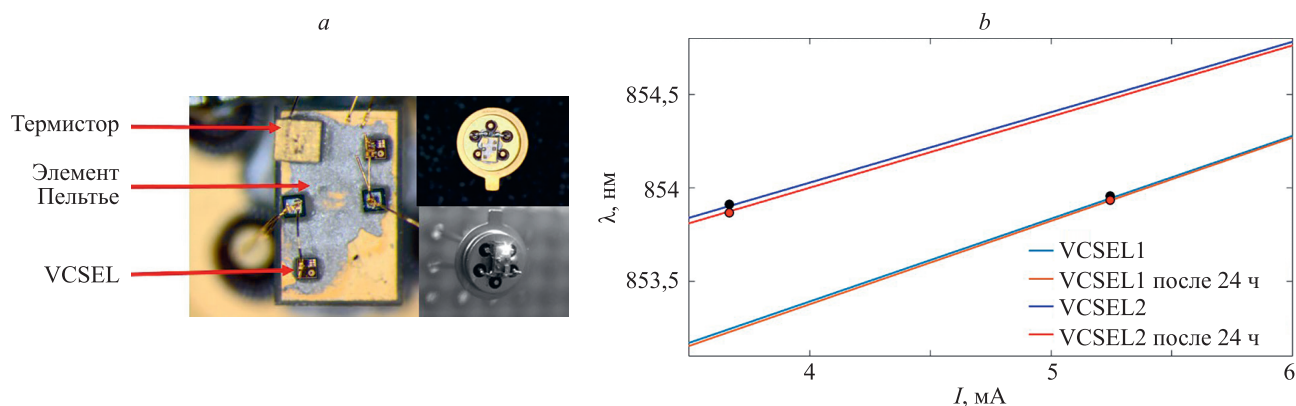


Рис. 2. Изображение вертикально-излучающего диода (a) и зависимости длины волны излучения от тока лазерного диода (b)
 Fig. 2. Image (a) and emission wavelength versus current (b) of a vertical emitting diode

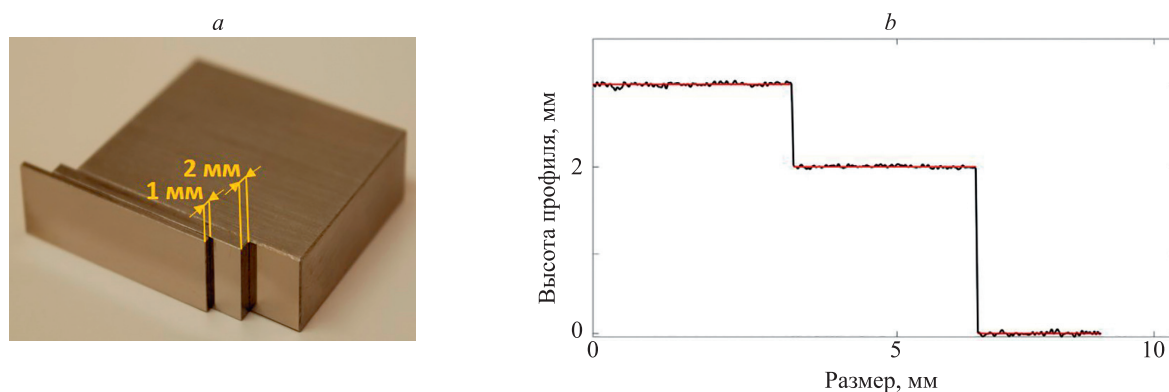


Рис. 3. Ступенчатый профиль, выполненный по стандартам высоты (a) и величина профиля, измеренная с помощью голографического метода (b)
 Fig. 3. Step-profile of height gauges (a), topography value measured by holography (b)

проведены измерения, а на рис. 3, *b* — измеренный профиль эталона.

Рассмотрим полученные результаты определения перепада уровней элементов кузова автомобилей, окрашенных в различные цвета. На рис. 4, *a* показан элемент макета регистрации, измеряемый объект и область измерения (выделена желтым прямоугольником), а на рис. 4, *b* — результат измерения профиля двух согласованных поверхностей. Размер области измерения $10 \times 10 \text{ мм}^2$.

Результаты измерений продемонстрировали возможность применения VCSEL в методе двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии для технических приложений на примере контроля пространственного сочетания элементов кузова автомобиля между собой.

Второй подход для реализации техники двухдлинноволновой голографической интерферометрии — использование одночастотного непрерывного титан-сапфирового лазера в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн 700–800 нм марки Matisse от компании Sirah (Германия). В данной конфигурации осуществлена последовательная регистрация голограмм на разных длинах волн. Однако интерес представляет использование двухдлинноволновой голографической интерферометрии для оптического неразрушающего контроля обращенных к плазме элементов Токамак. Отметим, что контроль таких элементов требует техники, исключаяющей вскрытие камеры реактора. Таким образом, методы оптического неразрушающего контроля, которые могут предоставить данные в виде оптического сигнала, зарегистрированного на достаточном удалении от измеряемого объекта и без установки датчиков на нем, являются оптимальными.

Выполним анализ результатов измерений профиля элемента защитной оболочки Токамак-реактора мето-

дом двухдлинноволновой голографической интерферометрии. На рис. 5, *a* показан элемент такой оболочки, изготовленный из вольфрама. Изучим возможность оценки профиля исследуемых элементов методом оптического неразрушающего контроля (голографической интерферометрии). Две голограммы последовательно регистрировались на двух длинах волн $\lambda_1 = 779,900 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 779,870 \text{ нм}$, что соответствует синтезированной длине волны $\Lambda = 20 \text{ нм}$. Определение длины волны проведено с помощью измерителя Burleigh Instruments WA-1000 (Великобритания). В результате анализа полученных интерферограмм доказано, что возможно построение формы поверхности. На рис. 5, *b* показано фазовое распределение, соответствующее профилю объекта, а на рис. 5, *c* — реконструированное трехмерное распределение формы защитного элемента [18].

Известно, что для повышения чувствительности метода двухчастотного оконтуривания необходимо увеличение разности длин волн, используемых при регистрации. Однако это приводит к уменьшению взаимной корреляции волновых полей, что ухудшает распределение разности фаз. Такой эффект сильно зависит от степени шероховатости и слабо влияет на результат для зеркальных поверхностей. Однако в случае диффузно-отражающих поверхностей уменьшение взаимной корреляции спекл-структур приводит к уменьшению соотношения сигнал-шум для фазового распределения на интерферограмме или к потере информации в случае их полной декорреляции [19].

Дополнительно заметим, что имеются особенности использования схемы с одновременной регистрацией голограмм на разных длинах волн. В такой конфигурации схемы регистрации возникает сложение интенсивностей объектных полей, что в случае большой интенсивности излучения может привести к перезагрузке детектора изображений и потере информации.

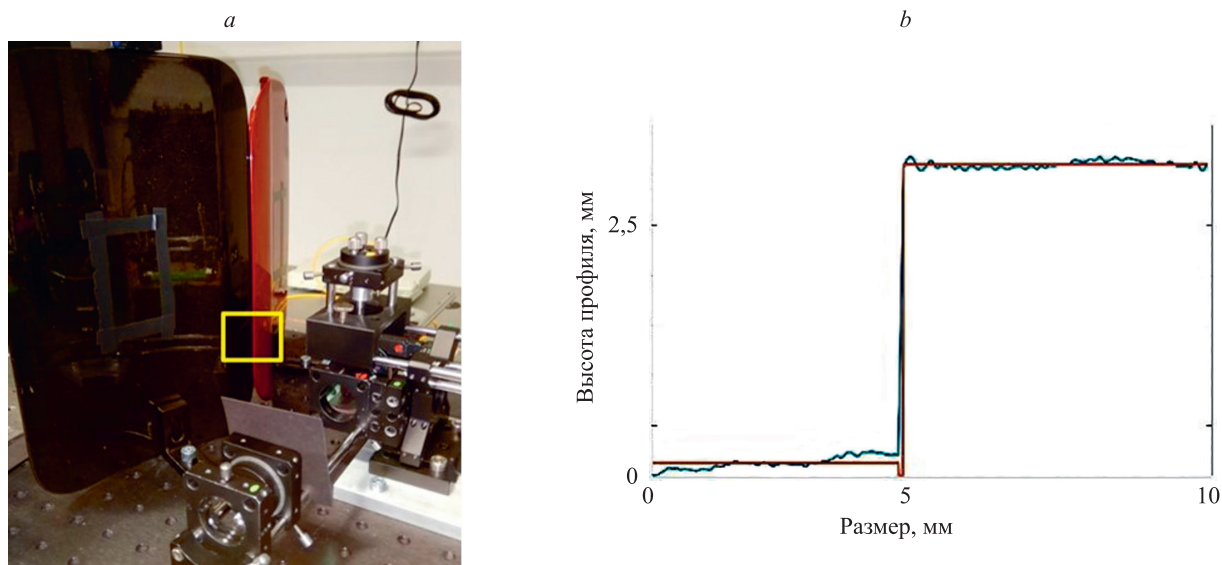


Рис. 4. Макет регистрации измеряемого объекта и область измерения $10 \times 10 \text{ мм}^2$ (желтый прямоугольник) (*a*), величина профиля совмещенных поверхностей кузова (*b*), где синяя линия показывает измеренный профиль, а красная — усредненное значение вдоль поверхности профиля

Fig. 4. Non-cooperative surfaces and measurement results setup (*a*) with non-cooperative surfaces (yellow square is $10 \times 10 \text{ мм}^2$ measurement area); (*b*) is topography cross-section plot (blue line is the measured profile, red is the averaged value along the profile)

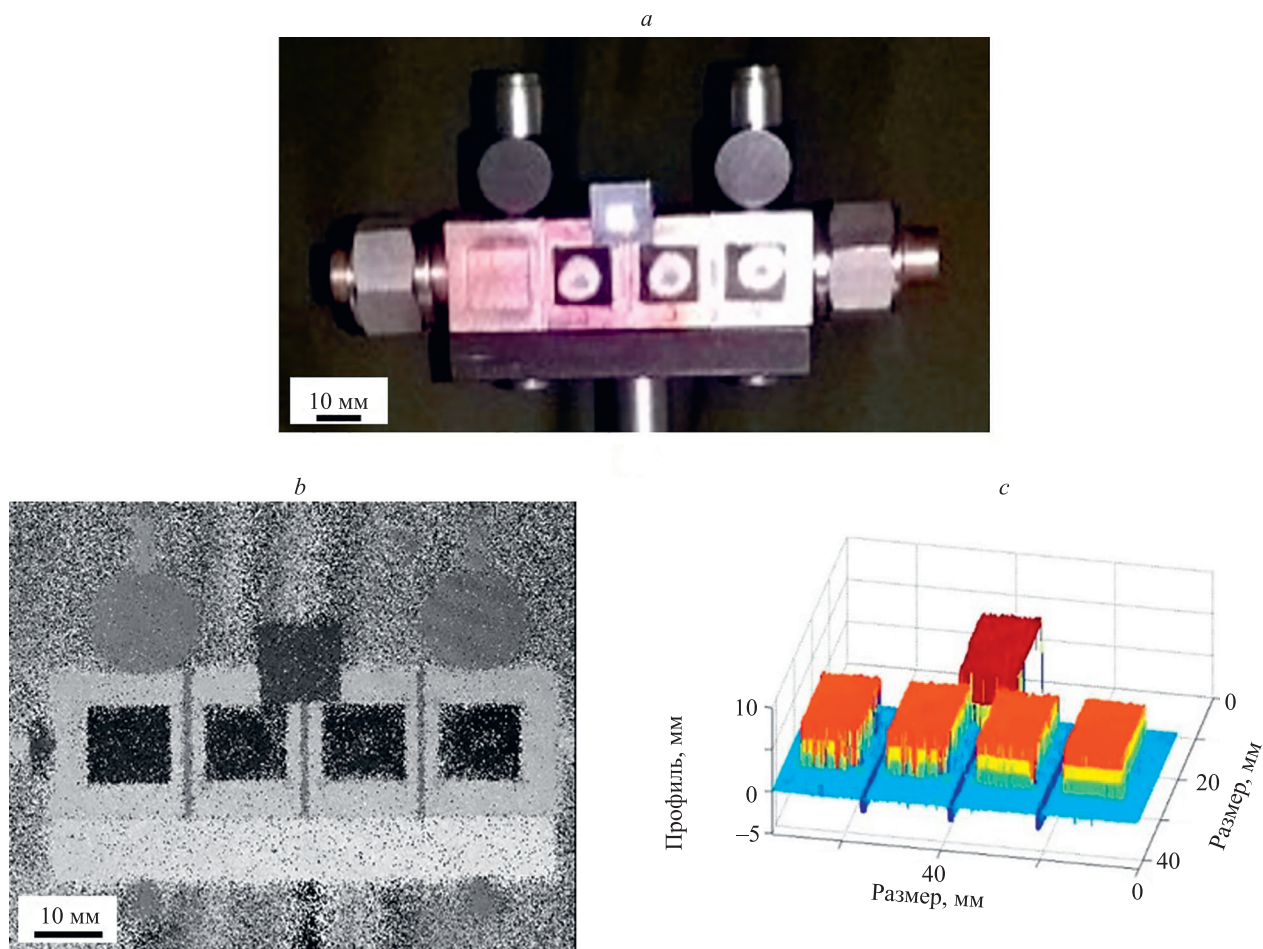


Рис. 5. Защитный элемент внутренней стенки Токамак-реактора (a); фазовое (b) и трехмерное (c) распределения профиля исследуемого объекта

Fig. 5. Protective element of the inner wall of the Tokamak reactor (a); phase (b) and three-dimensional (c) profile distributions of the object under study

Тем не менее, схема с одновременной регистрацией характеризуется большей стабильностью и гибкостью в управлении за счет использования двух независимых источников лазерного излучения.

Заключение

В работе показана возможность применения метода двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии для контроля формы поверхности различных по классу технических объектов. Продемонстрировано использование не только обычных лазерных систем с перестраиваемой длиной волны, но и компактных вертикально-излучающих диодов (VCSEL), у которых изменение длин волн осуществлено изменением тока лазерного диода. Показано, что VCSEL-структуры обладают высокой спектральной стабильностью, что определяет большую, по сравнению с обычными лазерными диодами, временную когерентность излучения. Соответствующая длина когерентности оценена в 20 см и сравнима с обычными

лазерами (HeNe, HeCd, Ti:Sa). Однако такие диоды все еще обладают малой выходной мощностью (1–2 мВт). Изучена зависимость длины волны излучения таких источников от проходящего тока. Установлено, что зависимость имеет линейный характер. Проверена стабильность длины волны излучения в течение 24 часов и определена величина ее отклонения в пределах 1 %.

Продемонстрировано применение двухдлинноволновой голографической интерферометрии для измерения формы объектов, используемых в различных технических приложениях: элемента кузова автомобиля и защитного элемента внутренней стенки Токамак-реактора. Рассмотрены различные конфигурации оптических схем регистрации первичных голограмм, что позволяет в зависимости от требований оптимизировать захват изображений.

Рассмотрен основной недостаток метода, связанный с зависимостью взаимной корреляции спектров от разности длин волн, используемых при регистрации голограмм, что ограничивает его чувствительность и применение.

Литература

References

1. Pedrini G., Zou Y.L., Tiziani H.J. Digital double-pulsed holographic interferometry for vibration analysis // *Journal of Modern Optics*. 1995. V. 42. N 2. P. 367–374. <https://doi.org/10.1080/09500349514550321>
2. Pedrini G., Zou Y.-L., Tiziani H.J. Simultaneous quantitative evaluation of in-plane and out-of-plane deformations by use of a multidirectional spatial carrier // *Applied Optics*. 1997. V. 36. N 4. P. 786–792. <https://doi.org/10.1364/ao.36.000786>
3. Pedrini G., Tiziani H., Zou Y. Digital holographic interferometry // *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques* / ed. by P.K. Rastogi. Chichester, N.Y.: Wiley, 2001. P. 337–362.
4. Alexeenko I., Gusev M., Gurevich V. Separate recording of rationally related vibration frequencies using digital stroboscopic holographic interferometry // *Applied Optics*. 2009. V. 48. N 18. P. 3475–3480. <https://doi.org/10.1364/ao.48.003475>
5. Vandenberg J.-F., Thizy C., Martin L., Beaumont F., Garcia J., Fabron C., Prieto É., Maciaszek T., Georges M.P. Digital holographic interferometry in the long-wave infrared and temporal phase unwrapping for measuring large deformations and rigid body motions of segmented space detector in cryogenic test // *Optical Engineering*. 2016. V. 55. N 12. P. 121723–121723. <https://doi.org/10.1117/1.oe.55.12.121723>
6. Dyomin V., Gribenyukov A., Davydova A., Zinoviev M., Olshukov A., Podzyvalov S., Polovtsev I., Yudin N. Holography of particles for diagnostics tasks // *Applied Optics*. 2019. V. 58. N 34. P. G300–G310. <https://doi.org/10.1364/ao.58.00g300>
7. Belashov A.V., Zhikhoreva A.A., Semenova I.V. Recording of long low-amplitude bulk elastic waves in transparent solid waveguides by digital and classical holography // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. N 3. P. 1687. <https://doi.org/10.3390/app12031687>
8. Zou Y.L., Pedrini G., Tiziani H.J. Two-wavelength contouring with a pulsed ruby laser by employing TV-holography // *Journal of Modern Optics*. 1996. V. 43. N 3. P. 653–646. <https://doi.org/10.1080/09500349608232771>
9. Wagner C., Osten W., Seebacher S. Direct shape measurement by digital wavefront reconstruction and multi-wavelength contouring // *Optical Engineering*. 2000. V. 39. N 1. P. 79–85. <https://doi.org/10.1117/1.602338>
10. Carl D., Fratz M., Pfeifer M., Giel D.M., Höfler H. Multiwavelength digital holography with autocalibration of phase shifts and artificial wavelengths // *Applied Optics*. 2009. V. 48. N 34. P. H1–H8. <https://doi.org/10.1117/1.602338>
11. Pitts R.A., Bonnin X., Escourbiac F., Frerichs H., Gunn J.P., Hirai T., Kukushkin A.S., Kaveeva E., Miller M.A., Moulton D., Rozhansky V., Senichenkov I., Sytova E., Schmitz O., Stangeby P.C., De Temmerman G., Veselova I., Wiesen S. Physics basis for the first ITER tungsten divertor // *Nuclear Materials and Energy*. 2019. V. 20. P. 100696. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.100696>
12. Razdobarin A.G., Gasparyan Y.M., Bogachev D.L., Dmitriev A.M., Elets D.I., Koval A.N., Kurskiev G.S., Mukhin E.E., Bulgadyan D.G., Krat S.A., Marenkov E.D., Alekseenko I.V. Diagnostics complex of the first wall and divertor of tokamak with reactor technologies: control of erosion and temperature and monitoring of fusion fuel build-up // *Plasma Physics Reports*. 2022. V. 48. N 12. P. 1389–1403. <https://doi.org/10.1134/s1063780x22700283>
13. Schnars U., Juptner W. *Digital Holography*. Springer-Verlag and Heidelberg GmbH & Company K, 2005. 164 p.
14. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // *Journal of the Optical Society of America*. 1982. V. 72. N 1. P. 156–160. <https://doi.org/10.1364/josa.72.000156>
15. Friesem A.A., Levy U. Fringe formation in two-wavelength contour holography // *Applied Optics*. 1976. V. 15. N 12. P. 3009–3020. <https://doi.org/10.1364/ao.15.003009>
16. Kreis T. *Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods*. Wiley, 2005. 554 p.
17. Claus D., Alekseenko I., Grabherr M., Pedrini G., Hibst R. Snap-shot topography measurement via dual-VCSEL and dual wavelength digital holographic interferometry // *Light: Advanced Manufacturing*. 2021. V. 2. N 4. P. 403–414. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.029>
18. Pedrini G., Alekseenko I., Jagannathan G., Kempenaars M., Vayakis G., Osten W. Feasibility study of digital holography for erosion measurements under extreme environmental conditions inside
1. Pedrini G., Zou Y.L., Tiziani H.J. Digital double-pulsed holographic interferometry for vibration analysis. *Journal of Modern Optics*, 1995, vol. 42, no. 2, pp. 367–374. <https://doi.org/10.1080/09500349514550321>
2. Pedrini G., Zou Y.-L., Tiziani H.J. Simultaneous quantitative evaluation of in-plane and out-of-plane deformations by use of a multidirectional spatial carrier. *Applied Optics*, 1997, vol. 36, no. 4, pp. 786–792. <https://doi.org/10.1364/ao.36.000786>
3. Pedrini G., Tiziani H., Zou Y. Digital holographic interferometry. *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques*. Ed. by P.K. Rastogi. Chichester, N.Y., Wiley, 2001, pp. 337–362.
4. Alexeenko I., Gusev M., Gurevich V. Separate recording of rationally related vibration frequencies using digital stroboscopic holographic interferometry. *Applied Optics*, 2009, vol. 48, no. 18, pp. 3475–3480. <https://doi.org/10.1364/ao.48.003475>
5. Vandenberg J.-F., Thizy C., Martin L., Beaumont F., Garcia J., Fabron C., Prieto É., Maciaszek T., Georges M.P. Digital holographic interferometry in the long-wave infrared and temporal phase unwrapping for measuring large deformations and rigid body motions of segmented space detector in cryogenic test. *Optical Engineering*, 2016, vol. 55, no. 12, pp. 121723–121723. <https://doi.org/10.1117/1.oe.55.12.121723>
6. Dyomin V., Gribenyukov A., Davydova A., Zinoviev M., Olshukov A., Podzyvalov S., Polovtsev I., Yudin N. Holography of particles for diagnostics tasks. *Applied Optics*, 2019, vol. 58, no. 34, pp. G300–G310. <https://doi.org/10.1364/ao.58.00g300>
7. Belashov A.V., Zhikhoreva A.A., Semenova I.V. Recording of long low-amplitude bulk elastic waves in transparent solid waveguides by digital and classical holography. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 1687. <https://doi.org/10.3390/app12031687>
8. Zou Y.L., Pedrini G., Tiziani H.J. Two-wavelength contouring with a pulsed ruby laser by employing TV-holography. *Journal of Modern Optics*, 1996, vol. 43, no. 3, pp. 653–646. <https://doi.org/10.1080/09500349608232771>
9. Wagner C., Osten W., Seebacher S. Direct shape measurement by digital wavefront reconstruction and multi-wavelength contouring. *Optical Engineering*, 2000, vol. 39, no. 1, pp. 79–85. <https://doi.org/10.1117/1.602338>
10. Carl D., Fratz M., Pfeifer M., Giel D.M., Höfler H. Multiwavelength digital holography with autocalibration of phase shifts and artificial wavelengths. *Applied Optics*, 2009, vol. 48, no. 34, pp. H1–H8. <https://doi.org/10.1364/ao.48.0000h1>
11. Pitts R.A., Bonnin X., Escourbiac F., Frerichs H., Gunn J.P., Hirai T., Kukushkin A.S., Kaveeva E., Miller M.A., Moulton D., Rozhansky V., Senichenkov I., Sytova E., Schmitz O., Stangeby P.C., De Temmerman G., Veselova I., Wiesen S. Physics basis for the first ITER tungsten divertor. *Nuclear Materials and Energy*, 2019, vol. 20, pp. 100696. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.100696>
12. Razdobarin A.G., Gasparyan Y.M., Bogachev D.L., Dmitriev A.M., Elets D.I., Koval A.N., Kurskiev G.S., Mukhin E.E., Bulgadyan D.G., Krat S.A., Marenkov E.D., Alekseenko I.V. Diagnostics complex of the first wall and divertor of tokamak with reactor technologies: control of erosion and temperature and monitoring of fusion fuel build-up. *Plasma Physics Reports*, 2022, vol. 48, no. 12, pp. 1389–1403. <https://doi.org/10.1134/s1063780x22700283>
13. Schnars U., Juptner W. *Digital Holography*. Springer-Verlag and Heidelberg GmbH & Company K, 2005, 164 p.
14. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, vol. 72, no. 1, pp. 156–160. <https://doi.org/10.1364/josa.72.000156>
15. Friesem A.A., Levy U. Fringe formation in two-wavelength contour holography. *Applied Optics*, 1976, vol. 15, no. 12, pp. 3009–3020. <https://doi.org/10.1364/ao.15.003009>
16. Kreis T. *Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods*. Wiley, 2005, 554 p.
17. Claus D., Alekseenko I., Grabherr M., Pedrini G., Hibst R. Snap-shot topography measurement via dual-VCSEL and dual wavelength digital holographic interferometry. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, vol. 2, no. 4, pp. 403–414. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.029>
18. Pedrini G., Alekseenko I., Jagannathan G., Kempenaars M., Vayakis G., Osten W. Feasibility study of digital holography for

- the International Thermonuclear Experimental Reactor tokamak // *Applied Optics*. 2019. V. 58. N 5. P. A147–A155. <https://doi.org/10.1364/ao.58.00a147>
19. Goodman J.W. Wavelength and angle diversity // *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*. Greenwood Village: Roberts and Company Publishers, 2006. P. 153–169.

- erosion measurements under extreme environmental conditions inside the International Thermonuclear Experimental Reactor tokamak. *Applied Optics*, 2019, vol. 58, no. 5, pp. A147–A155. <https://doi.org/10.1364/ao.58.00a147>
19. Goodman J.W. Wavelength and angle diversity. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*. Greenwood Village, Roberts and Company Publishers, 2006, pp. 153–169.

Авторы

Алексеенко Игорь Вячеславович — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236041, Российская Федерация, [sc 57207816753](https://orcid.org/0000-0001-8463-3304), <https://orcid.org/0000-0001-8463-3304>, IAlekseenko@kantiana.ru

Кожевникова Анастасия Михайловна — младший научный сотрудник, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236041, Российская Федерация, [sc 57284792900](https://orcid.org/0000-0002-6642-5226), <https://orcid.org/0000-0002-6642-5226>, AKozhevnikova1@kantiana.ru

Статья поступила в редакцию 10.08.2023
Одобрена после рецензирования 20.09.2023
Принята к печати 10.11.2023

Authors

Igor V. Alekseenko — PhD (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041, Russian Federation, [sc 57207816753](https://orcid.org/0000-0001-8463-3304), <https://orcid.org/0000-0001-8463-3304>, IAlekseenko@kantiana.ru

Anastasiia M. Kozhevnikova — Junior Researcher, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041, Russian Federation, [sc 57284792900](https://orcid.org/0000-0002-6642-5226), <https://orcid.org/0000-0002-6642-5226>, AKozhevnikova1@kantiana.ru

Received 10.08.2023
Approved after reviewing 20.09.2023
Accepted 10.11.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»