

УДК 681.385+621.372.5+681.3.01

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ШИРОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА В СИСТЕМАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДИНАМИКИ МИКРО- И МАКРОСИСТЕМ

И. В. Алексеенко^{1*}, *М. Е. Гусев*²

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта;

² ООО «Алгоритм-Опто», г. Калининград, Россия

Современная цифровая голографическая интерферометрия применяется в исследовании объектов различной природы и различных пространственных масштабов; при этом используется широкий спектральный диапазон когерентного электромагнитного излучения от длинноволнового инфракрасного до глубокого ультрафиолетового. В статье представлены результаты исследований динамических процессов в конструкционных материалах методами цифровой голографической интерферометрии, использующей излучение с длиной волны до 9,3 мкм. Также рассматривается голографический метод контроля микроскопических электромеханических структур. Для исследования микроскопических биологических объектов предложен метод цифровой голографической интерферометрии, использующий автоматизированный голографический микроскоп.

ВВЕДЕНИЕ

Методы цифровой голографической интерферометрии основаны на сравнении двух волновых полей, полученных путём регистрации голограмм для разных состояний объекта и относятся к оптико-физическим методам измерений и контроля.

В современных экспериментах голограммы регистрируются цифровыми средствами, а интерференционная картина с распределёнными изменениями фазы рассчитывается численно. Аппаратно метод реализуется с помощью цифровой видеокамеры в сочетании со стробоскопической регистрацией. Расчёт фаз основан на преобразовании Фурье.

Современные технические средства цифровой голографии [1, 2] могут использовать излучение в широком спектральном диапазоне, от инфракрасного до ультрафиолетового (длины волн от 190 нм до 10 мкм).

Основной задачей исследовательской работы было создание методов цифровой голографической интерферометрии, позволяющих использовать потенциал возможностей спектра оптического диапазона. Это даёт возможность изменять чувствительность методов и исследовать различные по природе объекты.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Пространственное распределение интерференционных полос как результат одновременного сложения опорной и объектной волн регистрируется матрицей цифровой видеокамеры. Далее зарегистрированный оптический сигнал переводится в цифровой формат. Для правильной оцифровки голограммы необходимо выполнение условий теоремы Найквиста [3], что налагает ограничения на пространственную частоту и, как следствие, на угол $\alpha_{\max} = \lambda / (2 \Delta x)$ между объектным и опорным пучками, где Δx — размер пиксела, λ — длина волны. Дополнительное ограничение спектра пространственных частот осуществляется диафрагмой, помещённой в объектный

* ialekseenko@kantiana.ru

пучок. После регистрации голограммы фаза рассчитывается с применением двумерного фурье-преобразования. Если голограммы зарегистрированы в моменты времени t_1 и t_2 , соответствующие различным состояниям объекта, то после регистрации пришедших волн можно рассчитать разность фаз и построить цифровую интерферограмму [4].

Суммарную зарегистрированную матрицей камеры интенсивность можно записать как

$$I = |E_R \exp[-i\varphi_R(x, y)] + E_O \exp[-i\varphi_O(x, y)]|^2, \quad (1)$$

где E_R и φ_R — амплитуда и фаза опорной волны соответственно, E_O и φ_O — амплитуда и фаза объектной волны

Применение двумерного преобразования Фурье позволяет разделить в фурье-области опорную и объектную составляющие зарегистрированного светового поля. Последующая фильтрация объектной составляющей и применение к ней обратного двумерного преобразования Фурье для различных состояний объекта позволяет получить разность фаз

$$\Delta\varphi = \arctg[\tg(\varphi_{O1} - \varphi_{O2})] = \arctg \frac{\text{Im}(I_{O1}) \text{Re}(I_{O2}) - \text{Im}(I_{O2}) \text{Re}(I_{O1})}{\text{Im}(I_{O1}) \text{Im}(I_{O2}) + \text{Re}(I_{O1}) \text{Re}(I_{O2})}, \quad (2)$$

которая и описывает изменение состояния объекта [5]. Здесь φ_{O1} — фаза объектной волны в первом состоянии, φ_{O2} — фаза объектной волны во втором (последующем) состоянии, $I_{O1} = E_O \times \exp[-i\varphi_{O1}(x, y)]$, $I_{O2} = E_O \exp[-i\varphi_{O2}(x, y)]$. Для исследования динамических процессов изменение фазы во времени восстанавливается следующим образом. Регистрируются k голограмм исследуемого объекта в процессе изменения его состояния. Интенсивность k -й голограммы, зарегистрированной с объектной волной вида

$$U(x, y, t) = |U_k(x, y, t)| \exp[i\varphi_k(x, y, t)], \quad (3)$$

определяется как

$$I_k = \frac{1}{\Delta} \int_{(k-1)\Delta}^{k\Delta} I_k(t) dt, \quad (4)$$

где Δ — время экспозиции. По интенсивности (4) можно восстановить фазу каждой точки $\varphi_k(x, y, t)$ исследуемого объекта для его k -го состояния. При этом k -ое состояние привязано к определённому моменту времени регистрируемого физического процесса.

Изменение фазы (разность) в голографической интерферометрии определяется соотношением [6]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{K}\mathbf{A}, \quad (5)$$

где $\mathbf{K} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$ — вектор чувствительности, \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 — единичные векторы в направлении освещения и наблюдения объекта соответственно, \mathbf{A} — вектор перемещения. Вектор чувствительности определяется пространственной геометрией системы регистрации, т. е., меняя геометрию системы регистрации, мы можем изменить чувствительность интерферометра. Изменение вектора чувствительности при соответствующем изменении конфигурации системы регистрации позволяет, например, регистрировать перемещения только в направлении наблюдения и исключить наблюдение перемещения точек в плоскости объекта. Также можно уменьшить влияние перемещения

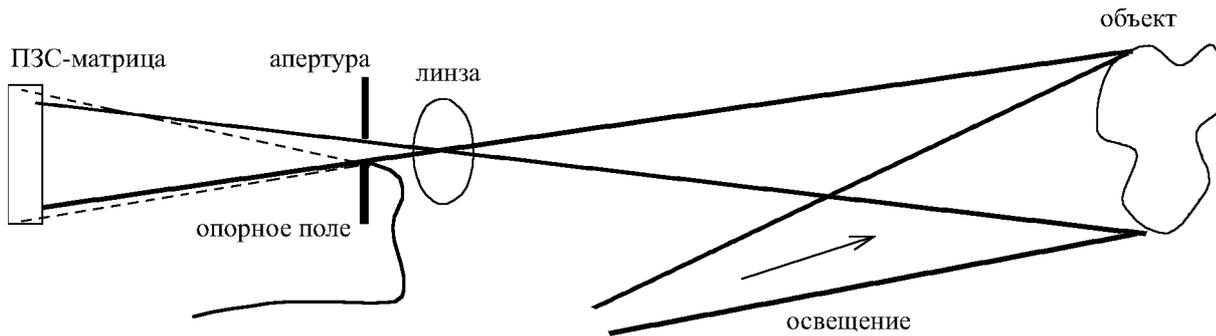


Рис. 1. Общая схема регистрации цифровой голограммы

точек в направлении наблюдателя при увеличении чувствительности для точек, движущихся в плоскости объекта [7]. Чувствительность метода, согласно выражению (5), зависит также от длины волны излучения, используемого при записи голограмм: чем больше такая длина, тем меньше изменение фазы при перемещении точек объекта. При переходе от видимого диапазона к длинноволновому инфракрасному ($9 \div 10$ мкм) чувствительность может уменьшиться в 20 раз [8]. На рис. 1 изображена схема регистрации первичных голограмм на цифровой детектор для дальнейшего анализа методом Фурье.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Разработаны методы цифровой голографической интерферометрии для инфракрасного излучения (длины волн $9 \div 12$ мкм). В качестве детектора инфракрасного сигнала использовалась высокоразрешающая термографическая камера компании «INFRATEC» (Германия) с разрешением 640×480 пикселей. В голографическом интерферометре использовался CO_2 -лазер с длиной волны излучения 9,3 мкм и мощностью 8 Вт. В качестве объекта исследования были выбраны используемые в авиастроении композитные материалы на основе кевлара и алюминия. Размер тестовых объектов составил 360×360 мм, а перемещения деформаций — 16 мкм. Тестовые объекты были рассмотрены с учётом дефектов структуры, которые моделировались участками с различной плотностью. Результаты измерений (интерферограмма с локализованными дефектами и трёхмерное представление деформаций) показаны на рис. 2.

Регистрация серии голограмм позволяет не только выявить дефекты, но и оценить динамическую деформацию во времени в области локализации проблемных зон при нагружении объекта [7, 8]. Интерес представляет также комбинация двух методов оптического неразрушающего контроля: активной термографии и голографической интерферометрии. Появляется возможность одновременной регистрации двух различных по природе сигналов (теплового и когерентного) с последующим их разделением. Таким образом можно сократить время наблюдения.

3. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Современные микроэлектронные технологии применяются для создания микроскопических электромеханических систем. Подобного рода структуры и устройства применяются в миниатюрных системах контроля и детектирования [9]. Однако контроль и калибровка таких систем

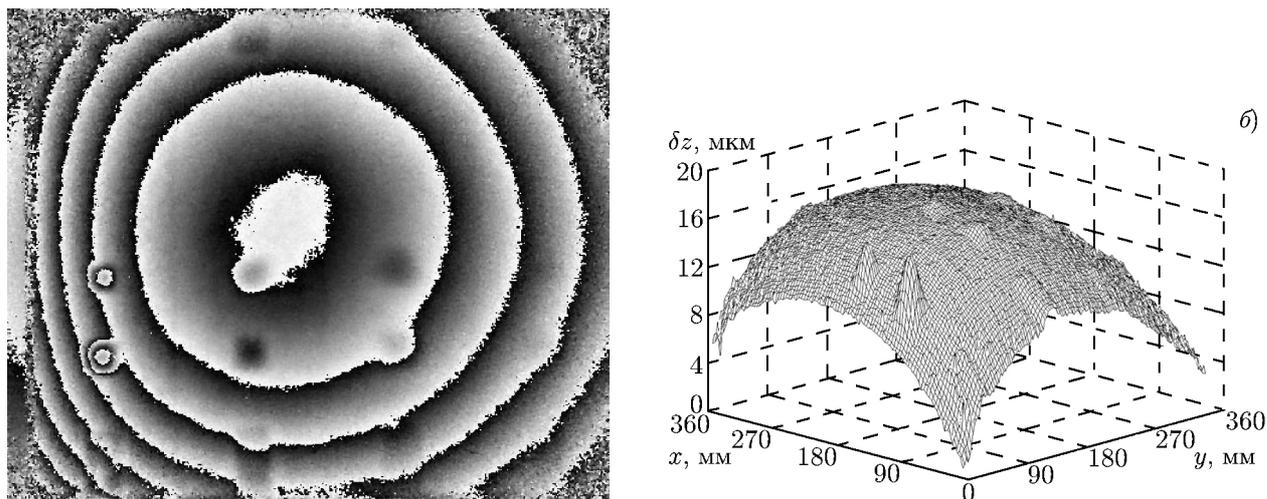


Рис. 2. Деформированное состояние объекта (кевлар) с проявленными дефектами: интерферограмма с локализованными дефектами (а) и трёхмерное представление деформаций (б)

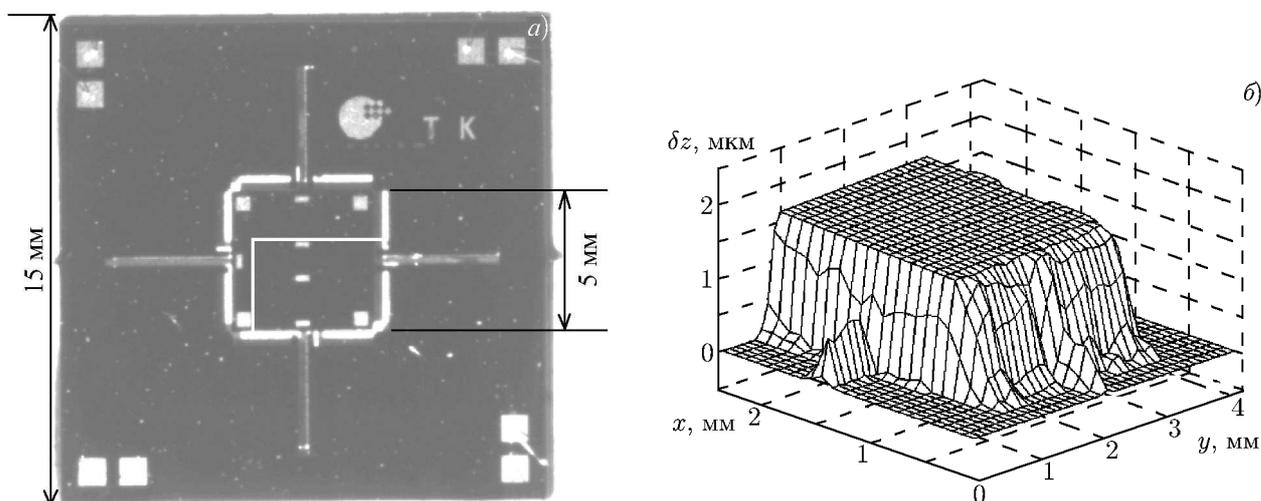


Рис. 3. Исследование микроперемещений микроскопической электромеханической структуры: (а) изображение структуры, центральная часть которой с размером 5×5 мм перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости структуры, и (б) результат измерения перемещения части структуры методом цифровой голографической интерферометрии. Показанная на рис. 3б часть поверхности с размером $2,5 \times 4$ мм выделена белым контуром на рис. 3а

только начинают развиваться. В данной работе цифровая голографическая интерферометрия применена для оценки механических характеристик таких структур и измерения перемещений их подвижных частей. В оптической схеме использовался гелий-неоновый лазер (длина волны 632 нм). Типичная микроскопическая электромеханическая структура и величина перемещения подвижной поверхности с течением времени представлены на рис. 3. Геометрические размеры структуры 5×5 мм. Максимальная величина перемещения поверхности составила 1,5 мкм. Заметно отклонение поверхности от строго горизонтального положения, что позволяет сделать вывод о возможности наблюдения и измерения перемещений на уровне нанометров. Использование голографических методов также позволяет получать информацию одновременно от всех точек поверхности. При использовании методов оценки перемещений через точечные измерители дан-

ное отклонение от строго горизонтального положения невозможно определить за одну измерительную сессию. Следует отметить основное достоинство метода голографической интерферометрии — полную реконструкцию фазы и интенсивности излучения объектного поля. Это позволяет оценить изменение перемещения всех точек поверхности объекта, не прибегая к помощи точечных детекторов.

4. ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Разработан метод измерения параметров процессов, связанных с изменением внутренней структуры биологических объектов. Микроскоп использует методы цифровой голографии и голографической интерферометрии реального времени для построения изображений, в том числе и трёхмерного их представления по распределению показателя преломления. В состав микроскопа входит высокоразрешающая цифровая камера, прецизионные оптикомеханические компоненты и Nd-YaG-лазер с длиной волны излучения $\lambda = 532$ нм.

В качестве объекта наблюдения были выбраны клетки лука. В эксперименте продемонстрирована возможность в одном программно-аппаратном комплексе совместить метод визуализации биологических микроструктур и метод цифровой голографической интерферометрии, позволяющий по фазовым изменениям провести оценку относительного изменения показателя преломления среды в клетке [10]. Технология имеет перспективы развития в будущем за счёт улучшения разрешающей способности системы с переходом в ультрафиолетовый диапазон излучения и применения новых алгоритмов обработки оптической информации.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методы цифровой голографической интерферометрии используют расширенный спектральный диапазон от ближнего инфракрасного диапазона до видимого, что позволяет гибко изменять чувствительность метода. В работе реализован комплексный подход динамического измерения и визуализации состояний как макроскопических, так и микроскопических объектов исследования. Использование современных средств регистрации оптических сигналов и оптимизация голографических интерферометров вместе с современными алгоритмами обработки данных существенно расширяет класс изучаемых объектов и протекающих в них физических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Faridian A., Hopp D., Pedrini G., et al. // Opt. Express. 2010. V. 18, No. 13. P. 14 159.
2. Freque B., Robert P., Minassian C., et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 6 940. Art. no. 69401X.
3. Onural L. // Appl. Opt. 2000. V. 39. P. 5 929.
4. Takeda M., Hideki I., Kobayashi S. // J. Opt. Soc. Am. A. 1982. V. 72. P. 156.
5. Pedrini G., Tiziani H. J., Zou Y. // J. Mod. Opt. 1995. V. 42. P. 367.
6. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.
7. Alexeenko I., Vandenrijt J.-F., Georges M., et al. // Appl. Mechanics Materials. 2010. V. 24–25. P. 147.
8. Alexeenko I., Vandenrijt J.-F., Pedrini G., et al. // Appl. Opt. 2013. V. 52, No. 1. P. 56.
9. Pedrini G., Gaspar J., Schmidt M. E., et al. // Opt. Engineering. 2011. V. 50, No. 10. Art. no. 101504.

10. Wilke M., Alekseenko I., Situ G., et al. // Proc. SPIE. 2011. V. 8082. Art. no. 80820D1.

Поступила в редакцию 11 ноября 2013 г.; принята в печать 31 марта 2014 г.

**DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY OF WIDE SPECTRAL RANGE
IN THE SYSTEMS OF NONDESTRUCTIVE TESTING OF DYNAMICS
OF MICRO AND MACRO SYSTEMS**

I. V. Alexeenko and M. E. Gusev

Modern digital holographic interferometry is used to study the objects of various nature and various spatial scales. In this case, a wide spectral range of coherent electromagnetic radiation from long-wave infrared to deep ultraviolet is used. In this work, we present the results of studying dynamic processes in construction materials by the methods of digital holographic interferometry using radiation with a wavelength of up to $9.3 \mu\text{m}$. The holographic method for control of microscopic electromechanical structures is also considered. The method of digital holographic interferometry, which uses automated holographic microscope, is proposed to study microscopic biological objects.