

09

## Голографический метод количественного измерения фотолитографических реплик толстых рельефных дефектов поверхности

© Н.С. Будников<sup>1</sup>, В.В. Дуденкова<sup>1</sup>, В.Е. Котомина<sup>1</sup>,  
О.А. Морозов<sup>1</sup>, В.В. Семенов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

<sup>2</sup> Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Нижний Новгород

E-mail: oranng@mail.ru

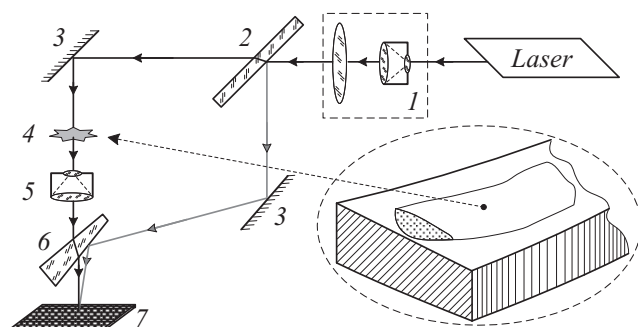
Поступило в Редакцию 20 января 2017 г.

Для задачи оценки характерных размеров и рельефа микродефектов поверхности образцов сложной формы представлен голографический метод измерений прозрачных реплик — обратной маски к исследуемой поверхности. Метод измерений основан на цифровой регистрации интерферограмм полимерной реплики в модифицированной внеосевой голографической схеме Лейта—Упатниекса и расчете разности набега фазы по серии восстановленных цифровых голограмм.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.11.44700.16710

Для оценки характеристик состояния поверхности материалов с линейным размером порядка или более 1 мкм обычно используются оптико-телевизионные измерительные системы, реализующие методы обработки оптических изображений и спекл-интерферометрии [1,2]. Для прецизионного изучения деформированного состояния поверхности материалов с высоким пространственным разрешением (порядка 10–100 нм) может быть использовано специализированное оборудование, позволяющее регистрировать профиль поверхности, в частности сканирующие зондовые микроскопы, и соответствующие алгоритмы обработки регистрируемых данных [3,4].

Выявление и визуализация дефектов поверхности с линейными размерами порядка 1–100 мкм с их дальнейшей количественной оценкой с



**Рис. 1.** Принципиальная оптическая схема внеосевой голографии прозрачных реплик объектов с возможностью цифровой регистрации.

высоким пространственным разрешением является актуальной задачей в сфере микроанализа износа и качества поверхностей. Ряд факторов существенно ограничивает возможности применения традиционной для данной задачи аппаратуры — оптических или конфокальных сканирующих микроскопов, контактных и лазерных профилометров. К таким факторам можно отнести относительно широкий диапазон линейных размеров изучаемых структур при необходимом пространственном разрешении менее  $1\ \mu\text{m}$  и сложную геометрию исследуемых образцов. Характерным примером может служить задача визуализации и измерения формы и размеров дефектов поверхности материала втулок, держателей, валов и т.д.

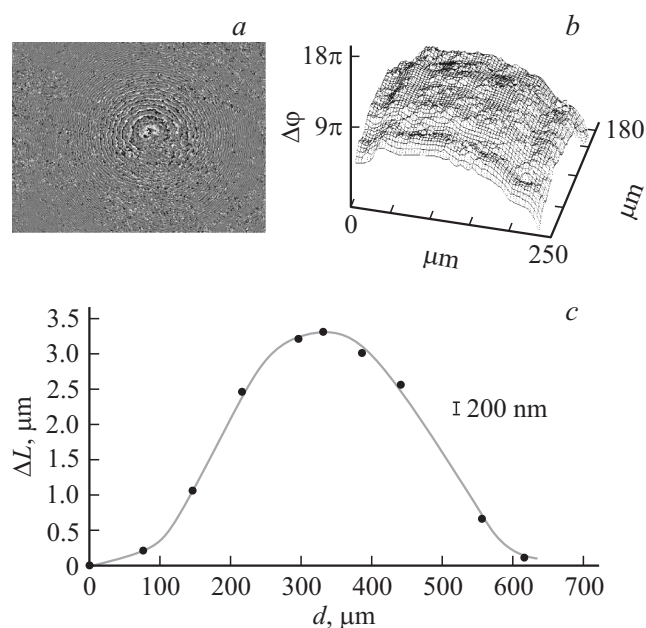
Для решения задачи получения информации о дефектных областях и оценки характерных размеров дефектов в работе предлагается использовать метод репликации. Реплики изготавливались методом фотолитографии на участке поверхности исследуемого образца (рис. 1) с использованием фотополимеризующихся при действии ультрафиолетового света негативных прозрачных в оптическом диапазоне полимерных композиций. В работе использовалась жидкая фотополимеризующаяся композиция (ФПК) „ТИОЛ“, разработанная Нижегородским предприятием „Репер-НН“ и состоящая из олигоэпоксидиакрилата ЭАС-20М (45 mass%) и бензилметакрилата (БМА) (55 mass %) [5]. Фотоинициатором служил 2,2-диметокси-2-фенилацетофенон (ДМФАФ), концентрация в смеси  $0.03\ \text{mol/l}$ . Для визуализации дефектов образца,

зафиксированных на реплике, и последующих измерений использовался метод регистрации разности набега фазы в модифицированной внеосевой голографической схеме Лейта–Упатниекса (выбрана оптическая схема, предназначенная для регистрации на прохождение) с цифровой регистрацией голографического изображения [6].

В нашем случае ФПК использовалась для получения своеобразной обратной маски к исследуемой поверхности, т.е. для получения негативного оттиска нужного фрагмента образца для дальнейшего исследования с помощью оптической микроскопии, растровой электронной микроскопии и оптической интерферометрии. На предварительно подготовленную (очищенную ацетоном ОСЧ) поверхность образца тонким слоем наливался фотополимер таким образом, чтобы все микрополости были заполнены. Наиболее оптимальные образцы для последующего экспонирования получались с толщинами от 1 до 2.5 мм. В более толстых образцах после экспонирования наблюдались воздушные микрополости, которые негативно влияют на последующую обработку данных.

Экспонирование производилось действием УФ-света с длиной волны  $\lambda = 350\text{--}420\text{ nm}$  на установке совмещения и экспонирования ЭМ-5026М1. Время экспозиции для разных толщин образцов подбиралось экспериментально, так как процесс полимеризации проходит послойно. Время экспозиции для толщин от 1 до 2.5 мм составляло соответственно от 120 до 180 с в зависимости от толщины маскирующего слоя. Для предотвращения ингибирующего воздействия кислорода на процесс полимеризации композиция на время экспонирования закрывалась лавсановой пленкой. После прохождения фотополимеризации проводилось термоотверждение в конвекционном шкафу с аналогичным подбором времен выдержки образцов с различной толщиной. Время выдержки при температуре 90°C в конвекционном шкафу составляло 40–60 min в зависимости от толщины полимерного оттиска образца. Контроль полученных образцов осуществлялся при помощи оптического микроскопа LeicaDM-4000 и заключался в установлении качества оттиска, проверке на отсутствие воздушных микрополостей в приготовленном образце.

Полученные оттиски исследовались на оригинальной цифровой внеосевой голографической схеме с целью установления фазового набега и его численной интерпретации. Используемая голографическая схема (рис. 1) основана на схеме Лейта–Упатниекса, где сформированный



**Рис. 2.** Результаты обработки цифровой голограммы: *a* — восстановленное распределение фазы; *b* — трехмерное распределение набега фазы (оптическая длина) центральной части отпечатка; *c* — профиль центрального поперечного сечения отпечатка.

системой 1 микрообъектив — линза луч лазера разделяется светоделительной пластинкой 2 на предметный и опорный лучи. Предметный луч проходит через исследуемый объект 4, и с помощью объектива 5 строится его увеличенное изображение в плоскости регистрирующей фотоэлектрической матрицы 7. Опорный луч после светоделительной пластинки направляется зеркалом 3 на полупрозрачное зеркало 6, с помощью которого совмещаются опорный и предметный лучи, образуя угол сходимости, необходимый для разделения порядков восстановленного изображения. Интерференционная картина в плоскости регистрации оцифровывается матрицей, формируя соответственно цифровую голограмму. Отличительной особенностью данной схемы является то, что из-за микроскопических размеров изменений, наблюдаемых на

объекте, применяется увеличивающий объектив (используется объектив Zeiss ACHROPLAN 40x/0.8), что позволяет снизить максимальные пространственные частоты и компенсировать низкую для голографии разрешающую способность цифровых матриц.

Для получения оптической толщины объекта необходимо вычислить разность фаз волн, восстановленных из голограмм, полученных при одних и тех же условиях: из голограммы объекта и из голограммы, полученной той же схемой без объекта и содержащей все фазовые набеги и амплитудные искажения, вносимые схемой. Таким образом, цифровая интерферометрия устраняет помехи, вносимые элементами оптической схемы. Для восстановления голограмм сфокусированного изображения в цифровой голографии применяют алгоритмы, основанные на использовании прямого и обратного преобразований Фурье с фильтрацией в частотной плоскости. Для реконструкции фазового набега используется вычисление разности фаз комплексных амплитуд волн, прошедших через объект в двух сравниваемых состояниях [6]:

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \arctg[\operatorname{tg}(\phi_1 - \phi_2)] = \arctg\left[\frac{\operatorname{tg}\phi_1 - \operatorname{tg}\phi_2}{1 + \operatorname{tg}\phi_1 \operatorname{tg}\phi_2}\right] \\ &= \arctg\left[\frac{\operatorname{Im}(A_1)\operatorname{Re}(A_2) - \operatorname{Im}(A_2)\operatorname{Re}(A_1)}{\operatorname{Re}(A_1)\operatorname{Re}(A_2) + \operatorname{Im}(A_1)\operatorname{Im}(A_2)}\right],\end{aligned}$$

где комплексные амплитуды восстановленных объектных волн  $A_1$  и  $A_2$  вычисляются непосредственно из данных, полученных восстановлением цифровых голограмм, а устранение неоднозначности арктангенса проводится алгоритмом разворачивания фазы [7,8] (добавлением или вычитанием  $\pi k$ ).

На рис. 2, *a, b* приведены результаты обработки цифровой голограммы реплики объекта, соответствующие центру отпечатка. Область дефекта представляет собой след от сферического индентора после приложения нагрузки, размер поля зрения  $2140 \times 1600$  пикселей, что соответствует размеру  $250 \times 187 \mu\text{m}$ . После выполнения преобразования Фурье по интенсивности спектра определяется расположение порядков дифракции, выделяется область порядка дифракции, с которого производится восстановление распределения комплексной амплитуды и фазы записанного участка. Восстановление глубины изменения профиля (оп-

тической длины пути) поверхности производится на основе выражения

$$\Delta L_{opt} = \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi},$$

с учетом гомогенности распределения коэффициента преломления в образце полимера получаем, что при набеге фазы  $\Delta\phi = 3.5\pi$  и длине волны зондирующего излучения  $\lambda = 633 \text{ nm}$  длина оптического пути  $\Delta L_{opt}$  будет порядка  $1 \mu\text{m}$ , а для получения реальных глубин результаты необходимо разделить на коэффициент преломления материала реплики  $k \approx 1.6$ .

Восстановленный по набору голограмм соседних областей профиль („оптическая высота“) отпечатка представлен на рис. 2, с, рассчитанная глубина профиля отпечатка составляет  $3.3 \mu\text{m}$ . Контроль точности проведения измерений может быть выполнен различными способами. Так, в нашем случае на объекте хорошо видны царапины в виде линейных продолжительных возвышений. Проведенные измерения на участке реплики, содержащем только отпечатки царапин, дают средний размер оптической высоты дефектов порядка  $0.3 \mu\text{m}$ , что хорошо согласуется с измерениями, выполненными на изначальном образце на сканирующем зондовом микроскопе. Кроме того, проведена регистрация серии изображений, представляющих собой распределение сигнала отражения от поверхности образца, на инвертированном конфокальном лазерно-сканирующем микроскопе LSM 710 (Carl Zeiss) с шагом по глубине  $0.47 \mu\text{m}$ . На полученных изображениях было хорошо видно изменение кривизны дуги сечения визуализируемого дефекта в каждой следующей фокальной плоскости, что, с учетом сферической геометрии исследуемого дефекта образца, позволило оценить зависимость изменения радиусов сечения с высотой фокальной плоскости, характеризующую профиль высоты (глубины) дефекта, и характерный размер вмятины. Рассчитанная глубина отпечатка составила  $3.4 \mu\text{m}$ .

Таким образом, голографический метод измерения профиля высоты дефектов, основанный на получении прозрачных реплик с поверхности объекта сложной формы, с последующей цифровой регистрацией и вычислением набеге фазы по восстановленной цифровой голограмме, дает адекватные, сравнимые с другими методами исследования результаты. Можно также отметить, что данный метод позволяет преодолеть ряд трудностей, связанных с интерпретацией результатов измерений, в частности, наклон и расположение образца не влияют

на фактическую толщину объекта при вычислении набега фазы путем восстановления цифровых голограмм, что устраняет неоднозначность определения глубины, связанную с наклоном образца.

## Список литературы

- [1] Экспериментальная механика: в 2 т. / Под ред. А. Кобаяси. М.: Мир, 1990.
- [2] Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Макаров П.В. и др. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 298 с.
- [3] Минеев С.А., Морозов О.А., Сотникова О.В., Гущина Ю.Ю. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2000. № 7. С. 96–98.
- [4] Семенова О.В., Зашивалова И.А., Морозов О.А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 14. С. 32–39.
- [5] Treushnikov V.M., Chesnokov S.A. // J. Photochem. Photobiol. A. Chem. 2008. V. 196. N 2-3. P. 201–209.
- [6] Муравьева М.С., Дуденкова В.В., Рыбников А.И., Захаров Ю.Н. // Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 8-9. С. 646–653.
- [7] Рыбников А.И., Дуденкова В.В., Муравьева М.С., Захаров Ю.Н. // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 7. С. 66–73.
- [8] Popescu G. Quantitative phase imaging of cells and tissues. McGraw-Hill Companies, Inc., 2011. 362 p.