

УДК 544.032.65

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ  
ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
СТРУКТУР НА ПЛЕНКАХ ТИТАНА НА ПОЛИМЕРНЫХ ПОДЛОЖКАХ ПРИ  
ДЕФОРМАЦИИ**

**Васильев М.Д. (ИТМО)**

**Научный руководитель – кандидат технических наук Синева Д.А.  
(ИТМО)**

**Введение.** В настоящее время большой интерес вызывают оптические свойства и особенности формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) с целью поиска практических применений периодических рельефов такого типа в различных областях науки и промышленности. К настоящему моменту уже были продемонстрированы возможности использования таких структур не только как дифракционных элементов, но и в качестве оптических элементов, влияющих на поляризацию падающей электромагнитной волны [1]. Помимо этого, ЛИППС приобретают применение в повседневной жизни человека. Уже были представлены работы о технологии не копируемых защитных меток на основе таких структур, которые могут применяться как для защиты дорогостоящих товаров от подделок, так и для генерации уникальных защитных кодов [2]. Кроме того, ЛИППС потенциально могут найти применение и в приборостроении. Например, был показан ряд работ об использовании ЛИППС в качестве элементов особой топологии поверхности светодиодов для повышения их эффективности [3]. Также были опубликованы работы об использовании таких структур в качестве дифракционных элементов в оптических тензометрических датчиках из массивной стали [4]. Однако к настоящему моменту такое направление использования испытывает значительные трудности в развитии из-за особенностей абляционных ЛИППС, имеющих большую погрешность периодичности, а также из-за свойств массивных металлов. Настоящее исследование предлагает способ решения проблем оптической тензометрии.

**Основная часть.** Ранее уже были представлены результаты по подбору и оптимизации режимов импульсного наносекундного лазерного воздействия ( $\lambda = 1064$  нм) для создания термохимических лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ТЛИППС) на тонкой пленке титана толщиной 30 нм на полиимидной подложке толщиной 200 мкм [5]. Получаемые таким методом структуры представляют собой регулярный рельеф на поверхности материала с периодом  $T = 660 \pm 40$  нм, что объясняется особенностями формирования ТЛИППС на тонкопленочных материалах, где помимо длины волны возбуждающего излучения значительный вклад вносят характеристики подложки. Периодический рельеф, сформированный окислительными процессами, имеет большую упорядоченность, чем абляционные ЛИППС, что способствует повышению точности измерений. Кроме того, использование тонкопленочного материала на полимерной подложке способствует значительному снижению порога чувствительности к деформации. Также уже были продемонстрированы результаты исследования спектральных характеристик таких структур при различных деформациях: растяжение, сжатие, кручение и изгиб – для решения задач тензометрии [6]. Однако такие результаты имеют большой разброс значений из-за растровых измерений и приборной погрешности, из-за чего на графиках появляются шумы, что значительно усложняет исследование смещений экстремумов зависимостей. Для решения этой проблемы был разработан метод обработки экспериментально измеренных данных при помощи математического пакета Wolfram Mathematica. По результатам обработки были получены наиболее релевантные зависимости смещения минимумов и максимумов коэффициентов отражения и пропускания ТЛИППС. Наибольший отклик проявляется при измерении смещения минимума коэффициента отражения при растягивающей нагрузке:  $\Delta\lambda \approx 60$  нм/Н.

Еще одним методом анализа оптического отклика эластичных дифракционных решеток

является исследование смещения ненулевых порядков дифракции, вызванное изменением периода решеток. Так как ТЛИППС на тонкопленочных образцах титана представляют собой периодический рельеф значительной глубины по отношению к начальной толщине пленки, такие структуры можно рассматривать как дифракционные решетки, подчиняющиеся соответствующим законам оптики. По результатам проведения экспериментов были показаны зависимости смещения  $\pm 1$  порядков дифракции при различных видах деформации как на пропускание, так и на отражение с длиной волны сигнального лазера  $\lambda = 532$  нм. В результате было установлено, что при деформациях структуры демонстрируют характерное сближение первых порядков дифракции.

**Выводы.** По результатам настоящего исследования были показаны уточненные зависимости смещения минимумов и максимумов спектров отражения и пропускания ТЛИППС на тонкой пленке титана на полиимидной подложке при различных видах деформации. Кроме того, были представлены результаты исследования дифракционных свойств периодических решеток такого типа при деформации. Также была произведена оценка перспективности такого метода измерения деформации. Полученные данные имеют значительный потенциал развития для решения задач оптической тензометрии.

*Проект поддержан грантом РФФ №21-79-10241. Авторы благодарят ресурсный центр «Нанотехнологии» СПбГУ за помощь в получении образцов титановых пленок на гибких диэлектрических подложках. Авторы благодарят научную группу Москвина М. К. за помощь в проведении экспериментов на дифракционной схеме.*

#### **Список использованных источников:**

1. Skoulas E. et al. Laser induced periodic surface structures as polarizing optical elements //Applied Surface Science. – 2021. – Т. 541. – С. 148470.
2. Moskvina M.K., Shchedrina N.N., Dolgoplov A.D., Prokofiev E.V., Romanov V.V., Sinev D.A., Veiko V.P., Odintsova G.V. Laser-based formation of periodic structures as a method for the one-stage production of security holograms//Journal of Optical Technology, 2023, Vol. 90, No. 4, pp. 170-178
3. Chen J. T. et al. Laser-induced periodic structures for light extraction efficiency enhancement of GaN-based light emitting diodes //Optics Express. – 2012. – Т. 20. – №. 5. – С. 5689-5695.
4. Gräf S. et al. Mechano-responsive colour change of laser-induced periodic surface structures //Applied Surface Science. – 2019. – Т. 471. – С. 645-651.
5. Васильев М.Д., Суворов А.Р., Рудь Д.А., Синева Д.А. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНО- ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР НА ОБРАЗЦАХ ТИТАНА РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ//Сборник научных трудов Международной научно-технической молодежной конференции "ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ КОНСТРУКЦИОННОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ" - 2022. - С. 333-336
6. Васильев М.Д., Синева Д.А. Исследование спектральных зависимостей оптических характеристик термохимических лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур при растягивающих нагрузках//Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО, [2023]. – 2023