

Голографическая запись на базе двумерных рельефов на основе лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур

Д. А. Синев, Я. М. Андреева, А. Р. Суворов
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Продемонстрирована запись прототипов защитных знаков на тонких пленках титана и диоксида титана, обладающих дисперсионными и поляризационными характеристиками с изменением цвета в зависимости от угла наблюдения. На пленках титана показана возможность формирования линейно-упорядоченных, ортогональных и гексагональных рельефов. Направление уклона одномерного рельефа, как и углы между осями симметрии двумерных решеток полностью управляемы и зависят от угла поворота плоскости поляризации записывающего излучения. На пленках диоксида титана, импрегнированных наночастицами серебра, в свою очередь, показана возможность формирования как одномерных, так и двумерных рельефов в зависимости от параметров лазерной записи (плотности энергии и скорости построчного сканирования).

Ключевые слова: Оптика, Дифракционные оптические элементы, ЛИППС, Лазерная физика, Тонкие пленки, Защитные знаки, Цветная лазерная маркировка.

Цитирование: Синев, Д. А. Голографическая запись на базе двумерных рельефов на основе лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур / Д. А. Синев, Я. М. Андреева, А. Р. Суворов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 197–200.

Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС) – это явление, заключающееся в образовании на поверхности материала совокупности периодических рельефов под действием лазерного излучения. Появление этих структур носит универсальный характер, исследователи изучают их получение на массивных металлах [1] и металлических плёнках [2], полупроводниках [3] и диэлектриках [4]. Высокий интерес к ЛИППС обусловлен широкой применимостью в различных областях науки, техники, включая медицину и оптику. Большое количество работ посвящено использованию ЛИППС для управления гидрофильными и гидрофобными свойствами поверхностей материалов [5–6], также такие структуры вполне успешно применяются для создания антибактериальных покрытий или для лучшего внедрения имплантата в организме [7].

Субмикронный период получаемых решёток позволяет с их помощью вполне успешно управлять оптическими свойствами поверхности. Благодаря использованию линейно поляризованного лазерного излучения имеется возможность управлять ориентацией и топологией получающихся решёток, что позволяет использовать их для записи функциональных фотонных элементов типа радужных голограмм заданной конфигурации, в качестве естественного продолжения и развития существующих методов современной голографической записи [8].

В настоящей работе продемонстрирована успешная запись ЛИППС на тонких плёнках титана, а также на тонких пористых плёнках диоксида титана, импрегнированные ионами, молекулярными кластерами и наночастицами серебра, нанесённых на диэлектрические подложки. На основе одномерных рельефов получены двумерные решётки, представляющие собой суперпозицию двух различно ориентированных ЛИППС в одной области. Двумерные структуры обладают оптическими свойствами, отличными как от необработанной плёнки, так и от одномерного рельефа. Процесс записи производился на лазерном комплексе МиниМаркер2 с иттербиевым волоконным лазером в качестве источника с центральной длиной волны $\lambda = 1,07$ мкм (для пленок титана) и 355 нм (третья гармоника, для пленок диоксида титана). Выявлены рабочие режимы записи периодических рельефов, составившие:

- на пленках титана на жестких кварцевых подложках (выявленные температурные режимы составляют порядка 450–700 °С к моменту окончания первого импульса), необходимая плотность энергии 0,04–0,07 Дж/см², необходимое число импульсов не менее 15 тысяч, частота следования импульсов 40–60 кГц, при длительности импульсов 4 нс и скоростях сканирования порядка 0,1 мм/с);

- на пленках диоксида титана, легированных наночастицами серебра на жестких стеклянных подложках (плотности энергии 0,11–0,3 Дж/см² для низкочастотных ЛИППС (период порядка 1λ) и 0,11–0,18 Дж/см² для высокочастотных ЛИППС (период порядка $0,5\lambda$), необходимое число импульсов порядка 10–100, длительности импульсов 1,5 нс, частота следования импульсов 300 кГц, при скоростях сканирования 50–300 мм/с для высокочастотных ЛИППС и 400–500 мм/с для низкочастотных ЛИППС.

Для пленок титана показана возможность формирования линейно-упорядоченных (одномерных) рельефов с периодом порядка $0,7\lambda$, ортогональных (двумерных) рельефов с периодом порядка $0,7\lambda$ по обеим осям симметрии, и гексагональных (двумерных) рельефов с периодом порядка $0,7\lambda$ по одной (основной) и порядка $0,5-0,7\lambda$ по двум другими осям. Направление уклона одномерного рельефа, как и углы между осями симметрии двумерных решеток полностью управляемы и зависят от угла поворота плоскости поляризации излучения записывающего пучка (для двумерных решеток - от разницы между углами поворота плоскостей поляризации при первом и втором этапе записи). Проведен анализ физико-химических характеристик записанных структур методами просвечивающей электронной микроскопии и рамановской спектроскопии, изучены оптические свойства рельефов в отраженном естественном и поляризованном свете (рисунок 1). Результаты проведенного исследования позволяют говорить о существенных перспективах выявленных режимов записи упорядоченных структур для решения задач цветной маркировки, записи защитных знаков, отражательных поляризаторов и функциональных элементов фотоники.

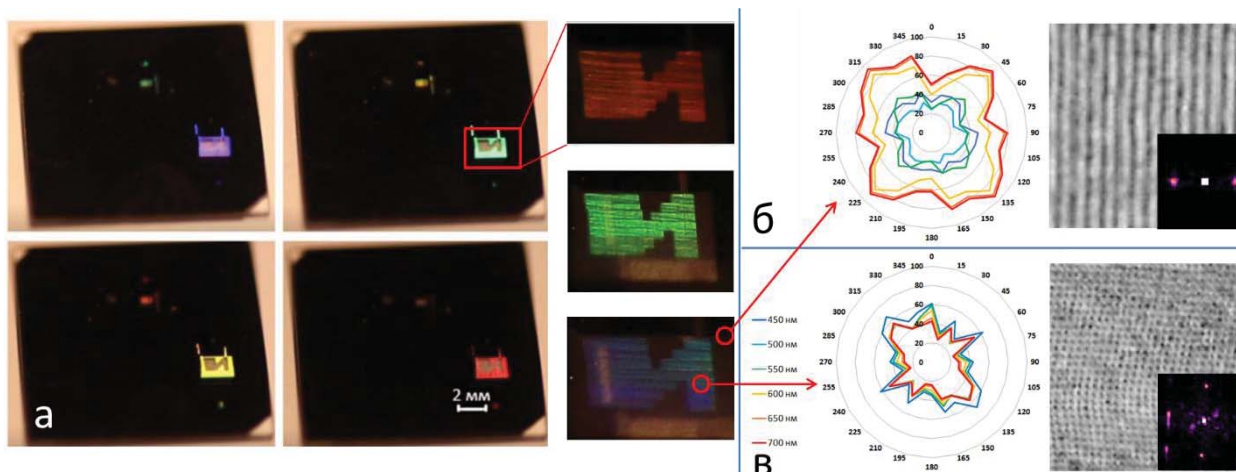


Рис. 1. (а) Прототип защитного знака, записанный на тонкой пленке титана при различных углах освещения естественным светом. Фон рисунка сформированным одномерным рельефом, символ – двумерным ортогональным рельефом. Результаты микроскопии структур и диаграммы интенсивности отраженного света при измерении в скрещенных поляризаторах в зависимости от угла поворота структуры приведены на рисунках (б) и (в) соответственно; на врезках приведены результаты 2Д-БПФ анализа соответствующих изображений.

Благодарность

Исследование поддержано грантом РФФ № 21-79-10241.

Список источников

- [1] Okamuro K. et al. Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation // *Physical Review B*. – 2010. – Т. 82. – №. 16. – С. 165417.
- [2] Sinev D. A. et al. Formation of the Submicron Oxidative LIPSS on Thin Titanium Films During Nanosecond Laser Recording // *Nanomaterials*. – 2020. – Т. 10. – №. 11. – С. 2161.
- [3] Costache F., Kouteva-Arguirova S., Reif J. Sub-damage-threshold femtosecond laser ablation from crystalline Si: surface nanostructures and phase transformation // *Applied Physics A*. – 2004. – Т. 79. – №. 4. – С. 1429–1432.
- [4] Höhm S. et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures on silica // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – Т. 112. – №. 1. – С. 014901.
- [5] Baldacchini T. et al. Superhydrophobic surfaces prepared by microstructuring of silicon using a femtosecond laser // *Langmuir*. – 2006. – Т. 22. – №. 11. – С. 4917–4919.
- [6] Varlamova O. et al. Modification of surface properties of solids by femtosecond LIPSS writing: comparative studies on silicon and stainless steel // *Applied Physics A*. – 2017. – Т. 123. – №. 12. – С. 1–6.
- [7] Orazi L. et al. Osteoblast cell response to LIPSS-modified Ti-implants // *Key Engineering Materials*. – Trans Tech Publications Ltd, 2019. – Т. 813. – С. 322–327.
- [8] А. В. Достовалов, В. П. Корольков, С. А. Бабин. ЛИППС на объемных образцах и тонких пленках металлов: формирование, постобработка и возможные применения в качестве дифракционных микрорешеток. Голлография. Наука и практика : XIV международная конференция HOLOEXPO. Тезисы докладов / МГТУ им. Н. Э. Баумана, ООО «МНГС». – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, С. 122 – 126.

Holographic recording based on 2D reliefs by laser-induced surface periodic structures

D. Sinev, Y. Andreeva, A. Suvorov

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Prototypes of security signs were recorded on thin titanium and titanium dioxide films, with dispersion and polarization characteristics depending on the viewing angle. On titanium films, the possibility of forming linearly ordered, orthogonal, and hexagonal reliefs is shown. The direction of the slope of the one-dimensional relief, as well as the angles between the symmetry axes of the two-dimensional gratings, are completely controllable and depend on the angle of rotation of the polarization plane of the recording radiation. On titanium dioxide films impregnated with silver nanoparticles, in turn, the formation of both one- and two-dimensional reliefs depends on the parameters of laser writing (energy density and line scanning speed).

Keywords: Optics, Diffractive optical elements, LIPSS, Laser physics, Thin films, Security signs, Colour laser marking.