

# Методы записи радужных голограмм на стеклах

*Д. А. Синева, К. Ибрагим, А. Р. Суворов, А. Д. Пивоваров, Е. В. Усынина, Р. М. Мухсинова, Е. А. Авилова, В. А. Домакова, А. Рамос Веласкес, Я. М. Андреева*

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Показана возможность формирования элементов типа защитных радужных голограмм на стеклянных подложках за счет управляемого формирования термохимических лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур на предварительно нанесенных акцепторных пленках. Рассмотрены визуальные эффекты на рельефах, записанных на пленках титана нанесенных методом распыления в вакууме (характерные периоды рельефов после лазерной обработки составляют  $0,74 \pm 0,03$  мкм), на предварительно осажденных (лазерно-перенесенных) пленках титана и стали (периоды  $0,65 \pm 0,03$  мкм), на золь-гель плёнках диоксида титана с частицами серебра (периоды порядка  $0,35$  мкм и меньше).

*Ключевые слова:* Тонкие пленки, Композитные пленки, Лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры, Радужные голограммы, Защитные знаки.

*Цитирование:* Синева, Д. А. Методы записи радужных голограмм на стеклах / Д. А. Синева, К. Ибрагим, А. Р. Суворов, А. Д. Пивоваров, Е. В. Усынина, Р. М. Мухсинова, Е. А. Авилова, В. А. Домакова, А. Рамос Веласкес, Я. М. Андреева // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 324–328.

## Введение

Маркировка стёкол и других оптически прозрачных материалов широко востребована в разнообразных областях современного производства, например для нанесения маркировок на бытовые изделия, окна, стёкла транспортных средств, оптические элементы и ампулы медицинских препаратов. При этом обработка стеклообразных материалов механическими методами (шлифовкой и химическим матированием) является достаточно трудоёмким и времязатратным процессом ввиду их твердости и хрупкости, а нанесение маркировки на изделие методами штамповки ограничивает разрешающую способность и не позволяет достичь высокой устойчивости нанесенного символа. Помимо этого, возникает сложность нанесения элементов одновременно с высоким контрастом, разрешением и полихромностью, что принципиально важно в случае нанесения штрихкодов или защитных меток на изделия для их последующего считывания [1].

## Методы и материалы

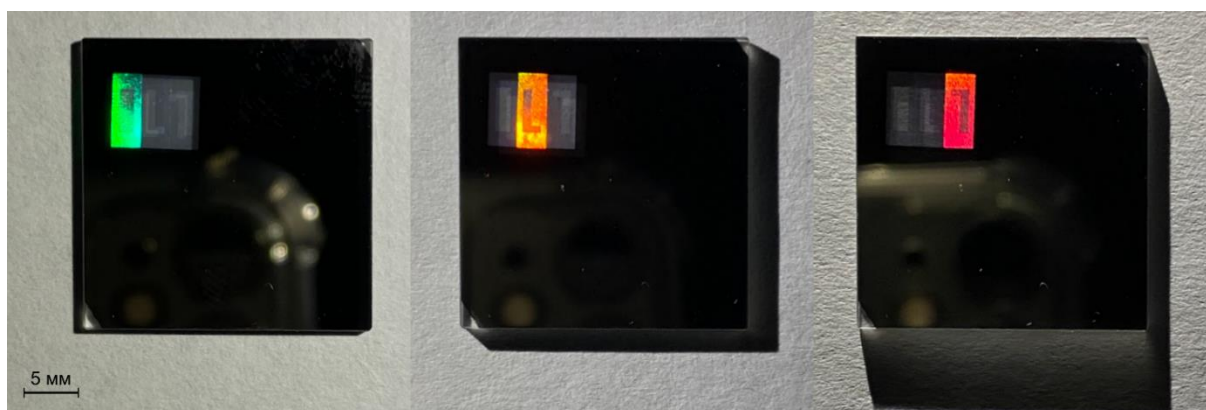
В настоящей работе описаны полученные результаты в области создания прототипов защитных радужных голограмм для маркировки стеклянных изделий. Предложенные подходы включают в себя предварительное нанесение на поверхность стеклянной подложки жертвенного слоя из материалов, склонных к образованию периодических рельефов под лазерным воздействием в результате интерференции падающего и рассеянного излучения (так называемые лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры, ЛИПЭС) [2]. Все результаты были получены под воздействием импульсов наносекундной

длительности излучения Yb-волоконного лазера на тонкопленочные материалы на стеклянных подложках. В качестве материалов были использованы три типа подложек:

- пленки титана толщиной 30 нм, нанесенные на подложку из кварцевого стекла путем распыления в вакууме [2],
- пленки титана и стали толщиной порядка 1 мкм, нанесенные на подложку из приборного стекла путем лазерно-индуцированного переноса на воздухе [1],
- пленки диоксида титана, допированные наночастицами серебра, толщиной 170-180 нм, нанесенные на подложку из приборного стекла золь-гель методом [3].

### Результаты и обсуждение

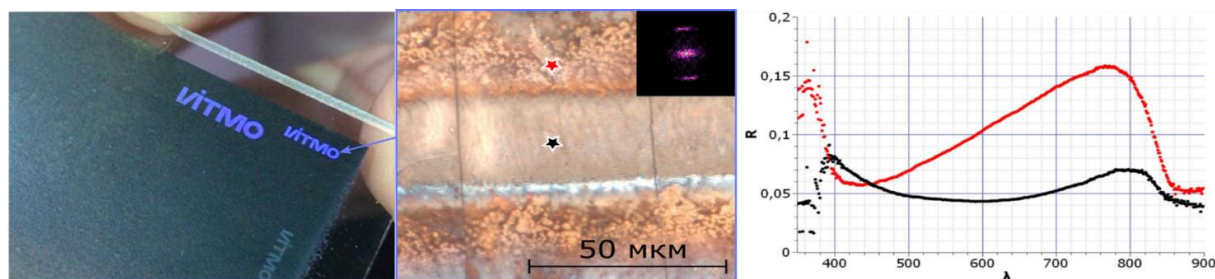
В результате окисления пленок титана под воздействием излучения с длиной волны 1,07 мкм, мощностью порядка 100 мВт и скоростью сканирования порядка 0,1 мм/с на их поверхности образуются упорядоченные рельефы (термохимические ЛИППС), характерный период которых составляет  $740 \pm 30$  нм. Получаемые рельефы могут быть комбинированы при двумерной развертке, а также при повторном экспонировании, для создания одномерных и двумерных рельефов типа поверхностных дифракционных решеток разнообразных конфигураций (рис. 1). Разнообразие получаемых структур обеспечивается поворотом вектора линейной поляризации лазерного излучения при экспонировании, что открывает потенциал широкой вариативности создания элементов защитных радужных голограмм, отличающихся геометрическими характеристиками (ориентация, симметрия, период, упорядоченность, топология и пр.).



**Рис. 1.** Пример радужной голограммы, записанной на тонкой пленке титана на кварцевом стекле при различном угле ориентации ЛИППС в сегментах. Цвет и порядок подсвечивания зависят от угла освещения

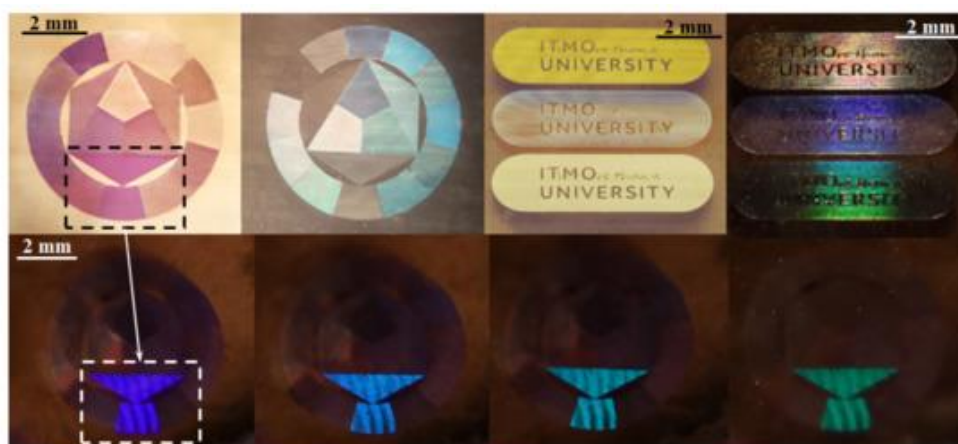
Запись ЛИППС на тонких металлических пленках открывает перспективу маркировки стеклянных изделий быстрым и доступным способом при помощи лазерного излучения. При этом, однако, необходимым является напыление металлического покрытия, осуществляемое обычно путем распыления мишени в вакууме. Заменить этот этап возможно за счет применения метода лазерно-индуцированного обратного переноса, при этом перенос осуществляется локально, что также устраняет необходимость удаления остаточного

металлического слоя в необработанных областях. В результате повторного экспонирования лазерно-перенесенных покрытий титана и стали излучением с длиной волны 1,07 мкм, мощностью порядка 500 мВт и скоростью сканирования порядка 1 мм/с, также образуются субмикронные рельефы, обладающие свойствами дифракционных решеток (рис.2).



**Рис. 2.** (а) Характерный вид и (б) микрофотография структуры на предварительно осажденной пленке титана после повторного экспонирования в режиме, способствующем формированию ЛИППС. На врезке приведен 2Д-БПФ спектр центральной области изображения. (б) Спектр отражения нормально поверхности образца: для исходной поверхности пленки (красный) и после нанесения ЛИППС, сонаправленного сканированию (черный).

Производительность записи может быть повышена с применением излучения УФ диапазона. К примеру, формирование полихромных меток типа защитных радужных голограмм было продемонстрировано при облучении тонких пористых пленок диоксида титана, пропитанных ионами, молекулярными кластерами и наночастицами серебра (диаметром до 10 нм), излучением с длиной волны 355 нм (третья гармоника иттербиевого волоконного лазера). Облучение производилось при скоростях сканирования 50–500 мм/с, комбинация различных режимов лазерного воздействия позволяла фиксировать различные цветные изображения со скрытыми защитными признаками на нанокompозитной пленке (рис.3).



**Рис. 3.** Примеры записи радужных голограмм на нанокompозитных решетках: каждый сектор получен с разными параметрами лазерной обработки (фотографии пропускания и отражения для разных углов освещения); логотип Университета ИТМО — фотографии в режимах отражения и рассеяния [3]

Например, при наблюдении в проходящем и отраженном свете каждый сектор элемента имеет собственный цвет, а при освещении структуры под небольшим зенитным углом проявляет дисперсионные свойства.

### **Заключение**

Предлагаемые подходы к маркировке стёкол за счет обработки предварительно нанесенных покрытий позволяют не только нанести однотонную контрастную метку, но и получить различные цветовые оттенки, что может служить как дополнительной степенью защиты от фальсификации, так и элементом дизайна изделия. Полная управляемость параметров формируемых элементов достигается благодаря возможности использовать металлические мишени различного состава, а также за счёт варьирования режимов лазерного воздействия, приводящего к локальному формированию структурированных покрытий с заданными свойствами.

### **Благодарности**

Работы выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №21-79-10241. Авторы благодарят: ЦКП ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН за помощь с проведением ПЭМ-анализа структур, МРЦ-НТ СПб ГУ за помощь с проведением СЭМ-анализа структур и напыление пленок титана, Dr. Francis Vocanson (Laboratoire Hubert Curien, St.Etienne, France) за подготовку пленок диоксида титана, ООО Лазерный центр за предоставленное оборудование.

### **Список источников**

- [1] **Ramos-Velazquez, A.** Laser-induced micro-scale polychrome marking of glass materials / A. Ramos-Velazquez, J. Amiaga, D. Pankin, G. Odintsova, R. Zakoldaev, V. Veiko // *Materials Letters*. — 2023. — Vol. 343. — pp. 134372. — DOI: 10.1016/j.matlet.2023.134372
- [2] **Sinev, D. A.** Formation of the Submicron Oxidative LIPSS on Thin Titanium Films During Nanosecond Laser Recording / D. A. Sinev, D. S. Yuzhakova, M. K. Moskvina, V. P. Veiko // *Nanomaterials*. — 2020. — Vol. 10. — No. 11. — pp. 2161. — DOI: 10.3390/nano10112161
- [3] **Andreeva, Y.** Laser Fabrication of Highly Ordered Nanocomposite Subwavelength Gratings / Y. Andreeva, A. Suvorov, E. Grigoryev, D. Khmelenin, M. Zhukov, V. Makin, D. Sinev // *Nanomaterials*. — 2022. — Vol. 12. — No. 16.— P. 2811.

## Methods of rainbow holograms recording on glass

*D. Sinev, Q. Ibrahim, A. Suvorov, A. Pivovarov, E. Usynina, R. Mukhsinova, E. Avilova,  
V. Domakova, A. Ramos-Velazquez, Y. Andreeva*

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Fuctional elements such as protective rainbow holograms on glass substrates are developed based on the controlled formation of thermochemical laser-induced surface periodic structures on the pre-deposited acceptor films. Visual effects are shown on gratings recorded on titanium films deposited by vacuum sputtering (the characteristic periods of reliefs after laser processing are  $0.74 \pm 0.03 \mu\text{m}$ ), on pre-deposited (laser-transferred) titanium and steel films (periods  $0.65 \pm 0.03 \mu\text{m}$ ), on sol-gel films of titanium dioxide with silver particles (periods of the order of 350 nm and less).

*Keywords:* Thin films, Composite films, Laser-induced periodic surface structures, Rainbow holograms, Protective signs.