

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОКИСЛЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ТИТАНА

Храмов А. С.<sup>1</sup>, Синева Д. А.<sup>1</sup>, Шахно Е. А.<sup>1</sup>  
Научный руководитель – д-р техн. наук Шахно Е. А.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Университет ИТМО  
askhramov@itmo.ru

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10230, <https://rscf.ru/project/24-79-10230/>.

### Введение

Лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС) являются предметом большого количества исследований [1, 2]. В последнее время отдельное внимание привлекают так называемые термохимические ЛИППС на металлических пленках на прозрачных подложках [3–8]. В термохимических режимах образование ЛИППС происходит вследствие локального окисления и увеличения толщины пленки при окислении, при этом структуры не загрязняются продуктами абляции и получают высокоупорядоченными [4]. Среди материалов пленки одним из наиболее перспективных для записи термохимических ЛИППС является титан, поскольку имеет сравнительно высокую скорость окисления, относительно низкую теплопроводность и образует прозрачный оксид  $TiO_2$  [5]. Термохимические ЛИППС используются, например, для записи дифракционных элементов, решеток Брэгга на оптическом волокне [6].

Несмотря на то, что существуют исследования, анализирующие влияние параметров лазерного воздействия на различные свойства термохимических ЛИППС (морфологию, химический состав, дифракционную эффективность) [6–8], недостаточно изучены особенности роста оксида при формировании ЛИППС. В то же время результаты работ по лазерно-индуцированному окислению тонких пленок [9, 10] не подходят для описания роста оксида при формировании ЛИППС, поскольку не учитывают особенности образования и распространения поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ), являющихся основной причиной образования ЛИППС. Данная работа представляет теоретическое моделирование роста термохимических ЛИППС на оптически тонкой пленке титана при многоимпульсном лазерном воздействии для различных параметров облучения за счет образования и роста ПЭВ.

### Основная часть

Согласно предложенной нами ранее модели [11, 12] формирование термохимических ЛИППС на пленках металлов происходит за счет образования ПЭВ на границе раздела пленка-подложка и ее воздействии на пленку совместно с падающим лазерным излучением. В максимумах ЛИППС энергия ПЭВ максимальна, в то время как в минимумах, соответствующих узлам ПЭВ, она равна нулю [11]. Таким образом, на рост оксида в максимумах ЛИППС, в отличие от минимумов, существенное влияние оказывает энергия ПЭВ. В минимумах же нагревание и окисление происходят за счет энергии лазерного излучения. Окисление в максимумах и минимумах термохимических ЛИППС рассматривается независимо, что является справедливым из-за того, что период структур оказывается больше характерного значения длины теплопроводности.

На длине волны 1064 нм поглощательная способность оксида титана ниже, чем у самого титана, уменьшение поглощения пленки при росте оксида принято линейным.

Рост оксида предполагается происходящим по параболическому закону Вагнера. Температура пленки рассчитывается по формуле для нагревания пленки на подложке [13]. Нагревание и окисление пленки для каждого импульса рассматривается отдельно, поскольку при исследуемых частотах повторений импульсов не происходит накопления тепла. В максимумах ЛИППС при расчете температуры учитывается вклад ПЭВ, амплитуда которой принята пропорциональной амплитуде ЛИППС [14] с коэффициентом пропорциональности  $\beta_1$ . Увеличение толщины пленки при окислении рассчитывается с учетом коэффициента Пиллинга-Бедворта [15]. Исследовано влияние количества импульсов, плотности мощности, длительности импульса на рост оксида. Проведено сравнение результатов расчетов с результатами экспериментов.

### Выводы

В работе показано, что окисление ЛИППС происходит с наибольшей скоростью при первых импульсах, далее рост оксида замедляется и достигает насыщения. Причиной замедления окисления является понижение температуры при каждом последующем импульсе в связи с падением поглощения пленки за счет уменьшения ее толщины. Температура пленки при рассматриваемых плотностях мощности не превышает температуру плавления титана. Вклад энергии ПЭВ существенно повышает толщину оксида в максимумах ЛИППС при определенных условиях. Вычислена дифракционная эффективность рассчитанных структур. Результаты проведенных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

### Литература

1. Bonse J., Gräf S. Maxwell meets Marangoni—a review of theories on laser-induced periodic surface structures // *Laser & Photonics Reviews*. 2020. Vol. 14, no. 10. P. 2000215.
2. Gräf S. Formation of laser-induced periodic surface structures on different materials: Fundamentals, properties and applications // *Advanced Optical Technologies*. 2020. Vol. 9, no. 1-2. P. 11-39.
3. Camacho-Lopez S. et al. Polarization-dependent single-beam laser-induced grating-like effects on titanium films // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 255, no. 5. P. 3028-3032.
4. Öktem B. et al. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses // *Nature photonics*. 2013. Vol. 7, no. 11. P. 897-901.
5. Dostovalov A. V. et al. Study of the formation of thermochemical laser-induced periodic surface structures on Cr, Ti, Ni and NiCr films under femtosecond irradiation // *Quantum Electronics*. 2017. Vol. 47, no. 7. P. 631-637.
6. Bronnikov K. et al. Highly regular laser-induced periodic surface structures on titanium thin films for photonics and fiber optics // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024. Vol. 16, no. 50. P. 70047-70056.
7. Bronnikov K. et al. Regulating morphology and composition of laser-induced periodic structures on titanium films with femtosecond laser wavelength and ambient environment // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 306.
8. Xie H. et al. Super-regular femtosecond laser nanolithography based on dual-interface plasmons coupling // *Nanophotonics*. 2021. Vol. 10, no. 15. P. 3831-3842.
9. Шахно Е. А., Нгуен К. З. Динамика лазерного нагревания и окисления тонких металлических пленок с учетом изменения поглощательной способности // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. №. 4. С. 31-37.
10. Xia F. et al. Mechanism of pulsed-laser-induced oxidation of titanium films // *Optical Materials Express*. 2019. Vol. 9, no. 10. P. 4097-4103.
11. Khramov A. S. et al. Subwavelength LIPSS-based nanopatterning of thin titanium films // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2026. Vol. 16, no. 6. P. 755-762.

12. Khramov A. S. et al. Abnormal period of laser-induced periodic surface structures on thin metal films impacted by substrate optical properties // Next Materials. 2026. Vol. 11. P. 101704.
13. Вейко В. П., Шахно Е. А. Лазерные технологии в задачах и примерах: Учебное пособие // СПб: Университет ИТМО. – 2014. 88 с.
14. Либенсон М. Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние // СПб: Наука. – 2007. 423 с.
15. Birks N., Meier G. H., Pettit F. S. Introduction to the high temperature oxidation of metals // Cambridge University Press. – 2006. 352 p.