

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель директора  
по научной работе ИАиЭ СО РАН  
д.т.н.  
Корольков Виктор Павлович



«5» сентября 2022 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматике  
и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук

(ИАиЭ СО РАН)

Диссертация «Формирование лазерно-индуцированных периодических  
поверхностных структур на пленках металлов и полупроводников» выполнена в  
лаборатории волоконной оптики ИАиЭ СО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Бронников Кирилл Алексеевич  
работал в ИАиЭ СО РАН в должности и. о. инженера-исследователя. А также проходил  
обучение в аспирантуре Новосибирского Государственного Университета в период с  
2018-2022 гг.

В 2018 г. окончил магистратуру физического факультета Новосибирского  
государственного университета по направлению подготовки 03.03.02 «физика». В 2022  
г. окончил аспирантуру Новосибирского государственного университета по  
направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», специальности 01.04.05 «Оптика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов № 2022/24 выдана 1 июля 2022 г. НГУ.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Достовалов  
Александр Владимирович, старший научный сотрудник лаборатории волоконной  
оптики ИАиЭ СО РАН.

Диссертация «Формирование лазерно-индуцированных периодических  
поверхностных структур на пленках металлов и полупроводников» была рассмотрена  
на семинаре.

На семинаре присутствовали:

Шапиро Давид Абрамович, д. ф.-м. н., профессор, ИАиЭ СО РАН

Бабин Сергей Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, ИАиЭ СО РАН

Фруммин Леонид Лазаревич, д. ф.-м. н., ИАиЭ СО РАН

Ильичёв Леонид Вениаминович, д. ф.-м. н., профессор, ИАиЭ СО РАН

Лобач Иван Александрович, к. ф.-м. н., ИАиЭ СО РАН

Достовалов Александр Владимирович, к. ф.-м. н., ИАиЭ СО РАН

Харенко Денис Сергеевич, к. ф.-м. н., ИАиЭ СО РАН

Абдуллина Софья Рафисовна, к. ф.-м. н., ИАиЭ СО РАН

Воликова Анастасия Михайловна, ИАиЭ СО РАН

Ткаченко Алина Юрьевна, ИАиЭ СО РАН

Дробышев Роман Владимирович, ИАиЭ СО РАН

Антропов Александр Алексеевич, ИАиЭ СО РАН

Жданов Иннокентий, ИАиЭ СО РАН

Гладких Семён Александрович, ИАиЭ СО РАН

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

**Актуальность работы.**

Модификация и структурирование поверхности сверхкороткими лазерными импульсами является активно исследуемой тематикой в физике взаимодействия лазерного излучения с веществом. Ввиду широкого спектра различных практических применений микро- и наноструктурированной поверхности в таких областях, как фотоника, интегральная оптика, фотоэлектрические преобразователи, трибология, сенсорные устройства и других, исследуются различные методы создания периодических структур на поверхности пленок металлов и полупроводников. Одним из перспективных подходов является формирование лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС), образующихся в области лазерного фокального пятна за счет интерференции между падающим и рассеянным полем. Явление ЛИППС по-прежнему вызывает значительный исследовательский интерес в связи с новыми неизученными аспектами их формирования, особенно в отношении

недавно обнаруженного типа ЛИППС, образующихся в результате термохимической реакции окисления, исследованию особенностей образования которых посвящена основная часть представленной диссертации. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной.

Методики, применяемые в диссертационной работе К. А. Бронникова, являются современными и полностью подходят для решения поставленных задач.

Основная цель диссертационной работы К. А. Бронникова состояла в исследовании особенностей формирования упорядоченных термохимических и абляционных ЛИППС с помощью фемтосекундного лазерного излучения на пленках металлов и полупроводников, а также поиске оптимальных режимов с точки зрения производительности записи и упорядоченности структур. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: сформировать ЛИППС структуры на пленках металлов (Cr, Ti, Hf) и полупроводника (Si) различной толщины при различных параметрах излучения, записи и внешних условиях; провести всестороннее исследование морфологии полученных ЛИППС, их химического состава, внутренней структуры; выполнить численные расчеты для объяснения ряда наблюдаемых зависимостей; продемонстрировать возможности применения метода лазерного структурирования поверхности в практических приложениях.

#### **Личное участие соискателя.**

В ходе выполнения работ К. А. Бронников принимал активное участие в постановке задач, проведении основных экспериментов, анализе и обсуждении результатов, а также презентации результатов на научных конференциях и написании статей. При выполнении диссертационной работы К. А. Бронников проявил себя как квалифицированный специалист, умеющий работать в коллективе, решать сложные задачи, а также проводить исследования высокого научного уровня.

#### **Новизна.**

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Обнаруженная зависимость периода термохимических ЛИППС (ТЛИППС) от толщины пленки в случае Cr может быть объяснена выявленным изменением относительного содержания оксидов  $\text{CrO}_2/\text{Cr}_2\text{O}_3$  в сформированных выступах структур, что подтверждается результатами численного моделирования.



2. В связи с эффектом диссипации тепла в пленке Cr снижение частоты следования импульсов приводит к ухудшению упорядоченности ТЛИППС. Использование астигматического гауссова пучка позволяет увеличить производительность записи структур на 2 порядка по сравнению с гауссовым пучком круглого сечения.
3. Благодаря более низкой теплоемкости и теплопроводности Hf на данном металле возможно формирование ТЛИППС с на порядок большей скоростью, по сравнению с Cr. Кроме того, в случае Hf, повышение скорости сканирования до 2 мм/с приводит к формированию выраженной перпендикулярной субструктуры с малым периодом  $\sim \lambda/7$ .
4. Обнаруженная линейная зависимость периода ТЛИППС, сформированных на пленке Ti, от длины волны лазерного излучения имеет электромагнитную природу, что подтверждается результатами численного моделирования. Запись в различных газовых средах (воздух, вакуум, азот) приводит к изменению морфологии образующихся структур, а также к образованию ТЛИППС с комплексным составом  $TiO_2/TiN$  в случае азотной среды.
5. На пленке аморфного Si впервые получены ТЛИППС, состоящие из оксидных микроконусов с гексагональной периодичностью и подповерхностных периодических включений поликристаллической фазы. Запись таких ТЛИППС существенным образом изменяет оптические свойства исходной пленки a-Si, а также позволяет использовать структурированную поверхность для повышения чувствительности в методе флуоресцентного анализа.
6. Облучение фс лазерными импульсами пленки a-Si при высокой скорости сканирования (1 мм/с) приводит к равномерной кристаллизации с минимальным изменением шероховатости поверхности, что может быть перспективным для получения поликристаллического кремния на полимерных подложках.
7. Наблюдается формирование разнообразных типов ЛИППС на тонкой пленке Hf, напыленной на c-Si, в зависимости от энергии записывающего импульса  $E_p$  и скорости сканирования  $v$ : при малых  $E_p$  и  $v$  образуются термохимические ЛИППС с периодом  $\sim \lambda$ , тогда как для

высоких  $E_p$  и  $\nu$  наблюдаются ЛИППС абляционного типа с периодом  $\sim \lambda, \lambda/2, \lambda/4$ . Использование азотной атмосферы позволяет снизить эффективность окисления и получить бездефектные субволновые  $(\lambda/2, 3)$  абляционные ЛИППС с высоким аспектным соотношением  $\sim 8$ .

#### **Степень достоверности результатов.**

Все полученные результаты не противоречат известным научным положениям и экспериментальным результатам других работ. Все измерения производились с помощью апробированных методик и точных приборов. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых мировых журналах и представлены на международных конференциях, что свидетельствует об обоснованности и достоверности сделанных выводов. Достоверность подтверждается также близким совпадением результатов измерений и численного моделирования.

#### **Практическая значимость.**

Результаты данной работы могут быть использованы при формировании высокоупорядоченных периодических структур на поверхности пленок металлов и полупроводников для их использования в целях создания дифракционных оптических элементов, элементов интегральной оптики, сенсоров органических соединений. Таким образом результаты настоящей работы будут полезны не только специалистам в области лазерно-индуцированного структурирования поверхности, но и более широкому кругу исследователей.

#### **Соответствие специальности.**

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика», так как основным объектом исследования являются лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры, образующиеся в результате взаимодействия импульсов лазерного излучения фемтосекундной длительности с пленками металлов и полупроводников.

#### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.**

Результаты работы докладывались соискателем лично на следующих конференциях и семинарах: международная конференция «*Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies*» (июль 2019 г., Санкт-Петербург), международная

конференция «2020 International Conference Laser Optics (ICLO)» (ноябрь 2020 г., Санкт-Петербург), международная школа-конференция «*School on Advanced Light-Emitting and Optical Materials (SLALOM 2021)*» (июнь 2021 г., Владивосток), международная конференция «2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)» (июнь 2021, г. Мюнхен, Германия), международная конференция «*Advanced Laser Processing and Manufacturing V*» (октябрь 2021, г. Нантонг, Китай).

Результаты диссертационной работы достаточно подробно отражены в восьми публикациях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных:

1. Dostovalov A.V. et al. Oxide composition and period variation of thermochemical LIPSS on chromium films with different thickness // *Opt. Express*, OE. 2018. Vol. 26, № 6. P. 7712–7723.
2. Dostovalov A.V. et al. Influence of femtosecond laser pulse repetition rate on thermochemical laser-induced periodic surface structures formation by focused astigmatic Gaussian beam // *Laser Phys. Lett.* IOP Publishing, 2019. Vol. 16, № 2. P. 026003.
3. Dostovalov A. et al. Hierarchical anti-reflective laser-induced periodic surface structures (LIPSSs) on amorphous Si films for sensing applications // *Nanoscale*. The Royal Society of Chemistry, 2020. Vol. 12, № 25. P. 13431–13441.
4. Bronnikov K. et al. Large-Scale and Localized Laser Crystallization of Optically Thick Amorphous Silicon Films by Near-IR Femtosecond Pulses: 22 // *Materials*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 13, № 22. P. 5296.
5. Mitsai E. et al. Crystallization of Optically Thick Amorphous Silicon Films by Near-IR Femtosecond Laser Processing // *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications Ltd, 2020. Vol. 312. P. 134–139.
6. Belousov D.A. et al. Thermochemical Laser-Induced Periodic Surface Structures Formation by Femtosecond Laser on Hf Thin Films in Air and Vacuum: 21 // *Materials*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. Vol. 14, № 21. P. 6714.
7. Bronnikov K. et al. Uniform subwavelength high-aspect ratio nanogratings on metal-protected bulk silicon produced by laser-induced periodic surface structuring // *Appl. Phys. Lett.* American Institute of Physics, 2021. Vol. 119, № 21. P. 211106.
8. Bronnikov K. et al. Regulating Morphology and Composition of Laser-Induced Periodic Structures on Titanium Films with Femtosecond Laser Wavelength and Ambient Environment: 3 // *Nanomaterials*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Vol. 12, № 3. P. 306.



Диссертация «Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на пленках металлов и полупроводников» Бронникова Кирилла Алексеевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика».

Председатель семинара

д. ф.-м. н., профессор

Шапиро Д.А.

Секретарь семинара

к. ф.-м. н.

Лобач И.А.

Подпись  
*Шапиро Д.А. и Лобач И.А.*  
сотрудника ИАиЭ СО РАН  
заверяю   
Зав. отделом кадров  
Кудрявцева Н.В.  
«05» 09 2014г.

