



МИНОБНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт автоматизации и процессов управления  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
(ИАПУ ДВО РАН)

Радио ул., д. 5, Владивосток, 690041  
Телефон (423) 2310439, факс (423) 231045.  
E-mail: director@iacp.dvo.ru, http: www.iacr.  
ОКПО 02698217, ОГРН 1022502127878  
ИНН/КПП 2539007627/253901001

*26.02.2019* № 16141/ *11*

На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт автоматизации и процессов  
управления Дальневосточного  
отделения Российской академии наук  
У ДВО РАН)

Корреспондент РАН  
Физ.-мат. наук

Р.В. Ромашко

5 г.

**Отзыв ведущей организации  
на диссертацию Григорьевой Марии Сергеевны  
«Исследование процессов плавления и абляции пористых материалов под  
действием лазерного излучения», представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.**

Диссертационная работа Григорьевой Марии Сергеевны посвящена исследованию физических процессов воздействия лазерного излучения на пористые материалы, таких как, нагрев, плавление и абляция, в зависимости от режима лазерного воздействия, термодинамических и структурных характеристик пористого материала.

**Актуальность работы**

Пористые материалы, и, в частности, нанопористые материалы (с размером пор до 100 нм) широко применяются в различных областях технологий и промышленности – машиностроении, авиационной, металлургической промышленности, микро- и нанoeлектронике, медицине, биотехнологиях и биосенсорике и др.

К перспективным технологиям, основанным на механизмах воздействия лазерных импульсов на пористые материалы, относятся лазерная модификация и аморфизация поверхности материалов, для придания им требуемых свойств и улучшения эксплуатационных характеристик, а также производство наночастиц и

наноструктур с заданными свойствами методом лазерной абляции. Для оптимизации режимов данных лазерных технологий становится актуальным систематическое изучение особенностей механизмов воздействия на пористые материалы в зависимости от параметров лазерного излучения и структурных и термодинамических характеристик материала.

### **Содержание работы**

Диссертационная работа Григорьевой М.С. состоит из введения, трех глав, заключения и основных выводов, а также списка цитируемой литературы из 183 наименований. Общий объём работы составляет 143 страницы машинописного текста, включая 48 рисунков и 7 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована её цель и основные задачи, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, апробация работы и личный вклад автора, описаны структура и объём диссертации.

В **первой главе** приведен аналитический обзор литературы, посвящённый современному состоянию исследований в области взаимодействия лазерного излучения с пористыми средами. Описаны структура и свойства пористых материалов, включая анализ зависимости теплофизических характеристик материалов от их пористости. Рассмотрены технологии модификации пористых материалов лазерным излучением с целью придания им требуемых свойств или улучшения эксплуатационных характеристик, приведены экспериментальные данные по лазерной абляции наноструктур пористого кремния. На основании приведённого обзора сформулированы цель и постановка задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** рассмотрена лазерная поверхностная модификация пористых пленок. Предложена самосогласованная модель проплавления при лазерной модификации поверхности пористого материала на основе механизма схлопывания пор в расплавленном материале под действием сил поверхностного натяжения. В рамках разработанной модели найдено изменение радиуса пор, т.е. фактически изменение пористости материала, и давления в зависимости от расстояния до фронта плавления, а также исследован процесс нагрева и плавления пористого материала под действием лазерного излучения.

В **третьей главе** исследованы механизмы лазерной абляции наноструктур пористого кремния. Методом молекулярной динамики проведено моделирование лазерной абляции пористого Si с учетом степени пористости мишени и размера пор в широком диапазоне длин волн (от УФ до ИК диапазона). В ходе моделирования были определены количество аблированных атомов и порог абляции в зависимости от степени пористости материала и размера пор. Для изучения кинетики фазовых переходов проведено моделирование процесса лазерного плавления сплошного и пористого Si с помощью комбинированной континуально-атомистической модели MD-nTGM, сочетающей в себе молекулярно-динамический подход для описания с атомарным разрешением кинетики неравновесных фазовых превращений, индуцированных лазером, и двухтемпературную модель.

В **заключении** перечислены основные результаты работы.

#### **Новизна проведенных исследований и полученных результатов**

Научная новизна диссертационной работы определяется тем, что автором впервые разработана самосогласованная модель проплавления при лазерной модификации поверхности пористого материала на основе механизма схлопывания пор под действием сил поверхностного натяжения, которая позволяет определить оптимальную для модификации скорость плавления и толщину модифицированного слоя. Показано, что динамика лазерной модификации поверхности пористого материала самосогласованным образом определяется давлением в расплавленном материале, которое определяет как скорость усредненного гомогенного движения расплава от поверхности к области схлопывания пор, так и скорость затекания расплава в пустые поры.

Автором впервые предложена модель лазерной абляции пористого кремния на основе молекулярно-динамического подхода, позволившая установить зависимость порога и производительности абляции (количество аблированных атомов) от пористости материала и размера пор в широком диапазоне длин волн лазерного излучения. Показано, что порог лазерной абляции снижается для пористых образцов относительно монокристаллических для всех рассмотренных длин волн, при этом более выраженное падение наблюдается для образцов с меньшим размером пор. Количество аблированных атомов уменьшается с увеличением пористости мишени при облучении лазерными импульсами. Установлено, что при плотностях энергии близких к пороговым эффективнее аблируются мишени с меньшим размером пор.

Впервые расширена и применена континуально-атомистическая математическая модель MD-nТТМ для исследования лазерного плавления пористого кремния. На основе модели установлено снижение порога плавления и времени начала процесса плавления для пористой мишени Si относительно монокристаллической при облучении ультракороткими лазерными импульсами.

### **Практическая значимость диссертационной работы**

Проведенные исследования и полученные в диссертационной работе результаты позволили оптимизировать режимы лазерной модификации и абляции различных пористых материалов в зависимости от параметров лазерного излучения и характеристик материала (пористости, размера пор). В частности, определена критическая скорость плавления, при которой возможно переплавление пористого материала с образованием однородной модифицированной поверхности, и толщина модифицированного слоя. Найдены соотношения между порогами абляции и характеристиками материала (пористость и размер пор), которые могут обеспечить оптимальную производительность наночастиц методом лазерной абляции.

Результаты диссертационной работы Григорьевой М.С. имеют высокую научную и практическую значимость и могут быть рекомендованы к использованию в Институте автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова и других научно-исследовательских организациях, ведущих исследования и разработки в области лазерных технологий модификации поверхности материалов и производства наноструктур.

### **Степень обоснованности**

Работа Григорьевой М.С. обладает высокой степенью достоверности полученных и изложенных в диссертационной работе результатов, и выводов, что подтверждается надёжностью применявшихся экспериментальных и теоретических методов, совпадением результатов аналитических и численных расчётов с экспериментальными данными, а также анализом полученных результатов с результатами работ других авторов.

Результаты диссертационной работы апробированы на всероссийских и международных научных конференциях. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в научных журналах, индексируемых в базах

данных Web of Science и Scopus, 13 тезисах и статей в сборниках докладов и трудов конференций.

### **Соответствие автореферата диссертационной работе**

Автореферат удовлетворяет предъявляемым требованиям и полностью соответствует диссертационной работе. Автореферат в полном объеме отражает результаты и сформулированные выводы диссертации.

Несмотря на общее положительное впечатление диссертационная работа Григорьевой М.С. не лишена недостатков.

По существу:

1. В диссертации в рамках разработанной модели проплавления при лазерной модификации поверхности пористого материала на основе механизма схлопывания пор представлены расчеты для обработки лазерным излучением пленки пористого индия, и не представлена апробация модели для других металлов (например, медь, никель и др.). Представляется важным провести дополнительные работы.
2. В разделе 2.2 при рассмотрении процесса нагрева и плавления лазерным излучением пористой пленки индия, расположенной на медной подложке, в системе уравнений (2.35) учтена зависимость теплофизических величин индия от пористости материала, при этом поглощательная способность материала считалась постоянной независимой от пористости величиной.
3. В главе 3 при рассмотрении абляции пористого кремния лазерным излучением в тексте диссертации не отражено, проводился ли учет изменения размера пор по глубине образца.

По оформлению:

4. В диссертационной работе часть рисунков обозначена латинскими буквами а), б) и т.д., а часть буквами русского алфавита – а), б), в) и т.д.
5. В разделе 1.2. на с. 34 подпись к рисунку 1.11 смещена относительно рисунка.

Высказанные замечания не снижают ценности научной и практической значимости работы и общей положительной оценки диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация Григорьевой Марии Сергеевны «Исследование процессов плавления и абляции пористых материалов под действием лазерного излучения» представляет собой законченную научно-квалификационную работу,

удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Григорьева Мария Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Доклад по материалам диссертации был сделан на семинаре Отдела оптоэлектронных методов исследования газообразных и конденсированных сред, состоявшемся 30 января 2025 г.

Настоящий отзыв утвержден на семинаре Отдела оптоэлектронных методов исследования газообразных и конденсированных сред (протокол № 1 от «30» января 2025 г.)

Отзыв на диссертацию составлен:

Ведущий научный сотрудник

кандидат физ.-матем. наук

телефон: 8(423) 231-04-39

e-mail: zhizhchenko@iacp.dvo.ru

Жижченко Алексей Юрьевич

Заведующий лабораторией

синхротронных методов изучения

свойств новых функциональных

наноматериалов оптоэлектроники,

нанофотоники и тераностики

кандидат физ.-матем. наук

телефон: 8(423) 231-04-39

e-mail: ku4mijak@iacp.dvo.ru

Кучмижак Александр Александрович

Список основных работ сотрудников ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН) по тематике защищаемой диссертации в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет:

1. Borodaenko Yu., Cherepakhin A., Gurbatov S.O., Modin E., Shevlyagin A.V., Kuchmizhak A.A. Polarized p-n junction Si photodetector enabled by direct laser-induced periodic surface structuring // *Surfaces and Interfaces*. – 2024. – V. 56 - p. 105568.
2. Pavlov D.V., Cherepakhin A.B., Zhizhchenko A.Y., Sergeev A.A., Mitsai E.V., Kuchmizhak A.A., Kudryashov S.I. Third-Harmonic Generation in Plasmonic Metasurfaces Fabricated by Direct Femtosecond Laser Printing // *JETP Letters*. – 2024. – V. 119. – № 10. – p. 763-767.
3. Borodaenko Yu., Pavlov D., Cherepakhin A., Mitsai E., Pilnik A., Syubaev S., Gurbatov S.O., Modin E., Porfirev A.P., Khonina S.N., Shevlyagin A.V., Gurevich E.L., Kuchmizhak A.A. Liquid-Assisted Laser Nanotexturing of Silicon: Onset of Hydrodynamic Processes Regulated by Laser-Induced Periodic Surface Structures // *Advanced Materials Technologies*. – 2024. – V. 9. – № 8. – p. 2301567.
4. Il'yaschenko V.M., Pavlov D.V., Balagan S.A., Gerasimenko A.V., Tarasenko N.V., Kuchmizhak A.A., Shevlyagin A.V. Alternative Look at Calcium Digermanide  $\text{CaGe}_2$ : A High-Performing Semimetal Transparent Conducting Material for Ge Optoelectronics // *ACS Applied Electronic Materials*. – 2024. – V. 6. – № 2. – p. 1373–1384.
5. An L., Ma J., Wang P., Kuchmizhak A., Yao J., Xu H., Wang W. In situ switchable nanofiber films based on photoselective asymmetric assembly towards year-round energy saving // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2024. – V.12. – № 29. – p. 18304-18312.
6. Manshina A.A., Tumkin I.I., Khairullina E.M., Mizoshiri M., Ostendorf A., Kulinich S.A., Makarov S., Kuchmizhak A.A., Gurevich E.L. The Second Laser Revolution in Chemistry: Emerging Laser Technologies for Precise Fabrication of Multifunctional Nanomaterials and Nanostructures // *Advanced Functional Materials*. – 2024. – V. 34. – № 40. – p. 2405457.
7. Yaroshenko V., Larin A., Syubaev S., Vazhenin I., Kustov P., Dolgintsev D., Ageev E., Gurbatov S., Maksimova A., Novikova K., Babin S., Kozlov A., Dostovalov A., Kuchmizhak A., Zuev D. Hidden IR security Labels by Laser-induced Periodic Surface Structuring of Erbium-Doped Silicon Films // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. – 2024. – V. 15. – p. 9714-9722.
8. Lapidas V., Cherepakhin A., Storozhenko D., Gurevich E.L., Zhizhchenko A., Kuchmizhak A.A. Surface Coloring and Plasmonic Information Encryption at 50000 dpi Enabled by Direct Femtosecond Laser Printing // *Nanoletters*. – V. 24. – p. 12590-12596.
9. Gurbatov S.O., Puzikov V., Storozhenko D., Modin E., Mitsai E., Cherepakhin A., Shevlyagin A., Gerasimenko A.V., Kulinich S.A., Kuchmizhak A.A. Multigram-Scale

Production of Hybrid Au-Si Nanomaterial by Laser Ablation in Liquid (LAL) for Temperature-Feedback Optical Nanosensing, Light-to-Heat Conversion, and Anticounterfeit Labeling // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. –2023. – V.15. – № 2. – p. 3336–3347.

10. Tatarinov D.A., Anoshkin S.S., Tsibizov I.A., Sheremet V., Isik F., Zhizhchenko A.Y., Cherepakhin A.B., Kuchmizhak A.A., Pushkarev A.P., Demir H.V., Makarov S.V. High-Quality CsPbBr<sub>3</sub> Perovskite Films with Modal Gain above 10 000 cm<sup>-1</sup> at Room Temperature // *Advanced Optical Materials*. – 2023. – V. 11. – № 7. – p. 2202407.

11. Borodaenko Y., Khairullina E., Levshakova A., Shmalko A., Tumkin I., Gurbatov S., Mironenko A., Mitsai E., Modin E.B., Gurevich E.L., Kuchmizhak A.A. Noble-Metal Nanoparticle-Embedded Silicon Nanogratings via Single-Step Laser-Induced Periodic Surface Structuring // *Nanomaterials*. –2023. – V. 13. – № 8. – p. 1300.

12. Mintcheva N., Subbiah D.K., Turabayev M.E., Gurbatov S.O., Rayappan J.B. B., Kuchmizhak A.A., Kulinich S.A. Gas sensing of laser-produced hybrid TiO<sub>2</sub>-ZnO nanomaterials under room-temperature conditions. *Nanomaterials*. – 2023. – V. 13. – № 4. – p. 670.

13. Ermolaev G., Pushkarev A.P., Zhizhchenko A., Kuchmizhak A.A., Iorsh I., Kruglov I., Mazitov A., Ishteev A., Konstantinova K., Saranin D., Slavich A., Stosic D., Zhukova E.S., Tselikov G., Carlo A.Di., Arsenin A., Novoselov K.S., Makarov S.V., Volkov V.S. Giant and tunable excitonic optical anisotropy in single-crystal halide perovskites // *Nanoletters*. – 2023. – V. 23. – № 7. – p. 2570-2577.

14. Lebedev D.V., Solomonov N.A., Dvoretckaia L.N., Shkoldin V.A., Permyakov D.V., Arkhipov A.V., Mozharov A.M., Pavlov D.V., Kuchmizhak A.A., Mukhin I.S. Femtosecond laser-printed gold nanoantennas for electrically-driven nanoscale light sources // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. –2023. – V. 14. – p. 5134-5140.

15. Bronnikov K., Gladkikh S., Okotrub K., Simanchuk A., Zhizhchenko A., Kuchmizhak A., Dostovalov A. Regulating Morphology and Composition of Laser-Induced Periodic Structures on Titanium Films with Femtosecond Laser Wavelength and Ambient Environment // *Nanomaterials*. –2022. – V. 12. – № 3. – p. 306.

16. Zhizhchenko A.Y., Shabalina A.V., Aljulaih A.A., Gurbatov S.O., Kuchmizhak A.A., Iwamori S., Kulinich S.A. Stability of Octadecyltrimethoxysilane- Based Coatings on Aluminum Alloy Surface // *Materials*. –2022. – V. 15. –№ 5. – p. 1804.

17. Pavlov D., Zhizhchenko A., Pan L., Kuchmizhak A.A. Tuning Collective Plasmon Resonances of Femtosecond Laser Printed Metasurface // *Materials*. –2022. – V. 15. – № 5. – p. 1834.

18. Syubaev S., Gordeev I., Modin E., Terentyev V., Storozhenko D., Starikov S., Kuchmizhak A.A. Anti-Counterfeit Labeling Enabled by Laser-Printed Silicon Mie Resonators // *Nanoscale*. – 2022. – V.14. – № 44. – p. 16618-16626.

19. Gurbatov S., Puzikov V., Modin E., Shevlyagin A., Gerasimenko A., Mitsai E., Kulinich S.A., Kuchmizhak A. Ag-Decorated Si Microspheres Produced by Laser Ablation in Liquid: All-in-One Temperature-Feedback SERS-Based Platform for Nanosensing // *Materials*. – 2022. – V. 15. – № 22. – p. 8091.

20. Bronnikov K., Dostovalov A., Terentyev V., Babin S., Kozlov A., Pustovalov E., Gurevich E.L., Zhizhchenko A., Kuchmizhak A. Uniform subwavelength high-aspect ratio nanogratings on metal-protected bulk silicon produced by laser-induced periodic surface structuring // Applied Physics Letters. – 2021. – V. 119. – № 21. – p. 211106.

## Сведения о ведущей организации

по диссертации Григорьевой Марии Сергеевны «Исследование процессов плавления и абляции пористых материалов под действием лазерного излучения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук
Сокращенное наименование организации	ИАПУ ДВО РАН
Место нахождения	г. Владивосток, Российская Федерация
Почтовый адрес	РФ, 690041, г. Владивосток, улица Радио, дом 5
Контактный телефон	8(423)231-04-39
Адрес электронной почты	director@iacp.dvo.ru
Сайт	<a href="https://www.iacp.dvo.ru/">https://www.iacp.dvo.ru/</a>