

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 24 марта 2025 г № 80

О присуждении Григорьевой Марии Сергеевне, гражданке Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование процессов плавления и абляции пористых материалов под действием лазерного излучения» по специальности 1.3.19 – Лазерная физика принята к защите 20 января 2025 года, (протокол заседания № 77) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Григорьева Мария Сергеевна, 4 апреля 1988 года рождения, в 2011 году окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" с присуждением квалификации «инженер-физик» по специальности «Физика конденсированного состояния вещества». В период с 2011 по 2014 год обучалась в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук по специальности «Лазерная физика». С 2010 года является сотрудником ФИАН. В настоящее время работает в должности высококвалифицированного младшего научного сотрудника лаборатории радиационной биофизики и биомедицинских технологий отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН (ОЯФА ФИАН).

Диссертационная работа Григорьевой М.С. выполнена в Отделении квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова и Отделении ядерной физики и астрофизики ФИАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, Завестовская Ирина Николаевна, специалист в области взаимодействия лазерного излучения с веществом, лазерного наноструктурирования материалов, лазерных нанотехнологий и нанобиотехнологий, ядерной наномедицины, лауреат премии Президента РФ в области образования, работает в должности руководителя Научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» и, по совместительству, высококвалифицированного ведущего научного сотрудника, исполняющего обязанности заведующего лабораторией радиационной биофизики и биомедицинских технологий Отделения ядерной физики и астрономии ФИАН.

Официальные оппоненты:

1. Головань Леонид Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей физики и наноэлектроники физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»;
2. Комленок Максим Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории лазерной оптики поверхности отдела светоиндуцированных поверхностных явлений Центра естественно-научных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматки и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток), в своем положительном отзыве, подписанном кандидатом физико-математических наук Жижченко Алексеем Юрьевичем, ведущим научным сотрудником лаборатории синхротронных методов изучения свойств новых функциональных наноматериалов оптоэлектроники, нанофотоники и тераностики ИАПУ ДВО РАН, кандидатом физико-математических наук Кучмижаком Александром Александровичем, заведующим лабораторией синхротронных методов изучения свойств новых функциональных наноматериалов оптоэлектроники, нанофотоники и тераностики ИАПУ ДВО РАН, и утвержденном членом-корреспондентом РАН, доктором физико-математических наук Ромашко Романом Владимировичем, директором ИАПУ ДВО РАН, указала, что диссертация 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 г., а соискатель заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Соискатель имеет 65 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 19 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, опубликовано 6 работ.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем М. С. Григорьевой работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в статьях:

1. Григорьева М.С., Завестовская И.Н., Канавин А.П., Динамика схлопывания пор при лазерном отжиге поверхности металлов // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2014. – вып. 9. – с. 27-32.

2. Grigoryeva M.S., Zvestovskaya I.N., and Kanavin A.P. Theoretical study of the heterogeneous films modified by the laser radiation // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 71. – P. 196 – 201.
3. Grigoryeva M. S., Zvestovskaya I.N., and Kanavin A.P. Laser annealing of porous defects in metals // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 941. – P. 012032.
4. Kharin A.Yu., Grigoryeva M.S., Zvestovskaya I.N. and Timoshenko V.Yu. Effect of silicon target porosity on laser ablation threshold: molecular dynamics simulation // *Laser Physics Letters*. – 2021. – Vol. 941. – P. 076001.
5. Grigoryeva M.S., Kutlubulatova I.A., Lukashenko S.Yu., Fronya A.A., Ivanov D.S., Kanavin A.P., Timoshenko V.Yu. and Zvestovskaya I.N. Modeling of Short-Pulse Laser Interactions with Monolithic and Porous Silicon Targets with an Atomistic–Continuum Approach // *Nanomaterials*. – 2023. – Vol. 13. – P. 2809.
6. Григорьева М.С., Звестовская И.Н., Канавин А.П., Фроня А.А., Маврешко Е.И. Влияние пористости и размера пор кремниевой мишени на порог лазерной абляции // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. – 2024. – вып. 9 – с. 9-18.

На автореферат диссертации поступил положительный отзыв от доктора физико-математических наук, доцента Павельева Владимира Сергеевича, заведующего кафедрой наноинженерии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева». В отзыве указано, что полученные в диссертации результаты могут быть использованы при оптимизации режимов лазерной модификации пористых материалов. Они являются обоснованными и достоверными. Отмечено наличие некоторого количества опечаток в тексте автореферата. Автор отзыва указывает, что этот недостаток не является принципиальным, а соискатель М.С. Григорьева заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19–Лазерная физика.

Выбор Голованя Леонида Анатольевича в качестве официального оппонента обоснован его высокой квалификацией и наличием достижений мирового уровня в области лазерной физики, в том числе взаимодействия

лазерного излучения с пористыми средами и исследования физических свойств пористых полупроводников и диэлектриков

Выбор Комленка Максима Сергеевича в качестве официального оппонента обоснован его высокой квалификацией и наличием достижений мирового уровня в области лазерной абляции аморфных и нанокристаллических материалов.

Выбор ведущей организации обоснован её репутацией признанного научного центра, проводящего исследования в области лазерной физики, производства новых функциональных наноматериалов для оптоэлектроники, нанофотоники и тераностики и изучения их свойств.

Диссертационная работа Григорьевой Марии Сергеевны посвящена исследованию физических процессов воздействия лазерного излучения на пористые материалы, лежащих в основе технологий их обработки, таких как лазерная модификация поверхности или производство наночастиц методом лазерной абляции пористых материалов. Проведено комплексное исследование процессов нагрева, плавления и абляции в зависимости от режима лазерного воздействия, термодинамических и структурных характеристик пористого материала.

Актуальность исследования связана с необходимостью оптимизации режимов лазерных технологий для контролируемого и воспроизводимого производства наночастиц или модификации поверхности пористых материалов для придания им требуемых свойств и улучшения эксплуатационных характеристик. Наличие пористой структуры накладывает особенности на механизмы воздействия, в связи с этим требуется системное изучение и выявление физических механизмов взаимодействия лазерных импульсов с пористыми материалами в зависимости от параметров лазерного излучения и свойств пористых наноструктур.

На основании выполненных соискателем исследований были получены следующие основные результаты:

1. Разработана модель проплавления при лазерной модификации поверхности пористого материала на основе механизма схлопывания пор под действием сил поверхностного натяжения, позволившая впервые определить критическую скорость плавления в зависимости от пористости материала и размера пор и толщину однородного модифицированного слоя. Установлено, 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. Расчетные значения, полученные в рамках разработанной модели, имеют хорошее согласие с экспериментом.
2. На основании разработанной модели исследован процесс нагрева и плавления пористого материала под воздействием лазерного излучения с учетом зависимости его теплофизических величин от температуры и степени пористости. Показано, что наличие пор приводит к увеличению температуры поверхности материала, глубины проплавления, а также времени жизни расплава, по сравнению со сплошным материалом при прочих равных условиях.
3. Проведено моделирование процесса лазерной абляции пористого кремния на основе метода молекулярной динамики. Определены зависимости величины порога и производительности абляции в зависимости от пористости материала и размера пор в широком диапазоне длин волн лазерного излучения ($\lambda_{\text{ит}}=300$ нм, $\lambda_{\text{ит}}=600$ нм, $\lambda_{\text{ит}}=1030$ нм). Установлено, что порог лазерной абляции и производительность абляции (количество аблированных атомов) зависит от степени пористости материала и размера пор. При исследованиях Si для всех рассматриваемых длин волн наблюдалось снижение порога лазерной абляции и количества аблированных атомов для пористых образцов Si относительно монокристаллических. Установлено, что при плотностях энергии близких к пороговым эффективнее аблируются мишени с меньшим размером пор.

4. На основе континуально-атомистической математической модели MD-nТТМ, сочетающей метод молекулярной динамики для описания кинетики неравновесных фазовых превращений, индуцированных лазером, и двухтемпературной модели, выявлены механизмы плавления пористых материалов. Установлено, что в пористой мишени кремния не происходит накопления внутренних напряжений, возникающих из-за быстрого нагрева, за счет быстрой релаксации любых избыточных напряжений внутри пор. При лазерно-индуцированном плавлении пористого кремния в расплаве возникает умеренное отрицательное давление, приводящее к усадке предповерхностного слоя и уменьшению объема материала. Установлено снижение порога плавления и времени начала процесса плавления для пористой мишени кремния относительно монокристаллической при облучении ультракороткими импульсами ($\lambda_{\text{ит}}=800$ нм).

Все результаты, представленные автором, являются новыми. Новизна обусловлена тем, что:

- Впервые разработана самосогласованная модель проплавления при лазерной модификации поверхности пористого материала на основе механизма схлопывания пор под действием сил поверхностного натяжения, позволяющая определить оптимальную для модификации скорость плавления и толщину модифицированного слоя.

- Впервые с помощью молекулярно-динамического подхода исследована лазерная абляция пористых материалов, позволившая установить зависимость порога и производительности абляции от пористости материала и размера пор в широком диапазоне длин волн лазерного излучения.

- Впервые континуально-атомистическая математическая модель MD-nТТМ усовершенствована и применена для исследования лазерного плавления пористого кремния, что позволило выявить механизмы, лежащие в основе технологий обработки пористых материалов.

