

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д002.023.03 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 14 октября 2019 г. № 69

О присуждении Кудряшову Сергею Ивановичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов в режиме абляции с металлами и полупроводниками, обладающими сильным межзонным поглощением» по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика» принята к защите 28 июня 2019 г., протокол № 65 диссертационного совета Д002.023.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53 (ФИАН).

Соискатель, Кудряшов С.И. 1969 г.р., в 1991 г. окончил Химический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова по специальности "химия" (диплом с отличием). В 1994 г. там же окончил очную аспирантуру, а с 1994 г. работал в должности младшего научного сотрудника и в 1999 г. защитил диссертацию на тему «Термодинамические характеристики метастабильного равновесия "жидкость-пар" углерода при лазерном испарении поликристаллического графита» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (диплом КТ № 008628). Стажировался в Институте лазерной и плазменной физики (ФРГ), работал в университетах США. С 2006 г. работает в ФИАН, с 2011 г. – в должности старшего научного сотрудника. С 2015 г. работает в должности ведущего научного сотрудника в университете ИТМО

и, по совместительству, в ФИАН, в 2011 г. ему было присвоено ученое звание доцента по специальности «Лазерная физика» (диплом АДС №002514).

Научный консультант, доктор физико-математических наук, профессор Ионин Андрей Алексеевич, специалист в области лазерной физики, работает в должности руководителя Отделения квантовой радиофизики ФИАН.

Официальные оппоненты:

Главный научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией ультрабыстрых процессов Института спектроскопии Российской академии наук (г. Троицк), доктор физико-математических наук Чекалин Сергей Васильевич,

Профессор Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (г. Москва), доктор физико-математических наук Головань Леонид Анатольевич,

Ведущий научный сотрудник филиала АО «Корпорация космических систем специального назначения «Комета» - «Научно проектный Центр оптоэлектронных Комплексов наблюдения» (г. Санкт-Петербург), доктор физико-математических наук Макин Владимир Сергеевич

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном главным научным сотрудником Научного центра волновых исследований (НЦВИ ИОФ РАН), доктором физико-математических наук Шафеевым Георгием Айратовичем и временно исполняющим обязанности руководителя НЦВИ ИОФ РАН, кандидатом физико-математических наук Лямшевым Михаилом Леонидовичем, и утвержденном директором ИОФ РАН, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Гарновым Сергеем Владимировичем, указала, что соискатель заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Выбор оппонентов и ведущей организации обоснован их значительным опытом работы по тематике диссертации, что подтверждается большим количеством публикаций в рецензируемых, в том числе ведущих в этой области, печатных изданиях.

На автореферат поступили отзывы от доктора физико-математических наук Витрика Олега Борисовича, заведующего лабораторией новых функциональных материалов фотоники Института автоматики и проблем управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, доктора технических наук Одинокова Сергея Борисовича, профессора кафедры лазерных и оптико-электронных систем Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва, и доктора физико-математических наук, профессора Павельева Владимира Сергеевича, заведующего кафедрой наноинженерии Самарского университета, г. Самара.

В отзыве доктора физико-математических наук Витрика О.Б. отмечается, что полученные множественные результаты – в первую очередь, предложенная целостная картина фемтосекундной лазерной абляции (ФЛА) материалов – имеют неоспоримое научное и практическое значение. Имеется замечание о том, что насыщение сигнала электронной эмиссии с поверхности кремния при высоких значениях плотности энергии ультракоротких лазерных импульсов (УКИ, длительность  $\sim 100$  фс) в автореферате не объясняется. В отзыве доктора физико-математических наук Павельева В.С. отмечается, что проведенное исследование выполнено на высоком научном уровне, а в качестве замечания поставлен вопрос о конкретных применениях ФЛА для микроструктурирования. В отзыве доктора технических наук Одинокова С.Б. указывается, что диссертационная работа имеет высокую научную и практическую значимость; имеется замечание, что в автореферате не указано пространственное разрешение ФЛА для ее разных механизмов. Во всех отзывах указано, что соискатель Кудряшов С.И. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Соискатель имеет 261 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации опубликовано 79 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, опубликованы 52 работы. Вклад соискателя в эти работы является определяющим. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения о работах, опубликованных Кудряшовым С. И. Основные результаты, представленные в диссертационной работе Кудряшова С.И., прошли научную апробацию на многих международных научных конференциях.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в работах:

1. Кудряшов С.И., Емельянов В.И. Коллапс запрещенной зоны и сверхбыстрое «холодное» плавление кремния в течение фемтосекундного лазерного импульса //Письма в ЖЭТФ. – 2001. – Т. 73. – №. 5. – С. 263-267.
2. Кудряшов С.И., Емельянов В.И. Уплотнение электронного газа и кулоновский взрыв в поверхностном слое проводника, нагреваемого фемтосекундным лазерным импульсом //Письма в ЖЭТФ. – 2001. – Т. 73. – №. 12. – С. 751-755.
3. Kudryashov S.I., Kandyla M., Roeser C., Mazur E. Intraband and interband optical deformation potentials in femtosecond-laser-excited  $\alpha$ -Te//Phys. Rev. B. – 2007. – V. 75. – №. 8. – P. 085207.
4. Голосов Е.В., Ионин А.А., Колобов Ю.Р., Кудряшов С.И., Лигачев А.Е., Новоселов Ю.Н., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В. Сверхбыстрые изменения оптических свойств поверхности титана и фемтосекундная лазерная запись одномерных квазипериодических нанорешеток ее рельефа //ЖЭТФ. – 2011. – Т. 140. – №. 1. – С. 21-35.
5. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В. Генерация и регистрация сверхмощных ударных волн при абляции поверхности алюминия под действием высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов //Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 94. – №. 1. – С. 35-39.

6. Apostolova T.T., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Self-limited ionization in bandgap renormalized GaAs at high femtosecond laser intensities //Opt. Eng. – 2012. – V. 51. – №. 12. – P. 121808.
7. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Бункин А.Ф., Леднев В.Н., Першин С.М. Термическое плавление и абляция поверхности кремния фемтосекундным лазерным излучением //ЖЭТФ. – 2013. – Т. 143. – №. 3. – С. 403.
8. Артюков И.А., Заярный Д.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Салтуганов П.Н. Релаксационные процессы электронной и решеточной подсистем при абляции поверхности железа ультракороткими лазерными импульсами //Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 99. – №. 1. – С. 54-58.
9. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Electron dynamics and prompt ablation of aluminum surface excited by intense femtosecond laser pulse //Appl. Phys. A. – 2014. – V. 117. – №. 4. – P. 1757-1763.
10. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Салтуганов П.Н., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В. Электронная эмиссия и сверхбыстрое низкопороговое плазмообразование при одноимпульсной фемтосекундной лазерной абляции поверхности материалов //Письма в ЖЭТФ. – 2015. – Т. 101. – №. 5. – С. 336-341.
11. Агеев Э.И., Вейко В.П., Кудряшов С.И., Петров А.А., Самохвалов А.А. Контактная и бесконтактная ультразвуковая диагностика ударных волн при одноимпульсной фемтосекундной лазерной абляции поверхности титана //Письма в ЖЭТФ. – 2015. – Т. 102. – №. 10. – С. 785-789.
12. Ageev E.I., Kudryashov S.I., Nikonov N.V., Nuryev R.K., Petrov A.A., Samokhvalov A.A., Veiko V.P. Non-contact ultrasonic acquisition of femtosecond laser-driven ablative Mbar-level shock waves on Ti alloy surface //Appl. Phys. Lett. – 2016. – V. 108. – №. 8. – P. 084106.
13. Заярный Д.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Кучмижак А.А., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н. Абляция поверхности алюминия и кремния

ультракороткими лазерными импульсами варьируемой длительности //Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 103. – №. 12. – С. 846-850.

14. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Самохин А.А. Абляция поверхности материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов //Усп. Физ. Наук. – 2017. – Т. 187. – №. 2. – С. 159-172.

15. Danilov P., Ionin A., Khmel'nitskii R., Kiseleva I., Kudryashov S., Mel'nik N., Rudenko A., Smirnov N., Zayarny D. Electron-ion coupling and ambipolar diffusion in dense electron-hole plasma in thin amorphous Si films studied by single-shot, pulse-width dependent ultrafast laser ablation //Appl. Surf. Sci. – 2017. – V. 425. – P. 170-175.

Диссертация Кудряшова С. И. посвящена экспериментальному обоснованию целостной мультстадийной картины нелинейного и неравновесного взаимодействия ультракоротких (УКИ, фемто- и пикосекундных) лазерных импульсов в абляционном режиме с поверхностью металлов и полупроводников – материалов с сильным межзонным поглощением. Такие материалы представляют собой более общий случай по сравнению с материалами без межзонного поглощения. Тематика исследований актуальна, поскольку в настоящее время, в отсутствие ясных представлений о каждой из основных стадий ФЛА – в первую очередь, для материалов с сильным межзонным поглощением – отсутствует целостная картина явления и для ее формирования требуются экспериментальные исследования закономерностей ключевых стадий с использованием новых подходов. Такие исследования были выполнены Кудряшовым С.И. в своей диссертационной работе.

На основании выполненных соискателем исследований, диссертационный совет отмечает следующие результаты:

1. В режиме ФЛА поверхности алюминия (Al) и титана (Ti) при плотности энергии 0.1-1 Дж/см<sup>2</sup> насыщение сильного межзонного поглощения в течение возбуждающих УКИ происходит с одновременным нарастанием роли внутризонных электронных переходов, что сопровождается нагреванием

электронной подсистемы до температуры  $\sim 1$  эВ и интенсивной эмиссией электронов и ионов.

2. Для теллура (Te), арсенида галлия (GaAs), кремния (Si) при воздействии УКИ накачки возбуждение электрон-дырочной плазмы с плотностью до  $10^{22}$   $\text{см}^{-3}$  приводит к возникновению безынерционной изотропной, сильной (до 50%) и линейной по плотности плазмы электронной перенормировки ширины запрещенной зоны в форме соответствующего «красного» сдвига спектра оптических постоянных этих материалов, а также нелинейному увеличению коэффициента и скорости оже-рекомбинации.

3. Пороговые плотности энергии одноимпульсной абляции аморфного и кристаллического Si, а также железа (Fe), Al, Cu, Ag при воздействии УКИ варьируемой длительности имеют минимум при длительностях импульса в диапазоне 0.6-3 пс, соответствующих для этих материалов характерному времени переноса энергии из электронной в ионную подсистему.

4. В режиме ФЛА транспорт энергии в пленках аморфного Si происходит путем амбиполярной диффузии с коэффициентом диффузии  $\sim 10^3$   $\text{см}^2/\text{с}$  для плотной электрон-дырочной плазмы ( $\sim 10^{22}$   $\text{см}^{-3}$ ).

5. Из-за акустического рассогласования твердой фазы и лазерно-индуцированного расплава Si и GaAs на пикосекундных временах возникает сильная квазипериодическая модуляция коэффициента отражения пробных УКИ, что связывается с реверберациями акустической волны в слое расплава, растущем по толщине со скоростями  $\sim 400-600$  м/с.

6. При умеренной ( $< 1$  Дж/см<sup>2</sup>) плотности энергии УКИ накачки на субнаносекундных временах для Al, Si, GaAs и графита (C) реализуется откольная абляция поверхностного расплава. Отрыв и отлет пленки расплава происходит после его акустической разгрузки в результате подповерхностного гомогенного вскипания в термически расширенном расплаве, что проявляется на дне кратеров в виде следов нанопены, а вне кратеров – в виде кавитационных структур.

7. При высокой ( $>1$  Дж/см<sup>2</sup>) плотности энергии УКИ накачки абляция поверхности Al, Ti и Si происходит в форме фазового взрыва (разлета закритического флюида). В данном режиме ФЛА в тонких и толстых образцах Ti с помощью бесконтактной фронтальной и контактной тыльной ультразвуковой диагностики обнаружен сверхупругий режим распространения ударной волны, реализующийся при давлениях выше 10 ГПа, и диссипативный режим распространения при меньших давлениях. Генерируемые в субмикронном поверхностном слое высокие (суб-ТПа) давления вызывают упрочнение Al-сплава и возникновение остаточных упрочняющих сжимающих напряжений ГПа-уровня для Ti-сплава.

Все основные научные результаты, включенные в диссертацию Кудряшова С.И., получены лично автором либо под его руководством и при его непосредственном участии. Анализ и интерпретация полученных результатов, подготовка материалов к опубликованию производились автором лично или в сотрудничестве с соавторами.

Представленные в работе Кудряшова С.И. экспериментальные данные, наблюдавшиеся закономерности и новые эффекты дают согласованную картину явления, для которого по некоторым отдельным стадиям имеется теоретическое обоснование, выполненное ведущими мировыми теоретическими группами, работающими в этой области. Достоверность проведенных автором экспериментальных исследований подтверждается использованием сертифицированного измерительного оборудования, комплекса взаимодополняющих методов измерений, а также сравнением с результатами экспериментов и расчетов других авторов.

Новизна результатов работы Кудряшова С.И. выражается в следующем:

- 1) исследована зависимость величины электронной перенормировки ширины запрещенной зоны полупроводников от плотности электрон-дырочной плазмы (до  $10^{22}$  см<sup>-3</sup>), возбуждаемой УКИ;
- 2) продемонстрирована корреляция по плотности энергии УКИ между насыщением межзонных переходов, началом нагревания ( $\sim 1$  эВ)



электронного газа и сверхбыстрой эмиссии электрон-ионной плазмы для металлов и полупроводников;

3) показано, что характерные времена переноса энергии из электронной в ионную подсистему соответствуют длительностям УКИ для минимальных пороговых плотностей энергии одноимпульсной абляции материалов;

4) обнаружена и объяснена пикосекундная квазипериодическая модуляция коэффициента отражения полупроводников из-за ревербераций акустической волны в их расплаве, характеризующая мгновенную толщину и скорость роста расплава;

5) установлено, что откольная абляция поверхностного расплава материалов под действием УКИ происходит после его акустической релаксации и протекает путем субнаносекундного наномасштабного подповерхностного гомогенного вскипания, пенообразования и образования паровой полости;

6) измерены давления мегабарного уровня в режиме фрагментационной ФЛА непосредственно на поверхности материалов, продемонстрированы диссипативный и сверхупругий режимы пробега волны давления в мишени.

Научная новизна представленных результатов подтверждается их приоритетными публикациями в рецензируемых журналах и докладами на многих международных конференциях.

Результаты, полученные в диссертационной работе Кудряшова С.И., могут найти практическое применение не только при обработке различных конструкционных и функциональных материалов с помощью УКИ, но и как ключевые входные параметры для моделирования таких процессов.

Совокупность результатов проведенных автором исследований, формирующих целостную картину фемтосекундной лазерной абляции и опирающихся на комплекс разработанных взаимодополняющих методик измерений, является научным достижением, имеющим важное значение для лазерной физики и технологии.

На заседании 14 октября 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Кудряшову С.И. учёную степень доктора физико-

математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 24 человек, из них 8 докторов наук по специальности 01.04.21-лазерная физика, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение ученой степени- 24,  
против присуждения ученой степени - 0,  
недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета,  
член корреспондент РАН, д.ф.-м. н.

\_\_\_\_\_ Колачевский Николай Николаевич

Учёный секретарь диссертационного совета,  
д.ф.-м. н.

\_\_\_\_\_ Золотко Александр Степанович

14 октября 2019 года