

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 14 ноября 2022 г. № 37

О присуждении Смирнову Никите Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Абляционные кратеры при воздействии фемто- и пикосекундных лазерных импульсов на поверхность золота и кремния в воздушной и водной среде» по специальности 1.3.19 – Лазерная физика принята к защите 4 июля 2022 года (протокол № 29) 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 Смирнов Никита Александрович, 2 марта 1992 года рождения, в 2014 году окончил специалитет по специальности «Физика» Череповецкого государственного университета. В 2016 г. окончил магистратуру Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по специальности «Ядерная физика и технологии». С 2015 работает в ФИАН, с 2016 г. в должности младшего научного сотрудника. В период с 2015 г. по 2019 г. обучался в аспирантуре ФИАН по направлению подготовки 03.06.01-Физика и астрономия». По окончании аспирантуры Смирнову Н.А. была присвоена квалификация «Исследователь; преподаватель-исследователь». Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана ФИАН в 2022 году.

Диссертационная работа Смирнова Н.А. выполнена в Отделении квантовой радиофизики ФИАН им. Н.Г. Басова ФИАН.

Научный руководитель доктор физико-математических наук Кудряшов Сергей Иванович работает в должности ведущего научного сотрудника лаборатории лазерной нанофизики и биомедицины ФИАН. Он является специалистом в области лазерной физики, нелинейной оптики и взаимодействия излучения с веществом.

Официальные оппоненты:

Першин Сергей Михайлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории Лазерной спектроскопии Научного центра волновых исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН» (ИОФ РАН),

Ашитков Сергей Игоревич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории лазерного воздействия Отдела физики экстремальных состояний Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур РАН дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ) в своем положительном заключении, подписанном доктором физико-математических наук, профессором Кашкаровым Павлом Константиновичем, заведующим кафедрой общей физики и молекулярной электроники, и кандидатом физико-математических наук Заботновым Станиславом Васильевичем, доцентом кафедры общей физики и молекулярной электроники, и утвержденном доктором физико-математических наук, профессором Федяниным Андреем Анатольевичем, проректором МГУ, начальником Управления научной политики, указала что соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата 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.

Соискатель имеет 50 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 6 работ, из них 6 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science. Результаты работы доложены на 6 международных конференциях.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения о работах, опубликованных Смирновым Н.А.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в работах:

1. Смирнов Н. А., Кудряшов С.И., Данилов П.А., Руденко. А.А., Ионин А.А., Настулявичус А.А. Одноимпульсная абляция кремния ультракороткими лазерными импульсами варьированной длительности в воздухе и воде //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – Т. 108. – №. 6. – С. 393-398.

2. Smirnov N. A., Kudryashov S. I., Rudenko A. A., Nastulyavichus A. A., Ionin A. A. Micro-Raman spectroscopy of single-shot pulse silicon craters produced by femtosecond laser in air and liquid //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1692. – №. 1. – С. 012012.

3. Смирнов Н., Кудряшов С., Мельник Н., Папилова П., Шерстнев И., Ионин А., Чэнь Ц. Индуцируемые напряжения, возникающие в кристаллическом кремнии при воздействии ультракоротких лазерных импульсов различной длительности в воздухе и воде// Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т.129. –№6. – С. 1331-1335.

4. Smirnov N. A., Kudryashov S. I., Rudenko A. A., Zayarny D. A., Ionin A. A. Pulsewidth and ambient medium effects during ultrashort-pulse laser ablation of silicon in air and water //Applied Surface Science. – 2021. – Т. 562. – С. 150243.

5. Smirnov N. A., Kudryashov S. I., Rudenko A. A., Nastulyavichus A. A., Ionin A. A. Ablation efficiency of gold at fs/ps laser treatment in water and air //Laser Physics Letters. – 2022. – Т. 19. – №. 2. – С. 026001.

6. Nastulyavichus A., Smirnov N., Kudryashov S. Quantitative evaluation of LAL productivity of colloidal nanomaterials: which laser pulse width is more productive, ergonomic and economic? //Chinese Physics B. – 2022. – Т. 31. – №. 7. – С. 077803.

В последней из указанных публикаций соискателю Смирнову Н.А. принадлежат только результаты, относящиеся к абляции золотой мишени жестко сфокусированными лазерными импульсами объективом с числовой апертурой NA 0.65.

Диссертационный совет отмечает, что в диссертации экспериментально исследована эффективность абляции золотой и кремниевой мишени в диапазоне длительностей от субпико до пикосекунд в режиме одноимпульсной абляции.

На основании выполненных соискателем исследований были получены следующие основные результаты:

1. Для одноимпульсной абляции золотой мишени в воздушной среде ультракороткими лазерными импульсами с длиной волны 515 нм и 1030 нм, сфокусированными микрообъектом с числовой апертурой NA=0.65, с увеличением длительности импульса от 0.3. до 10 пс при фиксированных значениях плотности энергии было обнаружено уменьшение глубин кратеров в ≈ 2 раза. Наблюдаемый эффект связан с уменьшением вклада фазового взрыва в процесс абляции.
2. Для одноимпульсной абляции объемных мишеней золота и кристаллического кремния в водной среде ультракороткими лазерными импульсами видимого (515 нм) и ближнего ИК (1030 нм) диапазонов варьируемой длительности (0.3-10 пс), жестко сфокусированными микрообъективами с числовыми апертурами 0.65 и 0.25, было обнаружено увеличение глубины кратера при снижении пиковой мощности импульса ниже значений критической мощности самофокусировки в воде (~ 0.1 МВт для длины волны 515 нм и ~ 1 МВт для длины 1030 нм). Уменьшение

эффективности абляции связывается с возникновением филаментации лазерных импульсов с сопутствующим возникновением нелинейного фокуса и появлением плазменного канала вследствие самофокусировки лазерных импульсов.

3. При одноимпульсной абляции мишени кристаллического кремния ультракороткими лазерными импульсами варьируемой длительности (0.3-10 пс) с длиной волны 1030 нм при низкой плотности энергии $<5 \text{ Дж/см}^2$ был обнаружен аномальный рост латеральных размеров кратеров сверх пятна фокусировки, наиболее выраженный для более коротких импульсов. Наблюдаемый эффект был связан с латеральным переносом энергии при абляционной плотности электрон-дырочной плазмы $\sim 10^{21} - 10^{22} \text{ см}^{-3}$ на временах электрон-фононной релаксации $\approx 2 \text{ пс}$ с эффективной скоростью расширения частично вырожденной электрон-дырочной плазмы в диапазоне $(0.2-0.4) \times 10^6 \text{ м/с}$.
4. Обнаружено снижение роста глубины кратеров для кристаллического кремния при фиксированной плотности энергии в диапазоне $<10 \text{ Дж/см}^2$ с увеличением длительности лазерного импульса при одноимпульсном воздействии ультракороткими лазерными импульсами варьируемой длительности в диапазоне от 0.3 до 10 пс с длиной волны 1030 нм.

Научная новизна полученных результатов связана с обнаружением роста латерального размера кратеров, полученных на мишени кристаллического кремния при воздействии ультракоротких лазерных импульсов с варьируемой длительностью (0.3-10 пс) с длиной волны 1030 нм сверх размера геометрического пятна фокусировки и сверхбыстрого бокового переноса энергии электрон-дырочной плазмы с эффективной скоростью. На основании измеренных глубин и объёмов кратеров произведена количественная оценка влияния явления самофокусировки на процесс выноса вещества с поверхности материалов (золото, кристаллический кремний) под воздействием ультракоротких лазерных импульсов варьируемой длительности 0.3-10 пс для двух длин волн (515 нм и

1030 нм) в водной среде при жесткой фокусировке лазерного излучения ($NA=0.25$ - 0.65).

Обнаружено, что глубина кратеров при достижении критической мощности самофокусировки снижается в 2-3 раза.

Практическая значимость результатов, полученных Смирновым Н.А. связана с экспериментальным измерением эффективных скоростей расширения в мишени кремния электрон-дырочной плазмы с плотностью $\sim 10^{22}$ см⁻³ и временем электрон-фононной термализации ≈ 2 пс, которые являются одними из ключевых параметров при численном моделировании взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с материалом.

Представленные в работе систематические результаты по экспериментальному исследованию эффективности абляции от длительности лазерного излучения в пико-субпикосекундном диапазоне в воздушной и водной средах позволяют оптимизировать параметры лазерной системы ультракоротких импульсов для обработки поверхности в зависимости от контактной среды, в которой будет происходить абляция.

Результаты диссертационной работы Н.А. Смирнова могут быть рекомендованы к использованию в Физическом институте имени П.Н. Лебедева РАН, Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургском государственном университете, Институте общей физики РАН имени А.М. Прохорова, Национальном исследовательском Томском государственном университете.

Результаты работы Смирнова Н.А. оригинальны и научно обоснованы. Их достоверность подтверждается адекватным выбором экспериментальных методик, использованием современного сертифицированного оборудования, успешным представлением на международных конференциях и публикациями в ведущих мировых научных журналах.

Все результаты диссертации получены лично автором или при его непосредственном участии. Смирнов Н.А. лично осуществил все представленные в работе расчеты, провел описанные эксперименты и обработал полученные

данные. Также автор внес существенный вклад в разработку экспериментальных схем, задействованных в работе, и предложил оригинальный метод расчета измерения эффективной скорости расширения электрон-дырочной плазмы. Подготовка результатов к публикации проводилась совместно с соавторами.

В ходе защиты соискатель Смирнов Н.А. аргументированно ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 14 ноября 2022 диссертационный совет принял решение присудить Н.А. Смирнову ученую степень кандидата физико-математических наук за решение научной задачи об определении влияния длительности лазерного излучения в субпико-пикосекундном диапазоне и среды на эффективность абляции золотой и кремниевой мишени и установлении физических процессов, определяющих ее.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 22 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.19 – Лазерная физика), участвовавшие в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение ученой степени – 21,
против присуждения ученой степени – 1,
недействительных бюллетеней – 0.

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

Колачевский Николай Николаевич

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Золотко Александр Степанович

14 ноября 2022 г.