

УТВЕРЖДАЮ

Проректор Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Московский государственный  
университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ),  
начальник Управления научной политики



Доктор физико-математических наук, профессор

А.А. Федянин

«19» октября 2022 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

*На диссертационную работу Смирнова Никиты Александровича*

*«Абляционные кратеры при воздействии фемто- и пикосекундных лазерных импульсов на поверхность золота и кремния в воздушной и водной среде»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика*

Диссертационная работа Смирнова Никиты Александровича «Абляционные кратеры при воздействии фемто- и пикосекундных лазерных импульсов на поверхность золота и кремния в воздушной и водной среде» посвящена экспериментальному исследованию структурных свойств абляционных кратеров на поверхности золота и кремния и описанию сопутствующих абляции физических эффектов при воздействии ультракоротких лазерных импульсов в одноимпульсном режиме в воздушной и водной средах при варьировании длительности, плотности энергии и длины волны лазерного излучения.

В настоящее время импульсное лазерное излучение находит широкое применение в технологиях структурирования объема и поверхности твердых тел с микронной и субмикронной точностью. Использование ультракоротких лазерных импульсов пико- и фемтосекундной длительности представляет несомненный интерес в развитии данного направления, поскольку они дают следующие преимущества по сравнению с импульсами большей длительности:

1. Меньшие тепловые повреждения материала.
2. Меньшее загрязнение поверхности мишени продуктами абляции.
3. Большая энергетическая эффективность абляционного удаления материалов.
4. Более широкие возможности по изменению структурных, оптических и электронных свойств облучаемых изделий за счет реализации нестационарных фазовых переходов и модификации рельефа поверхности в условиях разделения на временной шкале воздействия лазерного импульса и термических процессов.

Несмотря на значительный задел в области лазерной абляции полупроводников и металлов ультракороткими лазерными импульсами, до сих пор нет окончательного понимания взаимосвязи структуры формируемых абляционных кратеров с такими параметрами лазерных импульсов, как их длительность, плотность энергии и длина волны.

Для решения данной задачи представляется целесообразным детально проанализировать морфологические особенности и геометрические размеры кратеров при варьировании перечисленных параметров и учете таких важных процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, как неравновесное распределение энергии электронов на фемтосекундных временных масштабах во время воздействия лазерного импульса, перенос энергии электронов в решетку, теплопроводность, амбиполярную диффузию в электрон-дырочной плазме в случае облучения полупроводников, акустическую разгрузку и удаление материала.

Важно отметить, что на практике для прецизионной обработки материалов часто применяется многоимпульсное лазерное облучение, позволяющее удалять (аблировать) большее число материала по сравнению с одноимпульсным воздействием. Однако, с фундаментальной точки зрения последний режим имеет не меньшее значение, позволяя путем анализа только возникающих кратеров извлечь максимум информации о природе лазерной абляции и сопутствующих процессах за счет отсутствия наложения последовательных воздействий от импульса к импульсу. Таким образом, ставящаяся в представленной диссертационной работе цель изучения абляционных кратеров в одноимпульсном режиме облучения является, несомненно, актуальной и научно значимой.

В связи со сказанным, в представленной диссертационной работе автор ставит конкретные задачи получения кратеров на поверхностях золотой и кремниевой мишеней в воспроизводимых условиях (при одной фокусировке, поляризации излучения, фиксированных значениях энергии в импульсе) для разных длительностей лазерного излучения при одноимпульсной абляции в воздушной и водной средах; характеристики абляционного рельефа полученных кратеров; исследования эффекта водной среды на процесс абляции и установления физических процессов, определяющих абляцию золотой и кремниевой мишеней в воздушной и водной средах ультракороткими лазерными импульсами. Данная постановка задач позволяет говорить о том, что исследование автора диссертации является комплексным и обладает элементами научной новизны, поскольку позволяет в результате получить новые систематизированные знания о структуре и процессах формирования абляционных кратеров в непосредственной взаимосвязи с параметрами лазерного облучения.

Диссертационная работа написана на 118 страницах, ее структура следующая:

**Во Введении** сформулированы цели, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, выносимые на защиту положения, личный вклад автора, степень достоверности и апробация полученных результатов.

**Глава 1** представляет собой обзор литературы. В ней рассмотрены основные механизмы и модели взаимодействий ультракоротких лазерных импульсов с веществом, ранее выполненные исследования эффективности лазерной абляции в зависимости от длительности импульса, особенности нелинейного распространения лазерных импульсов в прозрачных средах и лазерной абляции в жидкостях.

**В главе 2** описывается использованная для облучения экспериментальная лазерная установка, позволяющая генерировать импульсы в диапазоне 0.3–10 пс на длинах волн 515 и 1030 нм. Уделено внимание используемым для лазерной абляции мишеням кремния и золота, методам электронной и зондовой микроскопии, оптической профилометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния света и расчету пороговой плотности энергии для абляции.

**В главе 3** представлены результаты по одноимпульсной абляции золотой мишени ультракороткими лазерными импульсами варьируемой длительности в воздухе и воде при различных числовых апертурах объективов, используемых для фокусировки излучения.

Проводится всесторонний анализ морфологических особенностей, профилей и глубин сформированных кратеров, оценка порогов абляции мишени. На основании измерений объемов сформированных кратеров производится оценка значений удаленной массы вещества, приводятся зависимости данной величины от плотности энергии и длительности лазерных импульсов.

Анализ полученных данных в случае абляции в воздушной среде позволяет сделать вывод о доминировании механизма фазового взрыва в процессе абляции. Наблюдаемые изменения эффективности абляции при варьировании параметров лазерных импульсов могут быть объяснены увеличением нелинейного поглощения в золоте при более высоких интенсивностях лазерного излучения и более коротких импульсах; сверхбыстрым переносом энергии горячих носителей в течение более коротких импульсов; уменьшением внутреннего давления сверхкритической жидкости в области абляции более длительными импульсами; нагревом ударной волной, для которой чем больше длительность лазерного импульса, тем меньше его интенсивность, слабее ударная волна и меньше глубина кратера.

В случае абляции в воде заметный вклад в эффективность абляции вносят самофокусировка и последующая филаментация лазерного луча. Данное предположение было подтверждено непосредственной визуализацией плазменного канала в сфокусированном луче и построением зависимости положения геометрического фокуса от пиковой мощности лазерного импульса, показывающей хорошее согласие с расчетами фокусного расстояния в нелинейно-оптической среде.

**В главе 4** описываются результаты по одноимпульсной лазерной абляции кремниевых мишеней в воздухе и воде. Анализ изображений и профилей кратеров, зависимостей глубин кратеров, порогов и эффективности абляции от плотности энергии, длительности лазерных импульсов также, как и в случае абляции золотой мишени, позволил сделать вывод о характеристике данного процесса преимущественно фазовым взрывом, который в рассматриваемом случае связан с гидродинамическим разлетом около- и закритического флюида кремния. Исключением является наблюдение режима откольной абляции на воздухе под действием импульсов длительностью 10 пс с длиной волны 1030 нм. Данный эффект может быть связан с непрерывной акустической релаксацией внутреннего теплового давления в расплавленном кремнии во время лазерных импульсов, таким образом приводящий к частичной или полной отмене механизма фазового взрыва.

Дополнительной важной особенностью абляции в водной среде стало появление на периферии кратера периодических кольцеобразных субмикронных структур, которые по мере роста пиковой плотности энергии все дальше распространяются от кратера. Их появление можно связать как с ударными волнами, которые в воде проявляют себя сильнее, чем на воздухе, так и с капиллярными волнами расплава кремния.

Анализ зависимостей разностей квадратов радиусов абляции в воздушной среде при варьируемой длительности лазерного импульса и длительности 10 пс от длительности импульса позволил произвести оценки значений времени термализации фононов, коэффициента амбиполярной диффузии и скорости расширения электрон-дырочной плазмы. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что наблюдаемый рост радиусов кратеров сверх размера пятна фокусировки в случае абляции лазерными импульсами с длиной волны 1030 нм связан с явлением преимущественно латерального переноса энергии на временном масштабе диффузии электрон-дырочной плазмы и сопутствующей электрон-фононной термализации.

Сравнение спектров комбинационного рассеяния света облученных и необлученных кремниевых мишеней позволило по сдвигу характерной линии  $521\text{ см}^{-1}$  показать, что в результате лазерной обработки в центре кратера возникают механические напряжения

амплитудой до 100 МПа по модулю. Конкретное значение и характер данной величины по типу сжатия или растяжения зависят от используемой для абляции буферной среды, длительности и плотности энергии лазерного импульса.

**В Заключение** сформулированы основные результаты диссертации. Далее оформлены список используемых сокращений, благодарности и список цитируемой литературы.

К основным результатам работы можно отнести следующие:

1. При одноимпульсной абляции в воздушной среде поверхности мишени золота ультракороткими лазерными импульсами, генерируемыми на длинах волн 515 нм и 1030 нм и жестко сфокусированными с помощью объектива с числовой апертурой 0.65, наблюдается уменьшение глубины кратеров в 2.5 раза с ростом длительности импульса от 0.3 до 10 пс. Наблюдаемый эффект связан с уменьшением вклада фазового взрыва в процесс абляции.
2. Для одноимпульсной абляции в водной среде мишени золота и кристаллического кремния лазерными импульсами, генерируемыми на длинах волн 515 нм и 1030 нм и жестко сфокусированными с помощью объективов с числовыми апертурами 0.25 и 0.65, в диапазоне длительностей импульса 0.3–10 пс наблюдается уменьшение глубины кратера с уменьшением длительности при одновременном соответствующем увеличении пиковой мощности импульсов. Наблюдаемый эффект связывается с достижением порога критической мощности самофокусировки лазерного излучения в воде.
3. При одноимпульсной абляции поверхности кристаллического кремния в воздушной среде лазерными импульсами, генерируемыми на длине волны 1030 нм и жестко сфокусированными с помощью объектива с числовой апертурой 0.25, при варьировании длительности в диапазоне 0.3–10 пс и плотности энергии импульсов менее 5 Дж/см<sup>2</sup> отмечается аномальный рост радиусов кратеров сверх размеров пятна фокусировки, более сильно выраженный для импульсов меньшей длительности. Наблюдаемый эффект связывается с быстрым латеральным переносом энергии при абляционной плотности электрон-дырочной плазмы порядка  $10^{22}$  см<sup>-3</sup> на временах электрон-фононной термализации  $\approx 2$  пс с эффективной скоростью расширения частично вырожденной электрон-дырочной плазмы в диапазоне  $(0.2-0.4) \times 10^6$  м/с.
4. При одноимпульсной абляции поверхности кристаллического кремния в воздушной среде лазерными импульсами, генерируемыми на длине волны 1030 нм и жестко сфокусированными с помощью объектива с числовой апертурой 0.25, при варьировании длительности в диапазоне 0.3–10 пс с ростом длительности импульсов при фиксированной плотности энергии менее 10 Дж/см<sup>2</sup> наблюдается замедление роста глубины кратера.

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.

Полученные результаты прошли серьезную апробацию на международных конференциях и семинарах Физического института имени П.Н. Лебедева РАН (семинары Отделения квантовой радиофизики имени Н.Г. Басова и семинар Центра лазерных и нелинейно-оптических технологий), опубликованы в 6 статьях, удовлетворяющих требованиям ВАК РФ для защиты диссертаций на соискание ученой степени.

Несмотря на общее позитивное впечатление, диссертационная работа Н.А. Смирнова не лишена ряда недостатков. В этой связи следует сделать ряд замечаний по оформлению и сути:

1. Местами работа оформлена небрежно:

- В тексте отсутствуют упоминания рисунков 1.1 и 1.14.

- Подпись к рисунку 1.5 из обзора литературы не имеет ссылки на первоисточник.

- Для рисунков 3.17, 4.3, 4.5, 4.9 и 4.10 рисунки и подписи к ним расположены на разных страницах, что затрудняет восприятие.

- В тексте часто пишется про зависимость « $R^2 - \ln E$ ». Видимо, имелась в виду функция  $R^2(\ln E)$ , что из представленной записи совсем не следует. Также непонятно, как брался натуральный логарифм от размерной величины  $E$ , являющейся энергией. В тексте пропущено описание необходимой для этого нормировки.

- Числовая нумерация формул непосредственно в строке с ними выполнена в разном стиле, то обычным шрифтом, то курсивом.

- На странице 28 в тексте делается ссылка на рисунок 5, но в работе везде используется двухуровневая нумерация рисунков. Видимо все же имелся в виду рисунок 1.5.

- Вместо знака тире в тексте почти везде пишутся дефисы.

- Опечатка в заголовке раздела 4.1: вместо «золотой мишени» должно быть «кремниевой мишени».

2. Не везде используется корректная терминология:

- На странице 46 следует писать, что пороговая плотность энергии абляции определяется не интерполяцией, а экстраполяцией.

- Вызывает недоумение формулировка на странице 71: «При этом с ростом  $\tau_{\text{las}}$  на рис.4.2 наблюдается монотонное снижение порогов абляции  $F_{th}$  и характерного  $1/e$ -радиуса области абляции  $w_{abl}$  с минимумом в области  $\approx 1.6$  пс». Может быть что-то одно: либо монотонное снижение, либо достигаться минимум.

- Вывод 2 на странице 101 сформулирован неудачно. Написано, что наблюдаемый эффект связывается с достижением порога критической мощности самофокусировки лазерного излучения в воде, равным, соответственно, более 0.1 МВт для длины волны 515 нм и более 1 МВт для длины волны 1030 нм. Слово «соответственно» писать излишне, а понятия «равным» и «более» противоречат друг другу.

3. В работе рассчитывается масса аблированного вещества путем умножения объема кратера на плотность. Абляционные кратеры имеют сложную форму и бортики по краям. Из текста непонятно, как учитывались эти факторы. Следовало бы подробнее описать процедуру расчета объема аблированного вещества.

4. Местами рисунки сложны для восприятия и сравнения. Так в главе 3 часть изображений кратеров в электронном микроскопе представлена для различных плотностей энергий, а другая часть – просто для различных энергий. Помимо этого, на рисунке 4.2 следовало бы характерное время 1.6 пс, упоминаемое в тексте, обозначить, например, вертикальной пунктирной линией или хотя бы отложить на оси абсцисс, поскольку выбранный шаг дискретизации, равный 5 пс, затрудняет анализ полученных зависимостей.

5. В списке цитируемой литературы в библиографических ссылках при наличии нескольких авторов указывается имя только первого из них. Согласно действующим стандартам оформления принято приводить данные всех авторов. Также вызывает недоумение оформление части ссылок, первоисточником которых являются журналы на русском языке, в виде ссылок на переводные англоязычные версии.

6. В первом защищаемом положении на странице 9 следовало бы указать причины уменьшения глубины кратеров при увеличении длительности лазерного импульса при абляции в воздухе и превышении критической мощности самофокусировки при абляции в воде. Ведь одной из поставленных задач диссертации является установление физических процессов, определяющих лазерную абляцию золотой и кремниевой мишени в воздушной и водной средах.

Тем не менее, приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости ее вклада в лазерные технологии прецизионного структурирования поверхностей золота и кремния. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты.

Диссертационная работа «Абляционные кратеры при воздействии фемто- и пикосекундных лазерных импульсов на поверхность золота и кремния в воздушной и водной среде» является законченным научным исследованием. По тематике она соответствует заявленной специальности и удовлетворяет требованиям, изложенным в пп. 9–11, 13 и 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор Смирнов Никита Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Доклад по материалам диссертации был сделан на научно-исследовательском семинаре кафедры общей физики и молекулярной электроники 12 октября 2022 года. Отзыв на диссертацию одобрен на заседании семинара.

Отзыв на диссертацию составлен:

Заведующий кафедрой общей физики  
и молекулярной электроники  
д.ф.-м.н., профессор  
тел.: +7 495 939 2193,  
e-mail: Kashkarov\_PK@nrcki.ru



Кашкаров Павел Константинович

Доцент кафедры общей физики  
и молекулярной электроники  
к.ф.-м.н.  
тел.: +7 495 939 4657,  
e-mail: zobotnov@physics.msu.ru



Заботнов Станислав Васильевич

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», 119991, ГСП-1, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1.

Список основных работ сотрудников ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ), по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет:

1. D.V. Shuleiko, F.V. Potemkin, I.A. Romanov, I.N. Parhomenko, A.V. Pavlikov, D.E. Presnov, S.V. Zobotnov, A.G. Kazanskii, P.K. Kashkarov "Femtosecond laser pulse modification of amorphous silicon films: control of surface anisotropy" // *Laser Physics Letters*, 2018, vol. 15, № 5, 056001.
2. С.В. Заботнов, А.В. Колчин, Ф.В. Кашаев, А.В. Скобёлкина, В.Ю. Нестеров, Д.Е. Преснов, Л.А. Головань, П.К. Кашкаров "Анализ структуры наночастиц, формируемых методом лазерной абляции пористого кремния и микрочастиц кремния в воде" // *Письма в Журнал технической физики*, 2019, т. 45, вып. 21, с. 22–25.
3. С.В. Заботнов, Д.А. Куракина, Ф.В. Кашаев, А.В. Скобелкина, А.В. Колчин, Т.П. Каминская, А.В. Хилов, П.Д. Агрба, Е.А. Сергеева, П.К. Кашкаров, М.Ю. Кириллин, Л.А. Головань "Структурные и оптические свойства наночастиц, формируемых методом лазерной абляции пористого кремния в жидкостях; перспективы применения в биофотонике" // *Квантовая электроника*, 2020, т. 50, № 1, с. 69–75.
4. А.В. Колчин, Д.В. Шулейко, А.В. Павликов, С.В. Заботнов, Л.А. Головань, Д.Е. Преснов, В.А. Володин, Г.К. Кривякин, А.А. Попов, П.К. Кашкаров "Фемтосекундный лазерный отжиг многослойных тонкопленочных структур на основе аморфных германия и кремния" // *Письма в Журнал технической физики*, 2020, т. 46, вып. 11, с. 43–46.
5. S.V. Zobotnov, A.V. Skobelkina, E.A. Sergeeva, D.A. Kurakina, A.V. Khilov, F.V. Kashaev, T.P. Kaminskaya, D.E. Presnov, P.D. Agrba, D.V. Shuleiko, P.K. Kashkarov, L.A. Golovan, M.Yu. Kirillin "Nanoparticles produced via laser ablation of porous silicon and silicon nanowires for optical bioimaging" // *Sensors*, 2020, vol. 20, 4874.
6. D.V. Shuleiko, M.N. Martyshov, D.V. Orlov, D.E. Presnov, S.V. Zobotnov, A.G. Kazanskii, P.K. Kashkarov "Fabrication of anisotropic structures on the surface of amorphous silicon by femtosecond laser pulses" // *Solid State Phenomena*, 2020, vol. 312, pp. 192–199.
7. S.V. Zobotnov, A.V. Skobelkina, F.V. Kashaev, A.V. Kolchin, V.V. Popov, D.E. Presnov, E.A. Sergeeva, M.Yu. Kirillin, L.A. Golovan "Pulsed laser ablation of silicon nanowires in water and ethanol" // *Solid State Phenomena*, 2020, vol. 312, pp. 200–205.
8. О.И. Соколовская, С.В. Заботнов, Л.А. Головань, П.К. Кашкаров, Д.А. Куракина, Е.А. Сергеева, М.Ю. Кириллин "Перспективы применения кремниевых наночастиц, полученных методом лазерной абляции, для гипертермии злокачественных опухолей" // *Квантовая электроника*, 2021, т. 51, № 1, с. 64–72.
9. D. Shuleiko, M. Martyshov, D. Amasev, D. Presnov, S. Zobotnov, L. Golovan, A. Kazanskii, P. Kashkarov "Fabricating femtosecond laser-induced periodic surface structures with electrophysical anisotropy on amorphous silicon" // *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, 42.
10. В.Ю. Нестеров, О.И. Соколовская, Л.А. Головань, Д.В. Шулейко, А.В. Колчин, Д.Е. Преснов, П.К. Кашкаров, А.В. Хилов, Д.А. Куракина, М.Ю. Кириллин, Е.А. Сергеева, С.В. Заботнов "Лазерная фрагментация кремниевых микрочастиц в жидкостях для решения задач биофотоники" // *Квантовая электроника*, 2022, т. 52, № 2, с. 160–170.

## Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Сокращенное название: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, МГУ имени М.В. Ломоносова или МГУ

Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Адрес официального сайта в сети Интернет: [www.msu.ru](http://www.msu.ru)

Телефон: +7 (495) 939-10-00 Факс: +7 (495) 939-01-26

Электронная почта: [info@rector.msu.ru](mailto:info@rector.msu.ru)