

## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук

**Ашиткова Сергея Игоревича**

на диссертацию Смирнова Никиты Александровича

**«Абляционные кратеры при воздействии фемто- и пикосекундных лазерных импульсов на поверхность золота и кремния в воздушной и водной среде»,**

представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Диссертационная работа Н.А. Смирнова посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия остросфокусированных ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) с переменной длительностью в диапазоне 0.3-10 пс с объемными мишенями золота и кристаллического кремния в воздушной и водной средах. Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена появлением лазерных коммерческих систем с ультракороткой длительностью импульса, скорость обработки для которых сопоставима со скоростью для механических способов обработки, таких как: сверление, стробирование, фрезерование. Вследствие этого важной задачей является исследование механизмов абляции вещества при воздействии ультракоротких лазерных импульсов, а также оптимального выбора параметров лазерной системы, таких как длительность лазерного импульса, энергии, длины волны и среды, в которой будет производиться лазерная обработка.

Диссертационная работа Н.А. Смирнова состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 118 страниц печатного текста, 61 рисунок и 1 таблицы. Библиография включает 157 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, приводятся основные цели и задачи работы, методы исследований, а также представлена научная новизна, сформулированы защищаемые положения и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** представлен литературный обзор по тематике диссертационного исследования. Рассмотрены основные стадии поглощения лазерных ультракоротких импульсов в материале. Представлены основные механизмы выноса вещества с поверхности мишени. Рассмотрено влияние жидкости на процесс абляции. Рассмотрено нелинейное распространение ультракоротких импульсов в среде.

**Во второй главе** приведено описание экспериментальной установки, охарактеризованы используемые образцы.

**В третьей главе** приведены экспериментальные результаты по взаимодействию остросфокусированных (числовая апертура объектива  $NA=0.65$ ) одиночных лазерных УКИ с золотой мишенью. В работе используются лазерные УКИ переменной длительности (0.3-10 пс) с длинами волн видимого и ближнего ИК диапазона (515 нм и 1030 нм). Анализ полученных на поверхности мишени кратеров (морфология, глубина, объем) производился с помощью сканирующего зондового и электронного микроскопов. Анализ кратеров приведен для фиксированных плотностей энергии, но разных длительностей. На основе полученных данных было обнаружено снижение глубин и объемов кратеров с ростом длительности лазерного импульса до 2.5 раз при абляции в воздушной среде. Данная тенденция характерна для двух используемых длин волн. При абляции в жидкости наблюдалась обратная картина, с увеличением длительности лазерного импульса глубины и объемы кратеров уменьшаются, что связывается с достижением критической мощности самофокусировки лазерного излучения. Для подтверждения возникновения филаментации производилась визуализация плазменного канала в воде. Было обнаружено смещение центра плазменного канала навстречу фокусирующей оптике, что интерпретировано как проявление явления самофокусировки в водной среде.

**В четвертой главе** приведены результаты опытов по абляции объемной мишени кристаллического кремния в режиме одноимпульсной абляции при варьируемой длительности лазерного импульса в диапазоне 0.3-10 пс для длин волн: 515 нм и 1030 нм. Показано, что эффективность абляции материала в водной среде с увеличением длительности импульса снижается. Наблюдаемый эффект, как и в третьей главе, объясняется достижением порога критической мощности самофокусировки. Исследован латеральный перенос тепла в кремнии в условиях острой фокусировки излучения при варьируемой длительности УКИ. Показано, что быстрый латеральный перенос энергии электронно-дырочной плазмой происходит на временном масштабе порядка 2 пс, ограниченном временем электрон-фононной термализации. Также показано, что при абляции в воздухе ниже пороговой плотности энергии  $5 \text{ Дж/см}^2$  максимальная глубина кратера не зависит от длительности импульсов что автор связывает со сменой механизма абляции. В конце главы исследовано влияние положения геометрического фокуса относительно мишени на абляцию кремния в водной среде в филаментационном и дофиламентационном режимах.



**В заключении** приведены основные результаты работы и выводы.

Научные положения, выдвинутые на защиту, представляются обоснованными.

Основные результаты исследований имеют высокую степень новизны, так как было проведено систематическое исследование влияния параметров лазерного излучения (длительности, энергии) и свойств мишени (металл, полупроводник) на эффективность выноса материала с поверхности мишени в воздушной и водной среде. Основные результаты исследования являются достоверными, представлены на ряде международных конференций и на семинарах ОКРФ ФИАН. По результатам диссертации было опубликовано 6 работ в рецензируемых научных журналах.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. Одним из наиболее интересных и практически важных научных результатов работы, с точки зрения определения зоны термического воздействия излучения (HAZ - heat affected zone) при лазерной обработке, является оценка скорости латеральной диффузии электронно-дырочной плазмы в кремнии. Предложенный способ с использованием остросфокусированных ультракоротких импульсов различной длительности является оригинальным. В то же время представляется, что обсуждению данного явления и полученных результатов можно было бы уделить больше внимания.

- В том числе достаточно нетривиальному результату, согласно которому следствием латерального растекания тепла из-за диффузии электронно-дырочной плазмы на пикосекундном масштабе является уменьшение размера области эффективного вложения энергии и соответственно снижение порога абляции.

- Кроме того, из текста не ясно, каким образом получено выражение (4.7) для оценки скорости диффузии электронно-дырочной плазмы, также отсутствует ссылка на соответствующую работу.

2. В работе не отражено, наблюдался ли аналогичный эффект на золоте с большим временем электрон-фононной термализации и с быстрым транспортом тепла на двухтемпературной стадии.

3. В тексте "на рис. 3.5. представлены результаты аппроксимации зависимостей..." размера кратеров от энергии  $R(E)$  для золота. Однако сами непосредственно измеряемые в эксперименте зависимости  $R(E)$  не представлены.

4. Было бы уместно в главе 2 (Экспериментальная часть) оценить погрешность определения порога абляции для применяемых методик (СЭМ, АСМ и др).

5. При анализе данных по абляции в воде (рис. 3.8 и 3.15) при варьируемой длительности импульсов автор переходит от плотности энергии в [Дж/см<sup>2</sup>] не к пиковой интенсивности в [Вт/см<sup>2</sup>], а к мощности в [Вт]. Тем самым исключается важнейший параметр взаимодействия - размер пятна фокусировки. Неясен физический смысл такого перехода, поскольку такие параметры как энергия или мощность импульса сами по себе не представляются информативными без дополнительной информации о размере области вложения энергии.

6. Представленный материал достаточно хорошо структурирован и изложен. В то же время в диссертации имеется ряд опечаток и неточностей, которые не снижают общую положительную оценку работы, в том числе:

6.1. Имеет место нечеткость в определении переменных:

- на стр. 47 " где  $wabl$  – характерная *площадь области* абляции на уровне интенсивности  $I/e$ . *Радиус пятна лазерного луча* ( $wabl$ ) рассчитывался..... "

6.2 Для радиуса Гауссова пучка на стр. 47 и 51 используются разные обозначения -  $wabl$  и  $wth$ .

6.3 Выражение (4.6) на стр. 79:  $R^2(\tau_{las}) - R^2(10ps) - \tau_{las}$ , по-видимому, следует читать, как  $R^2(\tau_{las}) - R^2(10ps) = f(\tau_{las})$ .

6.4 Стр. 60. "Предполагаемый механизм абляции *кремния* на воздухе связан с гидродинамическим разлетом около- и закритического флюида *кремния* ..." - опечатка, в данной главе речь идет об абляции золота.

6.5 Стр. 69. Одноимпульсная абляция *золотой мишени* ультракороткими лазерными импульсами варьируемой длительности в воздухе и воде на длине волны 515 нм. - опечатка, в данной главе речь идет об абляции кремния.

6.6 На стр. 60 и 72 имеется ссылка на рис. 11, которого нет в тексте (опечатка)

Отмеченные недостатки не уменьшают научной значимости результатов, представленных в диссертации, и не снижают ее общей положительной оценки.

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 действующего Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор Смирнов Никита Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник лаборатории лазерного воздействия Отдела физики экстремальных состояний Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур РАН, кандидат физико-математических наук

Ашитков Сергей Игоревич

«24» октября 2022 г.

Почтовый адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 2

Телефон +7 (495) 485-83-45

e-mail: [ashitkov11@yandex.ru](mailto:ashitkov11@yandex.ru)

Подпись старшего научного сотрудника ФГБУН ОИВТ РАН,  
кандидата физико-математических наук Ашиткова Сергея Игоревича заверяю

3

Ученый секретарь  
ФГБУН ОИВТ РАН  
Д. ф-м. н.



Амиров Равиль Хабибулович

Список основных публикаций оппонента Ашиткова Сергея Игоревича по теме защищаемой диссертации в рецензируемых изданиях за последние 5 лет:

1. Иногамов, Н. А., Ромашевский, С. А., Игнатов, А. И., Жаховский, В. В., Хохлов, В. А., Еганова, Е. М., ... & Ашитков, С. И. (2021). Дифракция на микропузырьке и морфология поверхности кремния после облучения через глицерин парой фемтосекундных лазерных импульсов. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 113(2), 84-91.
2. Струлёва, Е. В., Комаров, П. С., Ромашевский, С. А., Евлашин, С. А., & Ашитков, С. И. (2021). Фемтосекундная лазерная абляция железа. Теплофизика высоких температур, 59(5), 663-667.
3. Ситников, Д. С., Овчинников, А. В., & Ашитков, С. И. (2020). Исследование преплазмы на поверхности мишени железа при воздействии мощных фемтосекундных лазерных импульсов методом интерференционной микроскопии. Квантовая электроника, 50(2), 179-183.
4. Romashevskiy, S. A., Ashitkov, S. I., & Agranat, M. B. (2020). Circular ripple patterns on silicon induced by bubble-diffracted femtosecond laser pulses in liquid. Optics Letters, 45(4), 1005-1008.
5. Struleva, E. V., Komarov, P. S., & Ashitkov, S. I. (2019). Comparison of femtosecond laser ablation of gold and nickel. High Temperature, 57(5), 659-662.
6. Ашитков, С. И., Овчинников, А. В., Ситников, Д. С., & Агранат, М. Б. (2019). Образование поглощающего слоя и сверхбыстрый переход арсенида галлия в металлическое состояние при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов. Теплофизика высоких температур, 57(6), 882-885.
7. Struleva, E. V., Komarov, P. S., & Ashitkov, S. I. (2019). Thermomechanical ablation of titanium by femtosecond laser irradiation. High Temperature, 57(4), 486-489.
8. Agranat, M. B., Chefonov, O. V., Ovchinnikov, A. V., Ashitkov, S. I., Fortov, V. E., & Kondratenko, P. S. (2018). Damage in a thin metal film by high-power terahertz radiation. Physical Review Letters, 120(8), 085704.