

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

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

Диссертация Н.А. Смирнова посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с объемными мишенями золота и кристаллического кремния в воздушной и водной средах. В работе использовались ультракороткие лазерные импульсы варьлируемой длительности (0.3-10 пс) видимого (515 нм) и ближнего ИК диапазона (1030 нм). Несомненно, что лазерное воздействие ультракороткими лазерными импульсами на поверхность мишени позволяет концентрировать энергию излучения высокой интенсивности в фокусированных пучках и управлять параметрами лазерной абляции, а также физическими процессами взаимодействия. Однако, несмотря на большое количество научных экспериментальных и теоретических работ по взаимодействию ультракоротких импульсов с веществом, до сих пор нет полного понимания физики происходящих процессов из-за сложной многостадийной динамики поглощения лазерного импульса. В этой связи изучение физики формирования абляционных кратеров, проведенное автором диссертации при вариации параметров воздействия и среды погружения мишени является актуальным и имеет практическую значимость.

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

Во введении представлен литературный обзор по теме диссертации, сформулированы цель работы и методы исследования, а также представлены научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе обсуждаются результаты работ литературного обзора для обоснования выбора темы диссертации. Рассмотрены основные стадии поглощения лазерных ультракоротких импульсов в металлах, полупроводниках, диэлектриках в рамках двухтемпературной модели. Рассмотрены преимущества и недостатки абляции в жидкости по сравнению с атмосферой. Представлены основные механизмы выноса вещества с поверхности материала при формировании абляционных кратеров.

Во второй главе приведена схема экспериментальной установки, охарактеризованы используемые образцы и дано обоснование их выбора.

В третьей главе представлены и обсуждаются экспериментальные результаты по абляции образцов массивного золота одиночными ультракороткими лазерными импульсами пико- и субпикосекундной длительности для первой (1030 нм) и второй гармоники (515 нм) лазерного излучения. Впервые было выявлено увеличение эффективности абляции с уменьшением длительности импульса при абляции в воздухе и противоположный результат для абляции в дистиллированной воде, когда с уменьшением длительности импульса лазерного излучения эффективность абляции снижалась до 2.5 раз. Было установлено, что обнаруженное явление было обусловлено развитием самофокусировки в воде при достижении критической мощности. С помощью ПЗС камеры был записан плазменный канал в дистиллированной воде при вариации энергии импульсов. Проведенный анализ динамики его смещения навстречу фокусирующей оптике с ростом энергии в лазерном импульсе подтвердил физику экранировки энергии воздействия на мишень из-за самофокусировки.

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты по абляции кристаллического кремния ультракороткими лазерными импульсами варьируемой длительности для первой (1030 нм) и второй гармоники (515 нм) лазерного излучения. При абляции кремния в воде обнаружена аналогичная динамика, что и для золота. Этот факт подтверждает закономерность физического механизма влияния самофокусировки, выявленного ранее. При этом при абляции в воздухе был обнаружен латеральный рост размеров кратера для плотности энергии менее  $5 \text{ Дж/см}^2$ , который более выражен для коротких импульсов. Так размер кратера имеет значительно большие размеры, чем значения размера пятна геометрической фокусировки. Установлено, что обнаруженный процесс обусловлен быстрым переносом энергии с эффективной скоростью расширения плазмы  $0.2-0.4 \times 10^8 \text{ м/с}$ .

В конце главы был проведен анализ полученных кратеров с помощью микроспектроскопии комбинационного рассеяния света. Показано отсутствие аморфизации кристаллического кремния внутри и вблизи кратеров. Также по сдвигу частоты собственного колебания были рассчитаны значения локальных механических напряжений, возникающих в кристаллическом кремнии после лазерного воздействия. Заметим, что максимальные локальные сжимающие напряжения были обнаружены при абляции в воде в субфиламентационном режиме при максимальных плотностях энергии. Минимальные



напряжения возникают при абляции в воздухе при воздействии лазерного излучения с длительностью импульса 10 пс.

В заключении приведены основные результаты работы и выводы.

Защищаемые положения являются обоснованными. Основные результаты, полученные автором диссертации, обладают научной новизной. В работе впервые была измерена скорость расширения электрон-дырочной плазмы на пико-субпикосекундных временах, а также впервые продемонстрирован отрицательный вклад возникающей самофокусировки лазерного импульса на вынос вещества с поверхности мишени золота и кристаллического кремния при острой лазерной фокусировке при абляции в дистиллированной воде. Достоверность результатов не вызывает сомнений, поскольку прошла апробацию и обсуждение на ряде международных и национальных конференций, а также на семинарах ОКРФ ФИАН. По результатам диссертации было опубликовано 6 работ в рецензируемых научных журналах.

Следует отметить некоторые замечания, которые встречаются при знакомстве с диссертационной работой.

1. В работе часто встречается сочетание «одноимпульсная абляция...», но отсутствует обоснование выбора именно такого режима воздействия по сравнению с двух-импульсным воздействием или воздействием цуга импульсов.
2. В обзоре литературы нет упоминания о переходе металл-диэлектрик при нагреве металлов (см. Я.Б. Зельдович, Л.Д. Ландау, ЖЭТФ **14**, 32 (1944); И.К. Кикоин, А.П. Сенченков, Физ. металлов и металловедение **24**, 843 (1967)), который может сопровождаться «волной просветления» в кратере при лазерной абляции (А.М. Prokhorov, V.A. Batanov, F.V. Bunkin, and V.B. Fedorov, IEEE J. Quantum Electron. **9**, 503 (1973); A. A. Samokhin, P. A. Pivovarov, E. V. Shashkov, and I. A. Stuchebryukhov, "On the metal--nonmetal transition under nanosecond laser ablation," *Phys. Wave Phenom.* **29** (3), 204--209 (2021); S.M.Pershin, F.Colao, and V. Spizzichino, Quantitative Analysis of Bronze Samples by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): A New Approach, Model, and Experiment, Laser Physics, 2006, Vol.16, # 3, pp.455-467)
3. Список литературы представлен с сокращением со-авторов работы. При этом, например, ссылка №150: Ushakov A.A. et al. ... начинается не с фамилии первого автора Pavel A. Chizhov, что вводит читателя в заблуждение.

4. В большом (157 ссылок) списке литературы с публикациями в отечественных журналах (Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ, Квантовая электроника и др.) есть только одна ссылка №130, которая встречается на русском языке. Странная дискриминация языка.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Диссертационная работа «Абляционные кратеры при воздействии фемто- и пикосекундных лазерных импульсов на поверхность золота и кремния в воздушной и водной среде» является полновесным научным исследованием, которое открывает новые возможности применения полученных автором результатов в лазерных технологиях. Диссертация 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:

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 Российской академии наук» (ф и л и а л),  
доктор физико-математических наук

Першин Сергей Михайлович,

«26» октября 2022 г.

Почтовый адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д.38, НЦВИ ИОФ РАН

Телефон +7 (499) 503-87-77 доб.8-58; 8(916) 504-47-19

e-mail: pershin@kapella.gpi.ru

Подпись главного научного сотрудника НЦВИ ИОФ РАН, С.М. Першина удостоверяю:

Зам. Директора НЦВИ ИОФ РАН



М.Н. Абрашин



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

1. Lednev, V. N., Grishin, M. Y., Sdvizhenskii, P. A., Asyutin, R. D., Tretyakov, R. S., Stavertiy, A. Y., & Pershin, S. M. (2019). Sample temperature effect on laser ablation and analytical capabilities of laser induced breakdown spectroscopy. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34(3), 607-615.
2. Saraeva, I. N., Kudryashov, S. I., Lednev, V. N., Makarov, S. V., Pershin, S. M., Rudenko, A. A., ... & Ionin, A. A. (2019). Single- and multishot femtosecond laser ablation of silicon and silver in air and liquid environments: plume dynamics and surface modification. *Applied Surface Science*, 476, 576-586.
3. Chizhov, P. A., Grishin, M. Y., Pershin, S. M., Lednev, V. N., Ushakov, A. A., & Bukin, V. V. (2021). Tunable-shift stimulated Raman scattering in water by chirped 50 fs to 4.5 ps UV-pulses. *Optics Letters*, 46(11), 2686-2689.
4. Sdvizhenskii, P. A., Lednev, V. N., Grishin, M. Y., & Pershin, S. M. (2021). Deep ablation and LIBS depth elemental profiling by combining nano- and microsecond laser pulses. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 177, 106054.
5. Lednev, V. N., Sdvizhenskii, P. A., Asyutin, R. D., Grishin, M. Y., Tretyakov, R. S., & Pershin, S. M. (2019). Surface plasma influence on nanosecond laser ablation. *Applied Optics*, 58(6), 1496-1501.
6. Lednev, V. N., Sdvizhenskii, P. A., Asyutin, R. D., Grishin, M. Y., Tretyakov, R. S., & Pershin, S. M. (2018). Effect of Surface Plasma on Nanosecond Laser Ablation. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 45(12), 399-403.
7. Lednev, V. N., Sdvizhenskii, P. A., Grishin, M. Y., Filichkina, V. A., Shchegolikhin, A. N., & Pershin, S. M. (2018). Optimizing laser crater enhanced Raman spectroscopy. *Applied Optics*, 57(9), 2096-2101.
8. Pershin, S. M., Grishin, M. Y., Lednev, V. N., Chizhov, P. A., & Orlovich, V. A. (2019). Asymmetrical-cavity picosecond Raman laser at the water-air interface. *Optics Letters*, 44(20), 5045-5048.