

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук, доцента

Голованя Леонида Анатольевича

на диссертацию Григорьевой Марии Сергеевны

«Исследование процессов плавления и абляции пористых материалов под действием лазерного излучения», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика

Диссертационная работа Григорьевой М.С. посвящена исследованию таких физических процессов воздействия лазерного излучения на пористые материалы, как нагрев, плавление и абляция. Рассматриваемые механизмы лежат в основе технологий лазерной модификации поверхности и производство наночастиц методом лазерной абляции пористых материалов, и требуют систематического изучения в зависимости от режима лазерного воздействия, термодинамических и структурных характеристик пористого материала.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 183 наименований. Общий объем работы составляет 143 страницы и включает 48 рисунков и 7 таблиц.

Во **введении** описана актуальность темы диссертационной работы, сформулирована её цель и основные задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены результаты и основные положения, выносимые на защиту, апробация работы и личный вклад автора, описаны структура и объем диссертации.

В **первой главе** представлен обзор литературы по состоянию исследований в области взаимодействия лазерного излучения с пористыми материалами. Описаны структура и свойства пористых материалов. Проведен анализ зависимости теплофизических характеристик материалов от их пористости. Рассмотрены экспериментальные исследования модификации пористых материалов лазерным излучением и лазерной абляции наноструктур

пористого кремния. На основании приведённого обзора сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена лазерной поверхностной модификации пористых пленок. Предложена самосогласованная модель проплавления при лазерной модификации поверхности пористого материала на основе механизма схлопывания пор в расплавленном материале под действием сил поверхностного натяжения. В рамках разработанной модели найдено изменение пористости материала и давления в расплаве, определена критическая скорость плавления, при которой лазерная модификация поверхности пористого материала происходит за счет схлопывания пор. Исследован процесс нагрева и плавления пористого материала под действием лазерного излучения с учетом зависимости теплофизических величин от пористости.

Третья глава посвящена исследованию механизмов лазерной абляции пористого кремния. Исследования проводились как методом молекулярной динамики, так и с помощью комбинированной континуально-атомистической модели MD-nTTM, сочетающей в себе молекулярно-динамический подход и двухтемпературную модель. Моделирование проводилось в диапазоне длин волн от УФ до ИК диапазона с учетом степени пористости мишени и размера пор. Были определены количество аблированных атомов и порог абляции в зависимости от степени пористости материала и размера пор. Для изучения кинетики фазовых переходов проведено моделирование процесса лазерного плавления сплошного и пористого Si с помощью комбинированной континуально-атомистической модели MD-nTTM.

В заключении перечислены основные результаты работы.

К важным результатам, определяющим новизну и значимость диссертационной работы, можно отнести разработанную модель проплавления при лазерной модификации поверхности пористого материала, с помощью которой можно определить оптимальную для модификации скорость плавления и толщину модифицированного слоя, исследование

лазерной абляции пористого кремния на основе молекулярно-динамического подхода, позволившее установить зависимость порога и производительности абляции от пористости материала и размера пор в широком диапазоне длин волн лазерного излучения. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации режимов лазерной модификации и абляции пористых материалов в зависимости от характеристик материала (пористости, размера пор) и параметров лазерного излучения.

Результаты диссертационной работы опубликованы в научных изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science, и представлены Григорьевой М.С. на международных и российских конференциях и симпозиумах.

Следует отметить ряд замечаний.

Замечания по оформлению:

Ряд рисунков, содержащихся в диссертации, достаточно мелки, что значительно затрудняет восприятие представленных на них результатов.

Замечания по существу:

1. В разделе 2.1.2 «Динамика схлопывания пор при лазерной поверхностной модификации пористых пленок» упоминаются в тексте и показаны на рисунке 2.4 отрицательные значения давления, при этом в тексте нет обсуждения, почему значения давления могут становиться отрицательными.

2. В разделе 3.1 «Моделирование процесса лазерной абляции пленок пористого кремния методом молекулярной динамики» величина коэффициента двухфотонного поглощения света была взята на основании данных, полученных для мезопористого кремния, тогда как расчеты проводились для микропористого кремния, размер пор которого составлял от 1 до 2.5 нм. Известно, однако, что величина кубической нелинейной восприимчивости для мезопористого кремния может оказаться выше, чем для кристаллического кремния, а для микропористого, наоборот, – заметно ниже. В связи с этим, для оценок величины коэффициента двухфотонного

поглощения исследуемого микропористого кремния следовало бы брать не величины коэффициентов двухфотонного поглощения для мезопористого кремния, а оценки, сделанные в рамках модели эффективной среды, обобщенной на случай нелинейной восприимчивости.

3. На рис. 3.17 приведены экспериментальные и полученные в расчетах зависимости порога абляции от пористости. Наблюдается заметное расхождение указанных величин. Однако в тексте диссертации отсутствует обсуждение этого расхождения.

4. На рисунках 3.21 и 3.22 представлены результаты расчетов процесса лазерно-индуцированного плавления кристаллического кремния и пористого кремния соответственно. На рисунках представлены значения критерия твердой фазы, однако в тексте не объясняется, как именно введен этот критерий.

Приведенные замечания не снижают научной значимости полученных результатов и общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение по диссертационной работе.

Тема диссертационной работы является актуальной. Результаты диссертации обладают научной новизной и практической значимостью. Прошли апробацию и опубликованы в трудах автора. Достоверность результатов подтверждается надёжностью применявшихся методов и согласованностью, в том числе, с результатами других авторов.

Диссертация Григорьевой М. С. «Исследование процессов плавления и абляции пористых материалов под действием лазерного излучения» является законченной научно-квалификационной работой. Автореферат достаточно полно отражает содержание работы. Диссертация удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Григорьева Мария Сергеевна, заслуживает присуждения ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 –
Лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент Головань Леонид Анатольевич
профессор кафедры общей физики и нанoeлектроники физического
факультета Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»

Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

тел.: +7 (495) 939 46 57

e-mail: golovan@physics.msu.

/Головань Леонид Анатольевич/

08.03.2025

Подпись Голованя Леонида Анатольевича заверяю:

Белокуров Владимир Викторович

профессор

тел.: +7(495) 939 31 60

e-mail: info.ff@org.msu.ru

Список основных работ официального оппонента доктора физико-математических наук Голованя Леонида Анатольевича по тематике диссертации Григорьевой Марии Сергеевны «Исследование процессов плавления и абляции пористых материалов под действием лазерного излучения» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. D. Shuleiko, S. Zobotnov, O. Sokolovskaya, M. Poliakov, L. Volkova, T. Kunkel, E. Kuzmin, P. Danilov, S. Kudryashov, D. Pepelayev, S. Kozyukhin, L. Golovan, P. Kashkarov. Hierarchical surface structures and large-area nanoscale gratings in As_2S_3 and As_2Se_3 films irradiated with femtosecond laser pulses. *Materials*, 16(13):4524, 2023.
2. D. Shuleiko, S. Zobotnov, M. Martyshov, D. Amasev, D. Presnov, V. Nesterov, L. Golovan, P. Kashkarov. Femtosecond laser fabrication of anisotropic structures in phosphorus- and boron-doped amorphous silicon films. *Materials*, 15(21):7612, 2022.
3. A. Kolchin, D. Shuleiko, M. Martyshov, A. Efimova, L. Golovan, D. Presnov, T. Kunkel, V. Glukhenkaya, P. Lazarenko, P. Kashkarov, S. Zobotnov, S. Kozyukhin. Artificial anisotropy in $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films after femtosecond laser irradiation. *Materials*, 15(10):3499, 2022.
4. В. Ю. Нестеров, О. И. Соколовская, Л. А. Головань, Д. В. Шулейко, А. В. Колчин, Д. Е. Преснов, П. К. Кашкаров, А. В. Хиллов, Д. А. Куракина, М. Ю. Кириллин, Е. А. Сергеева, С. В. Заботнов. Лазерная фрагментация кремниевых микрочастиц в жидкостях для решения задач биофотоники. *Квантовая электроника*, 52(2):160–170, 2022.
5. О. И. Sokolovskaya, E. A. Sergeeva, L. A. Golovan, P. K. Kashkarov, A. V. Khilov, D. A. Kurakina, N. Y. Orlinskaya, S. V. Zobotnov, M. Y. Kirillin. Numerical simulation of enhancement of superficial tumor laser hyperthermia with silicon nanoparticles. *Photonics*, 8(12):580, 2021.
6. 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*, 51(1):64–72, 2021.
7. А. В. Скобелкина, Ф. В. Кашаев, А. В. Колчин, Д. В. Шулейко, Т. П. Каминская, Д. Е. Преснов, Л. А. Головань, П. К. Кашкаров. Формирование кремниевых наночастиц методом импульсной лазерной абляции пористого кремния в жидкостях. *Письма в Журнал технической физики*, 46(14):13–16, 2020.
8. С. В. Заботнов, Д. А. Куракина, Ф. В. Кашаев, А. В. Скобелкина, А. В. Колчин, Т. П. Каминская, А. В. Хиллов, 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*, 50(1):69–75, 2020.