

ОТЗЫВ

официального оппонента

**кандидата физико-математических наук Комленка Максима Сергеевича
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 актуальному направлению – исследованию физических процессов воздействия лазерного излучения на пористые материалы, лежащих в основе таких технологий, как лазерная модификация поверхности и производство наночастиц методом лазерной абляции пористых материалов.

Оптимизация режимов лазерного воздействия с целью модификации поверхности с требуемыми свойствами или производства наночастиц с заданными параметрами требует систематического изучения и выявления физических механизмов взаимодействия лазерных импульсов с пористыми материалами.

В диссертации проведено комплексное исследование таких процессов, как нагрев, плавление и абляция, в зависимости от режима лазерного воздействия, термодинамических и структурных характеристик пористого материала.

Диссертационная работа Григорьевой М.С. 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** представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулирована её цель и основные задачи, описаны 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.

Первая глава посвящена обзору литературы по современному состоянию исследований в области взаимодействия лазерного излучения с пористыми материалами. Приведено описание структур и свойств пористых материалов. Проведен анализ зависимости теплофизических характеристик материалов от их пористости. Рассмотрены технологии модификации пористых материалов лазерным излучением и экспериментальные исследования лазерной абляции наноструктур пористого кремния. На основании приведённого обзора сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

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

В третьей главе исследованы механизмы лазерной абляции наноструктур пористого кремния. Исследования проводились методом молекулярной динамики, а также с помощью комбинированной континуально-атомистической модели MD-nTТМ, сочетающей в себе молекулярно-динамический подход и двухтемпературную модель. Моделирование проведено в широком диапазоне длин волн (от УФ до ИК диапазона) с учетом степени пористости мишени и размера пор. В ходе моделирования 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-nTТМ.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Диссертация содержит важные теоретические результаты, имеющие принципиальное значение для разработки технологий лазерного производства наноструктур и модификации поверхности при использовании пористых материалов. Так, на основании разработанной модели проплавления пористого материала возможно оптимизировать режимы лазерной модификации для получения однородной модифицированной поверхности и определить толщину модифицированного (избавленного от пор) слоя. В результате исследования процесса лазерной абляции пористого кремния определены соотношения между порогами абляции, количеством аблированных атомов и характеристиками материала (пористость и размер пор), что может быть использовано для отработки технологий лазерного производства наноструктур, обеспечивающих оптимальную производительность. Следует отметить, что теоретические результаты по определению порогов абляции пористого кремния экспериментально апробированы автором, и находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами других авторов, представленными в литературном обзоре.

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

В то же время, следует отметить ряд замечаний.

Замечания по оформлению:

1. В рукописи диссертации присутствует некоторое количество опечаток и неудачных словосочетаний, например, компактное тело.
2. В автореферате встречается выделение некоторых фраз курсивом, например, на странице 9: «схлопывание пор в расплавленном материале под действием сил поверхностного натяжения».

3. В рукописи диссертации отсутствуют подписи к осям на рисунке 3.9.
4. В автореферате присутствуют графики зависимости порогов абляции от пористости мишени для длин волн 300 и 600 нм (рисунок 9), а для 1030 нм – нет. При этом есть текстовое описание, в котором отмечается, что зависимость отличается. Следовало бы её добавить.

Замечания по существу:

1. Диссертационная работа разделена на 2 задачи: моделирование лазерной модификации пористых материалов и моделирование лазерного плавления и абляции пористых полупроводников. Задачи сформулированы излишне широко, фактически в каждой из них рассматривается лишь один материал. В первом случае – пленка пористого индия, во втором – пористый кремний. Обобщения на другие материалы не сделаны.
2. На рисунках ба и б для демонстрации зависимости числа аблированных атомов от пористости мишени неудачно выбрано минимальное значение плотности энергии равное 0.001 Дж/см^2 , которое меньше пороговых значений для большинства рассматриваемых пористостей кремния. В результате этого может сложиться ошибочное мнение о наблюдаемой зависимости.
3. Есть вопрос к процедуре определения порога абляции пористого кремния. Автор пишет на 17 стр. автореферата: «Для определения порога абляции проводилась линейная аппроксимация зависимостей количества аблированных атомов от плотности энергии. Предполагалось, что значение порога абляции является минимальным значением плотности энергии, которое приводит к абляции не менее N атомов. Поскольку число атомов N колеблется вблизи порога абляции, то порог рассчитывался как среднее значение плотности энергии, которое соответствует значению N от 1 до 5 (см. пунктирную линию на рис. 8).» Из приведенного текста не ясно, как связана линейная аппроксимация, которая на рисунке 8 отсутствует, с определением

порога абляции. К тому же масштаб по оси ординат логарифмический. При этом необходимо отметить, что в тексте самой диссертации есть вспомогательный рисунок (3.9) с линейной аппроксимацией, который приведен для примера определения порога. Но тогда возникает вопрос, зачем искать среднее значение пороговой плотности энергии? Кроме того пунктирные линии на рисунке 8 соответствуют значениям N равным 2 и 7.

4. При лазерном воздействии на пленки индия пористость учитывалась только для теплофизических величин, оптическое поглощение считалось постоянным. Насколько это оправдано?
5. При моделировании абляции пористого кремния методом молекулярной динамики предполагалось полное поглощение лазерного излучения без учета отражения, которое составляет примерно 50%.
6. В работе утверждается, что зарождение жидкой фазы для сплошного кремния обнаруживается к 20 пс. В автореферате на рисунке 12 представлена динамика атомных конфигураций с шагом только 20 пс. Желательно было показать динамику с меньшим шагом. А для пористого (33%) образца время уменьшилось до 5 пс, а динамика на рисунке 13 показана с тем же шагом 20 пс.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования и общей положительной оценки работы.

Заключение по диссертационной работе.

Тема диссертационной работы Григорьевой М.С. является актуальной и востребованной. Все поставленные перед Григорьевой М.С. задачи выполнены и соответствуют цели исследования.

Представленные выводы и положения, выносимые на защиту, логическим образом вытекают из представленного материала, и являются научно обоснованными. Их достоверность обеспечена надёжностью применявшихся методов, совпадением теоретических результатов с

экспериментальными данными, в том числе, других авторов. Автореферат полностью отражает содержание работы.

Диссертация Григорьевой М. С. «Исследование процессов плавления и абляции пористых материалов под действием лазерного излучения» является законченной научно-квалификационной работой. 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:

кандидат физико-математических наук, Комленок Максим Сергеевич
старший научный сотрудник лаборатории лазерной оптики поверхности
отдела свето-индуцированных поверхностных явлений Центра естественно-
научных исследований Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей
физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

Российская Федерация, 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

тел.: +7 (910) 437-79-15

e-mail: komlenok@nsc.gpi.ru

04.03.2025

/Комленок Максим Сергеевич/

Список основных работ официального оппонента Комленка Максима Сергеевича по теме диссертации Григорьевой М.С. «Исследование процессов плавления и абляции пористых материалов под действием лазерного излучения» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Pimenov, S. M., Zavedeev, E. V., Komlenok, M. S., Zilova, O. S., Jaeggi, B., & Neuenschwander, B. (2024). Laser surface structuring of diamond-like carbon films for tribology. *Diamond and Related Materials*, 148, 111462

2. Komlenok, M.S., Dezhkina, M.A., Sedov, V.S., Klimenko, O.A., Dyakov, S.A. and Gippius, N.A., 2022. Laser Ablated Nanocrystalline Diamond Membrane for Infrared Applications. *Sensors*, 22(3), p.829.

3. Komlenok, M., Pashinin, V., Sedov, V. and Konov, V., 2022. Femtosecond and nanosecond laser polishing of rough polycrystalline diamond. *Laser Physics*, 32(8), p.084003.

4. M.S.Komlenok, N.R.Arutyunyan, C.Freitag, E.V.Zavedeev, A.D.Barinov, M.L.Shupegin, S.M.Pimenov, “Effect of tungsten doping on laser ablation and graphitization of diamond-like nanocomposite films” // *Optics and Laser Technology*, 135, 106683 (2021)