

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора Гордиенко Вячеслава Михайловича на диссертационную работу **Гололобова Виктора Михайловича « Наноабляция монокристалла алмаза фемтосекундными лазерными импульсами»** на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Создание фемтосекундных лазеров открыло новые горизонты в исследовании свойств материалов, проявляющихся под действием интенсивного лазерного излучения. При этом немаловажную роль играет и использование лазерной техники предельно малого временного и пространственного разрешения. Особый интерес в этих исследованиях принадлежит алмазу, обладающему уникальными механическими, тепловыми и электрическими свойствами. Он характеризуется большой шириной запрещенной зоны, обладает повышенной температурной и радиационной стойкостью, демонстрирует высокую подвижность носителей заряда и их малое время жизни, что существенно для использования алмаза в микроэлектронных и иных устройствах. В настоящее время работы по изучению физико-химических свойств алмаза отличаются заметной научной активностью. Диссертационная работа Гололобова В.М. посвящена проблеме изучения такого нового физического явления как низкоэнергетическая фемтосекундная лазерная наноабляция. Разработка новых лазерных методов микро и наноструктурирования поверхности алмаза, обладающего высокой твердостью и химической инертностью, актуально не только в плане изучения механизмов, ответственных за проявление низкоэнергетических процессов лазерно-индуцированной абляции, но важно и с точки зрения перспективных фемтосекундных технологий. Следует отметить, что прецизионное наноструктурирование алмаза требуют развития старых и создания новых методов диагностики. Диссертационную работу Гололобова В.М. характеризует новизна решаемых проблем и актуальность проводимых исследований.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 143 наименований. Общий объем диссертации составляет 106 страниц, включая 49 рисунков и 2 таблицы.

Во введении обсуждена актуальность работы, сформулированы цель и новизна исследования, определена ее научно-практическая значимость.

Первая глава диссертации, которая носит обзорный характер, посвящена описанию основных физических свойств алмаза, методам его выращивания, анализу известных процессов лазерного микроструктурирования монокристалла алмаза, а также обсуждению тепловых и лазерно-индуцированных процессов трансформации алмаза в графитоподобную фазу.

Во второй главе диссертации обсуждаются экспериментальные методы исследования, приводятся параметры титан-сапфировой фемтосекундной лазерной системы, работающей в импульсно-периодическом режиме с частотой повторений 1кГц, дано описание схемы взаимодействия лазерного излучения с алмазным образцом, проанализированы возможности ряда используемых в работе методов диагностики лазерно-индуцированных изменений поверхности алмаза.

В третьей главе диссертационной работы обсуждаются вопросы, относящиеся к экспериментальному изучению процесса лазерной нанооблации монокристалла алмаза. Методом фемтосекундной интерферометрии исследована динамика формирования плазмы, инициированной базовым лазерным излучением и его второй и третьей гармониками. Установлено, что многофотонное поглощение лазерного излучения определяет механизм ионизации алмаза. Исследована зависимость скорости нанооблации от давления окружающего воздуха и получено, что зависимость носит немоноотный характер. Делается вывод о том, что причины такого явления определяются фотоиндуцированной химической реакцией окисления, лежащей в основе процесса нанооблации алмаза.

В четвертой главе продемонстрирована возможность прецизионной обработки поверхности алмаза в режиме нанооблации с целью создания дифракционной структуры. Далее обсуждаются результаты выполненных экспериментов, в которых обнаружено, что под действием излучения третьей гармоники

фемтосекундного TiSa лазера лазерная наноабляция алмаза сопровождается «наведением» центров окраски - так называемых азот-вакансий (NV-центров) в тонком приповерхностном слое образца, содержащего примесь азота. Установлена взаимосвязь между скоростью наноабляции и скоростью генерации NV-центров.

В заключении сформированы основные результаты работы.

Выделим наиболее существенные результаты диссертационной работы.

1. Установлено, что в режиме наноабляции алмаза фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 400 нм и 266 нм скорость удаления материала с поверхности алмаза определяется концентрацией электрон-дырочных пар, индуцированных в результате поглощения лазерного излучения.
2. Показано, что генерация плазмы в режиме наноабляции алмаза фемтосекундными импульсами с длиной волны 400 нм и 266 нм происходит в результате многофотонного механизма поглощения лазерного излучения.
3. Обнаружено, что в процессе наноабляции алмаза фемтосекундным излучением на длине 266 нм возникает формирование азот-вакансионных комплексов (NV-центров). Установлено, что скорость генерации NV-центров пропорциональна шестой степени плотности энергии лазерных импульсов.

Достигнутые в диссертационной работе результаты и разработанные методики имеют большое научно-практическое значение. Полученные с помощью методов фемтосекундной интерферметрии, профилометрии и фотолюминесценции экспериментальные данные позволили выявить роль процесса плазмообразования, оценить среднюю скорость абляции, дали новую информацию относительно процесса формирования NV-центров в зависимости от плотности энергии используемого фемтосекундного лазерного излучения. Разработанная экспериментальная платформа может применяться для изучения динамики лазерно-индуцированного процесса наноабляции.

Отметим имеющиеся следующие замечания по диссертации.

1. В работе отсутствует характеристика исходного состояния поверхности используемого алмазного образца и адсорбированных на ней частиц, что существенно для анализа получаемых экспериментальных результатов.
2. Автор избегает оценки величины интенсивности воздействующего на объект фемтосекундного лазерного излучения, которая играет ключевую роль в развитии процесса нанооблации.
3. В тексте используется терминология, которая не принята при описании наблюдаемых физических процессов: «очень летучие вещества» (стр.39), «состояние поверхности алмаза отслеживалось с помощью микроскопической системы» (стр.43), «режим широкой полосы» (стр.51), «графитовые области, формирующиеся глубоко в объеме алмаза» (стр.62), «формирование толстого акваслоя» (стр.69), «передаваемая энергия решетке алмаза создает более или менее сильное возмущение электронной подсистемы» (стр.72), «правильный выбор алмазной подложки с достаточно низкой концентрацией примесного азота» (стр.84).
4. Автором допускаются неточности в размерности используемых параметров (формула 1.2, формула 1.5), выписаны формулы без обозначения включенных в них параметров (см., например 1.6), не в полном объеме приводятся параметры лазерного излучения в подрисуночных подписях (рис.2.3, 2.11, 2.12, 3.4, 3.5, 3.9), используются константы без ссылок на литературные источники (значение нелинейного показателя преломления алмаза – стр.59, коэффициент поглощения для графитизированной области-стр.62).
5. На странице 62 утверждается, что за возникновение протяженной «графитизированной области» в объеме алмаза отвечает «сильная самофокусировка» без использования при этом необходимых оценок.

Высказанные замечания радикально не снижают общей положительной оценки данной работы.

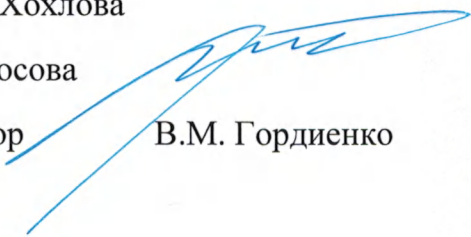
Полученные автором результаты являются новыми, обоснованными и достоверными, они хорошо известны научной общественности. Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, доложены на российских и

международных конференциях. Диссертация представляет собой завершённое научное исследование. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Гололобова Виктора Михайловича «Нанообляция монокристаллических алмазов фемтосекундными лазерными импульсами», соответствует паспорту специальности 01.04.21 – «Лазерная физика», по актуальности, достоверности, научной новизне и практической значимости результатов представляет собой законченную научно-квалификационную работу.

Диссертационная работа Гололобова В.М. соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Зав. лабораторией нелинейной оптики им. Р.В.Хохлова
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук, профессор


В.М. Гордиенко

Адрес: 119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы,
МГУ им. М.В.Ломоносова, Дом 1, строение 2, Физический Факультет,
Тел.: 8-495-939-4719, e-mail: gord@phys.msu.ru

Подпись удостоверяю:

Декан физического факультета
Московского Государственного Университета
имени М.В. Ломоносова
профессор



Сысоев Н.Н.

E-mail: dean@phys.msu.ru

Тел: (495) 939-16-82,

Адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет.