

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФНИЦ

«Кристаллография и фотоника» РАН

Али

Алексеева О.А.

« » _____ 2019 года



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Гололобова Виктора Михайловича

«Нанообляция монокристаллических алмазов фемтосекундными лазерными импульсами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Диссертационная работа Гололобова Виктора Михайловича посвящена исследованию нового метода лазерного травления поверхности монокристаллов алмаза – нанообляции. Алмаз, как широкозонный полупроводник, обладает выдающимися свойствами. Такие свойства как рекордная теплопроводность, прозрачность в широкой области спектра, высокая подвижность носителей заряда, высокое пробойное напряжение, большое сопротивление и другие свойства делают алмаз перспективным материалом для применения в различных отраслях науки и техники. Развитие методов получения алмазов оптического качества поставило задачу их обработки для нужд в таких областях физики, как микро- и нанoeлектронике, фотонике и др. Однако на этом пути высокая твердость и химическая инертность алмазных материалов вызывают значительные трудности. В последнее время активно ведутся исследования по профилированию и функционализации поверхности алмаза. Особый интерес вызывают NV-центры в алмазе, удовлетворяющие требованиям для их использования во многих перспективных областях, например, в качестве элементарных носителей квантовой информации. Всё это требует разработки новых технологий модификации алмаза.

В работе Гололобова В.М. приведены результаты экспериментов по нанообляции монокристалла алмаза фемтосекундными лазерными импульсами. Облучение

проводилось как при нормальном давлении окружающего газа, так и в условиях вакуума. В диссертации представлены скоростные характеристики нанообляции, степень возбуждения электронной подсистемы алмаза в процессе нанообляции, динамика скорости нанообляции при изменении концентрации воздуха в системе. Установлен механизм поглощения фемтосекундного излучения с длинами волн 800, 400 и 266 нм. Создана двумерная алмазная дифракционная решетка. Экспериментальные результаты показали возможность генерации в режиме нанообляции заряженных и нейтральных азотно-вакансионных комплексов (NV-центров).

Диссертационная работа Гололобова В.М. изложена на 106 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 143 источников.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель исследований и аргументирована их научная новизна, показана научная и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Обоснована достоверность полученных результатов, а также описана структура диссертационной работы.

В первой главе были приведены основные структурные и оптические свойства алмаза. Особое внимание было уделено рассмотрению структуры и свойств азотно-вакансионных дефектов в решетке алмаза – NV-центров, а также методов их генерации. Описывается методика CVD синтеза алмазов и современное состояние их применения в электронике, оптике и квантовых технологиях. Далее были рассмотрены основные аспекты лазерного воздействия на алмаз, в том числе приводятся существующие данные исследований по изучаемому в данной диссертационной работе режиму нанообляции.

Во второй главе описаны экспериментальные методы исследований, проведенные в рамках данной диссертационной работы. К ним относятся методы оптической микроскопии, фотолюминесцентной спектроскопии и метод фемтосекундной интерферометрии, реализованный на основе наработок ИОФ РАН. Метод фемтосекундной интерферометрии, в основе которого лежит техника накачки и зондирования фемтосекундными лазерными импульсами, позволил наблюдать и регистрировать быстропротекающие лазерно-индуцированные процессы в алмазе, в том числе регистрировать возмущения электронной подсистемы тела путем восстановления изменения показателя преломления среды, вызванные лазерным излучением.

В третьей главе приводятся установленные экспериментальным путем основные закономерности процесса нанооблации монокристалла алмаза. Эксперименты проводились двух типов. В первом были получены данные по нанооблации в воздухе при нормальном давлении. Установлены скоростные характеристики нанооблации и механизм поглощения лазерного излучения. Далее проводились эксперименты по нанооблации алмаза в условиях вакуума, в результате чего были получены скоростные характеристики нанооблации алмаза при различном давлении окружающей среды. На основе полученных данных сформулированы основные принципы фотоиндуцированной химической реакции окисления, лежащей в основе процесса нанооблации алмаза. В главе показана степень стабильности процесса травления поверхности алмаза.

Четвертая глава посвящена созданию наноструктур на поверхности монокристалла алмаза. Продемонстрирована работа созданной алмазной дифракционной решетки, представляющей собой двумерный массив (10×10) кратеров со средней глубиной 130 нм. Приведены результаты численного расчета такой решетки и показано их хорошее взаимное соответствие. Далее в главе сообщается об обнаруженном эффекте генерации NV-центров в приповерхностном слое алмаза, содержащего примесь азота в количестве 0.5 ppm, в результате ультрафиолетовой-фемтосекундной лазерной обработки в режиме нанооблации.

В заключении представлены основные результаты проведенных исследований и сделаны выводы.

Содержание диссертации соответствует п. 1 паспорта специальности 01.04.21 «Лазерная физика»: «Физика взаимодействия когерентного оптического излучения с веществом».

Новизна работы обусловлена впервые проведенными исследованиями нанооблационного режима лазерного воздействия на алмаз при различном давлении окружающего воздуха. Показана экспериментальная возможность применения нанооблации алмаза для контролируемого наноструктурирования его поверхности. Впервые продемонстрирована возможность лазерной генерации структурных дефектов в решетке алмаза в результате многоимпульсной нанооблации.

Достоверность результатов работы подтверждается экспериментальной проверкой, численным моделированием; проведением корректных математических расчетов и анализом полученных результатов.

Результаты работы имеют как фундаментальное, так и практическое значение. Фундаментальная значимость работы связана с установлением основных закономерностей взаимодействия фс лазерного излучения с монокристаллом алмаза в режиме наноабляции. С точки зрения практического значения полученных результатов, то они могут быть использованы для развития технологий контролируемого изготовления матричных источников света на основе NV-центров, в том числе однофотонных эмиттеров света, а также алмазных дифракционных элементов и других поверхностных наноструктур.

По диссертации Гололобова В.М. можно сделать следующие замечания:

1. Эксперименты по наноабляции алмаза проведены в атмосфере воздуха, что повлекло нежелательное влияние адсорбированного слоя воды на скорость наноабляции алмаза. По-видимому, целесообразно было провести эксперименты в атмосфере чистого кислорода, не допуская вредного влияния примесей, содержащихся в воздухе.
2. Не обсуждается роль плазменных явлений при наноабляции фемтосекундными лазерными импульсами с высокой ($\sim 10^9$ Вт/см²) плотностью мощности. Это затрудняет восприятие полученных результатов, учитывая, что плазменные явления (например, оптический пробой вблизи поверхности алмаза) могут оказывать сильное влияние на процесс взаимодействия лазерного излучения с веществом.
3. В работе для объяснения эффекта падения скорости наноабляции алмаза в близлежащем пятне облучения используется предположение о перестройке кристаллической структуры решетки алмаза на атомарном уровне с формированием структурных дефектов (центров окраски) вблизи поверхности алмаза. Однако механизм влияния таких структурных дефектов на глубину кратера в работе не раскрывается и остается непонятным. Кроме того, как следует из рис. 3.9, 3.10 и 4.1 нельзя исключить взаимного перекрытия соседних кратеров.

Отмеченные недостатки не снижают высокой научной ценности работы и не влияют на положительную оценку. Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой по актуальной тематике и обладает большой практической ценностью.

Автореферат соответствует тексту рукописи и в полной мере отражает содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в открытой печати и доложены в выступлениях на российских и международных конференциях.

Диссертационная работа Гололобова В.М. по своей актуальности, научной новизне и практической значимости соответствует требованиям раздела II «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.

Доклад и отзыв по диссертационной работе Гололобова Виктора Михайловича «Нанообляция монокристаллических алмазов фемтосекундными лазерными импульсами» были заслушаны и обсуждены на научном семинаре ИПЛИТ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН 12 сентября 2019 года (протокол № 1).

Отзыв составил:

Зав. лабораторией математического моделирования

лазерных процессов ИПЛИТ РАН – филиала

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,

доктор физико-математических наук

специальность 01.04.07

E-mail: fmirzade@rambler.ru

Тел: +7 (49645) 22200 доб. 118



Мирзаде Ф.Х.

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН).

Адрес: 119333, г. Москва, Ленинский пр., 59. Тел.: +7(499)135-63-11

Оф. сайт: <http://www.kif.ras.ru>, E-mail: office@crys.ras.ru