

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора Федерального
государственного учреждения науки

Физического института им.П.Н.Лебедева РАН
доктор физ.-мат. наук, профессор



С.Ю.Савинов

« 03 » 03 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Кононенко Виталия Викторовича
«Лазерно-стимулированные процессы на поверхности алмаза», представленную на
соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Диссертационная работа В.В. Кононенко посвящена проблемам импульсного лазерного воздействия на поверхность алмаза. Эта область лазерной физики представляется хорошо изученной: первые эксперименты по лазерному повреждению природного алмаза были сделаны около 50-ти лет назад, а модель двухстадийной абляции алмаза предложена около 30-ти лет назад. Часть диссертации посвящена продолжению этих исследований: измерению скоростей термостимулированной абляции, оптимизации соответствующих режимов структурирования поверхности и изучению свойств графитизированного слоя. Однако, автору также удалось продемонстрировать, что физика лазерного воздействия на алмаз не ограничивается классической абляцией. В диссертации, в частности, представлены исследования недавно обнаруженных предабляционных режимов лазерного воздействия на алмаз: «наноабляции» его поверхности и генерации структурных дефектов в тонком поверхностном слое. Интерес к этим процессам связан с поиском подходов к проблеме модификации структуры алмаза с целью управления его физико-химическими свойствами без повреждения исходной структуры. Отметим, что изучение воздействия излучения на алмаз в предабляционных режимах стало возможным и актуализировалось относительно недавно в связи с прогрессом в целом ряде следующих областей: совершенствование и появление новых лазерных систем; резкий рост качества искусственных алмазов; развитие экспериментальных методик, характеризующих свойства поверхности в микрообласти и т.д. Физика исследуемых в работе процессов травления и модификации алмаза вызывает особый интерес, поскольку задачи микро- и нанообработки поверхности алмаза, а также изменения ее свойств являются чрезвычайно важными для целого ряда приложений, включая квантовую оптику, электронику, сенсорику, медицину и пр. Основываясь на вышеизложенном, можно уверенно

утверждать, что тематика проводимых диссертантом исследований, безусловно, является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 230 ссылок. Полный объем диссертации - 234 страницы текста с 97 рисунками и 8 таблицами.

Во **введении** автор дает обоснование актуальности работы, формулирует цели и задачи исследования, проводит краткий обзор ключевых работ в области воздействия лазерного излучения на алмаз.

Первая глава содержит описание методики лазерного воздействия на поверхность алмаза и анализа результатов этого воздействия.

Вторая глава посвящена экспериментам по изучению возбуждения электронной подсистемы алмаза лазерными фемтосекундными импульсами.

Третья глава посвящена исследованию многоимпульсной абляции алмаза в условиях уже сформированного графитизированного слоя на поверхности.

В **четвертой главе** рассмотрены основные закономерности процесса лазерной «наноабляции» алмаза.

Пятая глава также посвящена воздействию интенсивного излучения непосредственно на алмаз, однако в режимах, когда плотность энергии превышает порог графитизации.

Шестая глава посвящена процессу лазерной генерации NV центров.

В **заключении** сформулированы основные выводы работы.

Диссертация В.В. Кононенко, безусловно, обладает **новизной**, в частности, ее автором было впервые показано, что при интенсивностях излучения меньше порогов графитизации и абляции концентрация $e-h$ пар в зоне проводимости алмаза может достигать 10^{21} см^{-3} . В условиях такой холодной плазмы становятся существенными разнообразные процессы модификации и химической эрозии решетки алмаза, а именно: «наноабляционное» травление, аккумуляционная графитизация, генерация точечных дефектов и их диффузия вглубь кристалла. Предложены и реализованы **новые** методы формирования рельефа алмазных дифракционных оптических элементов и локальной поверхностной генерации NV центров на алмазе.

Достоверность результатов работы В.В. Кононенко подтверждается разнообразием использованных в экспериментах лазерных источников, корректностью и взаимодополняемостью применяемых аналитических методик, а также широкой

апробацией результатов работы на известных международных конференциях и большим количеством публикаций в рецензируемых журналах.

Основные результаты работы можно представить в следующем виде:

1. При наноабляционном травлении алмаза в предабляционном режиме в результате интенсивного лазерного воздействия на поверхности алмаза инициируется реакция окисления. В отличии от абляционного режима наноабляция является беспороговым процессом, при котором оптически заметной графитизации поверхности не происходит, а скорости травления чрезвычайно малы (менее 10^{-2} нм/импульс).
2. Специфический промежуточный режим воздействия - аккумуляционная графитизация развивается при многоимпульсном облучении, если интенсивность воздействия ниже, чем в режиме абляции, и выше, чем в режиме «наноабляции». Установлено, что процесс – термостимулированный. Получены экспериментальные оценки скорости этого процесса: $10^{-4} - 1$ нм/импульс в зависимости от интенсивности излучения.
3. Показано, что процесс лазерно-стимулированной генерации азотно-вакансационных комплексов в алмазе – NV центров – является фотостимулированным, а скорость генерации дефектов пропорциональна 3-ей степени плотности индуцированной в алмазе плазмы.

В качестве **практической значимости** работы можно отметить, что кроме упомянутых выше методик создания алмазных дифракционных оптических элементов и активных структур на поверхности, результаты диссертационного исследования могут быть использованы для управления кристаллографической структурой графитизированной фазы, образующейся на алмазе в процессе абляции; для контролируемого управления физико-химическими свойствами поверхности алмаза и для формирования графито-алмазных микро и нанокомпозитных структур.

По диссертационной работе В.В. Кононенко имеется **ряд замечаний**:

- 1) Автор ни разу не сослался на целый ряд (7) публикаций, а также российских и международных патентов, сотрудников ФИАН-ведущей организации в ведущих научных журналах за последние 10 лет в области фемтосекундной лазерной структурной модификации и абляции объема и поверхности алмазов, их объемной маркировки (в том числе – с использованием NV центров).
- 2) В работе отсутствует единый литературный обзор состояния исследуемой области, в котором связно представлялись бы текущие достижения и существующие проблемы, которые предполагается решать.

3) Выражение «наноабляция» является общепринятым в лазерном сообществе в совершенно другом контексте – аблация нанометровых латеральных размеров, тогда как аблация нанометровой глубины не является уникальной и может регулироваться выше порогового значения плотностью падающей энергии фемтосекундных лазерных импульсов, а также лазерных импульсов любой большей длительности в режиме сублимации.

4) Влияние водяных паров на фемтосекундное лазерное фотохимическое травление поверхности алмаза в разреженном воздухе (низком вакууме) только предполагается, но экспериментально не обосновано.

5) В работе экспериментально показано, что процесс лазерно-стимулированной генерации азотно-вакансационных комплексов в алмазе – NV центров – является фотостимулированным, а скорость генерации дефектов пропорциональна 3-ей степени плотности индуцированной в алмазе плазмы. Нетрудно предположить, что 3-я степень связана с трехчастичной Оже-рекомбинацией в алмазе, генерирующей «горячие» электроны с энергией, превышающей ширину зонной щели в алмазе, и поэтому такие электроны могут выступать инициаторами генерации NV центров в плане генерации пар «вакансия-междоузлие». Такой анализ напрашивается, но не был сделан.

6) Диссертационная работа оформлена неаккуратно – имеется пустая пронумерованная страница (с. 223 - между списком литературы и списком рисунков), но нет списка собственных публикаций автора по диссертации.

Вместе с тем, указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают значимости основных выводов и защищаемых положений. Диссертация В.В. Кононенко является законченной научно-квалификационной работой, материалы которой отражены в 23 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, реферируемых в библиометрических базах Web of science, Scopus и РИНЦ, что отражает как качество исследований, так и интерес к ним. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

Результаты исследований, приведенные в диссертации В.В.Кононенко могут найти применение в ФИАН, МГУ, МИФИ, ИПФ РАН, ИТМО и других организациях, занимающихся проблемой взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Таким образом, диссертационная работа «Лазерно-стимулированные процессы на поверхности алмаза» удовлетворяет требованиям ВАК и соответствует пункту 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018), а автор работы Кононенко

Виталий Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Доклад по материалам диссертационной работы В.В.Кононенко был заслушан на семинаре Отделения квантовой радиофизики им.Н.Г.Басова ФИАН 27 декабря 2019г.

Отзыв на диссертацию В.В.Кононенко обсужден и принят на заседании Ученого совета Отделения квантовой радиофизики им.Н.Г.Басова ФИАН 28 февраля 2020 г.
(Протокол №94).

Отзыв составил

и.о. зав. Лабораторией фемтосекундной нелинейной оптики
Центра лазерных и нелинейно-оптических технологий
Отделения квантовой радиофизики им.Н.Г.Басова ФИАН
ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.

119991 Москва, Ленинский пр. 53
8 (499) 135 8648

seleznev@sci.lebedev.ru

Селезnev Леонид Владимирович

Председатель Ученого совета

Отделения квантовой радиофизики им.Н.Г.Басова ФИАН,
руководитель Отделения Квантовой радиофизики им.Н.Г.Басова ФИАН

д.ф.-м.н., профессор

119991 Москва, Ленинский пр. 53

8 (499) 783 3690

aion@sci.lebedev.ru

Иоинин Андрей Алексеевич