

ОТЗЫВ

официального оппонента к. ф.-м. н. Овчинникова Андрея Владимировича
на диссертационную работу Чэнь Цзяцзюня
«Структурная трансформация азотных примесных центров в алмазе под действием
ультракоротких лазерных импульсов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертационная работа Чэнь Цзяцзюня посвящена экспериментальному исследованию структурных трансформаций азотных примесных центров в синтетическом и природном алмазах с высоким содержанием азота под действием ультракоротких лазерных импульсов. В работе впервые продемонстрирована возможность модификации дефектно-примесного состава высокоазотных алмазов с использованием фемтосекундного лазерного излучения. Установлены механизмы агрегации и дезагрегации азотных центров в зависимости от концентрации вакансионно-междоузельных пар, что существенно углубляет понимание динамики лазерно-индуцированных процессов в алмазе.

Актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений. В последние годы значительно возрос интерес к примесным оптическим центрам в алмазах благодаря их перспективному использованию в фотонике, квантовой информатике и сенсорике. Особое внимание уделяется задачам целенаправленного создания и модификации таких центров с высокой степенью пространственного контроля. Также, до настоящего времени алмазы с высоким содержанием азота оставались малоизученными в области обработки фемтосекундными лазерными импульсами. В связи с этим метод фемтосекундного лазерного воздействия на алмазы с высоким содержанием азота, предложенный в диссертационной работе, представляет собой перспективное направление исследований и является актуальным для развития современной оптоэлектроники. Полученные результаты имеют не только фундаментальное значение, но и широкий спектр практических применений, включая разработку новых методов контроля оптических свойств алмазов на субмикронном масштабе. Выявленный эффект обесцвечивания красного высокоазотного синтетического алмаза открывает перспективы его использования в ювелирной промышленности, а также для лазерной маркировки и создания новых функциональных алмазных материалов.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 130 страниц, включая 42 рисунка и 4 таблицы, список цитированной литературы содержит 118 ссылок. Результаты, представленные в диссертационной работе, опубликованы в высокорейтинговых научных журналах Carbon, Nanomaterials, Письма в ЖЭТФ и других, а также представлены на международных конференциях.

Во введении обосновывается актуальность исследования структурных трансформаций азотных оптических центров в алмазах под действием ультракоротких лазерных импульсов. Определены цели и задачи диссертационной работы,

сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость.

Первая глава диссертации содержит информацию о современном состоянии исследований по теме работы. Представлены данные о классификации алмазов в зависимости от типа содержащихся в них примесных центров. Приведено подробное обсуждение атомных структур и оптических свойств наиболее распространенных азотных оптических центров в алмазе. Также приведены краткие сведения об их электронных и оптических свойствах. Представлено описание основных методов модификации оптических центров в алмазе. Кратко рассмотрены их физические основы, преимущества и недостатки. Изложены основные спектральные методы для изучения характеристик оптических центров. Описаны их основные принципы работы и области применения. Рассмотрены особенности распространения фемтосекундных лазерных импульсов и процессы возбуждения/релаксации в примесном алмазе, кратко описаны механизмы лазерной генерации дефектов в алмазе.

Во второй главе в разделе 2.1 представлено подробное описание двух образцов алмаза, которые были использованы в экспериментальных исследованиях. Эксперименты проводились с синтетическим алмазом Ib-типа, содержащем оптические центры C, NV⁰, NV⁻ и N3, а также с природным алмазом IaAB-типа, характеризующегося присутствием оптических центров A, B1, N3, NV⁰, NV⁻, GR1, ND1, H3 и H4. В разделе 2.2 описаны спектральные методы и оборудование, которые применялись для проведения экспериментальных исследований. В разделе 2.3 приведено описание экспериментальной схемы, параметров фемтосекундного лазера и экспериментальных условий, при которых проводилась лазерная модификация оптических центров внутри алмаза.

Третья глава посвящена изучению структурных трансформаций оптических центров в синтетическом алмазе Ib-типа под действием фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 515 нм. Показано, что в зависимости от энергии импульса и времени экспозиции наблюдается локальное обесцвечивание алмаза из-за образования N3-центров за счет агрегации C- и NV-центров при участии фотогенерируемых вакансионно-междоузельных пар. Подтверждение этого процесса получено на основе спектрофотометрии, инфракрасной и фотолюминесцентной спектроскопии. Предложен механизм резонансно-усиленной многофотонной ионизации, протекающий на дефектном уровне C-центра и приводящий к генерации горячих электронов, которые, автолокализуясь, образуют собственный дефект в виде вакансионно-междоузельных пар.

Четвертая глава посвящена изучению структурных трансформаций оптических центров в бесцветном природном алмазе Ia-типа под действием фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 515 нм. Установлено, что при низких энергиях импульса происходит агрегация A- и B1-центров в N3- и H4-центры, а при превышении порога энергии формируются NV-центры вследствие разрушения крупных агрегированных азотных центров.

Каждая глава заканчивается подразделом с выводами, в котором кратко изложены основные полученные результаты. В конце диссертации представлено общее заключение, отражающее основные результаты всей работы. Достоверность

полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается использованием современных методов диагностики и измерений, а также их воспроизводимостью при повторных исследованиях.

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена тем, что полученные результаты могут быть использованы для лазерной маркировки алмазов. Диссертационная работа содержит новые научные результаты, которые прошли апробацию на четырех международных конференциях. По материалам диссертации опубликовано семь статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

Общие замечания по диссертационной работе.

1. К сожалению, в работе никак не обсуждается выбор частоты повторения лазерных импульсов 100 кГц, а также энергии лазерных импульсов и время экспозиции.
2. Так как работа, в основном, экспериментальная, то было полезно привести методику оценки радиуса сфокусированного лазерного пучка в алмазе на разной глубине.
3. На стр. 61 указано, что «В этом случае зависимость мощности лазера P от интенсивности фотолюминесценции I_{PL} является линейной с калибровочным коэффициентом a ». Это, возможно, утверждение ошибочно, т.к. скорее интенсивность фотолюминесценции зависит от мощности лазера, что подтверждается выражением 2.3.
4. Не совсем понятно, что за интерферометр Уилсона используется в схеме ИК-спектрометра. На принципиальной схеме ИК-спектрометра изображен интерферометр Майкельсона.
5. На рис. 3.7 представлены спектры фотолюминесценции исходного алмаза и модифицированного. Из текста диссертации не совсем понятно, как получен нормированный спектр на рис. 3.7в. Аналогичный вопрос возникает к рис. 3.9 и 4.5.
6. В некоторых случаях в тексте диссертации встречаются сокращения, которые расшифровываются не при первом упоминании, например, сокращение БФЛ в первый раз встречается на стр.20, а расшифровывается только на стр. 24. При этом необходимо отметить, что в конце диссертационной работы приводится полный список всех используемых сокращений и обозначений.
7. В диссертационной работе присутствуют небольшие неточности и опечатки, например, на стр. 7 вместо слова «длительность», вероятно, должно быть написано «интенсивность», на стр. 43 должно быть написано «от ширины спектра», на стр. 63 вместо слова «автоколлиматор» должно быть слово «автокоррелятор» и другие.

Все перечисленные замечания не снижают общей научной значимости результатов, представленных в диссертационной работе.

Диссертация Чэнь Цзяцзюня «Структурная трансформация азотных примесных центров в алмазе под действием ультракоротких лазерных импульсов» является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, а выводы и заключения обоснованы. Работа базируется на достаточном количестве экспериментальных

данных, написана грамотно и аккуратно оформлена. Диссертационная работа отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Чэнь Цзяцзюнь, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник лаборатории 1.2 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (г. Москва), кандидат физико-математических наук (специальность – 01.04.08 физика плазмы)

Почтовый адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

Тел. +7 (495) 3625562 (доб. 2-11)

E-mail: a.ovtch@ihed.ras.ru

Овчинников Андрей Владимирович
04 марта 2025 г.

СПИСОК

основных работ официального оппонента Овчинникова Андрея Владимировича по тематике диссертации Чэнь Цзяцзюня «Структурная трансформация азотных примесных центров в алмазе под действием ультракоротких лазерных импульсов» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.

1. A. V. Ovchinnikov, I. V. Il'ina, M. A. Ovchinnikov, and O. V. Chefonov, Generation of terahertz radiation with a specified spectral profile from a mosaic combined organic crystal, // Opt. Lett. 2024 V. 49. P. 6021-6024.
2. M.B. Agranat, A.V. Ovchinnikov, O.V. Chefonov, Ionization of a Silicon Surface Layer Induced by a High-Intensity Subpicosecond Electric Field, // J Infrared Milli Terahz Waves 2024 V. 45. P. 383–391.
3. A.V. Ovchinnikov, O.V. Chefonov, M.B. Agranat, M. Shalaby, and D.S. Sitnikov, Terahertz generation optimization in an OH1 nonlinear organic crystal pumped by a Cr:forsterite laser // Optics Letters. 2022. V. 47. P. 5505-5508.
4. Yurkevich A. A., Ovchinnikov A. V., Agranat, M. B., Propagation of an Ultrashort Terahertz Pulse with a High Electric Field Amplitude in a Silicon Sample // High Temperature. 2022. V. 60. P. S430-S432.
5. O.V. Chefonov, A.V. Ovchinnikov and M.B. Agranat, Study of second optical harmonic generation in terahertz pulse-induced antiferromagnetic NiO // Quantum Electronics. 2022. V. 52. P. 269-273.
6. O.V. Chefonov, A.V. Ovchinnikov and M.B. Agranat, Electrooptical Effect in Silicon Induced by a Terahertz Radiation Pulse // High Temperature. 2022. V. 60. P. S332-S338.
7. A.V. Ovchinnikov, O.V. Chefonov, M.B. Agranat, Generation of the Second Optical Harmonic in Silicon under the Action of Terahertz Pulse with High Electric Field Strength // High Temperature. 2022. V. 60. P. 607-611.
8. A. V. Ovchinnikov, O. V. Chefonov, M. B. Agranat, A. V. Kudryavtsev, E. D. Mishina, and A. A. Yurkevich, Free-carrier generation dynamics induced by ultrashort intense terahertz pulses in silicon // Optics Express. 2021. V. 29. P. 26093-26102.
9. A. V. Ovchinnikov, O. V. Chefonov, M. B. Agranat, V. E. Fortov, M. Jazbinsek, and C. P. Hauri, Generation of strong-field spectrally tunable terahertz pulses // Optics Express. 2021. V. 28. P. 33921-33936.
10. O. V. Chefonov, A. V. Ovchinnikov, C. P. Hauri, and M. B. Agranat, Broadband and narrowband laser-based terahertz source and its application for resonant and non-resonant excitation of antiferromagnetic modes in NiO // Optics Express. 2021. V. 27. P. 27273-27281.2