

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Кононенко Тараса Викторовича «Лазерно-индуцированные графитизированные микроструктуры в объеме алмаза», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. — Лазерная физика**

Диссертационная работа Кононенко Т.В. посвящена созданию токопроводящих графитизированных микроструктур внутри алмазных кристаллов при помощи импульсно-периодического лазерного излучения. Исследования, выполненные в этой работе, создают научную основу для развития соответствующей технологии внутриобъемной микрообработки алмаза, обеспечивая возможность ее дальнейшего совершенствования и оптимизации. Хотя новая лазерная технология решает те же задачи, что и разработанная намного раньше техника микромодификации алмаза с помощью ионной имплантации, она обладает важным преимуществом – способностью формировать реальные трехмерные микроструктуры в любой области алмазного кристалла, а не только в тонком приповерхностном слое. Это значительно расширяет возможности по созданию интегрированных алмазно-графитовых микроустройств, некоторые возможные применения которых также рассмотрены в диссертации. Таким образом, научная тематика диссертации Кононенко Т.В., направленная на решение важной задачи внедрения новых материалов в технологическую практику, **является безусловно актуальной** и соответствует современным приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных терминов, списка литературы и списка опубликованных статей по материалам диссертации.

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследований, сформулированы цель, задачи исследований и защищаемые положения, новизна и практическая ценность полученных в диссертации результатов.

**В первой главе** содержится достаточно подробный аналитический обзор публикаций, посвященных проблеме графитизации алмаза, которая может быть инициирована квазистационарным высокотемпературным нагревом алмаза, ионной имплантацией с последующей термоиндуцированной рекристаллизацией, либо лазерным облучением.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментального исследования процесса роста графитизированных микроструктур в алмазе при многоимпульсном лазерном воздействии. Установлена зависимость между скоростью движения границы графитизированной области и локальной плотностью лазерной энергии. Описана и объяснена кинетика движения фронта графитизации в условиях движения лазерной каустики. Обсуждаются особенности формирования различных типов протяженных графитизированных микроструктур

**В третьей главе** диссертации систематизированы собранные экспериментальные данные о внутренней структуре лазерно-модифицированного материала, полученные с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния, сканирующей электронной микроскопии и зондовой микроскопии в режиме измерения сопротивления растекания тока. Анализируется влияние условий лазерного облучения на характеристики и взаимную конфигурацию графитовых включений внутри исходной алмазной матрицы, а также на электропроводность графитизированных нитей.

**В четвертой главе** рассматривается предложенная автором модель лазерно-индукционной волны графитизации в алмазе и анализируется ее соответствие экспериментальным наблюдениям, включая возможность объяснения экспериментальной зависимости скорости фронта графитизации от локальной плотности лазерной энергии.

**В пятой главе** диссертации приводятся результаты экспериментального тестирования возможности использования техники лазерного микроструктурирования алмаза для четырех различных областей применения:

создание алмазных детекторов ионизирующих частиц с трехмерной архитектурой электродов, фотопроводящих алмазных антенн для генерации ТГц импульсов, фотонных устройств для ИК и ТГц излучения, а также пустотелых высокоаспектных каналов внутри алмаза.

**В заключении** перечислены основные результаты работы.

Значительная часть выводов диссертации основывается на данных экспериментов, проведенных автором с использованием оригинальной методологии. Подробное изложение в диссертации условий их проведения обеспечивает возможность их повторения и верификации. Автор использовал целый ряд современных аналитических методик, взаимно дополняющих друг друга. Теоретическая модель процесса распространения лазерно-индуцированной волны графитизации, предложенная в диссертации, соответствует современным теоретическим представлениям о процессе графитизации алмаза. Таким образом, **представленные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации надежно обоснованы.**

К наиболее важным и значимым результатам, определяющим научную новизну диссертационной работы, на мой взгляд, можно отнести следующие результаты.

1. Впервые экспериментально изучена кинетика роста областей графитизации в объеме алмаза при облучении ультракороткими лазерными импульсами. Объяснена несогласованность между движением лазерной каустики и границей графитизации при различных условиях облучения.
2. Установлена гетерофазная (алмаз+графит) природа лазерно-модифицированной области; изучено влияние параметров лазерного излучения и условий облучения на конфигурацию графитовых включений и электрические свойства создаваемых графитизированных нитей.

3. Разработана теоретическая модель распространения лазерно-индуцированной волны графитизации в объеме алмаза, которая объясняет большинство экспериментальных наблюдений.

4. Впервые созданы и протестированы прототипы следующих алмазных устройств, содержащих графитизированные микроструктуры: многоканальный детектор бета-частиц, фотонный кристалл с минимумом пропускания на длине волны 4 мкм, фотопроводящая антенна для генерации ТГц импульсов.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается высоким уровнем проведения экспериментальных исследований и использованием взаимодополняющих аналитических методик. Предложенная теоретическая модель формирования протяженных микроструктур согласуется с экспериментальными данными, в том числе и на количественном уровне. Достоверность результатов исследования подтверждается также их публикацией в высокорейтинговых рецензируемых журналах и апробацией на многочисленных научных конференциях.

**Научная значимость диссертации** заключается в обнаружении целого ряда эффектов, которые не наблюдались ранее при лазерной структурной модификации прозрачных материалов. В первую очередь это касается процесса распространения волны лазерной модификации в алмазе, не связанного прямым образом с перемещением лазерной каустики, и определяющего влияния возникающих механических деформаций на процесс структурной трансформации и локализацию нового фазового состояния. Хотя обнаруженные эффекты связаны со специфическими особенностями алмаза и не являются типичными для большинства прозрачных материалов, полученные результаты существенно расширяют современные физические представления о лазерной модификации материалов.

**Высокая практическая значимость диссертации** не вызывает сомнений, учитывая высокий потенциал технологии лазерного

микроструктурирования алмаза для различных применений, некоторые из которых протестированы в рамках диссертационного исследования.

**По диссертационной работе имеются следующие замечания:**

1. В защищаемом положении 2, в частности, утверждается, что «Для ультракоротких лазерных импульсов скорость движения фронта графитизации в объеме алмаза определяется локальной плотностью лазерной энергии...». Однако в эксперименте применяются не импульсные, а импульсно-периодические лазеры. Не обозначен интервал частот следования лазерных импульсов, при котором справедливо это утверждение. При высоких частотах, особенно, когда интервал между импульсами сопоставим с временем диссипации тепла в алмазе, скорее всего, основным параметром является не плотность лазерной энергии, а плотность средней мощности (т.е. интенсивность) лазерного излучения.
2. В работе практически не отражена роль филаментации ультракоротких (фемто- и пикосекундных) лазерных импульсов в формировании протяженных объемных модифицированных областей внутри алмаза. На стр. 45 утверждается, что «возникновения эффекта самофокусировки почти во всех случаях можно ожидать лишь при многократном превышении порога оптического пробоя алмаза». При оценке использованы данные, полученные в 2000 и 2013 гг., [160, 161]. На самом деле этот эффект наблюдается и до пробоя, см. напр. S. I. Kudryashov, A. O. Levchenko, P. A. Danilov, N. A. Smirnov, and A. A. Ionin, IR femtosecond laser micro-filaments in diamond visualized by inter-band UV photoluminescence, Opt. Lett. 45 (7), 2026-2029 (2020) <https://doi.org/10.1364/OL.389348>. Наблюдаемые автором расщепление графитизированных нитей и многоканальная лазерно-индуцированная люминесценция алмаза (рис.2.21) может свидетельствовать о множественной филаментации сфокусированного лазерного излучения.

3. Вызывает сожаление, что для исследований многофазной структуры лазерно-индуцированных включений не были использованы такие современные микроскопические методы, как просвечивающая электронная микроскопия (TEM) и электронная дифракция выбранного участка (SAED).
4. В обзоре литературы не отражены как давно опубликованные работы по лазерной модификации алмаза, например, S.I. Kudryashov, N.N. Mel'nik, Structural mimicry of carbon driven by ultrashort laser pulses, Invited review chapter in the Book "Graphite: Properties, Occurrences and Uses", pp 69-124, 2013, Editor: Quinton C. Campbell. ISBN: 978-1-62618-576-0, Nova Science Publishers, Inc. N.Y. USA, так и достаточно «свежие» публикации по анализу механизмов генерации электрон-дырочной плазмы в алмазе под действием фемтосекундных лазерных импульсов, например, Krasin, G.K., Kudryashov, S.I., Danilov, P.A. et al. Ultrashort-laser electron-hole plasma and intragap states in diamond, Eur. Phys. J. D 75, 221 (2021). S. I. Kudryashov, R. A. Khmelnitskii, P. A. Danilov, N. A. Smirnov, A. O. Levchenko, O. E. Kovalchuk, M. V. Uspenskaya, E. A. Oleynichuk, and M. S. Kovalev, "Broadband and fine-structured luminescence in diamond facilitated by femtosecond laser driven electron impact and injection of “vacancy-interstitial” pairs," Opt. Lett. 46, 1438-1441 (2021).
5. В работе имеются стилистические ошибки и опечатки. Например, стр.5 - «Хотя ... графитовые микроструктуры ... ограничены тонким (< 3 мкм) поверхностным слоем, ЭТО создает новые возможности...» (что означает «это» - *поверхностный слой*? – для понимания приходится обращаться к предыдущему тексту); стр.31 – «...графитовое включение (>15 нм) может быть нагретА...»; стр.72 – «...лазерно-ндуцированной люминесценции» и.т.п.

**Приведенные выше замечания не умаляют научной значимости диссертации.**

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой систематическое научное исследование проблемы лазерного формирования токопроводящих графитизированных микроструктур в объеме алмаза. Совокупность результатов и положений, содержащихся в диссертации, позволяют квалифицировать ее как значительное достижение в области лазерной физики и взаимодействия лазерного излучения с веществом. Содержание диссертации правильно отражено в автореферате.

Считаю, что содержание диссертационной работы Кононенко Тараса Викторовича и форма ее представления полностью соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России в редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. за №842, предъявляемым к докторским диссертациям. Автор обладает высокой квалификацией и достоин присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. — Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Руководитель Отделения квантовой радиофизики им.Н.Г.Басова Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,

доктор физико-математических наук,

профессор

Ионин Андрей Алексеевич

07 ноября 2022 г.

Специальность, по которой защищена диссертация оппонента:

01.04.21 –Лазерная физика

Контактные данные:

тел.: +7(499)7833690, e-mail: ioninaa@lebedev.ru

Адрес места работы:

119991, г. Москва Ленинский пр. 53

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Отделение квантовой радиофизики

Подпись руководителя Отделения квантовой радиофизики  
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

А.А. Ионина удостоверяю:

Ученый секретарь

А.В. Колобов  
07 ноября 2022 г.

