

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Лукьянчука Бориса Семеновича 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

Актуальность исследования

Создание различных микроструктур внутри алмазных кристаллов с помощью лазерных импульсов привлекательно для развития ряда информационных технологий. Одним из направлений является сверхплотная запись информации в алмазе на базе NV-центров. Другая важнейшая проблема согласно DARPA, связана с разработкой технологий трехмерной гетерогенной интеграции (3DHI). Частью этой технологии является создание трехмерных графитизированных микроструктур в объеме алмаза. Эти исследования необходимы для создания инновационной технологии микрообработки алмаза. Для развития этой технологии требуется решение ряда фундаментальных проблем кинетики фазового перехода алмаз-графит. Актуальность такого исследования несомненна.

Степень обоснованности научных положений и выводов

Выводы диссертации основаны на результатах экспериментального исследования кинетики роста графитизированных микроструктур при импульсно-периодическом лазерном облучении, а также на базе изучения внутренней структуры и электрических свойств этих микроструктур. Существенным компонентом диссертации является оригинальная теоретическая модель распространения волны графитизации в алмазе под действием лазерного облучения и количественная оценка скорости перемещения границы графитизации в зависимости от локальной плотности лазерной энергии. Наконец, следует отметить исследование роли микротрещин в кинетике процесса графитизации. Обоснованность научных положений и выводов подкрепляется разумностью теоретических оценок и их близостью к полученным экспериментальным данным.

Оценка достоверности и новизны исследования

Новизна исследования устанавливается по срокам публикаций и их сопоставления с публикациями других авторов. Автором опубликован целый ряд пионерских работ, посвященных базовым аспектам лазерного микроструктурирования алмаза, включая зависимость скорости роста графитизированных микроструктур от параметров лазерного излучения, строгую пространственную локализацию лазерно-индуцированного фазового перехода и взаимосвязь этого процесса с растрескиванием исходной алмазной матрицы. Автором показано, что в случае алмаза, структурная модификация материала приводит к несравненно более значительному изменению свойств, включая различные стекла, полимеры и кристаллы. Автором описан целый ряд новых эффектов, например, им продемонстрировано

отсутствие жесткой связи между движением границы модифицированной области и перемещением лазерной каустики, формирование упорядоченных наноструктур из модифицированного материала, конфигурация которых определяется кристаллической структурой исходного материала и условиями облучения и др. Определенную информацию о новизне несет также наличие ссылок на работы автора (более 3000 цитирований).

Значимость полученных автором результатов для науки и практики

Диссертация имеет ясную практическую значимость. Она содержит обширную подборку примеров практического использования графитизированных микроструктур, подробно анализирует возможности технологии лазерного микроструктурирования алмаза, а также описывает типичные проблемы и способы их решения при создании наиболее востребованных на практике разновидностей графитизированных микроструктур. Полученные в диссертации результаты представляют существенный интерес для лазерной физики для расширения знаний о взаимодействии лазерного излучения с прозрачными материалами. Особо следует отметить исследования, посвященные лазерно-стимулированной «волне графитизации» в алмазе.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Диссертации содержит базовые сведения о физических принципах и специфике практического использования технологии лазерного микроструктурирования объема алмаза. Диссертация полезна для широкого круга специалистов, интересующихся новыми способами применения алмаза в науке и технике.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность, достоинства и недостатки

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

Во введении описаны актуальность и степень разработанности темы исследований, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены научная новизна, значимость и практическая ценность. Введение включает изложение положений, выносимых на защиту, и обоснование достоверности полученных результатов. Перечислены международные и всероссийские научные конференции, на которых проводилась апробация результатов диссертации.

В обзоре литературы первой главы систематизированы известные данные о графитизации алмаза, инициированном квазистационарным нагревом, ионной имплантацией или лазерным облучением. В последнем случае проведено четкое разграничение между тремя возможными постановками задачи: (i) абляция алмазной поверхности с образованием поверхностного графитированного слоя, (ii) оптический пробой на поверхности или в объеме алмаза с образованием локализованного микроскопического графитового включения и (iii) анализ

кинетики и динамики роста графитового включения при его облучении сквозь алмаз. Исследование кинетики и динамики роста графитового включения представляет главный интерес данной диссертации.

Вторая глава посвящена изучению кинетики формирования графитизированных микроструктур при различных условиях облучения и режимах перемещения лазерной каустики. Исследована зависимость скорости фронта графитизации от локальной плотности энергии и скорости перемещения каустики, связь энергии импульса с плотностью энергии на фронте графитизации. Исследованы особенности формирования различных типов трехмерных микроструктур.

Третья глава посвящена исследованию сформированных графитизированных микроструктур: анализируются данные об их внутренней структуре и электропроводности в привязке к различным условиям их формирования.

В четвёртой главе предложена модель термостимулированной трещино-зависимой волны графитизации, и сравнение этой модели с экспериментальными наблюдениями, в частности, с результатами измерения скорости движения фронта графитизации.

Пятая глава посвящена практическим применениям технологии лазерного микроструктурирования алмаза. В настоящий момент известно не менее шести перспективных направлений использования этой техники. По четырем из этих направлений существенный вклад был внесен в рамках исследований, выполненных в рамках данной диссертации. Конкретно, речь идет об алмазных детекторах с трехмерной архитектурой электродов, о фотопроводящих антенных терагерцового излучения, о фотонных устройствах для ИК и ТГц излучения, а также о формировании пустотелых каналов и других микроструктур внутри алмазных кристаллов.

В конце глав приведены краткие выводы, а финальное Заключение суммирует основные результаты диссертации.

Один из известных теоретиков как-то сказал, что ему для определения места научной работы прежде всего требуется выяснить - как теоретическая физика ставит такой вопрос? На что это похоже? Говоря условно, между какими параграфами какого тома курса Ландау и Лифшица нашли щель авторы данной работы. Мне при чтении диссертации тоже не доставало понимания – на какую полку книжного шкафа эту диссертацию следует поставить? Дело в том, что сходные вопросы возникают в различных задачах.

Во-первых, сам термин *графитизация* (graphitization) – уже более 70 лет используется для процесса образования графита в железоуглеродистых, никелевых, кобальтовых сплавах и др., в частности - в чугунах и сталях (см. Богачев И.Н. *О механизме графитизации белого чугуна*. М.: Машгиз, 1956. // Зубарев В.Ф. *Теоретические основы графитизации белого чугуна и стали*. М.: Машгиз, 1957. // Бунин К.П., Баранов А.А., Погребной Э.Н. *Графитизация стали*. - Киев: Изд-во АН УССР, 1961). Кинетика этого процесса сходна с той, которая имеет место при графитизации алмаза. Очевидно, что различие между этими процессами состоит в характерных скоростях фазового перехода: лазерная графитизация алмаза существенно более

быстрый процесс. Хотелось бы более четко понимать природу этого быстрого процесса и различия в кинетиках *быстрой* и *медленной* графитизации.

Во-вторых, оптический пробой прозрачных сред может осуществляться по различным механизмам – Анисимова-Макшанцева или Маненкова (см. Анисимов С.И., Макшанцев Б.И. *Роль поглощающих неоднородностей в оптическом пробое прозрачных сред*. ФТТ, **15**(4), 1090 (1973); Маненков, А. А. *О механизме лазерного разрушения прозрачных материалов, обусловленном тепловым взрывом поглощающих неоднородности*. Квантовая электроника, 5(1), 194-195 (1978)). Этот вопрос вообще не обсуждается в диссертации, хотя имеет отношение к начальной стадии процесса с высокой интенсивностью лазерного излучения.

В-третьих, интересна зависимость кинетики процесса графитизации от длины волны света и размера алмаза. Это может быть как чисто тепловой процесс, так и фотофизический. Последний, например, играет важную роль в механизме формирования космической пыли из наноалмазов, формирующихся в атмосфере водородно-богатых звезд, см. D. Ugarte, *Astrophysical Journal*, **443**, L85 (1995); *Nature*, **359**, 707 (1992). Ugarte предположил что углерод, образуется в результате отжига наноалмазов при поглощении УФ кванта света вдали от водородной атмосферы звезды. Фазовый переход алмаз–графит в кластерах ультрадисперсного алмаза исследовался в ряде работ, см., например, ФТТ **39** (6), 1125 (1997). Отмечу также проблемы, возникающие при графитизации углерода под действием рентгеновского излучения, см. C. R. Houska and B. E. Warren, *X-Ray Study of the Graphitization of Carbon Black*, J. Appl. Phys. **25** (12), 1503 (1954).

Google Scholar показывает свыше 50 000 работ, посвященных алмазам, из них 3600 работ, посвященных графитизации углерода. Я понимаю, что автор не обязан знать работы, не имеющие непосредственного отношения к теме его исследования. Поэтому сделанные выше замечания я не могу назвать «отмеченными недостатками». Просто для составления собственной физической картины процесса мне было бы интересно получить ответы на поднятые вопросы. Эти вопросы не являются существенными и не влияют на основные теоретические и практические результаты диссертации.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать ее как фундаментальное исследование, имеющее высокую значимость для лазерной физики в области взаимодействия лазерного излучения с веществом. В диссертации получены новые научные результаты, имеющие важное значение для повышения научно-технического потенциала Российской Федерации. Диссертационная работа не имеет аналогов в России и выполнена на передовом мировом уровне, о чем свидетельствуют публикации в ведущих международных физических журналах.

Степень достоверности результатов работы и сделанных выводов исключительно высокая, поскольку работа выполнена на современном оборудовании и с применением продвинутых взаимодополняющих методик. Диссертация написана грамотным, лаконичным и профессиональным языком, а ее оформление соответствует требованиям. Автореферат и опубликованные работы полностью и точно отражают содержание диссертации.

ее оформление соответствует требованиям. Автореферат и опубликованные работы полностью и точно отражают содержание диссертации.

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,
доктор физико-математических наук, профессор
ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1,
Ленинские горы, 1, стр. 35
Эл. почта: lukiyanchuk@nanolab.phys.msu.ru
тел. +7 968 653-08-19

Дата 29.10.2022

печать

Борис Лукьянчук

/ Лукьянчук Борис Семенович

Подпись Б.С. Лукьянчука заверяю

Декан физического факультета МГУ



Сысоев Н.Н.