

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Кучерика Алексея Олеговича
на диссертацию Кононенко Тараса Викторовича «Лазерно-индукционные
графитизированные микроструктуры в объеме алмаза», представленную на
соискание учёной степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.3.19. — Лазерная физика

Докторская диссертация Кононенко Т.В. посвящена изучению процесса формирования протяженных графитизированных микроструктур в объеме массивной алмазной мишени, при многоимпульсном лазерном облучении, а также разностороннему исследованию структуры и свойств полученных микроструктур, что определяет актуальность проведенных исследований для дальнейшего практического применения.

Алмаз - кристаллический материал, обладающий уникальным набором физических характеристик. О некоторых из них, таких как рекордная твердость и химическая инертность, известно уже давно. Другие были обнаружены сравнительно недавно, включая экстремально длительное сохранение спиновой когерентности некоторыми присутствующими в алмазе точечными дефектами, т.н. NV-центрами, что делает их перспективной основой для различных квантово-вычислительных применений. Однако растущее научно-техническое применение алмаза сдерживается как необходимостью совершенствования технологий его синтеза (НРНТ, CVD), так и ограниченностью средств его последующей обработки. Характерным примером является уникальная возможность модификации кристаллической структуры алмаза, превращающей широкозонный полупроводник (алмаз) в полуметалл (графит) с кардинально отличными физическими свойствами. Полноценная реализация подобного способа микрообработки алмаза, обеспечивающая строго локализованную модификацию структуры в произвольной точке алмазного кристалла, позволила бы создавать сложные алмазно-графитовые микросистемы, имеющие значительный технический потенциал в различных приложениях. Технология создания графитовых микроструктур с помощью ионной имплантации алмаза развивается уже более 40 лет и имеет серьезные достижения, однако, она в принципе не способна выйти за пределы тонкого поверхностного слоя. Новый подход к локальной модификации алмаза, использующий лазерное излучение, свободен от этого ограничения и позволяет формировать по-настоящему трехмерные проводящие микроструктуры, располагающиеся на произвольной глубине. Тем не менее, эффективное

развитие и совершенствование этой методики, как и любой новой технологии, невозможно без понимания процессов и физических эффектов, лежащих в ее основе. Диссертация Кононенко Т.В. обеспечивает достаточную научную базу для процесс лазерного микроструктурирования алмаза и вносит тем самым важный вклад в решение актуальной задачи создания новых технологий микрообработки алмаза, который является перспективным материалом для разнообразных применений в новейших областях науки и техники, включая электронику, фотонику и информационно-вычислительные технологии.

Научная и практическая значимость диссертации связана с получением систематических экспериментальных данных о процессе и конечном результате лазерного микроструктурирования объема алмаза, а также с теоретическим осмыслением этих данных. Проведенные исследования позволили выявить особенности кинетики формирования в алмазе непрерывных графитизированных микроструктур и установить принципиальное отличие этого процесса от лазерной модификации других прозрачных материалов. Исследование с нанометровым пространственным разрешением внутренней структуры лазерно-модифицированных областей, созданных при различных условиях облучения, обнаружило возникновение уникальных гетерогенных наноструктур, обеспечивающих макроскопическую электропроводность модифицированного материала. В рамках диссертации было экспериментально протестировано несколько перспективных практических применений технологии лазерного микроструктурирования алмаза.

Достоверность положений и результатов диссертации обеспечивается высоким уровнем проведения экспериментальных исследований, комбинацией нескольких взаимодополняющих методик и хорошим согласием экспериментальными данными с результатами модельных расчётов.

Новизна полученных результатов заключается в следующем:

- Впервые проведено систематическое экспериментальное исследование формирования протяженных графитизированных микроструктур в алмазе под действием ультракоротких лазерных импульсов при различных параметрах лазерного излучения и режимах движения лазерной каустики;

- Впервые сформулирован главный принцип, определяющий кинетику движения границы графитизированной области в алмазе: средняя скорость перемещения границы навстречу лазерному пучку определяется локальной плотностью лазерной энергии;

- Впервые внутренняя структура областей, модифицированных лазерным излучением, исследована с нанометровым пространственным разрешением и обнаружено возникновение графитовых нановключений, образующих единую проводящую сеть;

- Впервые проведено системное исследование электрических свойств графитизированных микроструктур в условиях варьирования энергии и длительности импульса, а также скорости движения каустики и кристаллографической ориентации микроструктуры, и продемонстрирован успешный пример создания эквивалентной электрической схемы графитизированной нити, позволяющей предсказать ее интегральную электропроводность;

- Впервые сформулирована модель термостимулированной трещино-зависимой волны графитизации, которая позволяет объяснить большинство экспериментальных наблюдений, в том числе, и на количественном уровне.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных терминов, списка литературы, а также, списка опубликованных статей по материалам диссертации. Общий объём диссертации составляет 196 страниц машинописного текста; диссертация включает 78 рисунка и 5 таблиц, и содержит 234 ссылки на печатные работы.

Во введении обосновывается актуальность диссертации, формулируются цель работы, научная новизна исследования и защищаемые положения, обсуждается практическая значимость полученных результатов. Приведены также данные об апробации результатов на международных конференциях.

В первой главе представлено современное состояние дел в изучении графитизации алмаза. Несмотря на метастабильный статус алмазной фазы, спонтанный фазовый переход алмаз-графит практически невозможен. Глава содержит три подраздела в соответствии с возможными вариантами внешнего воздействия на алмаз, приводящего к его графитизации: 1) квазистационарный нагрев, 2) ионная имплантация с последующим отжигом и 3) лазерное облучение. В рамках последнего сценария графитизации наиболее подробно изучен случай поверхностной абляции, сопровождающейся появлением поверхностного графитизированного слоя. Оптический пробой в объеме или на поверхности алмаза, сопровождающийся появлением микроскопического графитового включения, изучен намного хуже. Что же касается дальнейшего роста графитового включения и формирования протяженных микроструктур, до начала диссертационного исследования было опубликовано лишь одно короткое сообщение по этой теме,

Вторая глава посвящена исследованию кинетики роста графитизированных микроструктур при различных условиях облучения и режимах перемещения лазерной каустики. Акцентируется принципиальное отличие между возможным возникновением серии изолированных микропробоев и непрерывным перемещением границы графитизированной области, когда локальная плотность энергии снижается ниже порога многоимпульсного пробоя. Измерены скорости фронта графитизации для ультракоротких импульсов, и показано, что средняя скорость определяется локальной плотностью энергии. Изучено влияние скорости каустики и энергии импульса на плотность энергии на фронте графитизации после его синхронизации с движением каустики, а также объяснен эффект возникновения регулярных разрывов в микроструктуре при высоких скоростях движения каустики. Исследована возможность формирования сложных трехмерных микроструктур и проанализированы пути решения проблем, возникающих при их создании.

Третья глава посвящена исследованиям внутренней структуры лазерно-модифицированной области, а также суммируются собранные сведения о генерации механических напряжений в процессе графитизации и электропроводности графитизированных нитей. Представлены результаты исследования сечений различных микроструктур методами сканирующей электронной микроскопии и сканирующей микроскопии сопротивления растекания, свидетельствующие о том, что большая часть объема модифицированной области, видимой в оптический микроскоп, занята исходной алмазной матрицей, а электрические свойства модифицированного материала определяются возникшими нанопластинаами графита, соединенными в единую проводящую сеть.

В четвёртой главе представлена модель термостимулированной трещино-зависимой волны графитизации, обеспечивающей формирование непрерывных графитизированных микроструктур, которая позволяет объяснить большую часть экспериментальных наблюдений, описанных в предыдущих главах. Описана процедура проведенного компьютерного моделирования процесса лазерной графитизации под действием единичного лазерного импульса с целью получения оценки скорости движения фронта графитизации. Близость результатов моделирования к экспериментальным данным подтверждает адекватность предложенной модели.

В пятой главе представлены результаты тестирования четырех перспективных практических применений лазерного микроструктурирования алмаза, включая алмазные

детекторы ионизирующих частиц и излучений с трехмерной архитектурой электродов, фотопроводящие антенны для генерации ультракоротких терагерцовых импульсов, фотонные устройства (на примере фотонного кристалла для ИК излучения) и пустотельные микроструктуры в объеме алмаза (на примере ультратонких каналов).

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Автор провел значительные по объему исследования, и постарался всесторонне изучить и описать наблюдаемые явления, однако по диссертационной работе имеются следующие замечания:

- Автор постоянно прибегает к феноменологическому описанию наблюдаемых процессов. С одной стороны, это объяснимо, так как при ультракоротком воздействии все лазерно-индуцированные процессы нестационарны, а вызываемые ими явления перехода алмаз-графит, и микромодификации объема образца многофакторны, и в свою очередь порождают большое количество вторичных процессов. С другой стороны, хотелось бы лучшей оценки явлений с позиции анализа данных и выбора адекватной модели, опирающейся только на главные факторы. Для этого можно было бы провести анализ с выделением главных компонент, рассчитать условия нагрева локального объема при гауссовом распределении интенсивности излучения и т.д.

- В пункте 3.4. при измерении удельного сопротивления автору нужно было провести расчет не в приближении «сплошной» однородной среды, а хотя бы оценив средний размер графитового зерна (кристаллита). Как известно, наличие зерен, существенно изменяет сопротивление материала из-за рассеивания электронов на их границах. Тем более, что в выводах автор приходит ровно к такому же заключению: «Если заметная доля площади “графитизированной трещины” не содержит в действительности графитовой прослойки, то каждую “нанопластину” следует рассматривать скорее, как конгломерат графитовых наноразмерных включений с высоким внутренним сопротивлением.»

- Возникает вопрос, почему имея в своем распоряжении микроскоп Ntegra Spectra, автор в главе 3 привел только измерение сопротивления растекания, однако не представил для данного образца и карту КР-спектров? В этом случае полный объем данных по проводимости и спектрам комбинационного рассеяния окончательно снял бы вопросы о природе материалов в трещинах.

- В целом по диссертации хотелось бы увидеть результаты сравнения лазерного воздействия на монокристаллических и поликристаллический образцы, при одинаковых

условиях воздействия, мне кажется, что такой эксперимент снял бы некоторые вопросы относительно образования трещин. Также хотелось бы использования при видеорегистрации более скоростной камеры, из приведенных данных складывается ощущение, что съемка со скоростью пять/десять тысяч кадров в секунду позволила бы зафиксировать процесс образования трещин.

- Автор в принципе редко оценивает ошибку измерений, но на рисунке 5.10, когда речь идет зависимости энергии ТГц импульса от энергии лазерного импульса накачки, границы диапазона ошибки измерений очень не хватает для того, чтобы подтвердить наличие отклонения от линейного закона.

Тем не менее, эти замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Диссертация представляет собой цельное и законченное научное исследование, содержание которого соответствует целям работы и названию диссертации. Все защищаемые научные положения и выводы хорошо обоснованы. Работа выполнена автором на высоком научном уровне, характеризуется необходимой новизной и достоверностью полученных результатов, написана понятным и грамотным литературным языком, хорошо оформлена и показывает, несомненно, высокую квалификацию и научную зрелость автора. По теме диссертации опубликована двадцать одна работа в высокорейтинговых международных научных журналах, а полученные результаты неоднократно докладывались на международных научных конференциях. Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию.

На основании вышесказанного считаю, что содержание работы и форма ее представления полностью соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России в редакции Постановления Правительства РФ 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям. Автор — Кононенко Тарас Викторович, обладает высокой квалификацией и достоин присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. — Лазерная физика.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
проректор по научной работе и цифровому развитию Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский

государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87

Эл. почта: kucherik@vlsu.ru

тел. (4922) 47 99 31

/Кучерик Алексей Олегович

Подпись Кучерика А.О. заверяю

Ученый секретарь

Коннова Т.Г.

Mо



16.11.2022

Почтовый адрес: ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000

Тел. (раб.): +7(915) 761-76-15

Адрес электронной почты: kucherik@vlsu.ru

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Я, Кучерик Алексей Олегович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Кононенко Тараса Викторовича, и их дальнейшую обработку.