12

Вольт-амперные характеристики лазерно-индуцированных объемно-поверхностных графитизированных структур в монокристаллическом CVD-алмазе

© Д.Н. Бухаров, А.С. Черников, Д.А. Кочуев, Д.В. Абрамов, А.О. Кучерик

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, Россия
e-mail: buharovdn@gmail.com

Поступило в Редакцию 17 марта 2026 г.
В окончательной редакции 2 июня 2026 г.
Принято к публикации 17 июня 2026 г.

Продемонстрированы результаты формирования лазерно-индуцированных объемно-поверхностных графитизированных структур в монокристаллическом CVD-алмазе, которые представляют собой комбинацию протяженных структур в объеме алмаза и площадок, располагающихся в местах их выхода на поверхность. Синтез структур выполнен методами фемтосекундной и наносекундной локальной лазерной графитизации. Исследования продольного сечения лазерно-индуцированных структур методами сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния позволили установить особенности их внутреннего строения, характер фазовых превращений и выраженные структурные изменения в областях, подверженных лазерному воздействию. Отличия внутреннего строения структур, сформированных с использованием микрообъективов с различной числовой апертурой обусловлены изменением плотности энергии в зоне лазерной модификации вследствие изменения диаметра пучка и глубины фокуса, определяющих размеры зоны объемной модификации. Показано, что графитизированные области составляют малую часть объема модифицированной области, что указывает на локальный характер проводимости и ограниченный теплоотвод от проводящего участка в объем алмаза. Исследование вольт-амперных характеристик полученных объемно-поверхностных графитизированных структур позволило сопоставить их электрофизические свойства с особенностями внутренней структуры и выполнить корректную интерпретацию механизмов проводимости.

Ключевые слова: CVD-алмаз, лазерная графитизация, графитизированные структуры, вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.61011/JTF.2027.01.64193.71-26

Введение

Алмаз обладает целым рядом уникальных свойств, среди которых высокая механическая прочность, рекордная теплопроводность, оптическая прозрачность в широком спектральном диапазоне, высокая химическая инертность и радиационная стойкость [1,2]. Прогресс в области синтеза искусственных алмазов методом высокого давления и высокой температуры (High Pressure High Temperature — HPHT) и методом химического осаждения из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition — CVD) сделал возможным выращивание алмазов высокого качества с заданными свойствами с контролируемым уровнем дефектов и примесей. За последние два десятилетия стоимость производства таких алмазов значительно снилась, что открыло путь к их более широкому использованию в технологиях нового поколения и разработке прототипов различных устройств на основе алмаза. Алмаз является идеальной технологической платформой для мощной, высокочастотной и высоковольтной электроники и оптоэлектроники [3,4], для создания радиационно-стойких детекторов ионизирующего излучения, сенсоров нового поколения [5–8]. Ключевой технологической задачей при создании таких устройств является формирование проводящих структур на поверхности и в объеме алмаза. Направление создания проводящих структур по прошествии двух десятилетий продолжает быть актуальным.

Метод ионной имплантации позволяет формировать проводящие структуры как на поверхности алмаза, так и в объеме, но со значительными ограничениями (формирование в приповерхностных слоях, с глубиной залегания в несколько микрометров) [9,10]. Природа проводимости после имплантации зависит от дозы облучения и типа внедряемых ионов и обусловлена либо легированием, либо переходом из sp^3-фазы в sp^2-связанный углерод [11,12].

Наиболее гибким и эффективным методом формирования проводящих структур на поверхности и в объеме алмаза является метод локальной лазерной графитизации [13–16]. Их проводимость обусловлена локальным фазовым переходом алмаза в sp^2-связанный углерод в результате взаимодействия лазерного излучения с исходной алмазной матрицей, а сами структуры называют графитизированными. Примерами таких структур являются графитизированные площадки, сформированные на поверхности [17–19], а также нитевидные и пла-

стинчатые микроструктуры, сформированные в объеме высококачественных искусственных алмазов [20–22].

Свойства формируемых графитизированных структур зависят от множества параметров: длительности импульса, частоты следования импульсов, плотности энергии, ориентации относительно кристаллографической плоскости, особенностей фокусировки и скорости перемещения в процессе синтеза [23–27].

Одним из ключевых методов характеризации сформированных графитизированных структур является исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ), позволяющее оценить их проводимость.

В настоящей работе представлены результаты формирования графитизированных структур в монокристаллическом CVD-алмазе методами локальной лазерной графитизации. Полученные структуры исследованы методами оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния. Проведен анализ ВАХ лазерно-индуцированных объемно-поверхностных графитизированных структур в зависимости от условий их формирования.

1. Синтез объемно-поверхностных графитизированных структур в алмазе

Объемно-поверхностные графитизированные структуры, представляющие собой комбинацию лазерно-индуцированных протяженных структур в объеме алмаза (сквозные нити и пластинчатые, П-образная структура) и площадок, располагающихся в местах выхода объемных структур на поверхность алмаза, были изготовлены методами фемтосекундной и наносекундной локальной лазерной графитизации. В качестве образца использовался монокристаллический CVD-алмаз (ГК „Алмазная долина“, линейные размеры $5 \times 5 \times 1$ mm).

С использованием фемтосекундного лазерного излучения осуществлялся синтез графитизированных структур в объеме алмаза (сквозные нити и пластинчатые, П-образная структура) и на его поверхности (площадки). Источником излучения являлась фемтосекундная Yb:KGW лазерная система ТЕТА-10 (Авеста, Россия), генерирующая излучение на длине волны $\lambda = 1030$ nm (основная гармоника) с частотой следования импульсов $\nu = 10$ kHz и длительностью импульса $\tau = 280$ fs. Лазерное излучение основной гармоники проходило через поляризационный аттенюатор, с помощью которого осуществлялась настройка энергии лазерного импульса. Далее излучение распространялось в направлении блока преобразования частоты (Авеста, Россия), с помощью которого осуществлялась генерация излучения второй гармоники ($\lambda = 515$ nm). Излучение второй гармоники проходило через систему поворотных зеркал, отражалось от дихроичного зеркала и распространялось в направлении микрообъектива, с помощью которого осуществлялась фокусировка лазерного луча. Были использованы план-апохромат микрообъективы с различным увеличением и числовой апертурой: Mitutoyo M Plan Apo $10\times$ (числовая апертура $\mathrm{NA} = 0.28$); Mitutoyo M Plan Apo NIR $50\times$ ($\mathrm{NA} = 0.42$); Mitutoyo M Plan Apo NIR $100\times$ ($\mathrm{NA} = 0.7$). Диаметр перетяжки лазерного пучка рассчитывался по формуле $d_0 = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot \mathrm{NA}}$, для расчета глубины фокуса использовалось выражение $\Delta z = 2n\lambda/\mathrm{NA}^2$, где $n = 2.4$ показатель преломления алмаза [26]. Согласно расчетам, диаметр перетяжки d_0 и глубина фокуса Δz составили: 2.34 и 32 μm для микрообъектива $10\times$; 1.6 и 14 μm для микрообъектива $50\times$; 0.94 и 5 μm для микрообъектива $100\times$. Алмаз закрепляли на держателе образца и размещали в области лазерного воздействия. Лазерное воздействие на алмаз осуществлялось перпендикулярно кристаллографической плоскости {100}.

Облучение наносекундным лазерным излучением применялось к поверхностным графитизированным площадкам, ранее сформированным в результате фемтосекундного лазерного воздействия. Источником излучения являлся волоконный наносекундный лазер, генерирующий излучение на длине волны $\lambda = 1064$ nm, с перестраиваемой частотой следования импульсов в диапазоне от 10 kHz до 1 MHz, длительность импульса $\tau = 100$ ns, максимальная мощность 7 W. Воздействие осуществлялось путем сканирования лазерным лучом по поверхности графитизированных площадок с помощью гальваносканера, луч фокусировался с помощью объектива (диаметр пучка в области каустики $\sim 3\,\mu$m). Алмаз был закреплен на трехкоординатной системе позиционирования, благодаря которой производилась регулировка его положения относительно каустики лазерного пучка.

Принципиальная схема формирования лазерно-индуцированных графитизированных структур в объеме алмаза, а также схематичное изображение процесса формирования лазерно-индуцированных поверхностных графитизированных структур и траектория лазерного сканирования по поверхности алмаза представлены на рис. 1.

Формирование лазерно-индуцированных графитизированных нитей осуществлялось в автоматическом режиме с помощью программного обеспечения, которое управляло открытием/закрытием оптического затвора и перемещением положения каустики лазерного пучка относительно алмаза (вертикальное перемещение) на заданное расстояние с требуемой скоростью (рис. 1, *a*). Для вертикального перемещения использовался моторизованный линейный транслятор (разрешение на полном шаге 1.25 μm), на котором был закреплен микрообъектив. Лазерное воздействие начиналось с нижней грани алмаза, вертикальное перемещение осуществлялось в направлении к его верхней грани. Изменяемыми параметрами проводимых экспериментов являлись: энергия в импульсе; скорость вертикального перемещения; используемый микрообъектив. Графитизированная нить № 1 была сформирована с использованием $10\times$ микрообъектива ($\mathrm{NA} = 0.42$) при энергии в импульсе 0.9 μJ и скорости

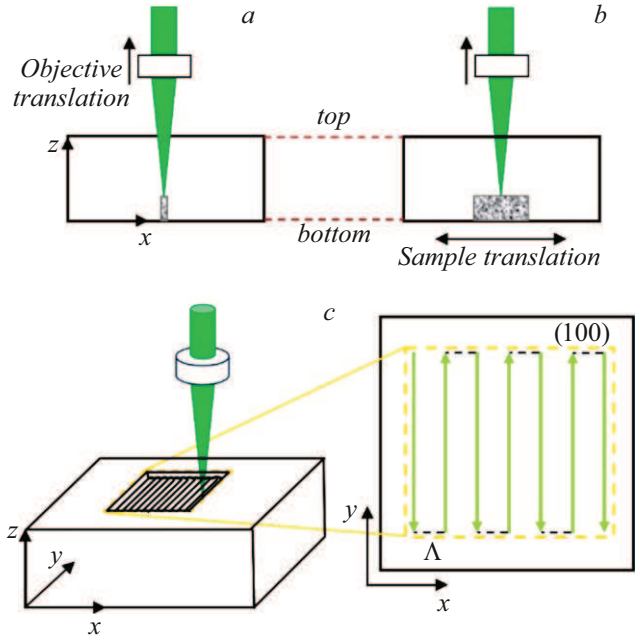


Рис. 1. Принципиальная схема формирования лазерно-индуцированных графитизированных структур в объеме алмаза нить (a) и пластинчатая структура (b): вертикальная стрелка — направление перемещения каустики лазерного пучка относительно алмаза; горизонтальная стрелка — направление перемещения алмаза в горизонтальной плоскости. Схематичное изображение процесса формирования лазерно-индуцированных поверхностных графитизированных площадок и траектория лазерного сканирования по поверхности алмаза (c).

перемещения 62.5 μm/s, графитизированные нити № 2 и № 3 формировались при одинаковых значениях энергии в импульсе (1 μJ) и скорости перемещения (250 μm/s) с использованием 50 $\times$ (NA = 0.42) и 100 $\times$ (NA = 0.7) микрообъективов соответственно.

Все сформированные графитизированные нити характеризовались „перьеобразной“ морфологией, которая является типичной для нитей, ориентированных вдоль кристаллографической оси алмаза {100}, и обусловлена растрескиванием алмаза в области лазерной модификации вдоль плоскостей {111} и последующей графитизацией поверхности микротрещин [28,29]. В работах [14,30,31] подробно была исследована внутренняя структура графитизированных нитей, сформированных в результате воздействия ультракороткими лазерными импульсами. Нити состоят из сгруппированных в сегменты наноразмерных графитизированных пластин, разделенных алмазными участками. Графитизированные пластины образуют проводящую структуру внутри алмазной матрицы.

В основу методики формирования лазерно-индуцированных графитизированных пластинчатых структур легли подходы, представленные в работах [20,32]. Формирование графитизированных пластинчатых структур отличалось от формирования нитей не только режимом вертикального перемещения, но и перемещением образца в горизонтальной плоскости (рис. 1, b). Для перемещения в горизонтальной плоскости использовался прецизионный двухкоординатный стол. Образец совершал возвратно-поступательные движения: перемещение по линии вдоль оси X с заданной скоростью (500 μm/s) одновременно с лазерным воздействием, а затем перемещение в противоположном направлении (цикл выполнялся дважды), энергия в импульсе составляла 1.5 μJ. Сканирование осуществлялось по линии длиной 20 μm (структура № 4) или 100 μm (структуры № 5–7, 9–11). Далее осуществлялось вертикальное перемещение в направлении к верхней грани алмаза на величину 1.25 μm, а затем снова возвратно-поступательные движения. В данном случае в отличие от процесса формирования графитизированных нитей лазерное воздействие начиналось не с нижней грани алмаза, а на 30–50 μm ниже нее. Так, плотность энергии на грани была недостаточной для оптического пробоя, однако по мере приближения положения лазерной каустики к нижней грани алмаза превышала пороговое значение для оптического пробоя, таким образом начинался процесс формирования графитизированной структуры. Количество повторений цикла лазерного сканирования подбиралось таким образом, чтобы пластина доходила до верхней грани алмаза, формируя сквозную структуру. Все пластинчатые структуры были изготовлены при наличии предварительно сформированных у нижней грани алмаза точечных графитизированных включений (микрообъектив 50 $\times$ (NA0.42), энергия в импульсе 0.2 μJ, 80 импульсов в точку, расстояние между соседними точками лазерного воздействия 4 μm, средняя высота графитизированных включений около 6 μm). Присутствие графитизированных включений в области лазерного воздействия положительно влияло на однородность формируемых графитизированных пластинчатых структур на начальной стадии их роста у нижней грани алмаза (оценка путем визуального контроля методом оптической микроскопии). Некоторые из графитизированных пластинчатых структур были сформированы в два полных прохода (структуры № 9–11).

П-образная графитизированная структура (структура № 8) создавалась в несколько этапов с использованием микрообъектива 100 $\times$ (NA = 0.7). Сначала были созданы два вертикальных участка по описанной ранее методике формирования графитизированных пластинчатых структур. Область лазерного сканирования составляла 40 μm, скорость сканирования по оси X 500 μm/s, вертикальное перемещение в направлении к верхней грани 1.25 μm за один цикл сканирования, количество циклов сканирования 120 для каждого вертикального участка, энергия в импульсе составляла 1.5 μJ. При формировании горизонтального участка структуры область сканирования составляла 320 μm, энергия в импульсе была уменьшена до 0.7 μJ, количество циклов сканирования 40, координата начала формирования горизонталь-

ной участка по оси Z находилась выше на $90\,\mu$m от нижней грани алмаза.

Была создана серия объемных графитизированных структур, состоящая из сквозных нитей и пластинчатых структур с выходами на нижней и верхней гранях алмаза, а также П-образной структуры, имеющей два выхода на нижней грани. После завершения синтеза объемных графитизированных структур в алмазе следующим шагом являлось формирование поверхностных графитизированных площадок (рис. 1, *c*), располагающихся в местах выхода объемных структур на поверхность алмаза. Присутствие графитизированных площадок было необходимо для упрощения позиционирования измерительных зондов и обеспечения стабильного электрического контакта при последующих измерениях ВАХ.

В случае сквозных графитизированных структур площадки были сформированы на нижней и верхней гранях алмаза. Формирование поверхностных графитизированных площадок осуществлялось в два этапа. Первый этап подразумевал формирование поверхностных графитизированных площадок в результате фемтосекундного лазерного воздействия. В качестве фокусирующей оптики был использован план-апохромат микрообъектив $50\times$ (NA $= 0.42$). Лазерное воздействие на алмаз осуществлялось перпендикулярно кристаллографической плоскости {100}, лазерный луч фокусировался на поверхность его верхней грани. Перемещение алмаза выполнялось по П-образной траектории с помощью прецизионного двухкоординатного стола и включало перемещение по линии одновременно с лазерным воздействием, смещение на заданное расстояние в перпендикулярном направлении без лазерного воздействия, перемещение совместно с лазерным воздействием в противоположном направлении параллельно начальной линии. Графитизированные площадки были сформированы в виде квадратов со стороной $200\,\mu$m при энергии в импульсе $0.08\,\mu$J и скорости перемещения $80\,\mu$m/s, расстояние между линиями лазерного сканирования (Λ) составляло $1\,\mu$m. Процесс формирования лазерно-индуцированных поверхностных графитизированных структур обусловлен многократным воздействием лазерных импульсов на один и тот же участок поверхности. Лазерное воздействие на поверхность алмаза с различным количеством импульсов в точку инициировало последовательное развитие процессов модификации поверхности, химических преобразований и изменения топологии. В данном случае энергия последующего лазерного импульса, приходящего в тот же участок поверхности, поглощается образованным графитифизированным слоем (в результате предшествующих импульсов), приводя к увеличению температуры в зоне воздействия, превышающей температуру испарения материала, что приводит к выраженной абляции. Одновременно с этим диффузия тепла в образец инициирует трансформацию следующего участка алмаза [33]. Таким образом, фемтосекундное лазерное воздействие приводило к формированию на поверхности алмаза углублений около $7\,\mu$m с присутствием тонкого графитизированного слоя.

Второй этап заключался в облучении наносекундным лазерным излучением поверхностных графитизированных площадок, сформированных на первом этапе. Область лазерного сканирования также представляла собой квадрат со стороной $200\,\mu$m, сканирование осуществлялось построчно со скоростью 1 mm/s, расстояние между линиями сканирования $10\,\mu$m. Процесс облучения осуществлялся за один проход при энергии $50\,\mu$J и частоте следования импульсов 100 kHz. При воздействии наносекундными лазерными импульсами необходимо учитывать, что алмаз прозрачен в широком диапазоне длин волн (ширина запрещенной зоны 5.47 eV). Таким образом, в случае лазерного излучения на длине волны 1064 nm энергии фотонов (1.17 eV) оказывается недостаточно для преодоления запрещенной зоны алмаза [34]. Площадка, сформированная в результате фемтосекундного лазерного воздействия на поверхность алмаза, характеризуется присутствием тонкого графитизированного слоя, который обладает намного более высоким линейным коэффициентом поглощения лазерного излучения по сравнению с алмазом. Последующее облучение графитизированных площадок наносекундным лазерным излучением также приводило к модификации поверхности, химическим преобразованиям и изменению топологии. Полученная площадка представляла собой совокупность микроканавок (величина удаленного слоя $\sim 30-40\,\mu$m) с графитизированным слоем, толщина которого превышала толщину слоя, полученного в результате фемтосекундного лазерного воздействия [35]. О схожих значениях величины удаленного слоя в результате наносекундного лазерного воздействия сообщалось в работе [36]. Согласно литературным данным, толщина графитизированного слоя, образующегося в результате фемтосекундного лазерного воздействия на поверхность алмаза в многоимпульсном режиме, составляет несколько десятков нанометров, в случае наносекундного лазерного воздействия толщина превышает 100 nm (например, при длительности импульса $\tau = 200$ ns может достигать $1\,\mu$m) [13,37].

На рис. 2 представлена оптическая микрофотография боковой грани алмаза с лазерно-индуцированными

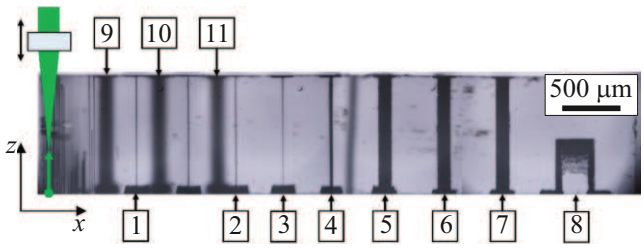


Рис. 2. Оптическая микрофотография боковой грани алмаза с лазерно-индуцированными объемно-поверхностными графитизированными структурами: нити (1–3); пластинчатые структуры (4–7, 9–11); П-образная структура (8).

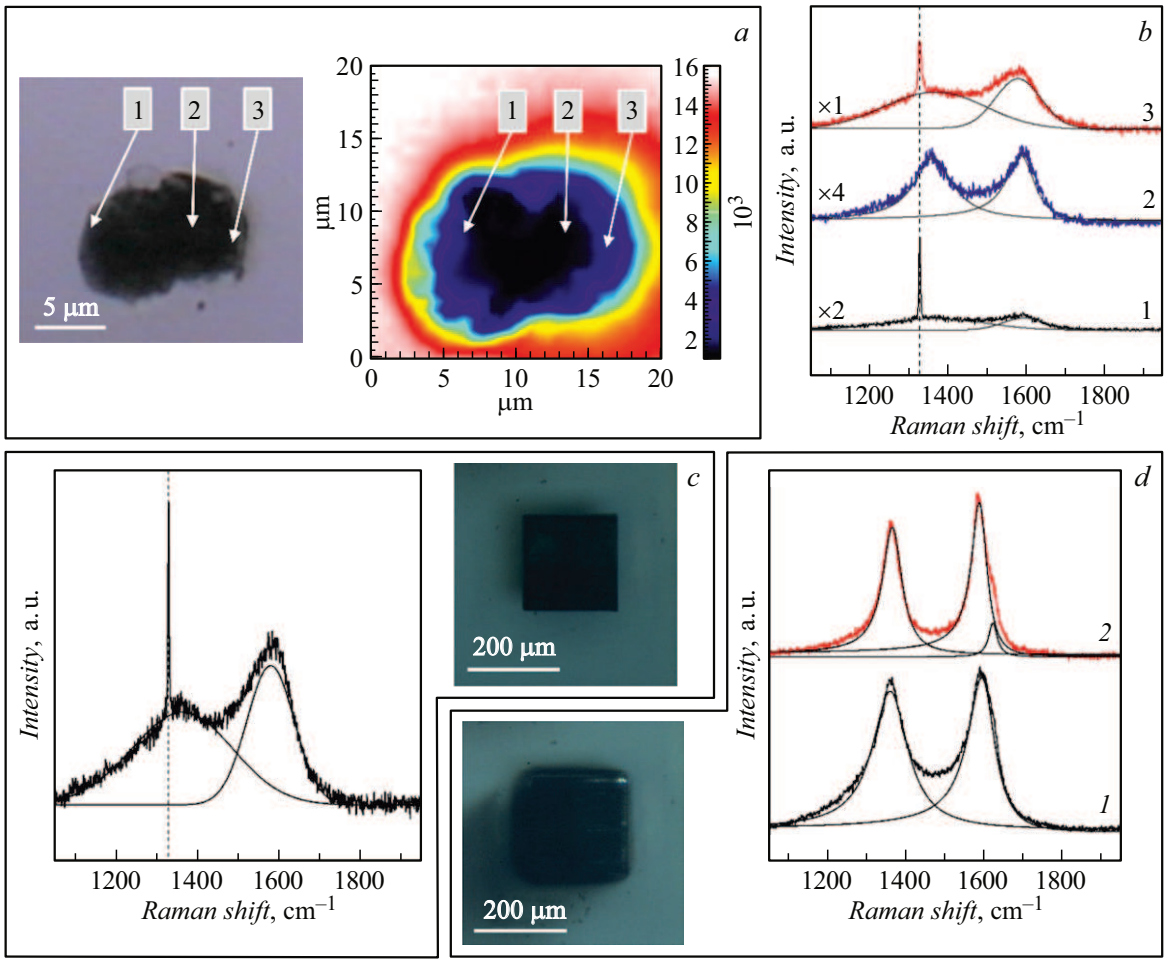


Рис. 3. Оптическая микрофотография выхода графитизированной нити № 3 на верхнюю грань алмаза и соответствующая карта распределения интенсивности КР-сигнала (a). Нормированные по локальному максимуму КР-спектры, соответствующие различным точкам области лазерной модификации (b). Типичные КР-спектры и оптические микрофотографии графитизированной площадки, сформированной в результате фемтосекундного лазерного воздействия (c) и последующего наносекундного лазерного воздействия (d).

графитизированными структурами (нити, пластинчатые, П-образная структура).

Для исследования фазовых превращений, характерных для лазерно-индуцированных графитизированных структур, применялся метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). Измерения спектров КР осуществлялись в геометрии обратного рассеяния с помощью модуля КР-спектроскопии зондовой нанолаборатории NTEGRA Spectra (НТ-МДТ, Россия) в режиме измерения в отдельной точке, а также в режиме двумерного поточечного картирования. В качестве источника возбуждения был использован лазер с длиной волны 473 nm, фокусировка лазерного луча осуществлялась с помощью микрообъектива Mitutoyo M Plan Apo NIR ($100 \times (\mathrm{NA} = 0.7)$), при измерениях использовалась дифракционная решетка 1800 lines/mm.

На рис. 3, a, b приведены оптическая микрофотография выхода графитизированной нити № 3 на верхнюю грань алмаза, соответствующая карта распределения интенсивности КР-сигнала, а также нормированные по локальному максимуму КР-спектры, соответствующие различным точкам (отмечены цифрами на микрофотографии и карте распределения) области лазерной модификации. Был проанализирован выход графитизированной нити на верхнюю грань алмаза. На рис. 3, c, d представлены типичные КР-спектры и оптические микрофотографии графитизированной площадки, сформированной в результате фемтосекундного лазерного воздействия и последующего наносекундного лазерного воздействия.

На картах распределения интенсивности КР-сигнала (рис. 3, a) области с максимальной интенсивностью визуализированы белым и красным цветами, зоны с минимальной интенсивностью соответствуют синему и темно-синему цвету. Во всех исследуемых точках присутствуют широкие пики с максимумом около 1365 cm^{-1} („disorder“ (D) пик, связанный с разупорядоченностью кристаллической решетки) и в области 1580–1595 cm^{-1} („graphite“ (G) пик, связанный с

растяжением C–C-связей в графитоподобных структурах) [38]. В нормированных по локальному максимуму КР-спектрах, снятых в различных точках модифицированной области (их положение отмечено цифрами на микрофотографии и карте распределения интенсивности КР-сигнала), интенсивный узкий пик с максимумом $1332\,\mathrm{cm}^{-1}$ (типичная колебательная мода кристаллической решетки алмаза) может как присутствовать, так и отсутствовать [39]. Различия в КР-спектрах для разных точек (рис. 3, *b*) указывают на структурную неоднородность материала в пределах модифицированной области. Об этом свидетельствует изменение полуширины *D*- и *G*-пиков и отношения их интегральных интенсивностей $I(D)/I(G)$ от 1.3 до 2.2. Наблюдаемые КР-спектры соответствуют второй стадии модели преобразования углеродных материалов (нанокристаллических графит → аморфный sp^2-углерод), предложенной в работе Феррари и Робертсона [40,41], а полученный лазерно-индуцированный графитизированный материал, представляет собой смесь нанокристаллического графита и аморфного углерода.

Анализ типичных КР-спектров для графитизированной площадки до и после наносекундного лазерного воздействия выявил существенную разницу. В случае графитизированной площадки, сформированной в результате фемтосекундного лазерного воздействия, характерным является присутствие пика алмаза ($1332\,\mathrm{cm}^{-1}$) во всех исследуемых точках в пределах модифицированной области, а также наличие *D* (около $1365\,\mathrm{cm}^{-1}$) и G (около $1585\,\mathrm{cm}^{-1}$) пиков. Отношение их интегральных интенсивностей $I(D)/I(G)$ составляет около 1.4.

В результате наносекундного лазерного воздействия в большинстве исследуемых точек в пределах графитизированной площадки наблюдается полное исчезновение пика алмаза ($1332\,\mathrm{cm}^{-1}$), а также присутствие четко выраженных интенсивных *D*- (около $1360\,\mathrm{cm}^{-1}$) и *G*- (в области $1585-1590\,\mathrm{cm}^{-1}$) пиков. В некоторых точках также наблюдается D'-пик (около $1620\,\mathrm{cm}^{-1}$), появление которого обусловлено исключительно наличием структурных дефектов, при этом D'-пик и *G*-пик сливаются в один, когда размер кристаллитов составляет менее 7 nm [42]. Стоит отметить значительное сужение *D*- и *G*-пиков по сравнению с КР-спектром графитизированной площадки до наносекундного лазерного воздействия. Снижение отношения их интегральных интенсивностей $I(D)/I(G)$ до значений $0.9-1.2$ в сочетании с уменьшением их полуширины указывает на возрастание степени упорядоченности углеродной фазы и переходу к первой стадии модели Феррари–Робертсона [40,41]. Различия в КР-спектрах для разных точек (*1* и *2* на рис. 3, *d*) указывают на структурную неоднородность модифицированной области. Полное отсутствие алмазного пика связано с толщиной формируемого графитизированного слоя, которая в случае наносекундного лазерного воздействия значительно больше толщины слоя, формируемого в результате фемтосекундного лазерного воздействия [43]. В данном случае образованный графитизированный слой экранирует сигнал от алмазных областей, расположенных ниже данного слоя, т. е. его толщина превышает глубину проникновения лазерного излучения [44]. В ряде работ аналогичные КР-спектры относят к нанокристаллическому графиту [45,46] или различным формам графитоподобного (в том числе пиролитического) углерода [47–49].

Формирование объемных графитизированных структур с последующим созданием поверхностных графитизированных площадок позволило реализовать трехмерную архитектуру (объемно-поверхностные графитизированные структуры) в алмазе. Данная архитектура использовалась для последующего измерения ВАХ, не прибегая к процессу металлизации поверхности.

2. Исследование ВАХ объемно-поверхностных графитизированных структур

Измерение ВАХ лазерно-индуцированных объемно-поверхностных графитизированных структур в алмазе выполнялось статическим методом с использованием регулируемого источника питания, схема проведения измерений ВАХ представлена на рис. 4, *a*. На рис. 4, *b* приведена оптическая микрофотография алмаза с лазерно-индуцированными объемно-поверхностными графитизи-

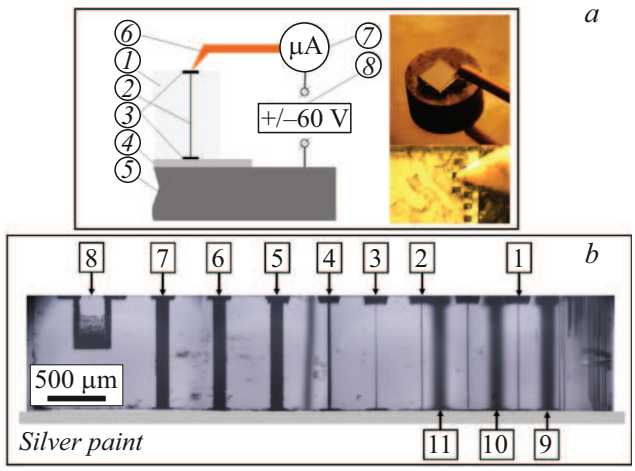


Рис. 4. Схема проведения измерений ВАХ: *1* — алмаз; *2* — графитизированная структура; *3* — графитизированные площадки; *4* — серебряная проводящая паста; *5* — алюминиевый предметный столик; *6* — измерительный зонд; *7* — цифровой микроамперметр Fluke 289 в режиме измерения постоянного тока (диапазон микроампер); *8* — регулируемый источник питания QJ6030S (диапазон выходного напряжения 0–60 V, сила тока 0–30 A). На вставках приведены фотографии алмаза в процессе подвода измерительного зонда к одной из исследуемых структур (*a*). Оптическая микрофотография боковой грани алмаза с лазерно-индуцированными объемно-поверхностными графитизированными структурами, демонстрирующая его пространственное расположение при измерении ВАХ (*b*).

Информация о типе графитизированной структуры, размерах области модификации, площади сечения и сопротивлении

№	Тип структуры	Область модификации, μm	Площадь сечения S, μm^2	Сопротивление R, $k\Omega$
1	Нить	$\varnothing 6.5$	33.18	116 ± 4
2		$\varnothing 6.5$	33.27	118 ± 4
3		$\varnothing 6$	28.3	260 ± 6
4	Пластинчатая	13×27	351	230 ± 6
5		13×110	1430	55 ± 2
6				
7				98 ± 4
8	П-образная	*	*	24 ± 1
9	Пластинчатая	13.5×110	1485	92 ± 4
10				78 ± 3
11				58 ± 2

рованными структурами, демонстрирующая его пространственное расположение при измерении ВАХ.

Алмаз с лазерно-индуцированными объемно-поверхностными графитизированными структурами фиксировался на алюминиевом держателе с помощью серебряной проводящей пасты (SPI Supplies, 05002-AB), обеспечивающей электрический контакт с графитизированными площадками на нижней грани алмаза, что упрощало проведение измерений за счет исключения необходимости подвода контактных зондов к двум противоположным граням. Измерения ВАХ осуществлялись в два этапа. На первом этапе напряжение изменялось в диапазоне от 0 до +60 V (положительный вывод подключался через амперметр к графитизированной площадке на верхней грани алмаза, отрицательный был установлен на поверхность предметного столика — прямая полярность). На втором этапе изменялась коммутация источника питания в схеме: положительный вывод подключался к предметному столику, отрицательный — через амперметр к графитизированной площадке на поверхности алмаза. Это позволило измерить ВАХ в обратной полярности, что соответствует диапазону напряжений от 0 до −60 V относительно исходной ориентации. Измерение тока осуществлялось с помощью Fluke 289 в режиме измерения постоянного тока (диапазон микроампер). Сопротивление рассчитывалось по наклону линейного участка ВАХ (прямая полярность). Размеры области модификации графитизированных структур оценивались с помощью оптической микроскопии. Исследование продольного сечения графитизированных структур (срез по плоскости {110}) методом сканирующей электронной микроскопии было выполнено с помощью микроскопа Quanta 200 3D, FEI. Доступ к плоскости {110} был получен путем прецизионной полировки алмаза. Были исследованы типичные графитизированные структуры, сформированные при тех же параметрах, что и структуры, для которых были измерены ВАХ.

В таблице содержится информация о типе каждой графитизированной структуры, размерах области модификации, площади сечения, рассчитанной используя размеры области модификации, значении сопротивления.

На рис. 5, *a*–*c* представлены ВАХ лазерно-индуцированных графитизированных структур № 1–3 (нити), на вставках приведены СЭМ-изображения продольного сечения (срез по плоскости {110}) типичных графитизированных нитей, сформированных при тех же параметрах, что и нити, для которых были измерены ВАХ. На рис. 5, *d* представлены СЭМ-изображение продольного сечения, карта распределения интенсивности КР-сигнала и нормированные по локальному максимуму КР-спектры, соответствующие различным точкам области лазерной модификации.

Как видно на рис. 5, *a*, ВАХ графитизированной нити № 1 линейна в диапазоне напряжений от 0 до +60 V и от 0 до −44 V, при этом наблюдается асимметрия (участки отмечены зеленым цветом). Значение сопротивления, вычисленного по наклону линейного участка ВАХ в диапазоне от 0 до +60 V, составило (116 ± 4) kΩ. Исследование продольного сечения графитизированной нити методом СЭМ позволило получить представление о ее внутренней структуре (вставка на рис. 5, *a*). Нить состоит из сгруппированных в сегменты наноразмерных графитизированных пластин, разделенных алмазными участками.

Графитизированные пластины ориентированы под углом около 35° к направлению распространения лазерного луча, в непосредственной близости к ним также наблюдается множество графитизированных кластеров. Как упоминалась ранее, подобное расположение графитизированных пластин обусловлено растрескиванием

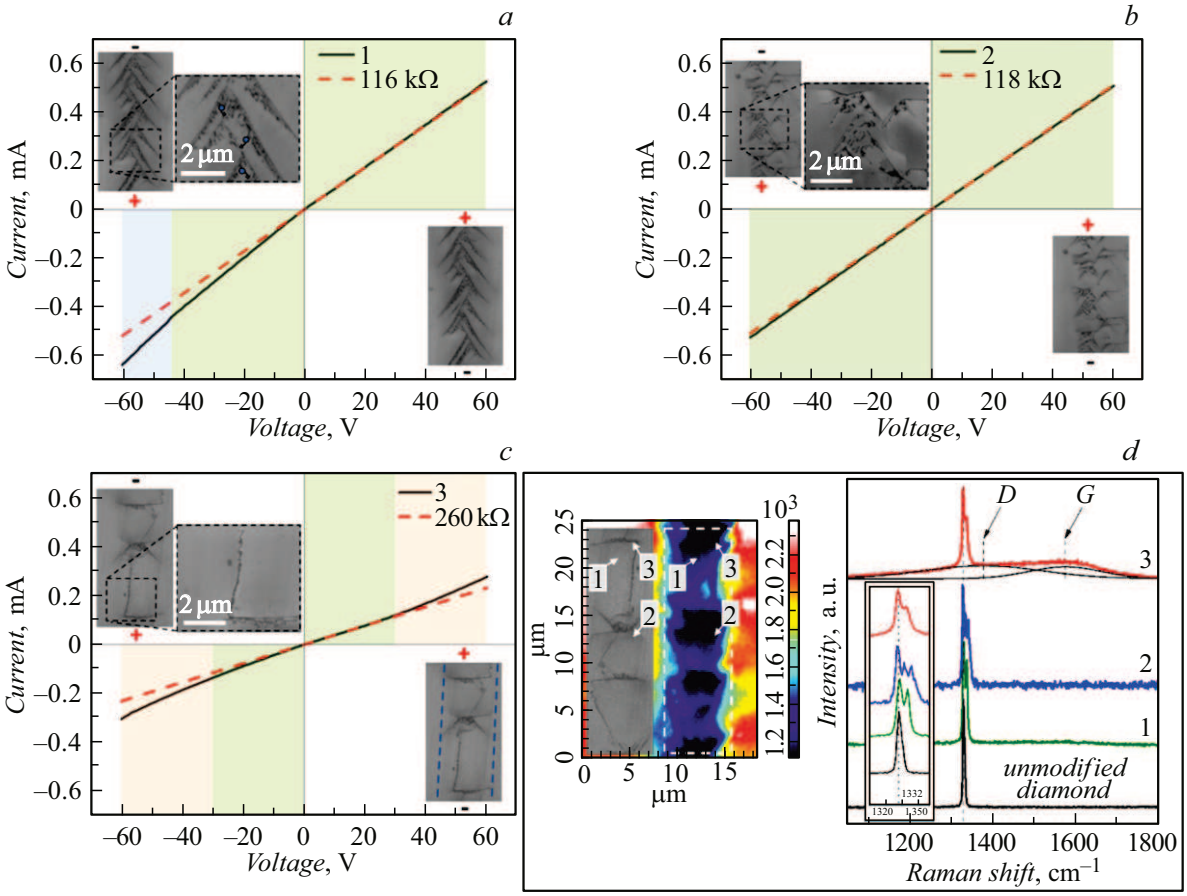


Рис. 5. ВАХ лазерно-индуцированных графитизированных структур № 1–3 (нити): структура № 1 (*a*); структура № 2 (*b*); структура № 3 (*c*). Красные пунктирные линии — теоретический ход ВАХ при сохранении постоянного сопротивления, вычисленного исходя из наклона линейного участка ВАХ (прямая полярность) в диапазоне напряжений от 0 до 60 V для структур № 1, 2 и от 0 до 30 V для структуры № 3. На вставках СЭМ-изображения продольного сечения (срез по плоскости {110}) типичных графитизированных нитей, сформированных при тех же параметрах, что и нити, для которых были измерены ВАХ. СЭМ-изображение продольного сечения, карта распределения интенсивности КР-сигнала и нормированные по локальному максимуму КР-спектры, соответствующие различным точкам области лазерной модификации (*d*).

алмаза вдоль плоскостей {111} и последующей графитизацией поверхности микротрещин. Таким образом, данные о границах сформированной графитизированной нити, полученные путем анализа продольного сечения нити с помощью СЭМ, согласуются с результатами визуальной оценки методом оптической микроскопии („перьеобразная“ морфология). Асимметрия ВАХ, вероятно, обусловлена особенностями структуры графитизированной нити (пространственное расположение графитизированных пластин и кластеров). В обратной полярности графитизированные кластеры, расположенные в непосредственной близости к наклонным графитизированным пластинам, выступают в роли локальных центров эмиссии электронов. Высокая концентрация электронов на границах этих кластеров создает условия для эффективной инжекции носителей заряда. Поле становится достаточным для преодоления барьеров на границах кластеров, что способствует увеличению проводимости и соответственно приводит к снижению сопротивления. В обратной полярности при достижении напряжения −44 V характер ВАХ меняется: наблюдается излом кривой с выходом на новый линейный участок, угол наклона которого соответствует более выраженному увеличению тока (участок отмечен синим цветом). В прямой полярности подобные условия для локализации поля отсутствуют.

ВАХ графитизированной нити № 2 (рис. 5, *b*) является линейной во всем исследованном диапазоне напряжений при измерении как в прямой, так и в обратной полярности (участки отмечены зеленым цветом). Сопротивление, рассчитанное по наклону участка ВАХ в диапазоне напряжений от 0 до +60 V, составило (118 ± 4) kΩ, при этом расхождение со значением, полученным в случае обратной полярности, не превышает 5 %, что укладывается в суммарную погрешность измерений. На СЭМ-изображении продольного сечения графитизированной нити (вставка на рис. 5, *b*) видно, что она, как и рассмотренная ранее нить, состоит из сгруппированных

в сегменты наноразмерных графитизированных пластин, разделенных алмазными участками. Наклон пластин составляет около 35° к направлению распространения лазерного луча. Графитизированные кластеры распределены в пространстве между наклонными пластинами более равномерно. Полевые эффекты, характерные для рассмотренной ранее графитизированной нити, СЭМ-изображение продольного сечения которой представлено на вставке рис. 5, *a*, в данном случае либо отсутствуют, либо не оказывают заметного влияния на проводимость, поэтому ВАХ остается строго линейной и симметричной во всем исследованном диапазоне напряжений.

ВАХ графитизированной нити № 3 (рис. 5, *c*) близка к линейной в диапазоне напряжений от 0 до +30 V и от 0 до −30 V, также наблюдается выраженная асимметрия (участки отмечены зеленым цветом). Сопротивление, рассчитанное по наклону участка ВАХ в диапазоне напряжений от 0 до +30 V, составило $(260 \pm 6)\,\mathrm{k\Omega}$. Наличие асимметрии, как мы предполагаем, связано с развитием полевого эффекта, наблюдаемого в диапазоне от 0 до −44 V для графитизированной структуры № 1 (рис. 5, *a*). Анализ СЭМ-изображения продольного сечения графитизированной нити (вставка на рис. 5, *c*) позволил выявить особенности ее внутренней структуры. В отличие от ранее исследованных нитей, в данном случае присутствует квазинепрерывная центральная графитизированная трещина. По обе стороны от центральной трещины наблюдаются наноразмерные графитизированные пластины, ориентированные под углом около 35° к направлению распространения лазерного луча, однако их значительно меньше по сравнению с нитями, рассмотренными ранее. В диапазоне напряжений от +30 до +60 V и −30 до −60 V ВАХ нелинейна. Наиболее вероятным на наш взгляд объяснением является джоулев нагрев проводящей графитизированной структуры. Как известно, графит — материал с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, следовательно, нагрев структуры приводит к снижению сопротивления [50].

Исследование поверхности продольного сечения графитизированной нити методом КР-спектроскопии в режиме двумерного поточечного картирования позволило выявить выраженную структурную анизотропию области модификации в результате фемтосекундного лазерного воздействия (рис. 5, *d*). Область сканирования представляла собой квадрат со стороной 25 μm, интервал между соседними точками измерения составлял около 0.2 μm, время экспозиции в точке 100 ms. Области с максимальной интенсивностью КР-сигнала визуализированы белым и красным цветами, зоны с минимальной интенсивностью сигнала соответствуют синему и темно-синему цвету. В зонах расположения квазинепрерывной графитизированной трещины и наклонных графитизированных трещин в КР-спектрах присутствует пик алмаза, а также менее интенсивные *D* (около $1380\,\mathrm{cm^{-1}}$) и *G* (около $1580\,\mathrm{cm^{-1}}$) пики (красная кривая рис. 5, *d*). Присутствие пика алмаза в таких зонах обусловлено ограниченным пространственным разрешением метода: диаметр лазерного пятна возбуждающего лазера (473 nm) составляет около 1 μm, в то время как графитизированые области значительно меньше по размеру. Изменения в положении алмазного пика, его уширение, а также расщепление на составляющие, связаны с возникновением внутренних напряжений в алмазе в результате лазерного воздействия [51,52]. Подобные изменения отчетливо видны при сравнении КР-спектра алмаза, измеренного вне модифицированной области (черная кривая на рис. 5, *d*) с КР-спектрами, измеренными в различных точках модифицированной области (кривые *1–3* на рис. 5, *d*), которые отмечены цифрами на картах распределения интенсивности КР-сигнала и СЭМ-изображении продольного сечения. Графитизированная проводящая область в виде квазинепрерывной трещины (ширина не более 100 nm) и наклонных пластин расположена в объеме поврежденной алмазной матрицы (границы отмечены синими пунктирными линиями на вставке рис. 5, *c*). Поврежденная алмазная матрица значительно ограничивает теплообмен между графитизированной структурой и объемом образца. Рекордная теплопроводность алмаза является прямым следствием особенностей строения его кристаллической решетки, что обеспечивает эффективное распространение фононов и высокий теплоотвод. В работах [53,54] сообщалось, что теплопроводность алмаза может существенно изменяться за счет обратимой упругой деформации решетки. Путем изменения тензора деформации теплопроводность может как увеличиваться в два раза, так и снижаться до значений менее $100\,\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$ (уменьшение более чем на 95 %). При этом именно неоднородные деформации приводят к дополнительному рассеянию фононов и снижению теплопроводности. Фемтосекундное лазерное воздействия на алмаз вызывает необратимые разупорядоченные изменения, что приводит к снижению теплопроводности модифицированной области по сравнению с исходным алмазом. Таким образом, малые размеры проводящей области и сильно поврежденная алмазная матрица в области лазерной модификации способствуют ограничению теплоотвода и усилению вклада джоулева нагрева, что может объяснить нелинейность ВАХ в диапазоне от +30 до +60 V и от −30 и до −60 V.

Анализ СЭМ-изображения продольного сечения графитизированных нитей, сформированных с использованием микрообъективов с различной числовой апертурой, а также ВАХ таких структур, подтвердил, что объем потенциальной зоны модификации является важнейшим параметром, который влияет на характер формирования графитизированных участков и проводимость таких структур.

На рис. 6, *a* представлены ВАХ лазерно-индуцированных графитизированных структур № 4–7 (пластинчатые), а на рис. 6, *b* — ВАХ структуры № 8 (П-образная).

Как видно из рис. 6, *a*, ВАХ графитизированных пластинчатых структур № 4–7 являются линейными во

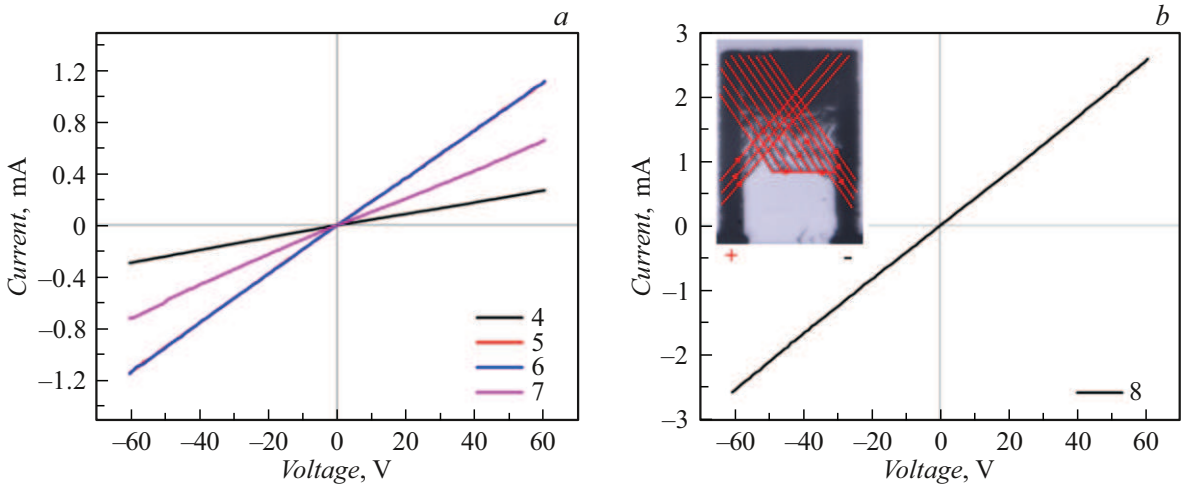


Рис. 6. ВАХ лазерно-индуцированных графитизированных структур: структуры №4–7 (пластинчатые) (*a*); структура №8 (П-образная). На вставке оптическая микрофотография П-образной структуры со схематично обозначенными проводящими участками (*b*).

всем исследованном диапазоне напряжений при измерении как в прямой, так и в обратной полярности. Сопротивление структуры №4, рассчитанное по наклону ВАХ в диапазоне напряжений от 0 до +60 V, составило $(230 \pm 6)\,\mathrm{k\Omega}$, сопротивление структур №5, 6 — $(55 \pm 2)\,\mathrm{k\Omega}$. ВАХ структур №5, 6 полностью совпадают (наложение синей прямой на красную на рис. 6, *a*), данные структуры были сформированы при идентичных параметрах воздействия, что говорит о воспроизводимости получаемых результатов с погрешностью менее 1%.

Пластинчатые структуры представляют собой совокупность отдельных графитизированных участков с ограниченной степенью коммутации, что затрудняет формирование однородной проводящей структуры по сравнению с графитизированными нитями. Сформированные графитизированные участки затеняют соседние области от воздействия в рамках одного слоя модификации. Характер воздействия приводит к „срыву“ процесса объемной графитизации, увеличению количества и размеров зон разупорядоченной алмазной матрицы между графитизированными участками как в горизонтальной, так и вертикальной плоскости. Коммутация между соседними графитизированными участками (в большинстве случаев наклонными графитизированными пластинами) неравномерна, что напрямую влияет на проводимость пластинчатых структур. Этим объясняются высокие значения сопротивления таких структур по сравнению с графитизированными нитями, учитывая значительное увеличение площади модифицированной области, наблюдаемой методами визуального контроля, и не последовавшее снижение сопротивления.

Увеличение сечения пластинчатой структуры за счет изменения величины смещения по оси X в случае структур № 4–6 при прочих неизменных условиях приводит к снижению сопротивления примерно в 4.2 раза (с 230 до $55\,\mathrm{k\Omega}$), что практически совпадает с коэффициентом, равным отношению площадей их сечений (приблизительно 4.1). Это говорит о линейном характере масштабирования проводимости и воспроизводимости процесса формирования графитизированных пластинчатых структур.

Визуальная оценка графитизированных нитей и пластинчатых структур методом оптической микроскопии не позволяет выявить особенности их внутренней структуры, при этом использование размеров области модификации на основании такой оценки для вычисления сечения проводника и последующего расчета удельного сопротивления приводит к аномально высоким значениям по сравнению с графитом, как следствие такая оценка некорректна.

Вычисленное сопротивление структуры №7 составило $(98 \pm 4)\,\mathrm{k\Omega}$, что значительно выше по сравнению со структурами №5, 6 при одинаковых значениях площади сечения модифицированной области. Использование высокоапертурного микрообъектива ($\mathrm{NA} = 0.7$) вместо микрообъектива с числовой апертурой $\mathrm{NA} = 0.42$ приводит к уменьшению диаметра пучка с 1.6 до $0.94\,\mu\mathrm{m}$ и глубины фокуса с 14 до $5\,\mu\mathrm{m}$, что существенно влияет на объем потенциальной зоны модификации. Физическое смещение на $1.25\,\mu\mathrm{m}$ по оси Z соответствует фактическому перемещению положения фокуса внутри алмаза (с учетом его показателя преломления $n = 2.4$) примерно на $3\,\mu\mathrm{m}$, что сопоставимо со значением глубины фокуса. Это приводит к снижению пространственного перекрытия соседних слоев модификации, при этом коммутация между сформированными графитизированными участками нарушается, что объясняет более высокое сопротивление структуры №7.

ВАХ П-образной графитизированной структуры (рис. 6, *b*) линейна во всем исследованном диапазоне

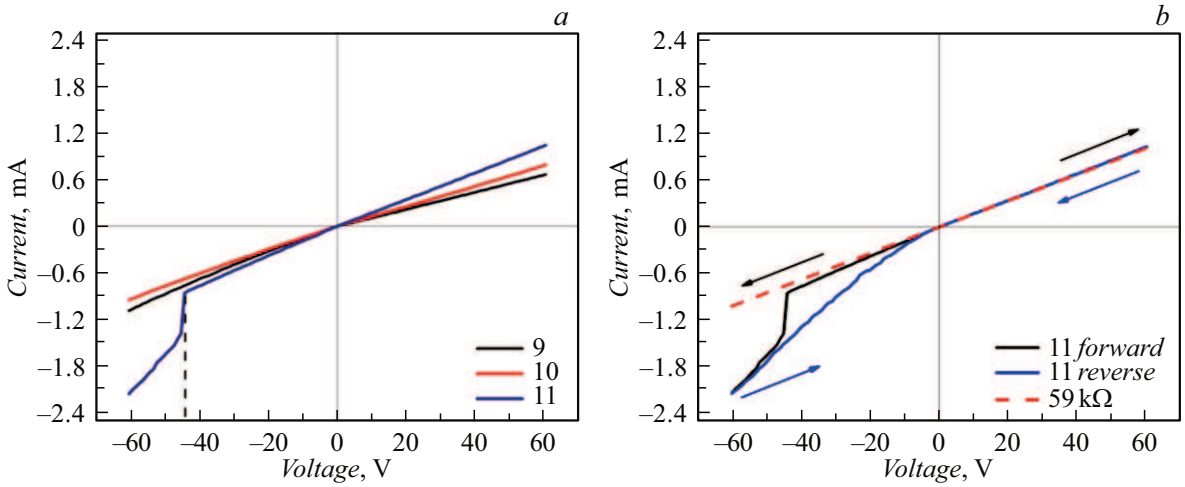


Рис. 7. ВАХ лазерно-индуцированных графитизированных структур: структуры № 9–11 (пластинчатые) (*a*); ВАХ структуры № 11, измеренные при росте напряжения (обозначена черным цветом) и при его последующем снижении к нулю (обозначена синим цветом) (*b*). Красная пунктирная линия — теоретический ход ВАХ при сохранении постоянного сопротивления, вычисленного исходя из наклона линейного участка ВАХ (прямая полярность) в диапазоне напряжений от 0 до +60 V.

напряжений при измерении в обоих полярностях, значение сопротивления, вычисленного по наклону ВАХ в диапазоне напряжений от 0 до +60 V, составило (24 ± 1) kΩ. Если предположить, что в случае пластинчатых структур, сформированных с использованием высокоапертурного микрообъектива, уменьшение площади поперечного сечения приводит к увеличению сопротивления пропорционально отношению площадей их сечений, то даже для двух вертикальных участков П-образной структуры (ширина 50 μm, глубина 13 μm, суммарная длина 900 μm) расчетное значение сопротивления должно составлять около 194 kΩ, что существенно превышает экспериментально полученное значение для П-образной структуры (24 kΩ). Низкое сопротивление П-образной структуры, вероятно, обусловлено присутствием параллельных групп графитизированных проводящих участков (вставка на рис. 6, *b*), сформированных вдоль кристаллографической плоскости {111}, характеризующейся пониженной прочностью при расщеплении по сравнению с плоскостями {110} и 100 [55]. Такие участки характеризуются более высокой степенью взаимной коммутации графитизированных кластеров (в рамках одной трещины по кристаллографической плоскости 111) по сравнению с нитевидными и пластинчатыми структурами, в которых проводящие области разделены промежутками разупорядоченной структуры алмаза.

На рис. 7 представлены ВАХ лазерно-индуцированных графитизированных структур № 9–11 (пластинчатые).

ВАХ графитизированных пластинчатых структур № 9–11 линейны во всем исследованном диапазоне напряжений при измерении в прямой полярности. Сопротивление, рассчитанное по наклону ВАХ в диапазоне напряжений от 0 до +60 V для структур № 9, 10, 11, составило (92 ± 4) kΩ, (78 ± 3) kΩ и (58 ± 2) kΩ соответственно. В обратной полярности ВАХ структур № 9 и 10 остаются линейными во всем диапазоне напряжений, а ВАХ структуры № 11 линейна в диапазоне от 0 до −44 V. Асимметрия ВАХ, наблюдаемая для данных структур, на наш взгляд, обусловлена особенностями их изготовления, а именно использованием двухпроходного режима формирования. Такой режим приводит к возникновению пространственного градиента степени взаимной коммутации графитизированных структур от нижней к верхней грани алмаза.

При достижении порогового значения напряжения −44 V (обратная полярность) в случае структуры № 11 наблюдается резкий скачок регистрируемого тока (отмечено черной пунктирной линией на рис. 7, *a*. Подобное поведение ВАХ может быть объяснено в рамках модели токов, ограниченных пространственным зарядом (space-charge-limited current (SCLC)) [56–58]. В данной модели резкое возрастание тока связывают с постепенным заполнением электронных ловушек при интенсивной инжекции носителей заряда, а напряжение −44 V в нашем случае является пороговым значением заполнения этих ловушек (VTFL). В работе [10] для устройства, представляющего собой переход графит–алмаз–графит (графитизированные участки, сформированные в алмазе методом ионной имплантации и разделенные промежутком около 9 μm), были получены типичные ВАХ в условиях SCLC, но с особенностями в режиме высоких токов, которые они связывают с эффектом Пула–Френкеля. В классической модели скачок тока при достижении VTFL может составлять несколько порядков, в нашем случае наблюдается рост тока, регистрируемого при −45 V примерно в 1.6 раз. Данная особенность обусловлена внутренним строением лазерно-индуцированной графитизированной пластинчатой структуры, которая представляет собой перколяционную сеть, сформированную

совокупностью графитизированных участков, и существенно отличается от классических систем металл–диэлектрик–металл, ВАХ которых рассматривается в рамках модели SCLC. Применение двухпроходного режима формирования с использованием высокоапертурного микрообъектива ($NA = 0.7$) приводит к дополнительной модификации проводящей графитизированной структуры и появлению особенностей ВАХ, которые не наблюдаются для структуры № 7, изготовленной в однопроходном режиме (розовая прямая на рис. 6, a). Дальнейшее поведение ВАХ в диапазоне напряжений от -45 до -60 V приближенно описывается линейной зависимостью, с более интенсивным ростом тока по сравнению с диапазоном от 0 до -44 V, который обусловлен снижением характерного сопротивления проводящей структуры (сопротивление около $28-32\,\mathrm{k\Omega}$).

На рис. 7, *b* видно, что при последующем изменении напряжения от -60 до 0 V ВАХ проявляет гистерезисное поведение и остается в режиме низкого сопротивления вплоть до порогового значения напряжения -24 V (сопротивление увеличивается до $35\,\mathrm{k\Omega}$). В оставшемся диапазоне напряжений наблюдается постепенное увеличение сопротивления с 35 до $58\,\mathrm{k\Omega}$. Наблюдение гистерезиса указывает на низкую скорость освобождения электронов из ловушек, что дополнительно подтверждает корректность выбранной интерпретации ВАХ в рамках модели SCLC. ВАХ пластинчатой структуры №11 в обратной полярности демонстрировала полную воспроизводимость при пяти повторных измерениях, что подтверждает отсутствие необратимых изменений в графитизированной структуре.

В работах [24,27] при исследовании ВАХ графитизированных нитей, сформированных с помощью фемтосекундного лазерного воздействия, описано наличие потенциального барьера, зависящего от параметров синтеза структур. В полученных нами графитизированных структурах наличие потенциального барьера не выявлено. Мы связываем это как с оптимизированными режимами формирования графитизированных структур, так и с особенностями реализации трехмерной архитектуры (объемно-поверхностные структуры). После формирования графитизированных структур в объеме алмаза в местах их выхода на поверхность формировались поверхностные графитизированные площадки. Формирование графитизированных площадок сопряжено с удалением слоя материала и, как следствие, устранением приповерхностного потенциально дефектного участка графитизированной структуры, который может приводить к появлению потенциального барьера.

Заключение

В работе представлены результаты формирования объемно-поверхностных графитизированных структур в монокристаллическом CVD-алмазе с помощью методов фемтосекундной и наносекундной локальной лазерной графитизации. Графитизированные структуры в объеме алмаза (сквозные нити и пластинчатые, П-образная структура) были сформированы фемтосекундным лазерным воздействием. Поверхностные графитизированные площадки синтезировались с использованием двухэтапного процесса: фемтосекундное лазерное воздействие на поверхность алмаза с последующим облучением модифицированной области наносекундным лазерным излучением. Поверхностные площадки располагались в местах выхода объемных структур на поверхность алмаза, что позволило реализовать трехмерную архитектуру (объемно-поверхностные графитизированные структуры), необходимую для последующего измерения ВАХ, не прибегая к процессу металлизации поверхности.

Исследование продольного сечения лазерно-индуцированных графитизированных нитей методом СЭМ выявило различия во внутреннем строении нитей, сформированных с использованием микрообъективов с различной числовой апертурой. Наблюдаемые различия обусловлены изменениями плотности энергии в зоне лазерной модификации вследствие изменения диаметра пучка и глубины фокуса, определяющих размеры зоны объемной модификации. Указанные параметры напрямую влияют на характер формирования структурных дефектов и зародышей графитизации, а также на образование связанных графитизированных участков в области лазерной модификации, что приводит к изменению проводимости структур. Исследование графитизированных структур методом КР-спектроскопии позволило установить характер фазовых превращений и выявить выраженные структурные изменения в областях, подвергнутых лазерному воздействию. Показано, что графитизированные области составляют малую часть объема модифицированной области, что указывает на локальный характер проводимости и ограниченный теплоотвод от проводящего участка в объем алмаза. Совокупность результатов, полученных методами СЭМ и КР-спектроскопии, а также анализ ВАХ объемно-поверхностных графитизированных структур позволили сопоставить их электрофизические свойства с особенностями внутреннего строения и корректно интерпретировать механизмы проводимости.

Графитизированные пластинчатые структуры, сформированные в однопроходном режиме, имеют линейные ВАХ. Продемонстрирован линейный характер масштабирования проводимости графитизированных пластинчатых структур и воспроизводимость процесса формирования структур. Увеличение сечения пластинчатых структур при прочих неизменных условиях приводит к снижению сопротивления на коэффициент приблизительно равный отношению площадей их сечений. В случае пластинчатых структур, полученных в двухпроходном режиме, ВАХ обладают выраженной асимметрией, наличие которой мы связываем с появлением пространственного градиента степени взаимной коммутации графитизированных структур от нижней к верхней грани алмаза. Для структуры, сформированной с использованием высокоапертурного микрообъектива, характерным

является появление особенностей ВАХ при измерении в обратной полярности, которые мы интерпретируем в рамках модели токов, ограниченных пространственным зарядом (SCLC). Наблюдение гистерезиса при последующем изменении напряжения от -60 до 0 V указывает на низкую скорость освобождения электронов из ловушек, что дополнительно подтверждает корректность выбранной интерпретации ВАХ.

Несмотря на широко используемый в большинстве работ подход к расчету удельного сопротивления лазерно-индуцированных графитизированных структур, основанный на использовании размеров модифицированной области (визуальная оценка методом оптической микроскопии) для вычисления сечения проводника, такой подход является несостоятельным, поскольку не учитывает неоднородность лазерно-индуцированных графитизированных структур. Фактические значения сечения графитизированных участков, непосредственно обеспечивающих проводимость, могут на порядок отличаться от размеров модифицированной области.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания в области научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта FZUN-2024-0018.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R. Kalish. J. Phys. D: Appl. Phys., **40** (20), 6467 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/20/s22
[2] G. Chiodini, M. Martino. Photoconductivity and Photoconductive Materials: Fundamentals, Techniques and Applications, **2**, 689 (2022). DOI: 10.1002/9781119579182.ch17
[3] S. Koizumi, H. Umezawa, J. Pernot, M. Suzuki. *Power electronics device applications of diamond semiconductors. Woodhead Publishing* (2018)
[4] M.M. Hasan, C. Wang, N. Pala, M. Shur. Nanomaterials, **14** (5), 460 (2024). DOI: 10.3390/nano14050460
[5] A. Oh, B. Caylar, M. Pomorski, T. Wengler. Diamond and Related Materials, **38**, 9 (2013). DOI: 10.1016/j.diamond.2013.06.003
[6] F. Picollo, A. Battiato, E. Carbone, L. Croin, E. Enrico, J. Forneris, S. Gosso, P. Olivero, A. Pasquarelli, V. Carabelli. Sensors, **15** (1), 515 (2014). DOI: 10.3390/s150100515
[7] T. Kononenko, V. Ralchenko, A. Bolshakov, V. Konov, P. Allegrini, M. Pacilli, G. Conte, E. Spiriti. Appl. Phys. A, **114** (2), 297 (2014). DOI: 10.1007/s00339-013-8091-7
[8] M. Gramala, A. Sikora, A. Chudzyńska, L. Gelczuk, F. Dybala, P. Modrzynski, R. Kudrawiec. ACS Appl. Mater. Interfaces, **16** (43), 59528 (2024). DOI: 10.1021/acsami.4c12113
[9] R. Kalish, S. Prawer. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, **106** (1–4), 492 (1995). DOI: 10.1016/0168-583x(95)00758-x
[10] S.D. Tchernij, N. Skukan, F. Picollo, A. Battiato, V. Grilj, G. Amato, L. Boarino, E. Enrico, M. Jakšić, P. Olivero, J. Forneris. Diamond Related Mater., **74**, 125 (2017). DOI: 10.1016/j.diamond.2017.02.019
[11] R. Kalish. Appl. Surface Sci., **117**, 558 (1997). DOI: 10.1016/s0169-4332(97)80142-0
[12] J.F. Prins. Semicond. Sci. Technol., **18** (3), S27 (2003). DOI: 10.1088/0268-1242/18/3/304
[13] V.V. Kononenko, T.V. Kononenko, S.M. Pimenov, M.N. Sinyavskii, V.I. Konov, F. Dausinger. Quant. Electron., **35** (3), 252 (2005). DOI: 10.1070/QE2005v035n03ABEH002900
[14] M. Shimizu, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, T. Yuasa, H. Homma, Y. Minowa, K. Tanaka, K. Miura, K. Hirao. Opt. Express, **17** (1), 46 (2008). DOI: 10.1364/oe.17.000046
[15] T.V. Kononenko, M.S. Komlenok, V.P. Pashinin, S.M. Pimenov, V.I. Konov, M. Neff, V. Romano, W. Lüthy. Diamond and Related Mater., **18** (2-3), 196 (2009). DOI: 10.1016/j.diamond.2008.07.014
[16] A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, K.E. Mikhin, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn. Laser Phys., **20** (8), 1778 (2010). DOI: 10.1134/S1054660X10150028
[17] M. Komlenok, A. Bolshakov, V. Ralchenko, V. Konov, G. Conte, M. Girolami, P. Oliva, S. Salvatori. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **837**, 136 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2016.09.019
[18] M. De Feudis, A.P. Caricato, G. Chiodini, M. Martino, E. Alemanno, G. Maruccio, A.G. Monteduro, P.M. Ossi, R. Perrino, S. Spagnolo. Diamond and Related Mater., **65**, 137 (2016). DOI: 10.1016/j.diamond.2016.03.003
[19] A. Porter, K. Kanxheri, I.L. Paz, A. Oh, L. Servoli, C. Talamonti. Diamond and Related Mater., **133**, 109692 (2023). DOI: 10.1016/j.diamond.2023.109692
[20] T.V. Kononenko, V.I. Konov, S.M. Pimenov, N.M. Rossukanyi, A.I. Rukovishnikov, V. Romano. Diamond and Related Mater., **20** (2), 264 (2011). DOI: 10.1016/j.diamond.2010.12.013
[21] A.A. Khomich, K.K. Ashikkalieva, A.P. Bolshakov, T.V. Kononenko, V.G. Ralchenko, V.I. Konov, P. Oliva, G. Conte, S. Salvatori. Diamond and Related Mater., **90**, 84 (2018). DOI: 10.1016/j.diamond.2018.10.006
[22] M. Reichmann, A. Alexopoulos, M. Artuso, F. Bachmair, L. Bäni, M. Bartosik, J. Beacham, H. Beck, V. Bellini, V. Belyaev, B. Bentele, A. Bes, J-M. Brom, M. Bruzzi, G. Chiodini, D. Chren, V. Cindro, G. Claus, J. Collot, J. Cumalat, A. Dabrowski, R. D'Alessandro, D. Dauvergne, W. de Boer, S. Dick, C. Dorfer, M. Dünser, G. Eigen, V. Eremin, G.T. Forcolin, J. Forneris, L. Gallin-Martel, M.L. Gallin-Martel, K.K. Gan, M. Gastal, C. Giroletti, M. Goffe, J. Goldstein, A. Golubev, A. Gorišek, E. Grigoriev, J. Grosse-Knetter, A. Grummer, B. Gui, M. Guthoff, B. Hiti, D. Hits, M. Hoeferkamp, T. Hofmann, J. Hosselet, J-Y. Hostachy, F. Hügging, C. Hutton, J. Janssen, H. Kagan, K. Kanxheri, G. Kasieczka, R. Kass, M. Kis, G. Kramberger, S. Kuleshov, A. Lacoste, S. Lagomarsino, A. Lo Giudice, I. López Paz, E. Lukosi, C. Maazouzi, I. Mandic, A. Marino, C. Mathieu, M. Menichelli, M. Mikuž, A. Morozzi, J. Moss,

R. Mountain, A. Oh, P. Olivero, D. Passeri, H. Pernegger, R. Perrino, M. Piccini, F. Picollo, M. Pomorski, R. Potenza, A. Quadt, F. Rarbi, A. Re, S. Roe, D.A. Sanz Becerra, M. Scaringella, C.J. Schmidt, E. Schioppa, S. Schnetzer, S. Sciortino, A. Scorzoni, S. Seidel, L. Servoli, D.S. Smith, B. Sopko, V. Sopko, S. Spagnolo, S. Spanier, K. Stenson, R. Stone, B. Stugo, C. Sutera, B. Tannenwald, M. Traeger, W. Trischuk, D. Tromson, M. Truccato, C. Tuve, J. Velthuis, N. Venturi, S. Wagner, R. Wallny, J.C. Wang, J. Weingarten, C. Weiss, N. Wermes, M. Yamouni, M. Zalieckas, M. Zavrtanik, P.S. Salter, M. Chmeissani, S. Grinstein, D.V. Furelos. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **958**, 162675 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2019.162675

[23] K.K. Ashikkalieva, T.V. Kononenko, V.I. Konov. Optics Laser Technol., **107**, 204 (2018). DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.05.040

[24] I. Haughton, I.L. Paz, M. McGowan, A. Oh, A. Porter, P.S. Salter, O. Allegre. Diamond and Related Mater., **111**, 108164 (2021). DOI: 10.1016/j.diamond.2020.108164

[25] K.K. Ashikkalieva, T.V. Kononenko, E.E. Ashkinazi, E.A. Obraztsova, A.A. Mikhutkin, A.A. Timofeev, V.I. Konov. Diamond and Related Mater., **128**, 109243 (2022). DOI: 10.1016/j.diamond.2022.109243

[26] P.S. Salter, M.P. Villar, F. Lloret, D.F. Reyes, M. Krueger, C.S. Henderson, D. Araujo, R.B. Jackman. ACS Nano., **18** (4), 2861 (2024). DOI: 10.1021/acsnano.3c07116

[27] A. Kuriakose, A. Chiappini, B. Sotillo, A. Britel, P. Aprà, F. Picollo, O. Jedrkiewicz. Diamond and Related Mater., **136**, 110034 (2023). DOI: 10.1016/j.diamond.2023.110034

[28] S.M. Pimenov, I.I. Vlasov, A.A. Khomich, B. Neuenschwander, M. Muralt, V. Romano. Appl. Phys. A, **105** (3), 673 (2011). DOI: 10.1007/s00339-011-6645-0

[29] T.V. Kononenko, E.V. Zavedeev, V.V. Kononenko, K.K. Ashikkalieva, V.I. Konov. Appl. Phys. A, **119** (2), 405 (2015). DOI: 10.1007/s00339-015-9109-0

[30] K.K. Ashikkalieva, T.V. Kononenko, E.A. Obraztsova, E.V. Zavedeev, A.A. Khomich, E.E. Ashkinazi, V.I. Konov. Carbon, **102**, 383 (2016). DOI: 10.1016/j.carbon.2016.02.044

[31] K.K. Ashikkalieva, T.V. Kononenko, E.A. Obraztsova, E. Zavedeev, E.E. Ashkinazi, A.A. Mikhutkin, A. Khomich, V.I. Konov. Diamond and Related Mater., **91**, 183 (2019). DOI: 10.1016/j.diamond.2018.11.023

[32] A.O. Kucherik, T.V. Kononenko, V.D. Samyshkin, A.S. Chernikov, A.V. Khar'kova, D.N. Bukharov. ZhTF, **96** (1), 139 (2026). DOI: 10.61011/JTF.2026.01.62044.43-25

[33] V.V. Kononenko. Photonics, **10** (10), 1077 (2023). DOI: 10.3390/photonics10101077

[34] H. Wang, Q. Wen, X. Xu, J. Lu, F. Jiang, C. Cui. Opt. Express, **29** (14), 22714 (2021). DOI: 10.1364/OE.430354

[35] X. Cui, C. Zhang, G. Li, C. Song, W. Qin, T. Wang. Materials, **17** (24), 6200 (2024). DOI: 10.3390/ma17246200

[36] S. Lagomarsino, M. Bellini, C. Corsi, S. Fanetti, F. Gorelli, I. Liontos, G. Parrini, M. Santoro, S. Sciortino. Diamond and Related Mater., **43**, 23 (2014). DOI: 10.1016/j.diamond.2014.01.002

[37] Y. Ogawa, M. Ota, K. Nakamoto, T. Fukaya, M. Russell, T.I. Zohdi, K. Yamazaki, H. Aoyama. CIRP Annals, **65** (1), 245 (2016). DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.081

[38] A. Dychalska, P. Popielarski, W. Franków, K. Fabisiak, K. Paprocki, M. Szybowicz. Mater. Sci.-Pol., **33** (4), 799 (2015). DOI: 10.1515/msp-2015-0067

[39] S. Prawer, R.J. Nemanich. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, **362**, 2537 (2004). DOI: 10.1098/rsta.2004.1451

[40] A.C. Ferrari, J. Robertson. Phys. Rev. B, **61** (20), 14095 (2000). DOI: 10.1103/physrevb.61.14095

[41] A.C. Ferrari, J. Robertson. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, **362**, 2477 (2004). DOI: 10.2307/4488961

[42] G. Pillet, A. Sapelkin, W. Bacsa, M. Monthioux, P. Puech. J. Raman Spectroscopy, **50** (12), 1861 (2019). DOI: 10.1002/jrs.5723

[43] M.S. Komlenok, M.A. Dezhkina, A.A. Khomich, A.S. Orekhov, V.I. Konov. Phys. Status Solidi (b), **256** (9), 1800686 (2019). DOI: 10.1002/pssb.201800686

[44] F. Tuinstra, J.L. Koenig. J. Chem. Phys., **53** (3), 1126 (1970). DOI: 10.1063/1.1674108

[45] S.K. Jerng, D.S. Yu, Y.S. Kim, J. Ryou, S. Hong, C. Kim, S. Yoon, D.K. Efetov, P. Kim, S.H. Chun. J. Phys. Chem. C, **115** (11), 4491 (2011). DOI: 10.1021/jp110650d

[46] F. Mouhamadali, S. Equis, F. Saeidi, J.P. Best, M. Cantoni, P. Hoffmann, K. Wasmer. Opt. Lasers Eng., **126**, 105917 (2020). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.105917

[47] E. López-Honorato, P.J. Meadows, R.A. Shatwell, P. Xiao. Carbon, **48** (3), 881 (2010). DOI: 10.1016/j.carbon.2009.11.010

[48] P. Puech, M. Kandara, G. Paredes et al. C, **5** (4), 69 (2019). DOI: 10.3390/c5040069

[49] I.V. Ershov, N.V. Prutsakova, O.M. Kholodova, A.A. Lavrent'ev, I.V. Mardasova, T.P. Zhdanova. ZhTF, **91** (4), 635 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.04.50627.257-20

[50] T. Dinh, H.P. Phan, D.V. Dao, P. Woodfield, A. Qamar, N.-T. Nguyen. J. Mater. Chem. C, **3** (34), 8776 (2015). DOI: 10.1039/C5TC01650A

[51] S.M. Pimenov, A.A. Khomich, I.I. Vlasov, E.V. Zavedeev, A.V. Khomich, B. Neuenschwander, B. Jäggi, V. Romano. Appl. Phys. A, **116** (2), 545 (2014). DOI: 10.1007/s00339-014-8530-0

[52] M.C. Rossi, S. Salvatori, G. Conte, T. Kononenko, V. Valentini. Opt. Mater., **96**, 109214 (2019). DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109214

[53] B. Wang, J. Zhao, Y. Hu, Y. He, N. Rodionov, J. Han, J. Zhu. Phys. Rev. B, **106** (18), 184303 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevB.106.184303

[54] Z. Shi, E. Tsymbalov, W. Shi, A. Barr, Q. Li, J. Li, X.Q. Chen, M. Dao, S. Suresh, J. Li. Proceed. National Academy Sci., **121** (8), e2313840121 (2024). DOI: 10.1073/pnas.2313840121

[55] R.H. Telling, C.J. Pickard, M.C. Payne, J.E. Field. Phys. Rev. Lett., **84** (22), 5160 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.5160

[56] M.A. Lampert, P. Mark. *Current injection in solids* (1970).

[57] P.B. Thang. J. Korean Phys. Society, **51**, 664 (2007). DOI: 10.3938/jkps.51.664

[58] F.C. Chiu. Adv. Mater. Sci. Eng., **2014** (1), 578168 (2014). DOI: 10.1155/2014/578168