07

Лазерно-индуцированные пластинчатые графитизированные структуры в CVD-алмазе как перспективные радиационные сенсоры

© А.О. Кучерик,[1] Т.В. Кононенко,[2] В.Д. Самышкин,[1] А.С. Черников,[1] А.В. Харькова,[1] Д.Н. Бухаров[1]

[1] Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
600000 Владимир, Россия
[2] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: buharovdn@gmail.com

Поступило в Редакцию 22 марта 2025 г.
В окончательной редакции 14 июля 2025 г.
Принято к публикации 21 июля 2025 г.

Представлен управляемый лазерный метод получения пластинчатых графитизировнных структур в CVD-алмазе, перспективных в качестве сенсорных поверхностей для детектирования заряженных частиц, составляющих радиационное излучение. Предложена модель описания структуры таких пластинчатых структур на основе диффузионного приближения. Описаны возможные пути применения полученных структур в сенсорных устройствах.

Ключевые слова: лазерная графитизация, сенсорные структуры, CVD-алмаз, пластинчатые структуры, моделирование, диффузионное приближение.

DOI: 10.61011/JTF.2026.01.62044.43-25

Введение

Сегодня материалы на основе искусственных CVD-алмазов (Chemical Vapor Deposition) являются перспективной элементной базой современной микроэлектроники [1]. Так, они успешно применяются в качестве сенсорных элементов в различных системах, осуществляющих контроль и регулирование состояния важных технических и промышленных объектов [2–5], а также состояния внешней среды [6,7].

Основное преимущество таких сенсоров — возможность работать в экстремальных условиях: при высокой температуре, давлении, в условиях жестких радиоактивных излучений [8–10], а также их высокое быстродействие и миниатюрность чувствительных элементов, что позволяет получить достаточно сильные детектирующие сигналы.

Одно из успешных направлений использования таких сенсоров — радиационный контроль [11–13].

Основу такого сенсора составляет чувствительная к радиоактивным частицам структура, представляющая собой графитизированную область искусственного алмаза с хорошо развитой поверхностью, позволяющей пройти сквозь нее высокоэнергетическим частицам с последующей генерацией ими свободных носителей, создающих электрический импульс во внешней цепи, позволяющий измерить общий индуцированный заряд, по величине которого можно распознать детектируемое излучение. Далее полученный сигнал может передаваться на усиливающую электрическую схему и элемент, осуществляющий преобразование и нормирование выходного сигнала, позволяющий устранить накопленные ошибки и классифицировать полученные сигналы с использованием различных методов машинного обучения и искусственного интеллекта [14].

Таким образом, схемы датчиков, реализованных на базе графитизированных областей в CVD-алмазах, могут являться хорошей альтернативой сенсорных устройств, реализованных стандартными методами.

1. Лазерная схема синтеза чувствительного элемента датчика на основе графитизированной пластины в CVD-алмазе

Существует ряд методов изготовления сенсоров радиации на основе графитизированных областей [15].

Среди них можно выделить метод локальной лазерной графититизации, отличающийся от стандартных подходов высокой скоростью синтеза, универсальностью, технологичностью и возможностью гибкого управления параметрами [16]. Такой метод позволяет сформировать пластинчатые графитизированные структуры с регулярной поверхностью [15,16] с требуемыми электрофизическими свойствами.

В соответствии с принципиальной схемой локальной лазерной модификации, приведенной на рис. 1, нами были синтезированы пластинчатые графитизированные структуры в образце синтетического CVD-алмаза величиной $5 \times 5 \times 1$ mm, предоставленного ГК „Алмазная долина“ (г. Карабаново, Россия).

На CVD-алмаз воздействовало импульсное излучение длительностью $\tau = 550$ fs от волоконного лазера Huaray с гауссовым профилем пучка на длине волны

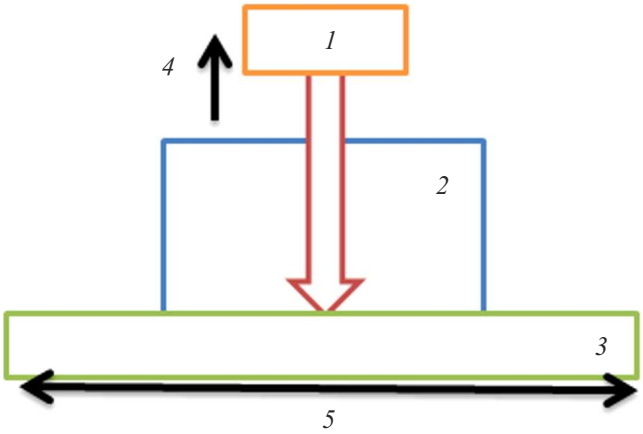


Рис. 1. Схема лазерной модификации искусственного алмаза: *1* — источник лазерного излучения, *2* — CVD-алмаз, *3* — позиционный столик, *4* — направление движения источника лазерного излучения, *5* — направление движения позиционного столика.

$\lambda = 1.03\,\mu$m. Лазерный луч, отраженный от узкополосного зеркала, падал вертикально на асферическую линзу с фокусным расстоянием 4.5 mm. Излучение было сфокусировано в приповерхностном слое нижней грани алмаза (кристаллографическая плоскость (100)). Движение источника вверх, а также горизонтальное смещение (влево-вправо) позиционного столика во время воздействия позволили сформировать пластинчатые графитизированные структуры. Движение фокуса вверх просходило со скоростью $1\,\mu$m/s, скорость движения столика принимала значения от 20 до $200\,\mu$m/s. Частота импульсов лазерного излучения составляла 1 kHz, а энергия в импульсе варьировалась от 0.3 до $2.08\,\mu$J. Для сфокусированного пучка диаметром $1\,\mu$m (по уровню интенсивности $1/e^2$) значения плотности потока энергии составляли от 76 до 530 J/cm^2.

Указанные значения параметров схемы синтеза обеспечили превышение порога оптического пробоя [17] на задней поверхности.

2. Исследование структрурных особенностей графитизированных пластинчатых структур

Варьирование параметров экспериментальной схемы (скорости смещения позиционного столика и энергии в импульсе) позволили синтезировать графитизированные пластинчатые микроструктуры, расширяя набор структур с различными (нитевидными и узкими ленточными) топологическими особенностями в объеме алмаза [17,18]. Таким образом, можно утверждать, что параметры скорости смещения позиционного столика и энергии в импульсе являются управляющими параметрами схемы лазерного синтеза графитизированных пластинчатых областей в CVD-алмазе.

Так, на основании данных, приведенных на рис. 2, можно оценить влияние величины энергии в импульсе на структуру графитизированных пластинчатых областей. Величина лазерной энергии в импульсе E варьировалась от 0.3 до $2.08\,\mu$J, когда значение скорости смещения позиционного столика в горизонтальном направлении $v_x = 100\,\mu$m/s, частота следования лазерных импульсов $\nu = 1$ kHz, а также скорость смещения фокуса вверх $v_z = 1\,\mu$m/s были фиксированы.

Из рис. 2 очевидно, что по мере увеличения энергии в импульсе происходило увеличение степени заполненности графитизированной пластинчатой области. Количество алмазных включений уменьшалось. Такому характеру соответствовало увеличение фрактальной размерности, вычисленной по методу boxcounting [19] в среде MATLAB (рис. 3). Полученная зависимость может аппроксимироваться логарифмической функцией вида

$$D(E) = 0.0693\ln(E) + 1.8048, \qquad (1)$$

полученной методом наименьших квадратов, реализованном в среде MATLAB.

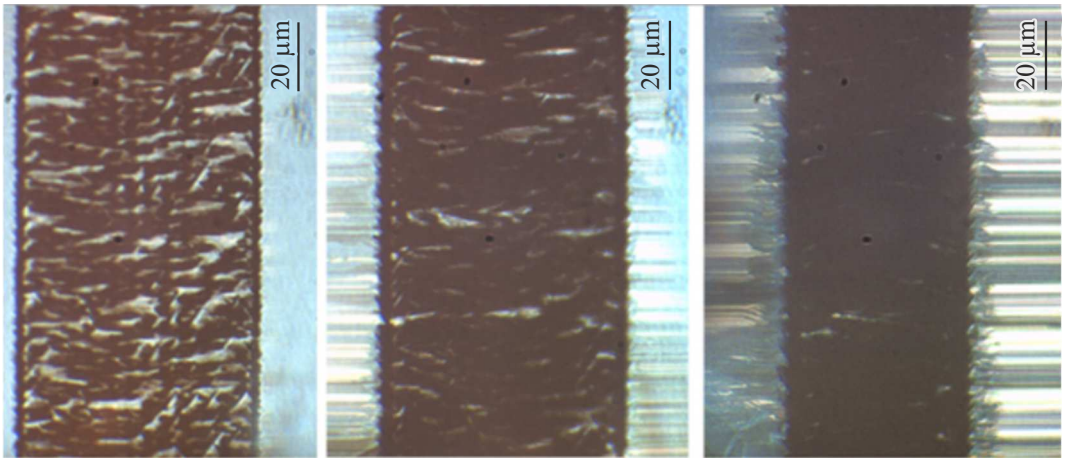
Полученные значения фрактальных размерностей подтверждают увеличение площади синтезированных графитизированных пластинчатых областей, а значит и развитие их поверхности.

Также по мере увеличения энергии в импульсе наблюдалось усиление степени растрескивания алмазной структуры вокруг пластинчатой области. На границах формировались трещины длиной до $10-15\,\mu$m.

Таким образом, для получения хорошо сформированных однородных пластинчатых областей необходимо использовать достаточно мощные импульсы с учетом возможного растрескивания на границах структуры, когда расстояние между соседними образцами должно превосходить две длины трещин.

Увеличение скорости движения позиционного столика оказывает влияние на структуру и топологию пластинчатой структуры (рис. 2, 4). В случае воздействия импульса с относительно высокой энергией из рассматриваемого нами диапазона ($2.08\,\mu$J) с увеличением скорости генерируются образцы с обширными алмазными включениями (рис. 2 — образец *1*, рис. 4, *a*). В случае относительно низкоэнергетических воздействий (0.7, $0.3\,\mu$J) генерируются пластинчатые структуры со множеством мелких алмазных включений, со структурой, которая может быть представлена как множество графитизированных нитей.

Для изучения фазовых превращений, характерных для лазерно-индуцированных графитизированных пластинчатых структур, использовался метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). Измерение КР-спектров проводилось в геометрии обратного рассеяния в режиме двумерного поточечного картирования с помощью модуля КР-спектроскопии зондовой нанолаборатории NTEGRA Spectra (NT-MDT, Россия). Источником излучения являлся лазер с длиной волны 473 nm, фокусировка лазерного луча осуществлялась



(*1*) (*2*) (*3*)

Рис. 2. Оптические изображения нитевидных структур для различных энергий лазерного импульса E: 0.3 (*1*), 0.7 (*2*), 2.08 μJ (*3*).

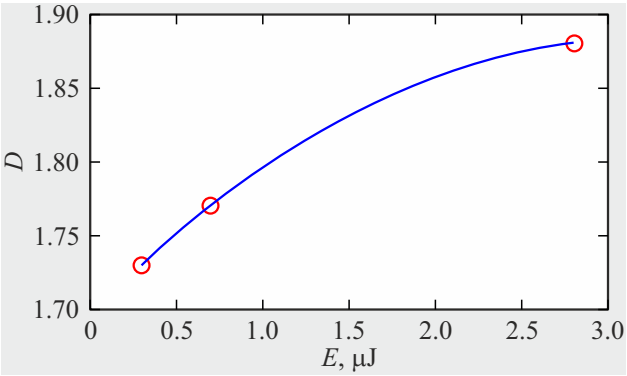


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности D от энергии E в лазерном импульсе для структур, приведенных на рис. 2.

с помощью 100× объектива с числовой апертурой N.A. = 0.7, при измерениях была использована дифракционная решетка 1800 strokes/mm. Область сканирования в режиме картирования представляла собой квадрат со стороной 50 μm, интервал между соседними точками измерения составлял около 0.8 μm, время экспозиции в точке — 1000 μs. На рис. 5 представлены оптические изображения и карты распределения интенсивности КР-сигнала для немодифицированного алмаза и участков графитизированных структур (соответствуют образцам, изображения которых представлены на рис. 4), выходящих на грань алмаза, вблизи которой начинался процесс объемной модификации, а также нормированные по локальному максимуму КР-спектры, соответствующие различным точкам (отмечены цифрами на картах распределения и оптических изображениях) области модификации. Рассматривались как точки, расположенные близко к границе раздела алмаз–графит (точки *1–3* на рис. 5, *a*, точки *1, 2* на рис. 5, *b*), так и находящиеся ближе к центру (точка *3* на рис. 5, *b*, точки *2, 3* на рис. 5, *c*) области графитизации, а также на узких участках с преобладанием алмазного вещества (точка *1* на рис. 5, *c*).

На картах распределения интенсивности КР-сигнала участки, имеющие красный, желтый и зеленый цвета (высокая интенсивность), соответствуют поверхности алмаза, не подвергнутого лазерной модификации. В данном случае в КР-спектрах наблюдается один интенсивный узкий пик при $\sim 1332\,\mathrm{cm}^{-1}$ (на рисунке не представлено), который является типичной колебательной модой кристаллической решетки алмаза [20]. В случае участков графитизированных структур, выходящих на грань алмаза, вблизи которой начинался процесс роста структур в объеме (синий цвет на картах распределения интенсивности), появляются широкие пики при $\sim 1350\,\mathrm{cm}^{-1}$ („disorder“ (D) пик, связанный с разупорядоченностью кристаллической решетки) и $\sim 1580\,\mathrm{cm}^{-1}$ („graphite“ (G) пик, связанный с растяжением C–C-связей в графитоподобных структурах) [21]. При этом пик при $\sim 1332\,\mathrm{cm}^{-1}$ может как сохраняться, так и полностью отсутствовать (цифрами обозначены КР-спектры, снятые в различных точках, отмеченных на картах распределения интенсивности и оптических изображениях). При сравнении КР-спектров, представленных на рис. 5, можно заметить некоторые различия в форме пиков и их интенсивности, что говорит о неоднородном характере формируемых структур, выходящих на грань алмаза, а следовательно, о частичном или полном переходе из sp^3-гибридизации в sp^2-гибридизацию под действием лазерного излучения. Приведенные широкие пики при $1580\,\mathrm{cm}^{-1}$ типичны для упорядоченного графита, что позволяет предположить, что графитовая фаза может состоять из относительно больших кластеров с ограниченным повреждением кристаллической структуры. Отношение интенсивностей для алмазного и графитового пиков может быть использовано для оценки размеров средних размеров углеродного кластера [22]. Сравнение интенсивности пика алмаза в случае модифи-

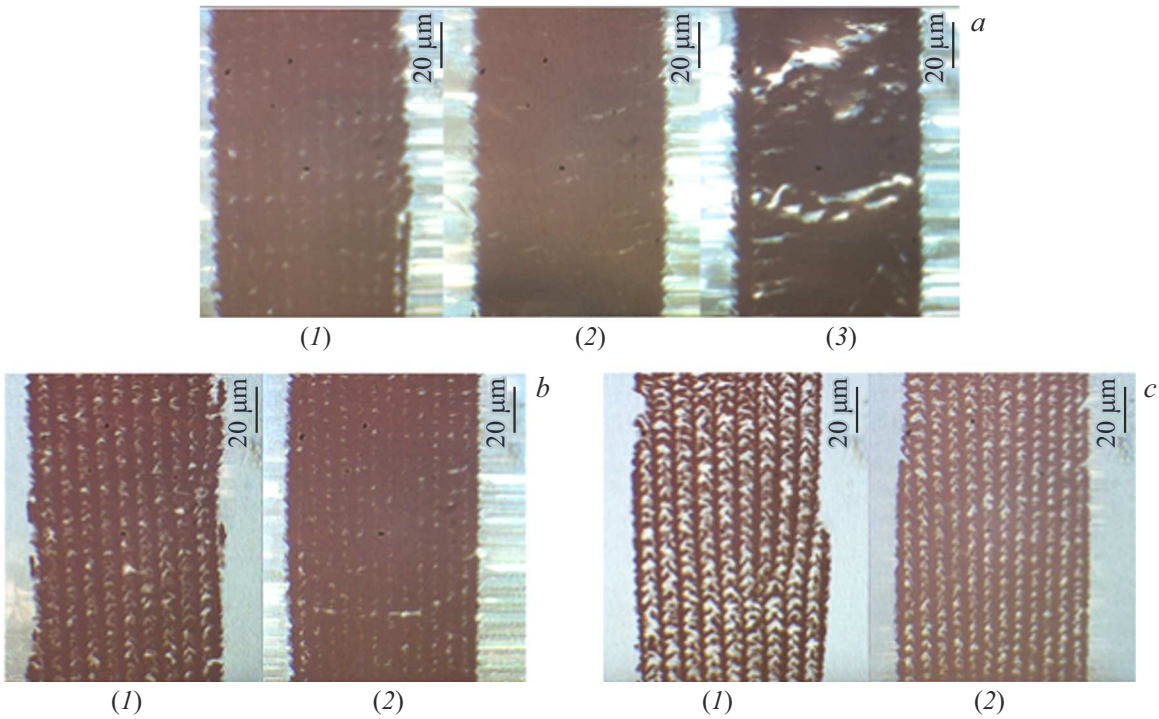


Рис. 4. Оптические изображения пластинчатых структур, полученные при различных E и варьировании скорости фокуса: *a* — $E = 2.08\,\mu$J, $v_x = 20\,\mu$m/s (*1*), $v_x = 50\,\mu$m/s (*2*), $v_x = 200\,\mu$m/s (*3*); *b* — $E = 07\,\mu$J, $v_x = 20\,\mu$m/s (*1*), $v_x = 50\,\mu$m/s (*2*); *c* — $E = 03\,\mu$J, $v_x = 20\,\mu$m/s (*1*), $v_x = 50\,\mu$m/s (*2*).

цированной поверхности и интенсивности сигнала, полученного от исходной поверхности, показало снижение интенсивности пика алмаза примерно на 50 %.

Для всех трех образцов из рис. 5 наблюдались явные пики на $1580\,\text{cm}^{-1}$, которые свидетельствовали о том, что в микромодифицированных областях (точки *2* и *3*) сформировались графитизированные структуры. Кроме того, явные пики на $1320\,\text{cm}^{-1}$ демонстрировали наличие алмазной фазы на границах графитизированных областей. Такая картина предполагала трансформацию связи sp^3 в связь sp^2. Сравнительно низкая интенсивность пиков на $1320\,\text{cm}^{-1}$ демонстрировала наличие смешанной фазы аморфного углерода на участках, близких к границам области лазерного воздействия. Так, на рис. 5, *b*, с для точек *1* приведены случаи малой концентрации смешанного вещества и большей концентрации алмазной составляющей по сравнению с точками *2* и *3* на этих же рисунках.

Таким образом, управление параметрами синтеза (энергией в импульсе E, скоростью движения позиционного столика v_x) позволяет синтезировать образцы с развитой структурой и требуемыми свойствами.

3. Моделирование структуры графитизированных пластинчатых областей

В первом приближении для выбора моделей графитизации применим имитационный феноменологический подход [23], позволяющий описать структуру реального образца, принимая во внимание только основные определяющие процессы.

Исследования динамики процесса лазерной модификации искусственного алмаза во время синтеза графитизированной области демонстрируют, что определяющий процесс — возникновение микротрещин с многочисленными „центрами активации“, которые инициируют распространение термостимулированной волны графитизации в окружающий объем алмаза [24]. Очевидно, что процесс распространения тепловой волны, вызывающей графитизацию областей в алмазе, носит диффузионный характер.

Таким образом, модель первого приближения, описывающая процесс графитизации, в общем случае может быть представлена в рамках уравнения диффузии [25,26] в дискретном случае с учетом тепловых факторов. В связи с этим, моделируемая система, в общем случае, может быть представлена, как решение задачи Коши, где в качестве модельного уравнения рассматривалось двумерное уравнение диффузии для концентраций графитизированного вещества $u(x, y, t)$, дополненное начальным условием — начальной концентрацией графитизированного вещества u:

$$\frac{\partial}{\partial t} u(x, y, t) = \nabla\big(d(x, y, t)\Delta u(x, y, t)\big), \tag{2}$$

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y), \tag{3}$$

где $d(x, y, t)$ — нормированный коэффициент диффузии.

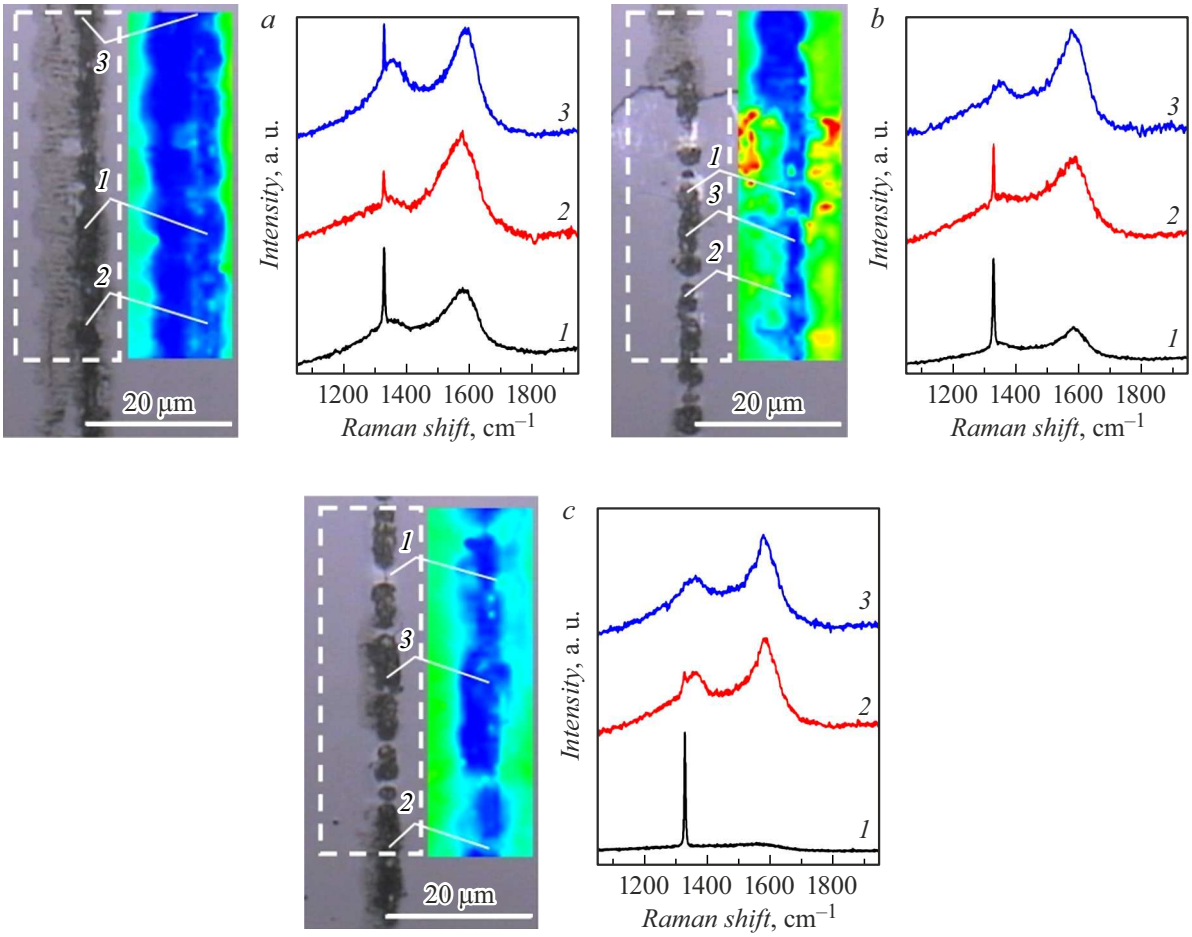


Рис. 5. Оптические изображения и карты распределения интенсивности КР-сигнала для немодифицированного алмаза и участков графитизированных структур, выходящих на грань алмаза (левые фрагменты), нормированные по локальному максимуму КР-спектры (правые фрагменты), соответствующие различным точкам (отмечены цифрами на картах распределения интенсивности КР-сигнала и оптических изображениях) области модификации: образец *1* из рис. 4, *a* (*a*); образец *1* из рис. 4, *b* (*b*); образец *1* из рис. 4, *c* (*c*).

Основным параметром модели, позволившим учесть тепловые факторы, служил нормированный коэффициент диффузии. Уравнение диффузии рассматривалось в дискретном виде на прямоугольной расчетной области с наложенной равномерной сеткой, формировавшей систему ячеек, и решалось с использованием клеточного автомата [27] для окрестности Неймана первого порядка (рис. 6).

Моделирование проводилось в относительных единицах (a.u.). Дискредитированная модельная система представляла собой набор ячеек с двумя состояниями: значением 0 маркировалось свободная ячейка, 1 — графитизированная. Начальным условием служило стартовое распределение уже графитизированных областей, представленное прямой, расположенной на нижней границе расчетной области. Моделирование графитизированной структуры реализовывалось в ходе итерационного процесса смены своего состояния ячейками расчетной области на основе системы из двух правил. Во-первых, текущая ячейка изменяла свое состояние со свободной на графитизированную (с маркера 0 на 1), при условии того, что окружавшие ее ячейки в окрестности Неймана уже ранее стали графитизированными. Во-вторых, смена этого состояние реализовывалась с характерной для рассматриваемой ячейки вероятностью (s). Под этой вероятностью (s) понимался нормированный коэффициент диффузии, зависевший от температуры (T), которой обладала рассматриваемая ячейка расчетной области. Тогда s оценивалось, как

$$s = \gamma T/S, \tag{4}$$

где S — площадь расчетной области, $\gamma = 1/t$ — масштабный коэффициент, t — количество итераций.

Таким образом, соотношение для температуры, зависящее от скорости движения и энергии в импульсе, позволяет произвести соотношение параметров модели и реальной лазерной схемы.

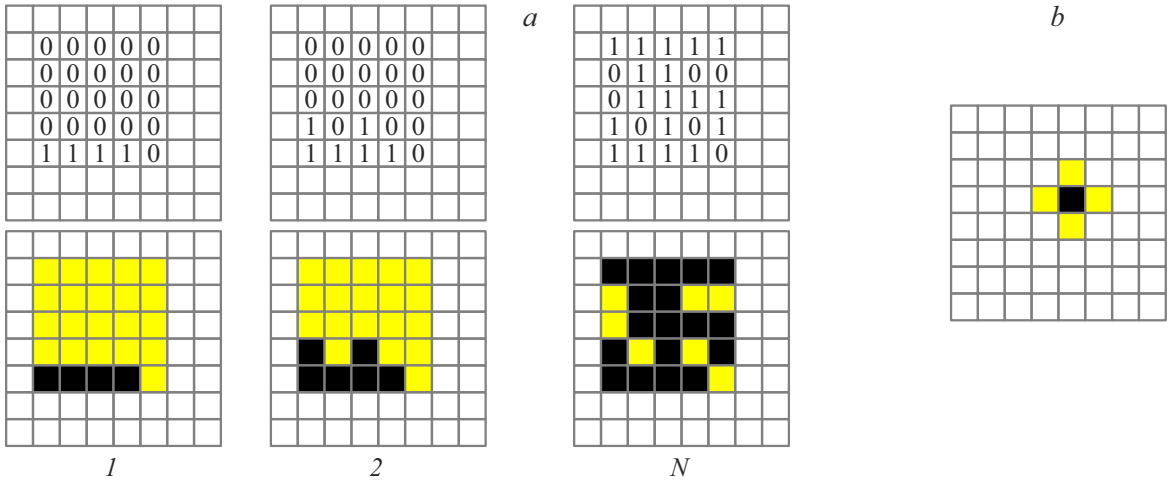


Рис. 6. Модель области графитизации (a). Схема 1-N итерации: сверху — маркированная система: 1 — графитизированная ячейка, 0 — свободная; снизу — соответствующая цветовая маркировка; b — окрестность Неймана.

В первом приближении такое соотношение может быть реализовано, например, на основе решения уравнения теплопроводности Розенталя [28] с учетом средней мощности импульсного источника [29], как

$$s \sim \gamma_1 E \quad \text{и} \quad s \sim \gamma_2 \exp(-\gamma_3 \nu_x), \tag{5}$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ — коэффициенты пропорциональности.

Предложенная модель была реализована в среде MATLAB для различных значений температур в стационарном случае. Так, графитизация реализовывалась для температур 4000 °C–6000 °C [30]. На рис. 7, 8 приведены модели для различных соотношений параметров. На рис. 7 приведен вид сбоку: рис. 7, a, b соответствуют более высокоэнергетическому воздействию для значений энергий из рассматриваемого нами диапазона ($2.08\,\mu$J), рис. 7, c, d — более низкоэнергетическому ($0.3\,\mu$J).

На рис. 8 приведены модели выходов на поверхность графитизированных пластин. В качестве стартовой структуры выбирался набор линий (рис. 8, a) или линия в центре (рис. 8, b).

Переход к абсолютным единицам позволил оценить размеры модельных структур, которые не противоречили величинам реальных образцов.

Для предложенного приближения производилась оценка погрешности моделирования путем соотношения фрактальных размерностей, вычисленных методом boxcounting. Удалось добиться погрешности не более 8 %, что свидетельствовало об адекватности предложенного приближения. Таким образом, соответствие фрактальных размерностей моделей и реальных образцов позволяет надеяться на непротиворечивость их электрофизических и оптических функциональных свойств [31–35].

4. Возможные пути использования лазерно-индуцированных графитизированных структур в CVD-алмазе в качестве сенсорных поверхностей

Полученные пластинчатые структуры могут быть применены в качестве сенсорных элементов для алмазного детектора, основанного на принципе с заглубленными лазерно-индуцированными электродами [36].

По этой схеме может функционировать алмазный детектор ионизирующего излучения и элементарных частиц [37]. В таком детекторе высокоэнергетическая β-частица, попадая на графитизированную сенсорную поверхность, порождает некоторое число свободных носителей, движение которых в электрическом поле формирует электрический импульс.

На основе системы пластинчатых графитизированных структур была реализованная сенсорная поверхность с заглубленными электродами, схема которой приведена на рис. 9.

Заглубленные электроды были сформированы из периодических параллельных друг другу графитизированных пластинчатых структур, выходящих на поверхность алмаза. Расстояние между графитизированными пластинами составляло величину $250\,\mu$m, что позволило устранить возможный эффект растрескивания алмазной структуры и паразитных ответвлений.

Графитизированные структуры были получены при энергии импульса $E = 2.08\,\mu$J и $\nu_x = 20\,\mu$m/s. Указанные значения управляющих параметров позволили получить качественные образцы с регулярной структурой.

Тестирование разработанной сенсорной поверхности проводилось с использованием ^{90}Sr β-источника, генерировавшего электроны с максимальной энергией 2.28 MeV.

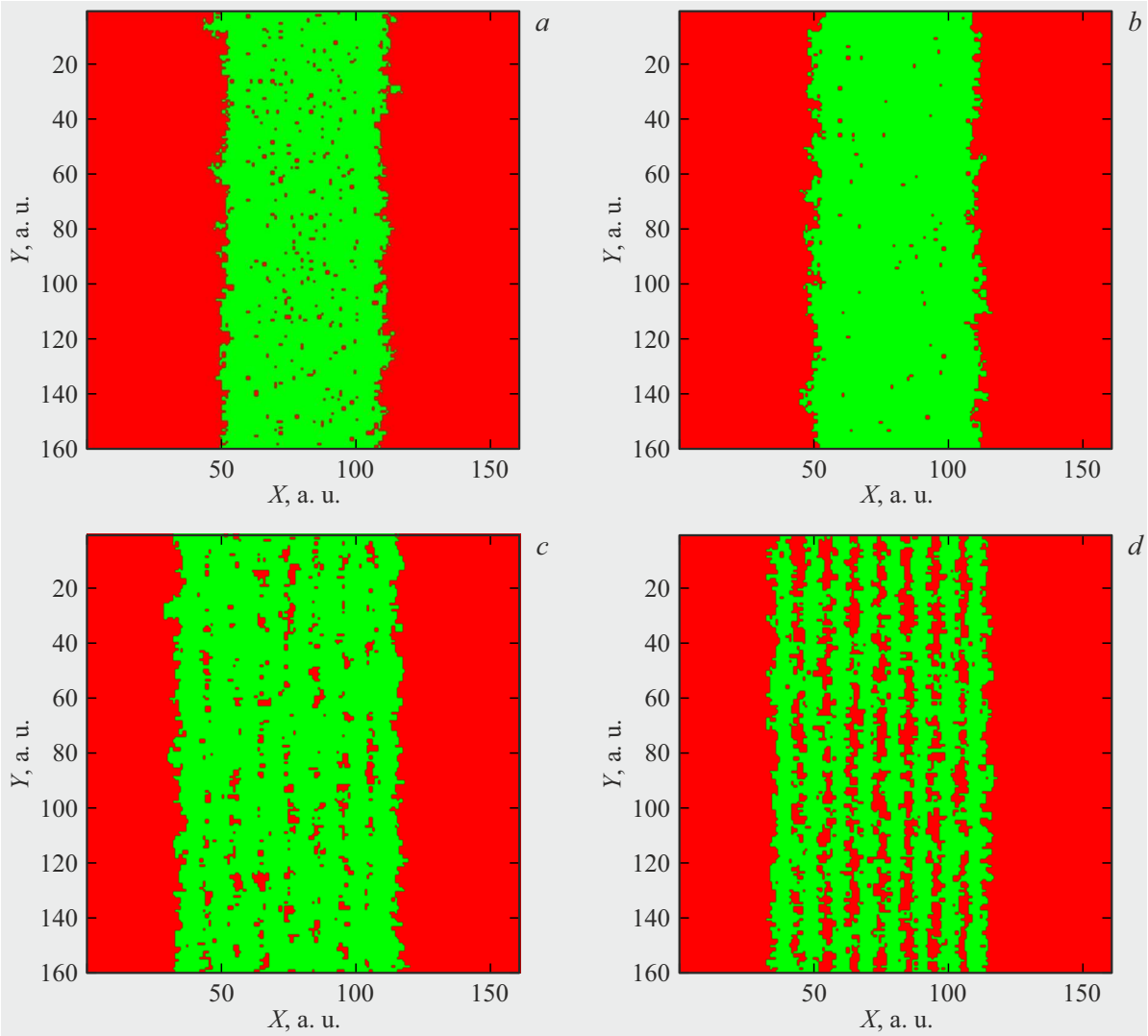


Рис. 7. Модели боковых сечений графитизированных пластинок при варьировании параметров модели и их соотношении с экспериментальными: $T = 5500\,^{\circ}$C, $s = 0.021$, $v_x = 20\,\mu$m/s, $E = 2.08\,\mu$J (a); $T = 4000\,^{\circ}$C, $s = 0.016$, $v_x = 50\,\mu$m/s, $E = 2.08\,\mu$J (b); $T = 4000\,^{\circ}$C, $s = 0.016$, $v_x = 20\,\mu$m/s, $E = 0.3\,\mu$J (c); $T = 4000\,^{\circ}$C, $s = 0.016$, $v_x = 50\,\mu$m/s, $E = 0.3\,\mu$J (d).

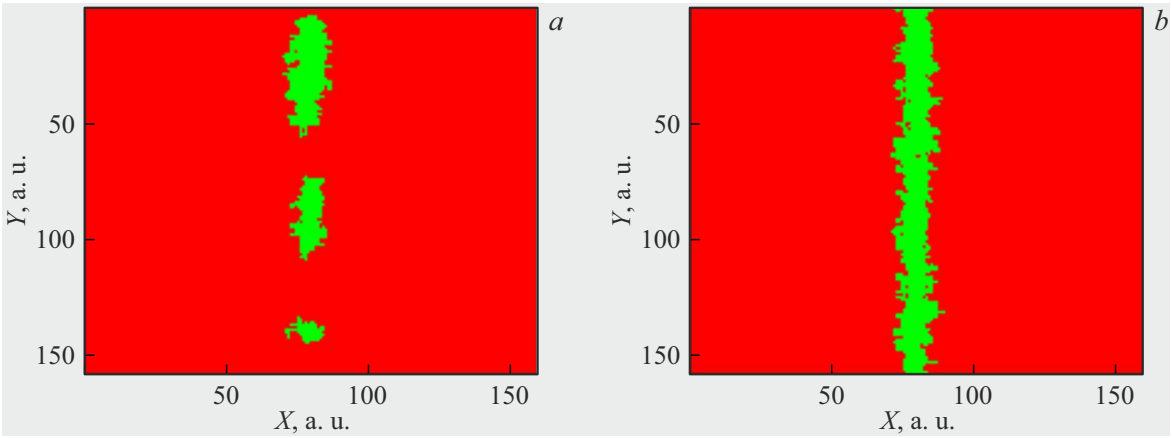


Рис. 8. Модели выхода на поверхность графитизированной пластины: a — для случая низкоэнергетического воздействия, b — для случая высокоэнергетического воздействия.

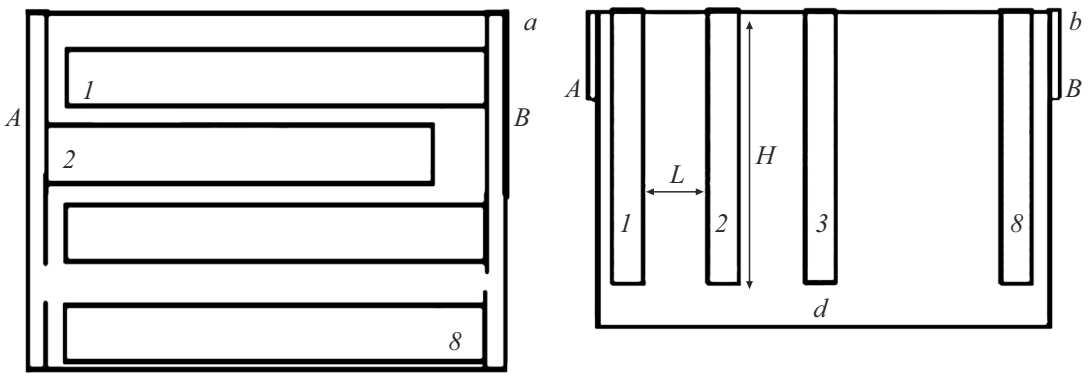


Рис. 9. Принципиальная схема восьмиканальной сенсорной поверхности для детектирования высокоэнергетических частиц: вид сверху (a), вид сбоку: $L = 250\,\mu$m, $H = 300\,\mu$m, $d = 20\,\mu$m (b). К точкам A, B подведено напряжение.

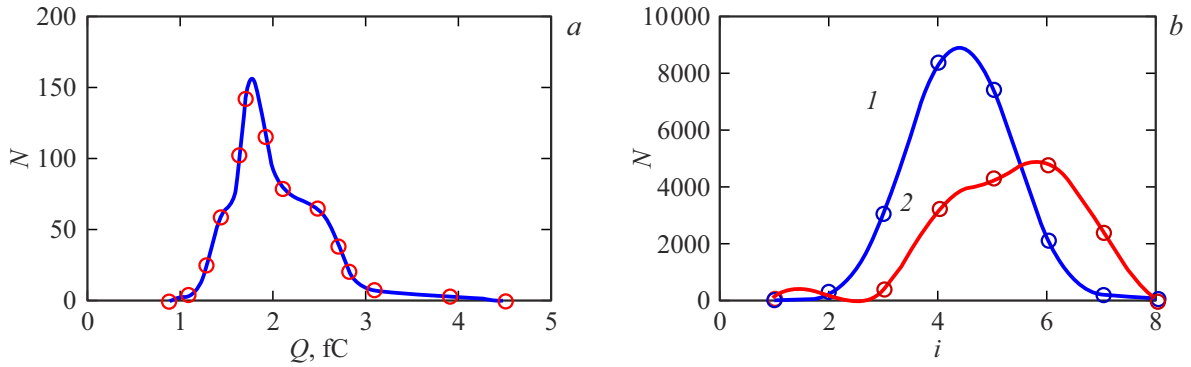


Рис. 10. Тестирование сенсорной поверхности: зависимость количества зафиксированных электрических импульсов от общего электрического заряда, соответствующего данным импульсам (a), интегральное число электрических импульсов для заглубленных электродов в зависимости от угла отклонения траектории β-частиц от вертикального направления: *1* — вертикальное направление, *2* — отклонение на угол 20° (b).

Во время тестирования на нечетные и четные ряды подавался различный потенциал, который создавал пространственно-периодическое электрическое поле. Каждая высокоэнергетическая β-частица, проходящая сквозь сенсорную поверхность, генерировала свободные носители, создававшие электрический импульс во внешней цепи, позволявший измерить общий индуцированный заряд. Поток частиц располагался в центре сенсорной поверхности параллельно заглубленным электродам.

На рис. 10 приведено тестирование сенсорной поверхности. Рис. 10, a демонстрирует количество зафиксированных электрических импульсов в зависимости от заряда, соответствующего данным импульсам. Указанная зависимость получена как средняя величина от 4 и 5 дорожек, аппроксимированная сплайнами в MATLAB.

Полученная зависимость позволяет оценить наиболее вероятное значение собранного заряда, как 1.78 fC, а также эффективность сбора генерируемых свободных носителей заряда, определяемую средним значением собранного заряда (2.25 fC).

В первом приближении эффективность сбора заряда можно оценить величиной порядка 80 %.

На рис. 10, b приведена зависимость интегрального числа электрических импульсов для различных каналов сенсорной структуры от направления падения β-частиц на детектор, аппроксимированная сплайнами в MATLAB.

Так, в случае смещения оси источника наблюдаюсь изменение распределения. Эта особенность открывает перспективы использования сенсорной поверхности с заглубленными электродами в качестве детектора, позволяющего локализовать источник ионизирующих частиц.

Заключение

Лазерное воздействие на образцы искусственных алмазов позволяет формировать управляемым способом графитизированные пластинчатые структуры с достаточно развитой поверхностью, имеющие перспективу применения для различных приложений, в частности, как элементной базы для микро- и наноэлектроники, а также при разработке высокочувствительных сенсоров и детекторов различного предназначения в масштабах наносенсорики.

Предложенная в работе схема синтеза подобных графитизированных алмазных конфигураций нацелена на решение задачи по управляемому способу лазерного индуцирования образцов с пластинками. Варьирование величин основных управляющих параметров используемой лазерной экспериментальной схемы, таких, как скорость смещения позиционного столика, энергия лазерного импульса, а также соотношений между ними, позволяет получать графитизированные структуры в образцах искусственного алмаза с требуемыми топологическими, а значит, и обусловленными ими электрофизическими и оптическими характеристиками.

Предложенные модели структуры графитизированных областей в диффузионном приближении показали хорошую адекватность, и могут быть использованы для планирования экспериментов по управляемому лазерному синтезу образцов графитизированных структуру с требуемыми свойствами. Так, связь параметров модели и схемы синтеза организована через величину температуры нагревания системы, а определенная в ходе моделирования фрактальная размерность позволяет надеяться на сходство функциональных характеристик (оптических или электрофизических, зависящих от фрактальной размерности) модели и прогнозируемого образца. Например, величина электропроводимости, оценка которой зависит от фрактальной размерности чувствительного элемента сенсора, оказывает влияние на его чувствительность. Более того, величина шероховатости чувствительного элемента тоже зависит от фрактальной размерности и определяет возможность прикрепления молекул детектируемого вещества к чувствительной поверхности.

Тестирование прототипа сенсорной поверхности показало, что системы пластинчатых структур могут быть успешно использованы в качестве элементной базы в датчиках радиации.

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] D. Araujo, M. Suzuki, F. Lloret, G. Alba, P. Villar. Materials (Basel), **14** (22), 7081 (2021). DOI: 10.3390/ma14227081

[2] W. Adam, E. Berdermann, P. Bergonzo, W. de Boer, F. Bogani, E. Borchi, A. Brambilla, M. Bruzzi, C. Colledani, J. Conway, P. D'Angelo, W. Dabrowski, P. Delpierre, W. Dulinski, J. Doroshenko, B. van Eijk, A. Fallou, P. Fischer, F. Fizzotti, C. Furetta, K.K. Gan, N. Ghodbane, E. Grigoriev, G. Hallewell, S. Han, F. Hartjes, J. Hrubec, D. Husson, H. Kagan, J. Kaplon, R. Kass, M. Keil, K.T. Knoepfle, T. Koeth, M. Krammer, A. Logiudice, R. Lu, L. Mac Lynne, C. Manfredotti, D. Meier, D. Menichelli, S. Meuser, M. Mishina, L. Moroni, J. Noomen, A. Oh, M. Pernicka, L. Perera, R. Potenza, J.L. Riester, S. Roe, A. Rudge, S. Sala, M. Sampietro, S. Schnetzer, S. Sciortino, H. Stelzer, R. Stone, C. Sutera, W. Trischuk, D. Tromson, C. Tuve, B. Vincenzo, P. Weilhammer, N. Wermes, M. Wetstein, W. Zeuner, M. Zoeller. Eur. Phys. J. C, **33**, 1014 (2004). DOI: 10.1140/epjcd/s2004-03-1798-6

[3] R.S. Sussmann, J.R. Brandon, S.E. Coe, J.L. Collins, A.J. Whitehead. Industrial Diamond Rev., **61**, 271 (2001).

[4] R.S. Sussmann. *CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors* (Wiley, Chichester, 2009)

[5] H. Kagan, A. Alexopoulos, M. Artuso, F. Bachmair, L. Bäni, M. Bartosik, J. Beacham, H. Beck, V. Bellini, V. Belyaev, B. Bentele, P. Bergonzo, 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. Dunser, V. Eremin, G. 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, I. Haughton, B. Hiti, D. Hits, M. Hoeferkamp, T. Hofmann, J. Hosslet, J.-Y. Hostachy, F. Hügging, C. Hutton, J. Janssen, K. Kanxheri, G. Kasieczka, R. Kass, F. Kassel, M. Kis, G. Kramberger, S. Kuleshov, A. Lacoste, S. Lagomarsino, A. Lo Giudice, E. Lukosi, C. Maazouzi, I. Mandic, C. Mathieu, M. Menichelli, M. Mikuž, A. Morozzi, J. Moss, R. Mountain, S. Murphy, M. Muškinja, A. Oh, P. Olivero, D. Passeri, H. Pernegger, R. Perrino, F. Picollo, M. Pomorski, R. Potenza, A. Quadt, A. Re, M. Reichmann, G. Riley, S. Roe, D. Sanz, M. Scaringella, D. Schaefer, C.J. Schmidt, D.S. Smith, S. Schnetzer, S. Sciortino, A. Scorzoni, S. Seidel, L. Servoli, B. Sopko, V. Sopko, S. Spagnolo, S. Spanier, K. Stenson, R. Stone, C. Sutera, A. Taylor, B. Tannenwald, M. Traeger, D. Tromson, W. Trischuk, C. Tuve, J. Velthuis, N. Venturi, E. Vittone, S. Wagner, R. Wallny, J.C. Wang, J. Weingarten, C. Weiss, T. Wengler, N. Wermes, M. Yamouni, M. Zavrtanik. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **924**, 297 (2019). DOI: 10.1016/j.nima.2018.06.009

[6] Y. Xiaoxi, F. Yang, H. Li. *Recent Progress and Development on Nanostructures* (IntechOpen, 2024), DOI: 10.5772/intechopen.1006609

[7] B. Dischler, C. Wild. *Low-Pressure Synthetic Diamond. Springer Series in Materials Processing* (Springer, Berlin, Heidelberg, 1998), DOI: 10.1007/978-3-642-71992-9_13

[8] G.K. Samudrala, S.L. Moore, Y.K. Vohra. Materials, **8** (5), 2054 (2015). DOI: 10.3390/ma8052054

[9] A. Metcalfe, G. Fern, George, P. Hobson, P. Smith, D. Lefeuvre, G. Saenger. J. Instrumentation, **12**, 01066 (2017). DOI: 10.1088/1748-0221/12/01/C01066

[10] C. Ahl, T. Beck, E. Lukosi. Appl. Phys. Lett., **119** (25), 252103 (2021). DOI: 10.1063/5.0067578

[11] P. Bergonzo, A. Brambilla, D. Tromson, C. Mer, B. Guizard, F. Foulon, V. Amosov. Diamond Related Mater., **10** (3–7), 631 (2001). DOI: 10.1016/S0925-9635(00)00554-9

[12] А.В. Красильников, Н.Б. Родионов, А.П. Большаков, В.Г. Ральченко, С.К. Вартапетов, Ю.Е. Сизов, С.А. Мещанинов, А.Г. Трапезников, В.П. Родионова, В.Н. Амосов, Р.А. Хмельницкий, А.Н. Кириченко. ЖТФ, **92** (4), 596 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.04.52247.226-21
[13] T. Shimaoka, S. Koizumi, J.H. Kaneko. Functional Diamond, **1** (1), 205 (2021). DOI: 10.1080/26941112.2021.2017758
[14] A. Kucherik, A. Kumar, A. Abramov, V. Samyshkin, A. Osipov, I. Bordanov, S. Shchanikov, M. Kumar. Nanotechnology, **36** (7), 072002 (2025). DOI: 10.1088/1361-6528/ad947c
[15] W. Adam, C. Bauer, E. Berdermann, P. Bergonzo, F. Bogani, E. Borchi, A. Brambilla, M. Bruzzi, C. Colledani, J. Conway, W. Dabrowski, P. Delpierre, A. Deneuville, W. Dulinski, B. van Eijk, A. Fallou, F. Fizzotti, F. Foulon, M. Friedl, K.K. Gan, E. Gheeraert, E. Grigoriev, G. Hallewell, R. Hall-Wilton, S. Han, F. Hartjes, J. Hrubec, D. Husson, H. Kagan, D. Kania, J. Kaplon, C. Karl, R. Kass, K.T. Knöpfle, M. Krammer, A. Logiudice, R. Lu, P.F. Manfredi, C. Manfredotti, R.D. Marshall, D. Meier, M. Mishina, A. Oh, L.S. Pan, V.G. Palmieri, M. Pernicka, A. Peitz, S. Pirollo, P. Polesello, K. Pretzl, V. Re, J.L. Riester, S. Roe, D. Roff, A. Rudge, S. Schnetzer, S. Sciortino, V. Speziali, H. Stelzer, R. Stone, R.J. Tapper, R. Tesarek, G.B. Thomson, M. Trawick, W. Trischuk, E. Vittone, A.M. Walsh, R. Wedenig, P. Weilhammer, H. Ziock, M. Zoeller. Accelerators, Spectrometers, Detectors Associated Equipment, **434** (1), 131 (1999). DOI: 10.1016/S0168-9002(99)00447-7
[16] C.E. Nebel. Functional Diamond, **3** (1), 2201592 (2023). DOI: 10.1080/26941112.2023.2201592
[17] T.V. Kononenko, K.K. Ashikkalieva, V.G. Ral'chenko, V.V. Kononenko, V.I. Konov. Diamond Related Mater., **142**, 110812 (2024).
[18] V.V. Kononenko, E.V. Zavedeev, T.V. Kononenko, V.V. Bukin, V.I. Konov. Diamond. Photonics, **10** (1), 43 (2023). DOI: 10.3390/photonics10010043
[19] Y. Jundong, S. Yuanyuan, C. Shanshan, H. Xiaopeng. J. Appl. Analysis Computation, **6** (4), 1114 (2016).
[20] S. Prawer, R.J. Nemanich. Philosophical Transactions Royal Society of London. Series A: Mathem., Phys. Eng. Sci., **362** (1824), 2537 (2004).
[21] A. Dychalska, P. Popielarski, W. Franków, K. Fabisiak, K. Paprocki, M. Szybowicz. Mater. Sci.-Pol., **33** (4), 799 (2015).
[22] A.A. Khomich, V. Kononenko, O. Kudryavtsev, E. Zavedeev, A.V. Khomich. Nanomaterials, **13**, 162 (2023). DOI: 10.3390/nano13010162
[23] G. Stiesch. *Modeling Engine Spray and Combustion Processes. Heat and Mass Transfer* (Springer, Berlin, Heidelberg, 2003)
[24] T.V. Kononenko, E.V. Zavedeev, V.V. Kononenko, K.K. Ashikkalieva, V.I. Konov. Appl. Phys. A, **119**, 405 (2015). DOI: 10.1007/s00339-015-9109-0
[25] А.А. Евсеев, О.И. Нечаева. ПДМ, **4**, 72 (2009).
[26] Д.Н. Бухаров, Т.В. Кононенко, А.О. Кучерик. Письма в ЖТФ, **51** (1), 26 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.01.59516.19964
[27] D.A. Zaitsev. Theoretical Computer Sci., **666**, 21 (2017). DOI: 10.1016/j.tcs.2016.11.002
[28] M. Moda, A. Chiocca, G. Macoretta, B.D. Monelli, L. Bertini. Materials Design, **223**, 110991 (2022). DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110991
[29] B. Bhattacharyya, B. Doloi. *Modern Machining Technology Advanced, Hybrid, Micro Machining and Super Finishing Technology* (London, Academic Press, 2020), DOI: 10.1016/B978-0-12-812894-7.00004-9
[30] K.K. Ashikkalieva, T.V. Kononenko, V.I. Konov. Optics Laser Technol., **107**, 204 (2018). DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.05.040
[31] D.N. Bukharov, A.O. Kucherik, S.M. Arakelian. J. Adv. Mater. Technol., **8** (3), 227 (2023). DOI: 10.17277/jamt.2023.03.pp.227-251
[32] D.N. Bukharov, S.M. Arakelyan, A.O. Kucherik, O.A. Novikova, V.D. Samyshkin. J. Phys.: Conf. Ser., **1439**, 012050 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1439/1/012050
[33] T. Yang, F. Tian, J.A. Covington, F. Xu, Y. Xu, A. Jiang, J. Qian, R. Liu, Z. Wang, Y. Huang. Chemosensors, **7**, 31 (2019). DOI: 10.3390/chemosensors7030031
[34] A. Jiang, F. Tian, J.A. Covington, M. Jiang, Z. Wu. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, **71**, 9506207 (2022). DOI: 10.1109/TIM.2022.3175026
[35] F. Tian, A. Jiang, T. Yang, J. Qian, R. Liu, M. Jianga. IEEE Sensors J., **21**, 13 (2021). DOI: 10.1109/JSEN.2021.3072621
[36] S. Salvatori, M.C. Rossi, G. Conte, T. Kononenko, M. Komlenok, A. Khomich, V. Ralchenko, V. Konov, G. Provatas, M. Jaksic. IEEE Sensors J., **19** (24), 1908 (2019). DOI: 10.1109/JSEN.2019.2939618
[37] S.O. Kasap. *Photoconductivity and Photoconductive Material* (Wiley, Chichester, 2022)