

13 Анализ поверхности поликристаллического CVD-алмаза после статической термохимической обработки

© А.В. Лебедеко,^{1,2} И.В. Клепиков,^{1,2,3} Е.Н. Куликов,⁴ А.В. Дерябкин,⁴ Ю.Ю. Федоров,⁴ В.А. Шепелев,² А.А. Алтухов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия

²Российский технологический университет Московский институт радиотехники,
электроники и автоматики,
125993 Москва, Россия

³ООО „Научно-производственный комплекс „Алмаз“,
197706 Сестрорецк, Санкт-Петербург, Россия

⁴АО „Научно-производственное предприятие „Исток“ им. Шокина“,
141190 Фрязино, Московская обл., Россия
e-mail: a.lebedenko@spbu.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2024 г.

В окончательной редакции 18 октября 2024 г.

Принято к публикации 18 октября 2024 г.

Представлен комплексный анализ поверхности поликристаллического CVD-алмаза после его статической термохимической обработки. Исследование сфокусировано на тонких изменениях в морфологии и шероховатости поверхности алмаза до и после обработки. Для проведения анализа использованы методы оптической, атомно-силовой и растровой электронной микроскопии, что позволило детально охарактеризовать как макроскопические, так и микроскопические изменения. Результаты показали снижение параметров шероховатости поверхности, существенное изменение рельефа и скульптур на поверхности алмаза, что свидетельствует об эффективности термохимической обработки такого сложного материала, как поликристаллический алмаз.

Ключевые слова: CVD-алмаз, поликристаллический алмаз, поликристалл, шероховатость поверхности, метод термохимической обработки, термохимическая обработка.

DOI: 10.61011/JTF.2025.03.59867.322-24

Введение

Поликристаллический алмаз (PCD) представляет собой материал с очень перспективным сочетанием физических свойств, размера (диаметра и толщины пластин для использования на существующем промышленном оборудовании), и стоимости. Он находит применение в полупроводниковых приборных структурах, оптических компонентах, теплоотводящих и износостойких покрытиях [1–7]. Необходимость обработки и полировки пластин PCD большого диаметра (до 100 mm), производимого методом CVD с целью улучшения качества поверхности, становится важным этапом его подготовки для эффективного использования в качестве теплоотводов. Процесс последующей тонкой полировки также очень важен, поскольку он уменьшает шероховатость поверхности, что, в свою очередь, влияет на сопротивление теплового контакта при установке радиатора на электронные устройства [8–10]. Хотя теплопроводность является ключевым свойством для теплоотводов, анизотропия теплопроводности PCD также играет важную роль. Наличие неоднородности тепловых свойств еще раз подчеркивают важность понимания и оптимизации

микроструктуры при подготовке этих материалов для использования в системах терморегулирования [10].

Стандартная механическая шлифовка/полировка PCD зачастую может привести к повреждению и загрязнению поверхности, скорость удаления материала низкая (0.1–0.5 $\mu\text{m/h}$) и позволяет достичь микрошероховатости поверхности около 40 nm [11–13]. Также существуют методы финишной полировки, например, новый метод полировки с использованием ультрафиолетового (УФ) облучения, позволяющий достичь шероховатости поверхности 0.2 nm при большей скорости удаления материала [14]. Использование фиксированных абразивных инструментов с механохимическими алмазными зёрнами для шлифовки и полировки PCD позволяет достичь зеркальных поверхностей (до 40 nm), особенно при применении SiO₂ и проведении процесса в условиях высокой температуры [15]. Также были проведены попытки „сухой“ полировки, при которой основной процесс основан на термохимических реакциях, таких, как графитизация и окисление (итоговая шероховатость 40–60 nm) [16]. В работе [17] показана эффективность метода, сочетающего диффузионную обработку и фрезерование с использованием свободного абразива. Другие методы включают использование различных полиро-

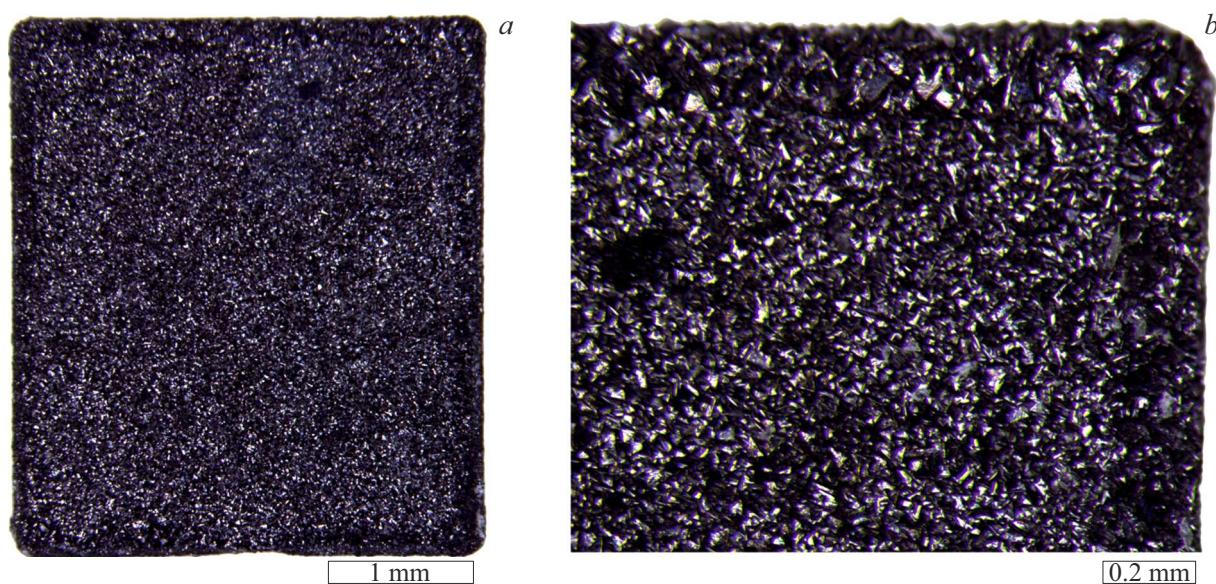


Рис. 1. Изображения с оптического микроскопа PCD до ТХО: *a* — общее изображение образца № 2; *b* — увеличенный угловой фрагмент участка образца № 2.

важных паст и дисков [18]. Также была предложена лазерная обработка: низкоэнергетический волоконный лазер повышает твердость и сохраняет шероховатость поверхности, вызывая пластическую деформацию зерен и изменяя площадь межкристаллитных границ [19,20]. Обработка PCD включает в себя различные методы, каждый из которых имеет свои достоинства и выбирается в зависимости от начальных параметров шероховатости поверхности, конкретных требований к финишной чистоте поверхности и природы обрабатываемого PCD-материала. Методы комбинируются, совершенствуются и дополняют друг друга при необходимости.

Термохимическая обработка (ТХО) является одним из перспективных методов обработки поликристалла CVD-алмаза. Этот метод направлен на улучшение механических свойств поверхности алмаза за счет устранения внутренних напряжений и дефектов [21]. Впервые он был применен к CVD-алмазным пленкам в начале 1990-х годов [22]. Процесс заключается в прижатии алмаза к пластине каталитического металла (например, железа, никеля, марганца или молибдена), нагретой до 730–900°C. Алмазный образец при этом может находиться в движении относительно пластины при невысоких скоростях и давлении, а может пребывать в статическом состоянии. Металл, соприкасающийся с алмазом при высокой температуре, действует как катализатор, снижая энергию активации для превращения алмаза в неалмазный углерод. Затем неалмазный углерод удаляется с поверхности алмаза за счет диффузии в металлическую пластину. Скорость трансформации и диффузии, а также скорость полирования увеличиваются экспоненциально с повышением температуры, контактного давления и амплитуды поперечных колебаний [23]. Низкие температуры делают процесс неэффективным, а

высокие температуры, особенно в присутствии кислорода, могут привести к травлению и появлению углублений [24]. ТХО при 1000–1100°C позволила достигнуть итоговой шероховатости около 0.8 μm , при этом скорость шлифования составила от 20 $\mu\text{m}/\text{h}$ до 3 mm/h [25]. Особой разновидностью ТХО и полировки, обеспечивающей более высокую скорость травления, является термотравление, при котором железо заменяется элементами с более высокой растворимостью углерода [26]. При температуре 900°C в атмосфере аргона углерод диффундирует в марганцевый порошок, фольгу или узорчатую тонкую пленку, которые находятся в контакте с поверхностью алмаза. При этом выбор металла имеет ключевое значение. Например, использование чистого Се при температуре 700°C демонстрирует очень высокую скорость удаления материала (более 25 $\mu\text{m}/\text{h}$), хотя конечная средняя шероховатость поверхности остается на уровне микрометров [27,28].

В одной из работ исследователи провели тест сухого шлифования поликристаллического алмаза с использованием PCD-диска в качестве шлифовального инструмента. Они обнаружили, что термохимические реакции могут влиять на шероховатость шлифованной поверхности: увеличение электроотрицательности привело к более шероховатой поверхности из-за ослабления ковалентных связей в алмазе [29]. Однако более подробная информация о начальных размерах кристаллитов и значениях шероховатости после шлифования в данном контексте не приводится. Другой коллектив авторов представил технологию обработки алмазных подложек с использованием железной пластины и раствора пероксида водорода (H_2O_2). Этот метод использует гидроксильные радикалы (ОН-радикалы), образующиеся при разложении H_2O_2 на поверхности железа, для дости-

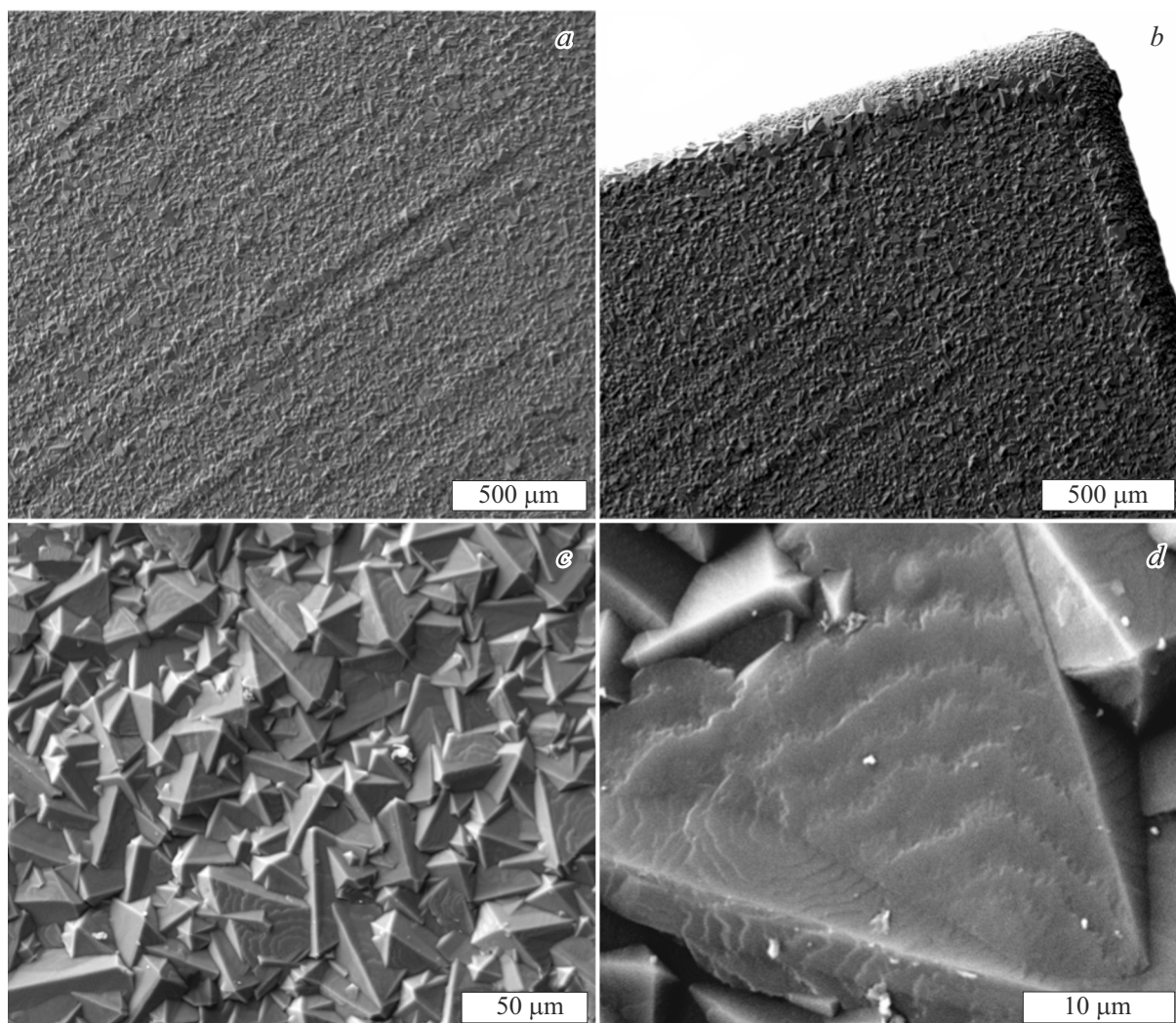


Рис. 2. Изображения PCD CVD до TXO в обратно-рассеянных электронах: *a* — фрагмент центрального участка образца № 2, *b* — увеличенный фрагмент края образца № 2, *c* — увеличенный фрагмент центрального участка образца № 2, *d* — пластинчатое концентрически-зональное строение октаэдрической грани кристаллита образца № 2.

жения атомарно гладкой алмазной поверхности [30]. Существует метод термохимической постобработки, направленный на улучшение механических свойств механически полированного кристалла алмаза. Он позволяет устранить внутренние напряжения и дефекты, внесенные механическим воздействием, в нарушенном поверхностном слое материала [31]. Кроме того, качество PCD-структур, зависящее от концентрации дефектов, таких, как границы зерен и примеси, является ключевым фактором, определяющим эффективность и результат шлифовки [31–36].

В настоящей работе методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) проанализирована морфология поверхности трех образцов CVD PCD размером $\sim 5 \times 5$ mm до и после TXO в статическом режиме. Цель настоящей работы заключалась в детальной характеристике качества исходных и полученных поверхностей при проведении данного вида обработки. Подбор оптимальных па-

раметров шероховатости поверхности теплоотводящих PCD-элементов и их обработки является актуальной прикладной задачей.

1. Объекты и методы исследования

В настоящей работе исследовалось три образца поликристаллического CVD-алмаза (характерных для производства теплоотводящих элементов конструкции сборок полупроводниковых приборов), предоставленные АО „НПП „Исток“ им. Шокина“, являющихся типичными примерами. Образец № 2 является примером поверхности пластины необработанного поликристаллического алмаза (размеры образца $3.31 \times 3.78 \times 0.21$ mm). Образцы № 1 и № 3 изъяты из технологического процесса группового изготовления теплоотводящих элементов конструкции сборок полупроводниковых приборов, изготовлены из одной пластины поликристал-

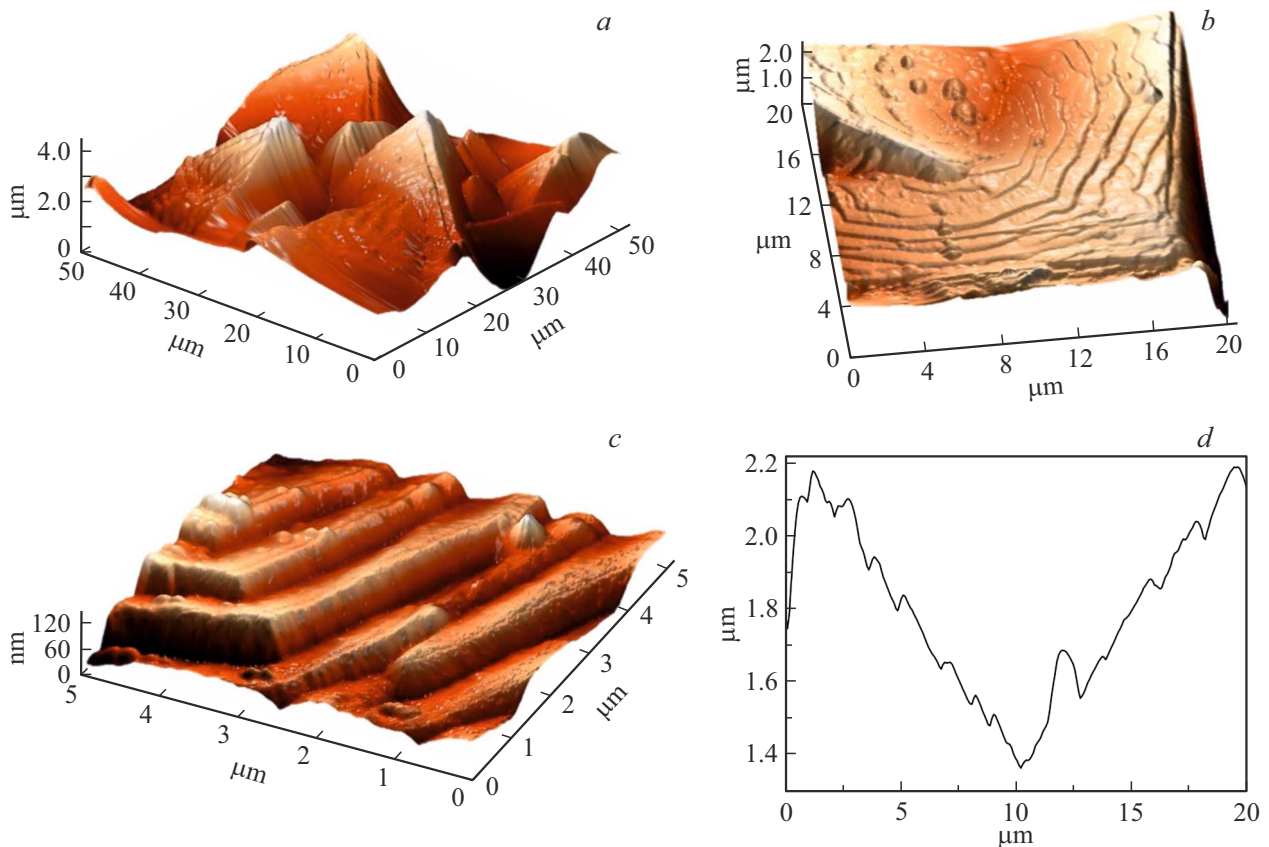


Рис. 3. Изображения с атомно-силового микроскопа PCD CVD до TXO: *a* — 3D-изображение октаэдрических кристаллитов с центрального участка образца № 2; *b* — 3D-изображение пластинчато-ступенчатого концентрически-зонального строения октаэдрической грани кристаллита образца № 2; *c* — 3D-изображение фрагмента октаэдрической грани кристаллита; *d* — продольный профиль участка *b*.

лического CVD-алмаза и подвергнуты TXO, применяющейся в АО „НПП „Исток“ им. Шокина“. Размеры образцов № 1 и № 3 составляют $9.57 \times 5.25 \times 0.19$ и $3.05 \times 3.49 \times 0.10$ mm соответственно. TXO проводилась в статическом режиме в водородной печи при температуре около 1100°C на пластине никеля 9 класса чистоты. Данная методика обработки позволяет получить шероховатость поверхности поликристаллического CVD-алмаза менее $1\ \mu\text{m}$, скорость удаления материала составляет от $30\text{--}50\ \mu\text{m/h}$ [37]. Данный вариант TXO является разновидностью шлифовки, т.е. грубой операции подготовки поверхности. Помимо снижения шероховатости поверхности, он позволяет существенно выравнивать плоскостность поверхности образцов поликристаллического алмаза. Фотодокументация образцов проводилась на стереомикроскопе Leica M205 C. Для детального изучения особенностей поверхности поликристаллов использовался многофункциональный растровый электронный микроскоп с интегрированной системой фокусированного ионного пучка Quanta 200 3D. Изучение структурных особенностей поверхности образцов проводилось на атомно-силовом микроскопе — зондовой нанолaborатории INTEGRA-AURA. Исследо-

вания проведены в ресурсном центре „Микроскопии и микроанализа“ Санкт-Петербургского государственного университета.

2. Результаты

2.1. Поликристаллический алмаз до TXO

Морфология выращенного CVD PCD до TXO (образец № 2) представлена сложным агрегатом, состоящим из кристаллитов октаэдрического габитуса размером до $0.05\ \text{mm}$ (рис. 1, *a*). На поверхности образца наблюдается неравномерное распределение кристаллитов: в центре пластины имеется небольшое понижение рельефа изометричной формы. Присутствуют также вытянутые параллельные зоны возвышающихся кристаллитов. По периферии пластины наблюдаются более крупные октаэдрические кристаллиты размером до $0.1\ \text{mm}$, образующие небольшую ступень (рис. 1, *b*).

В обратно-рассеянных электронах отчетливо видно, что кристаллиты образца № 2 имеют острореберный октаэдрический габитус и размеры $10\text{--}50\ \mu\text{m}$.

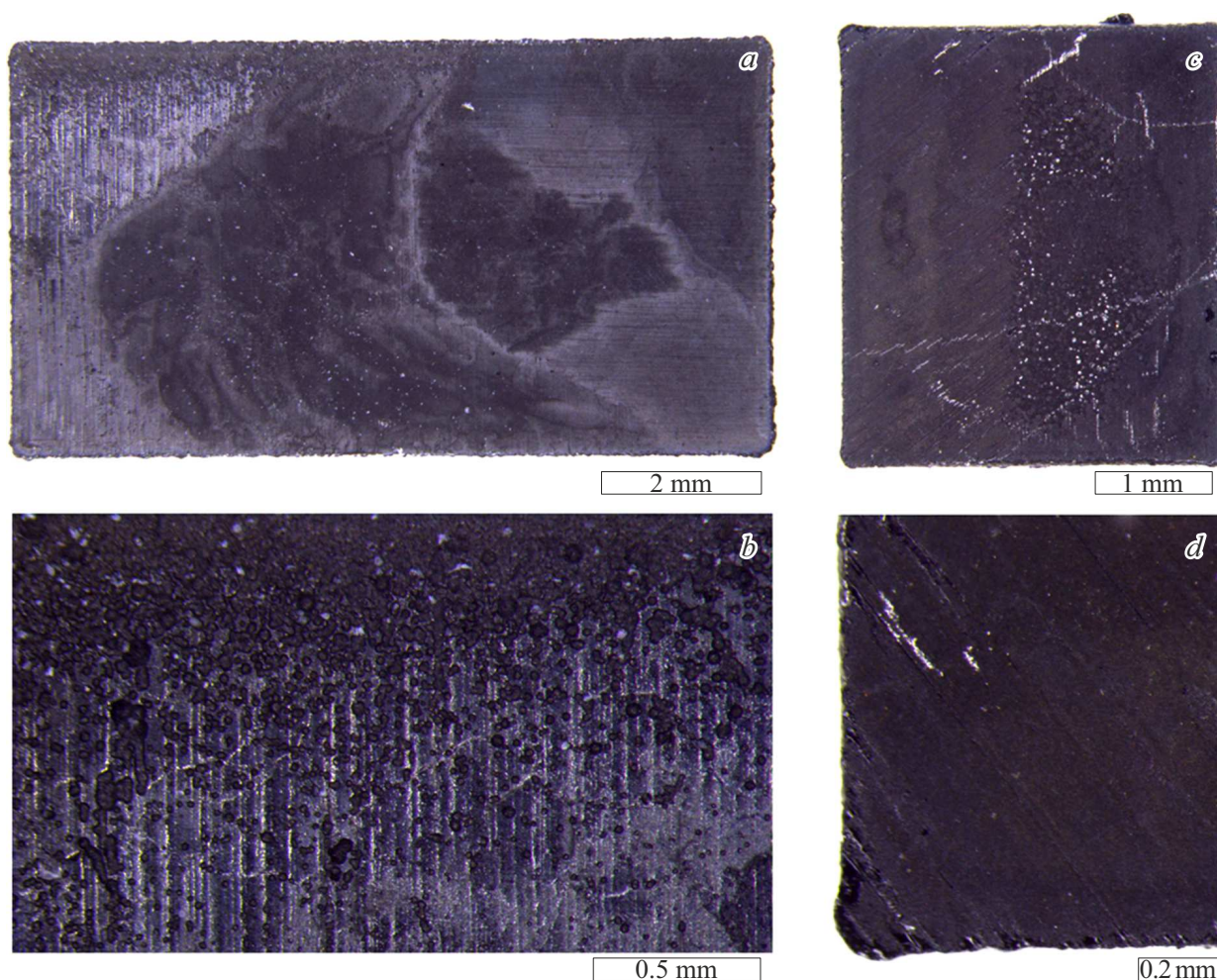


Рис. 4. Изображения с оптического микроскопа PCD CVD после ТХО: *a* — общее изображение образца № 1; *b* — увеличенный фрагмент участка образца № 1; *c* — общее изображение образца № 3; *d* — увеличенный фрагмент участка образца № 3.

При этом наиболее четко выделяются параллельные возвышающиеся вытянутые зоны (рис. 2, *a*). Вдоль контура пластины имеются возвышения (рис. 2, *b*), на торцах образца кристаллиты существенно более мелкие (до $10\ \mu\text{m}$). При крупном увеличении выделяются двойниковые фрагменты — двойники прорастания (рис. 2, *c, d*). Октаэдрические грани кристаллитов имеют пластинчато-ступенчатое концентрически-зональное строение (рис. 2, *c, d*).

Результаты исследования методом АСМ показали, что высота октаэдрических кристаллитов PCD CVD до ТХО достигает $6\ \mu\text{m}$ (рис. 3, *a*), при этом они имеют выраженное пластинчато-ступенчатое строение. При большем увеличении наблюдается отчетливое концентрически-зональное наложение пластин (рис. 3, *b*). Перепад высот между ступенями составляет $0.1\text{--}0.3\ \mu\text{m}$. Сами ступени находятся под уклоном относительно горизонтальной плоскости (рис. 3, *c, d*). Торцы ступеней также имеют наклон относительно вертикальной плоскости (рис. 3, *c, d*). Шероховатость поверхности Ra такого образца на участ-

ке $100 \times 100\ \mu\text{m}$ составляет $\sim 2\ \mu\text{m}$, на некоторых участках она доходит до $20\ \mu\text{m}$.

2.2. Поликристаллический алмаз после ТХО

Изображения в оптическом микроскопе образцов № 1 и № 3 поликристаллического алмаза после ТХО представлены на рис. 4. Они характеризуются макроскопически гладкой поверхностью со слабовыраженной штриховкой и текстурой (рис. 4, *b, d*). При больших увеличениях наблюдается шероховатая поверхность и в некоторых областях — небольшие ямки округлой формы (рис. 4, *b*). Для образца № 3 после ТХО был зафиксирован небольшой наклон плоскости, особенно заметный в центральной части пластины.

При исследовании на растровом электронном микроскопе для образцов № 1 и № 3, обработанных ТХО, наблюдается четко выраженная параллельная штриховка (рис. 5, *a, b*). Также наблюдается неоднородность рельефа поверхности. Она состоит из небольших бугорков и углублений, также присутствуют зоны с ячеистой

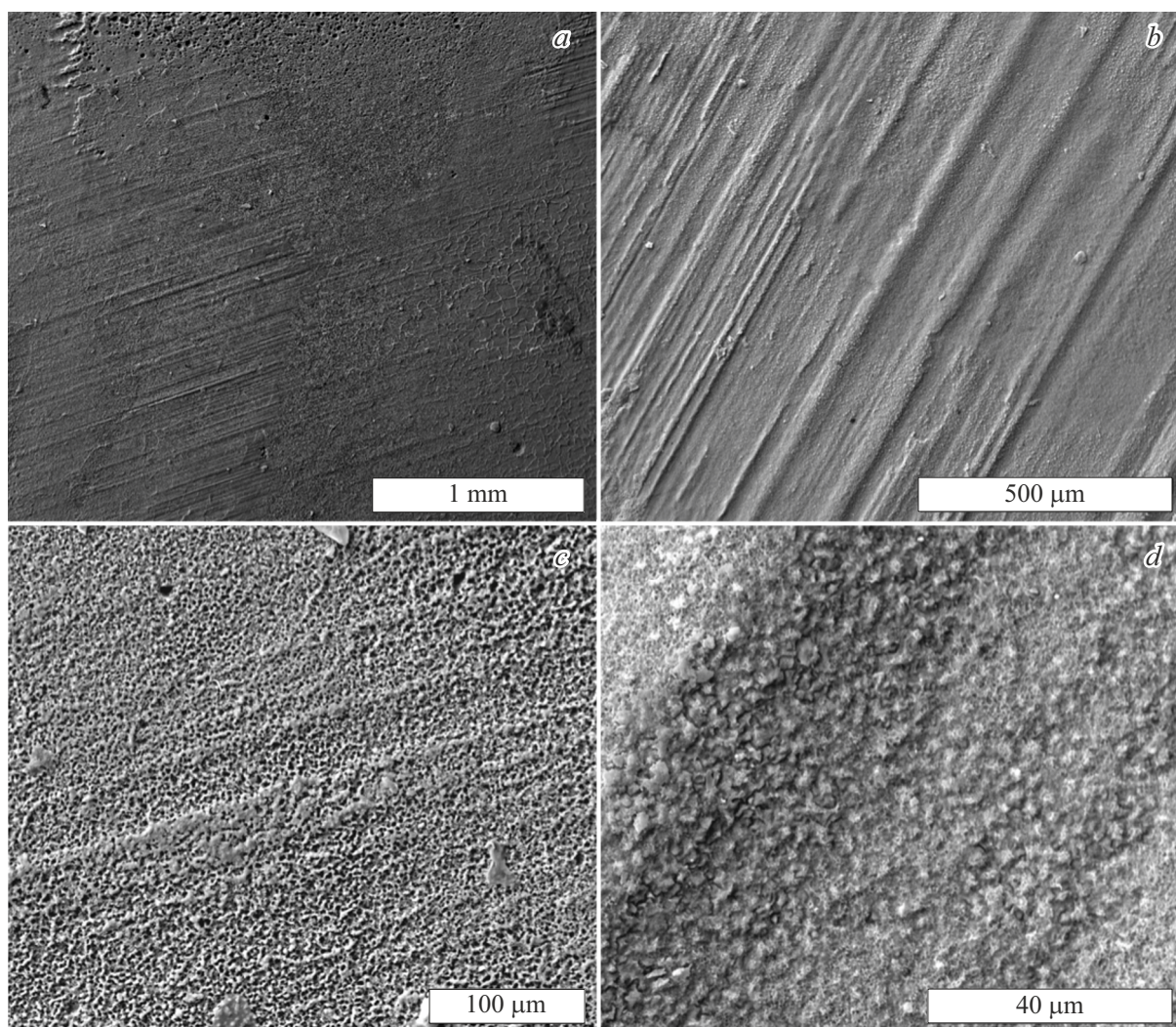


Рис. 5. Изображения в обратно-рассеянных электронах PCD CVD после TXO: *a, b* — фрагменты центральных участков образца № 1 и № 3 соответственно; *c* — увеличенный фрагмент центрального участка образца № 1 с ячеистой структурой; *d* — увеличенный фрагмент центрального участка образца № 3, состоящий из бугорков и углублений.

структурой. Октаэдрические кристаллиты отсутствуют. При больших увеличениях для PCD после TXO различимо микропористое строение (рис. 5, *c*) и присутствие небольших округлых сглаженных бугорков (рис. 5, *d*).

Исследования на атомно-силовом микроскопе выявили, что поверхность состоит из округлых бугорков (рис. 6, *a*), в редких случаях достигающих высоты $4\ \mu\text{m}$. При этом крупные бугорки микрошероховатой поверхности (рис. 6, *b*) состоят из множества более маленьких бугорков (рис. 6, *c, d*). Перепады высот между крупными бугорками составляют $1\text{--}2\ \mu\text{m}$. Шероховатость поверхности R_a составляет величину порядка $500\ \text{nm}$, с воспроизводимостью на разных участках.

3. Обсуждение результатов

По результатам исследований методами оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии было уста-

новлено, что изученные образцы PCD CVD, используемые в качестве теплопроводящих элементов, состоят из октаэдрических кристаллитов со ступенчатым строением граней, характеризуются наличием двойников прорастания и до TXO обладают шероховатостью поверхности в диапазоне $600\text{--}2000\ \text{nm}$. Образцы после TXO имеют шероховатость $170\text{--}600\ \text{nm}$, при этом октаэдрические кристаллиты полностью скругляются на всей поверхности образцов и трансформируются в сглаженные округлые бугорки. Максимальный перепад высот составил $2.3\text{--}5.0\ \mu\text{m}$ для образца № 2 (до TXO) и $0.9\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ для образцов после TXO. Результаты исследования шероховатости поверхности и максимальных перепадов высот представлены в таблице.

Метод TXO в статическом режиме позволяет снизить шероховатость сложной поверхности поликристаллического алмаза, которая практически не поддается стандартной механической обработке. Однако результаты оп-

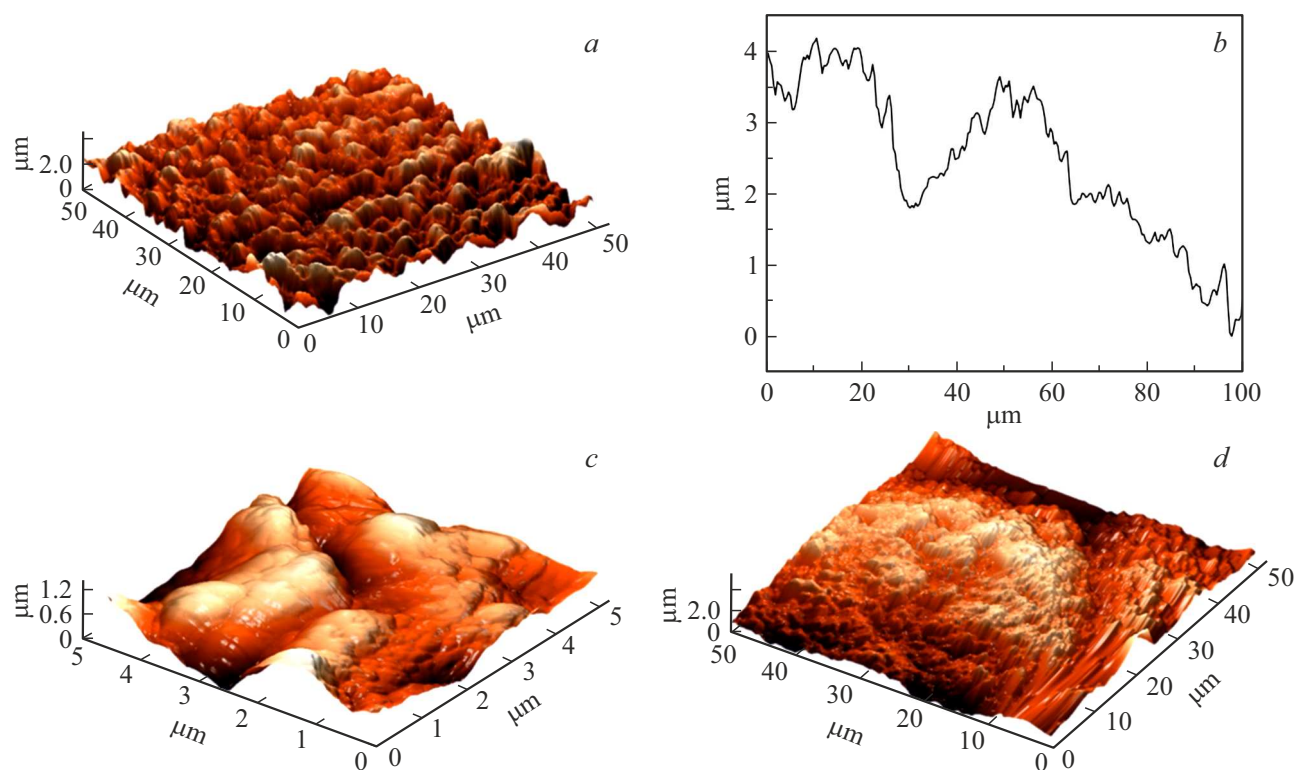


Рис. 6. Изображения с атомно-силового микроскопа PCD CVD после TXO: *a* — 3D-изображение образца № 3, поверхность состоит из округлых бугорков; *b* — продольный профиль участка *a*; *c, d* — 3D-изображения поверхности крупного округлого бугорка.

Сводные результаты исследования шероховатости поверхности и максимальных перепадов высот

№ образца	Область	Размер области, μm	Шероховатость поверхности R_a , nm	Максимальный перепад высот, μm
2	1	100 × 100	627.3	5.0
	2	100 × 100	1251.9	5.0
	3	50 × 50	682.1	4.0
	4	20 × 20	338.9	3.0
	5	20 × 20	148.0	2.3
1	1	100 × 100	418.5	2.5
	2	100 × 100	450.4	2.5
	3	50 × 50	426.1	2.5
	4	20 × 20	338.4	2.0
	5	5 × 5	170.1	0.9
3	1	100 × 100	595.4	2.5
	2	100 × 100	187.4	2.0
	3	50 × 50	585.6	2.0
	4	20 × 20	216.0	1.4

тической и электронной микроскопии свидетельствуют о некоторой неоднородности обработки: поверхности образцов CVD PCD после TXO характеризуются наличием бугорков и углублений, зон с ячеистой структурой и пор, а также явно проявлена параллельная штриховка. Шероховатость поверхности в разных зонах образца отличается, но в установленных пределах.

Таким образом, в настоящей работе наглядно показано, что методы оптической, атомно-силовой и растровой электронной микроскопии позволяют характеризовать поверхности PCD различного качества и выявлять ее дефекты в широком диапазоне величин. Статическая TXO является перспективным методом снижения шероховатости поверхности PCD. Необходимо дальней-

шее совершенствование технологии ТХО крупных РСД ($d \geq 100 \text{ mm}$), а также создание последующего этапа термохимической полировки для снижения уровня шероховатости поверхности теплоотводящих элементов до десятков нанометров с контролем поверхности примененными в работе методами. Механизмом сглаживания поверхности РСД-алмаза является превращение/растворение остросереберных октаэдрических кристаллитов в округлые растворенные бугорчатые поверхности, в свою очередь состоящие из более мелких бугорков.

Финансирование работы

Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFZ-2022-0006).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Р.А. Хмельницкий, Н.Х. Талипов, Г.В. Чучева. *Синтетический алмаз для электроники и оптики* (ИКАР, М., 2017)
- [2] M. Kim, J.-H. Seo, U. Singiseti, Z. Ma. *J. Mater. Chem. C*, **5**, 45 (2017). DOI: 10.1039/C7TC02221B
- [3] A. Bindra. *IEEE Power Electron Magazine*, **2** (1), 5 (2015). DOI: 10.1109/MPREL.2014.2382195
- [4] S. Fujita. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54** (3), 12 (2015). DOI: 10.7567/JJAP.54.030101
- [5] J. Canas, A.C. Pakpour-Tabrizi, T. Trajkovic, F. Udrea, D. Eon, E. Gheeraert, R. Jackman, A.C. Pakpour-Tabrizi, R.B. Jackman. *IEEE Trans Electron Devices*, **68**, 6 (2021). DOI: 10.1109/TED.2021.3117237i
- [6] Q. He, J. Zhang, Z. Ren, J. Zhang, K. Su, Y. Lei, D. Ly, T. Mi, Y. Hao. *Diamond Related Mater.*, **119**, 5 (2021). DOI: 10.1016/j.diamond.2021.108547
- [7] T. Matsumoto, T. Yamakawa, H. Kato, T. Makino, M. Ogura, X. Zhang, T. Inokuma, S. Yamasaki, N. Tokuda. *Appl. Phys. Lett.*, **119**, 5 (2021). DOI: 10.1063/5.0075964
- [8] P.L. Tso, T.M. Wang. *Adv. Mater. Res.*, **76–78**, 6 (2009). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.76-78.207
- [9] П.П. Мальцев, С.В. Редькин, И.А. Глинский, Н.В. Побойкина, М.П. Духновский, Ю.Ю. Федоров, А.К. Смирнова, Е.Н. Куликов, С.В. Щербаков, И.А. Леонтьев, О.Ю. Кудряшов, А.С. Скрипниченко. *Нано- и микросистемная техника*, **18** (4), 13 (2016).
- [10] H.Y. Tsai, C.J. Ting, C.P. Chou. *Diamond Related Mater.*, **16**, 9 (2007). DOI: 10.1016/j.diamond.2006.06.007
- [11] T. Schuelke, T.A. Grotjohn. *Diamond Related Mater.*, **32**, 10 (2013). DOI: 10.1016/j.diamond.2012.11.007
- [12] L. Zhang, D.H. Wen, S.M. Ji, Q.L. Yuan, Z.H. Xu. *Adv. Mater. Res.*, **69–70**, 7 (2009). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.69-70.192
- [13] C.H. Hsieh, H.Y. Tsai, H.T. Lai, H.Y. Lin. *Nano- and Microtechnology: Mater., Processes, Packaging, Systems*, **4936**, 8 (2002). DOI: 10.1117/12.469741
- [14] J. Watanabe, M. Touge, T. Sakamoto. *Diamond Related Mater.*, **39**, 6 (2013). DOI: 10.1016/j.diamond.2013.07.001
- [15] K. Yamaguchi, M. Ota, K. Egashira, H. Miwa, Y. Onchi, K. Tanada. *Trans Tech. Publications*, **874**, 6 (2016). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.874.139
- [16] T. Kuriyagawa, K. Syoji. *Progress in Precision Engineering* (Springer, Berlin, 1991) DOI: 10.1007/978-3-642-84494-2_47
- [17] Z.M. Cui, Y.G. Han, J.P. Kong, Q.Q. Chen. *Adv. Mater. Res.*, **797**, 5 (2013). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.797.491
- [18] M.J. Ashe, G.A. Tripp, F.C. Eichmiller, L.A. George, J.C. Meiers. *JADA*, **127**, 6 (1996). DOI: 10.14219/jada.archive.1996.0059
- [19] M. Pacella. *Procedia CIRP*, **87**, 5 (2020). DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.084
- [20] F.Y. Chang, C.F. Hsu, W.H. Lu. *Appl. Sci.*, **11** (5871), 22 (2021). DOI: 10.3390/app11135871
- [21] M.G. Warhanek, J. Pfaff, L. Meier, C. Walter, K. Wegener. *SPIE Proceed.*, **9736**, 10 (2016). DOI: 10.1117/12.2212771
- [22] А.В. Дерябкин, Ю.Ю. Федоров, М.П. Темиряева. VII Всероссийская научно-техническая конференция „Электроника и микроэлектроника СВЧ“, **1**, 1 (2018).
- [23] A. Hirata, H. Tokura, M. Yoshikawa. *Thin Solid Films*, **212**, 6 (1992). DOI: 10.1016/0040-6090(92)90498-z
- [24] J.A. Weima, W.R. Fahrner, R. Job. *J. Solid State Electrochem.*, **5**, 7 (2001). DOI: 10.1007/s100080000118
- [25] S.A. Eremin, A.M. Kolesnikova, I.A. Leontiev, V.N. Anikin, O.Yu. Kudryashov, Y.M. Yashnov, M.V. Zhdanova. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci.*, **848**, 012016 (2020). DOI: 10.1088/1757-899X/848/1/012016
- [26] A.P. Malshe, B.S. Park, W.D. Brown, H.A. Naseem. *Diamond Related Mater.*, **8**, 16 (1999). DOI: 10.1016/s0925-9635(99)00088-6
- [27] S. Jin, J.E. Graebner, T.H. Tiefel, G.W. Kammlott, G.J. Zydzik. *Diamond Related Mater.*, **1** (9), 5 (1992). DOI: 10.1016/0925-9635(92)90116-6
- [28] M. McCormack, S. Jin, J.E. Graebner, T.H. Tiefel, G.W. Kammlott. *Diamond Related Mater.*, **3**, 5 (1994). DOI: 10.1016/0925-9635(94)90088-4
- [29] Z. Minglong, X. Yiben, W. Linjun, S. Hujiang. *Solid State Commun.*, **130**, 4 (2004). DOI: 10.1016/j.ssc.2004.01.013
- [30] T. Semba, S. Ohta, Y. Amamoto, H. Fujiyama, H. Sumiya. *Transactions Jpn. Society Mech. Eng.*, **77** (784), 14 (2011). DOI: 10.1299/kikaic.77.4704
- [31] A. Kubota, S. Nagae, S. Motoyama, M. Touge. *Diamond Related Mater.*, **60**, 5 (2015). DOI: 10.1016/j.diamond.2015.10.026
- [32] Y. Sun, S. Wang, S. Tian, Y. Wang. *Diamond Related Mater.*, **15**, 6 (2006). DOI: 10.1016/j.diamond.2005.10.057
- [33] J.E. Graebner, S. Jin, G.W. Kammlott, B. Bacon, L. Seibles, W. Banholzer. *J. Appl. Phys.*, **71** (5353), 4 (1992). DOI: 10.1063/1.350553
- [34] P. Miranzo, M.I. Osendi, E. Garcia, A.J.S. Fernandes, V.A. Silva, F.M. Costa, R.F. Silva. *Diamond Related Mater.*, **11**, 5 (2002). DOI: 10.1016/s0925-9635(02)00028-6
- [35] P. Niedermann, W. Hänni, N. Blanc, R. Christoph, J. Burger. *J. Vacuum Sci. Technol. A*, **14** (1233), 5 (1996). DOI: 10.1116/1.580273
- [36] M. Hoinkis, E.R. Weber, M.I. Landstrass, M.A. Plano, S. Han, D.R. Kania. *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1870), 2 (1991). DOI: 10.1063/1.106172
- [37] А.В. Дерябкин, Е.Н. Куликов, А.К. Смирнова. V Всероссийская научно-техническая конф. „Электроника и микроэлектроника СВЧ“, **2**, (2016).