

Научная статья

УДК 535.37, 628.9.037, 548.4, 544.778.4, 539.2, 620.3, 535.375.54

doi: 10.17223/29491665/9/4

Оптические свойства поверхности детонационных наноалмазов

Анна Анатольевна Чеботова¹, Захар Игоревич Бородулин², Илья Сергеевич Петров³,
Евгения Сергеевна Шеремет⁴, Иван Николаевич Лапин⁵, Евгений Игоревич Липатов⁶,
Александр Борисович Ворожцов⁷

^{1, 2, 5, 6, 7} Томский государственный университет, Томск, Россия^{3, 4} Томский политехнический университет, Томск, Россия⁶ evlip@mail2000.ru

Аннотация. В данной работе были исследованы свойства поверхности образцов суспензии детонационных наноалмазов производства АО ФНПЦ «Алтай», г. Бийск. Образцы суспензии детонационных наноалмазов были подвергнуты очистке от неалмазной фазы углерода термическим отжигом при температуре 500 °С, что привело к исчезновению в спектрах комбинационного рассеяния полос sp^2 -гибридизованного углерода (графена) на 1362 и 1586 cm^{-1} , усилению полос sp^3 -гибридизованного углерода (наноалмаза) на 1320 cm^{-1} , появлению полос sp^3 -гибридизованного аморфного углерода на 1265 и 1552 cm^{-1} и полосы кислородосодержащих функциональных групп на 1065 cm^{-1} . Образцы суспензии детонационных наноалмазов были разделены на фракции методами седиментации и центрифугирования. Методом центрифугирования удалось выделить фракции детонационных наноалмазов с размерами до 20 и до 60 нм.

Ключевые слова: детонационные наноалмазы, центрифугирование, атомно-силовая микроскопия, комбинационное рассеяние, фотолуминесценция, аллотропы углерода

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет 2030), проект № 2.4.4.23 ИГ « N_2V^0 -центры окраски алмаза для квантовой магнитометрии».

Для цитирования: Чеботова А.А., Бородулин З.И., Петров И.С., Шеремет Е.С., Лапин И.Н., Липатов Е.И., Ворожцов А.Б. Оптические свойства поверхности детонационных наноалмазов // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2025. № 9. С. 36–43. doi: 10.17223/29491665/9/4

Original article

doi: 10.17223/29491665/9/4

Optical properties of the surface of detonation nanodiamonds

Anna A. Chebotova¹, Zakhar I. Borodulin², Ilya S. Petrov³, Evgeniya S. Sheremet⁴,
Ivan N. Lapin⁵, Evgeniy I. Lipatov⁶, Alexander B. Vorozhtsov⁷

^{1, 2, 5, 6, 7} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation^{3, 4} Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation⁶ evlip@mail2000.ru

Abstract. In this work, the surface properties of samples of a detonation nanodiamond suspension produced by JSC Federal Research and Production Center “Altai”, Biysk, Russia, were investigated. The samples of the detonation nanodiamond suspension were purified from the non-diamond carbon phase by thermal annealing at 500 °C, which led to the disappearance of the bands of sp^2 -hybridized carbon (graphene) at 1362 and 1586 cm^{-1} , an increase in the band of sp^3 -hybridized carbon (nanodiamond) at 1320 cm^{-1} , and the appearance of bands of sp^3 -hybridized amorphous carbon at 1265 and 1552 cm^{-1} , as well as a band of oxygen-containing functional groups at 1065 cm^{-1} in the Raman spectra. The samples of the detonation nanodiamond suspension were fractionated by sedimentation and centrifugation. Using centrifugation, it was possible to isolate fractions of detonation nanodiamonds with sizes up to 20 nm and up to 60 nm. It should be noted that detonation nanodiamonds with sizes up to 20 nm have a high potential for use in biomedical technologies as carriers of functional groups and as photoluminescent nanoparticles. At the same time, it is necessary to be able to perform not only fractionation by nanoparticle size, but also fractionation by photoluminescence properties and by the content of specific diamond color centers (NV^- , N_2V^0 , etc.), including at the single-particle level. Based on such diamond nanoparticles, elements for photonic integrated circuits, contrast agents for magnetic resonance imaging, probes for atomic force microscopy, single-photon sources, and three-dimensional photonic crystals (diamond opals) are being developed.

Key words: detonation nanodiamonds, centrifugation, atomic force microscopy, Raman scattering, photoluminescence, carbon allotropes

Acknowledgments: The research was carried out with the support of the Tomsk State University Development Program (Priority 2030), project №2.4.4.23 IG «N₂V⁰ diamond color centers for quantum magnetometry».

For citation: Chebotova, A.A., Borodulin, Z.I., Petrov, I.S., Sheremet, E.S., Lapin, I.N., Lipatov, E.I. & Vorozhtsov, A.B. (2025) Optical properties of the surface of detonation nanodiamonds. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeystel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 9. pp. 36–43. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/9/4

Введение

Детонационные нанодIAMЗОВ (ДНА) – это продукт взрывного разложения углеродосодержащих взрывчатых веществ в условиях недостатка кислорода. При подрыве смеси тротила и гексогена во взрывной камере в течение 10^{-7} – 10^{-6} с при давлении от 17 до 30 ГПа и температуре свыше 3 000 К происходит синтез ДНА [1]. Чтобы предотвратить окисление и графитизацию алмаза, необходимо охлаждать продукты взрыва. В качестве охлаждающей среды используются вода, инертный газ или продукты предыдущего подрыва. Из образовавшейся шихты механической и химической очистками выделяются наноразмерные углеродные наночастицы – ДНА [2, 3].

Работы по детонационному синтезу нанодIAMЗОВ ведутся с начала 1960-х гг. в нескольких научных центрах России: РФЯЦ ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина (г. Снежинск), Филиал ФИЦ ХФ РАН им. Н.Н. Семёнова (г. Черноголовка), ИГиЛ СО РАН им. М.А. Лаврентьева (г. Новосибирск), АО ФНПЦ «Алтай» (г. Бийск) и др. [4, 5].

ДНА отличаются от природных импактных нанодIAMЗОВ и нанодIAMЗОВ, синтезированных при высоких статических давлениях и температурах, своим сложным строением и физико-химическими свойствами. Углеродная часть ДНА представлена алмазным ядром (алмазным кристаллитом), окруженным нарушенной углеродной оболочкой, содержащей наночастицы графита, скрученный слой графена и другие углеродные аллотропы. На поверхности нарушенной углеродной оболочки на нескомпенсированных валентных атомах углерода хемосорбируются функциональные группы, включая различные соли, карбиды, оксиды металлов [6].

Ввиду наноразмеров ДНА в углеродном ядре может существовать единственный люминесцирующий центр окраски. По этой причине центры окраски в ДНА рассматриваются как кандидаты в кубиты для квантовых вычислений и в высокоскоростные источники одиночных фотонов, не подверженных фотодеградации и эффектам мерцания [6, 7].

Центры окраски NV[−] и N₂V⁰ в ДНА обладают двумя локализованными электронами, расщеплением электронных уровней на спиновые подуровни, синглетными и триплетными системами и, как следствие, интеркомбинационной конверсией. Воздействие ВЧ, СВЧ, электрического или магнитного по-

лей могут изменять интенсивность фотолюминесценции данных центров. Способность NV[−] и N₂V⁰ центров проявлять высокую чувствительность фотолюминесценции используется для создания сверхточных сенсоров магнитного и электрического полей, температуры и других физических величин [8].

Однако не каждая наночастица ДНА проявляет фотолюминесценцию, что объясняется как химическим составом оболочки, так и дефектностью алмазного ядра. В данной работе мы провели предварительные исследования ДНА производства АО ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, на предмет влияния размера наночастиц на их оптические свойства.

Материалы и методы исследований

Эксперимент № 1. Известно свойство водной суспензии ДНА с течением времени коагулировать, т.е. формировать агрегаты и коагуляционные структуры. Необработанная водная суспензия ДНА была помещена в ультразвуковую ванну для равномерного распределения частиц по объему и частичной дефрагментации агрегатов. После ультразвуковой обработки в течение 30 мин из суспензии ДНА было отобрано 5 мл раствора. Отобранный объем был смешан с 1 л дистиллированной ионизированной воды в колбе.

Далее методом седиментации было произведено разделение разбавленной суспензии на 5 фракций – от самой крупной (фракция 1) до самой мелкой (фракция 5). Для этого разбавленная суспензия отстаивалась в течение 15 мин в отсутствие перемешивания и заметных вибраций. Предполагается, что в течение этого времени самые крупные ДНА и их агрегаты под действием гравитации опускались на дно колбы быстрее, чем ДНА меньшего размера. По истечении 15 мин производился отбор 5 мл суспензии со дна колбы, которые смешивались с 1 л дистиллированной воды. Затем процедура повторялась; таким образом были получены 5 фракций водяной суспензии ДНА (рис. 1).

Полученные фракции были помещены в чашки Петри и подвергнуты сушке на открытом воздухе в закрытом помещении для испарения воды и образования сухого конгломерата. Полученные конгломераты были исследованы на конфокальном флуоресцентном микроскопе ZEISS LSM 780 NLO (Carl Zeiss Group, Германия).

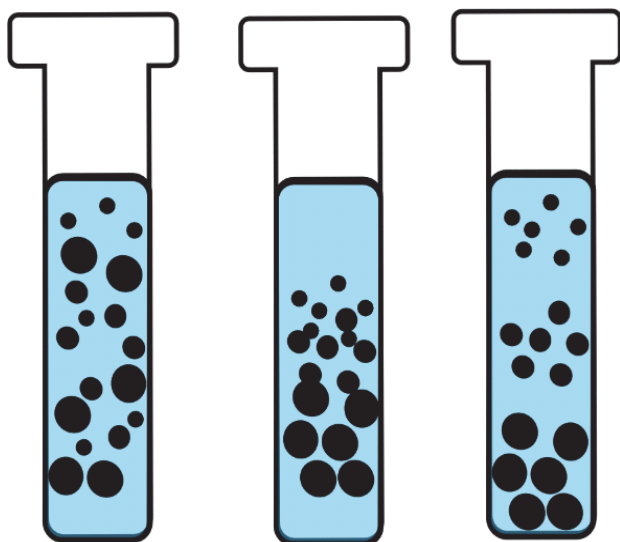


Рис. 1. Процесс седиментации – разделение водной суспензии по размеру наночастиц ДНА под действием гравитации

Fig. 1. The sedimentation process – the separation of a water suspension by the size of detonation nanodiamonds under the action of gravity

Эксперимент № 2. Четыре образца суспензии ДНА массой по 2 г каждый были помещены в чашки Петри и подвергнуты сушке на открытом воздухе в помещении для испарения воды и образования сухого конгломерата.

Образцы 1 и 2 использовались как контрольные и не подвергались очистке. Образцы 3 и 4 были подвергнуты очистке нагревом до 500 °С в воздушной среде в течение 4 ч в муфельной печи SX-2-12D (Shanghai Shiyen Electric Furnace Co., Ltd., Китай). Полученные сухие конгломераты были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния при возбуждении непрерывным лазерным излучением на 457 нм (см. рис. 5–7).

Затем все образцы были растворены в смеси этилового спирта-ректификата массой 200 г и поливинилпиралидона массой 3×10^{-3} г, и в виде капель суспензии помещены на оптическое стекло (рис. 2).

Далее образцы были помещены в центрифугу LC-8C (JoanLab, Китай), где в течение 30 мин при 3 000 об./мин производилось разделение суспензии на фракции (рис. 3). В центрифуге под действием центробежной силы суспензия, содержащая наночастицы ДНА и их агрегаты различной формы, разделилась на фракции. С разной глубины пробирки собирались фракции образца с различными размерами наночастиц.

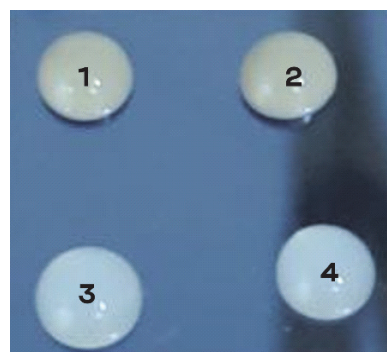


Рис. 2. Фотография образцов ДНА, растворенных в смеси этилового спирта и поливинилпиралидона в пропорции 666667:1, на оптическом стекле: 1 – образец, не подвергнутый термической очистке, 2 – контрольный образец, не подвергнутый термической очистке, 3 – образец, подвергнутый термической очистке, 4 – контрольный образец, подвергнутый термической очистке

Fig. 2. Photo of samples of detonation nanodiamonds dissolved in a mixture of ethyl alcohol and polyvinylpyrrolidone in a ratio of 666667:1 on optical glass. 1 is a sample that has not been thermally cleaned, 2 is a control sample that has not been thermally cleaned, 3 is a sample that has been thermally cleaned, 4 is a control sample that has been thermally cleaned

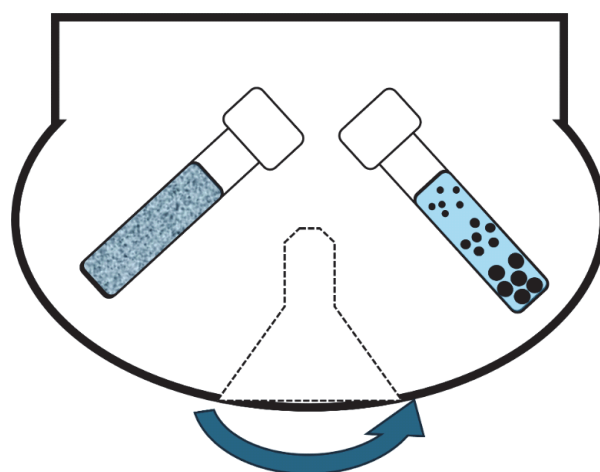


Рис. 3. Схема центрифугирования суспензии ДНА в смеси этилового спирта и поливинилпиралидона

Fig. 3. Scheme of centrifugation of bottom suspension in a mixture of ethyl alcohol and polyvinylpyrrolidone

После центрифугирования были отобраны 2 образца – с наибольшими и наименьшими фракциями ДНА. Образцы были помещены на высокоориентированный лабораторно-произведенный графит и исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Ntegra (NT-MDT, Россия). АСМ исследование поверхности образцов позволило оценить максимальный размер ДНА в каждой из двух фракций.

Результаты

Эксперимент № 1. На конфокальном микроскопе ZEISS LSM 780 NLO были получены спектры фотолюминесценции сухих фракций ДНА 1 и 5 (рис. 4, *a* и *b*, соответственно). На вставках приведены фотографии исследуемых образцов и крестами отмечены точки измерения спектров фотолюминесценции. Очевидно, что принципиальных отличий в образцах не

наблюдается как на фотографиях, так и в спектрах фотолюминесценции. Полученные спектры фотолюминесценции содержат различные полосы, которые затруднительно идентифицировать при данном спектральном разрешении. В любом случае остаётся непонятным, является наблюдавшаяся фотолюминесценция свечением алмазного ядра либо данное свечение есть проявление нарушенной углеродной оболочки или хемосорбированных функциональных групп.

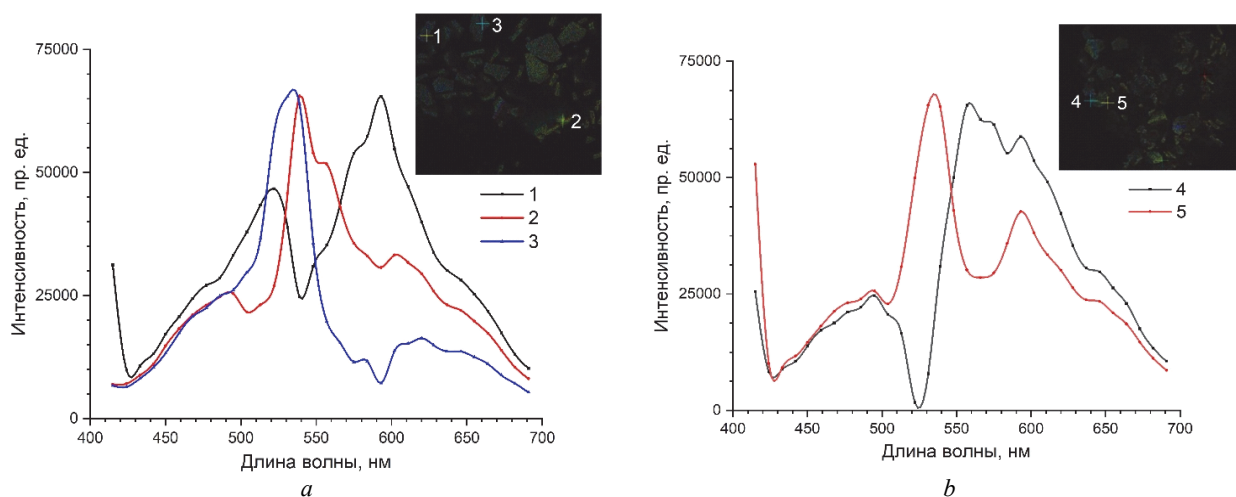


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции 1-й фракции (*a*) и 5-й фракции (*b*) ДНА под воздействием лазерного излучения 405 нм. На вставках приведены фотографии с отмеченными участками, в которых измерены спектры фотолюминесценции

Fig. 4. Photoluminescence spectra of fraction 1 (*a*) and fraction 5 (*b*) of detonation nanodiamonds under the action of 405 nm laser radiation. The inserts show photographs with marked areas in which photoluminescence spectra are measured

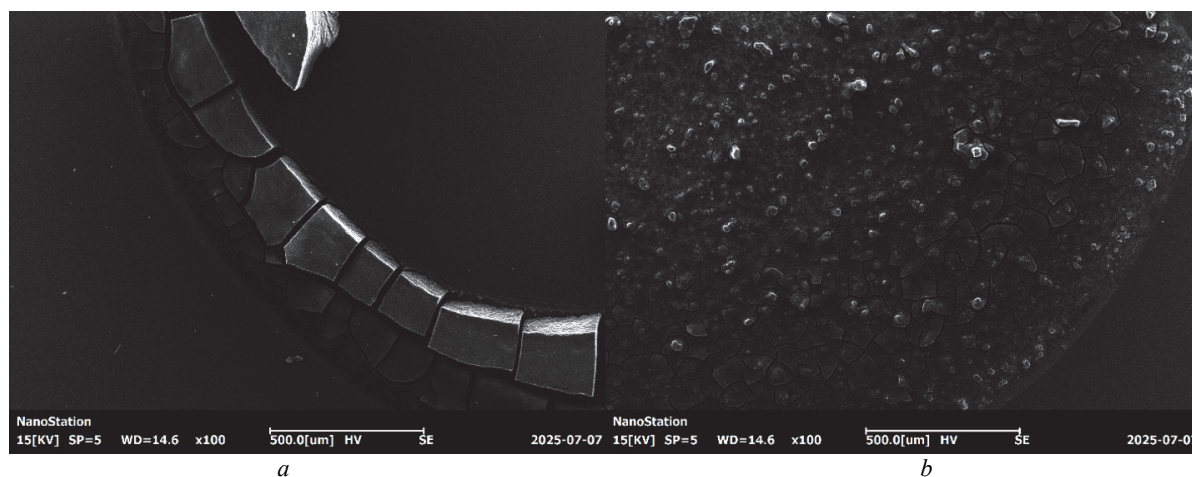


Рис. 5. СЭМ изображения образцов ДНА: *a* – до очистки (образец 1) и *b* – после очистки (образец 3)

Fig. 5. SEM images of samples of detonation nanodiamonds *a*) before cleaning (sample 1) and *b*) after cleaning (sample 3)

Эксперимент № 2. На рис. 5 приведены СЭМ изображения, полученные на сканирующем электронном микроскопе Сохет ЕМ-30+ (Сохет, Южная Корея), образцов ДНА до и после очистки, т.е. образца 1 (рис. 4, *a*) и образца 3, при увеличении 100х и ускоряющем напряжении 10 кВ (рис. 4, *b*).

Как следует из рис. 5, отжиг образцов суспензии ДНА привёл к дроблению агрегатов и коагуляционным структурам.

На рис. 6 приведены спектры комбинационного рассеяния образцов ДНА до очистки и после очистки (образцы 1 и 3, соответственно), полученные на КР-спектрометре Ntegra (NT-MDT SI, Россия). Очистка

образцов отжигом привела к многократному усилению уровня сигнала в спектре комбинационного рассеяния, что говорит об усилении вклада фотолюминесценции в КР-сигнал. При этом наблюдалось усиление собственно полос комбинационного рассеяния.

Вычитание фона фотолюминесценции (рис. 7) позволило провести первичный анализ наблюдавшихся полос комбинационного рассеяния образцов ДНА до и после очистки. Положение и ширина на полувысоте полос комбинационного рассеяния (см. рис. 7) приведены в таблице.

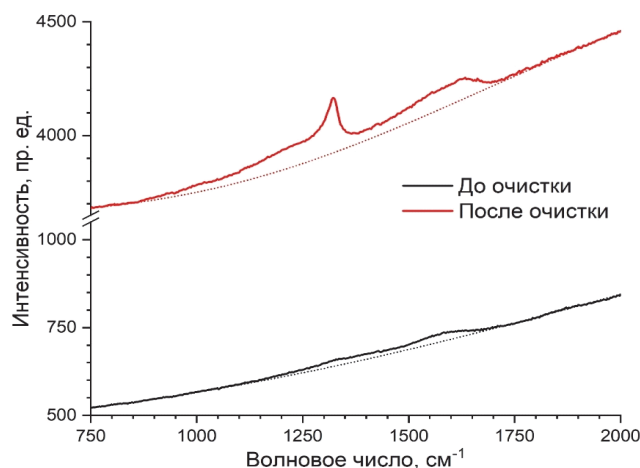


Рис. 6. Спектры комбинационного рассеяния ДНА до и после очистки (образец 1, нижний спектр, и образец 3, верхний спектр) при возбуждении непрерывным лазером на длине волны 457 нм

Fig. 6. Raman spectra of samples of detonation nanodiamonds before and after purification (sample 1, lower spectrum and sample 3, upper spectrum) when excited by a continuous laser at a wavelength of 457 nm

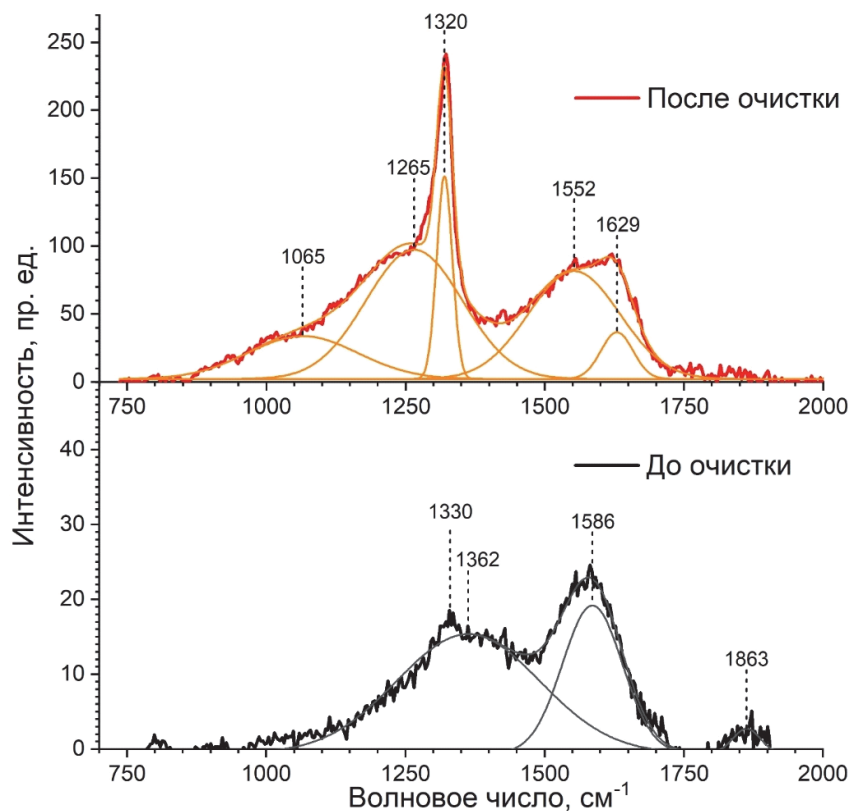


Рис. 7. Спектры комбинационного рассеяния образцов ДНА до и после очистки (образец 1, нижний спектр, и образец 3, верхний спектр) при возбуждении непрерывным лазером на длине волны 457 нм после вычитания фона фотолюминесценции

Fig. 7. Raman spectra of samples of detonation nanodiamonds before and after purification (sample 1, lower spectrum and sample 3, upper spectrum) when excited by a continuous laser at a wavelength of 457 nm after subtracting the photoluminescence background

Положение в спектре и ширина на полувысоте полос комбинационного рассеяния образцов ДНА до и после очистки (образцы 1 и 3 соответственно)

Номер полосы	До очистки (образец 1)		После очистки (образец 3)	
	КР-сдвиг, см^{-1}	Ширина на полувысоте, см^{-1}	КР-сдвиг, см^{-1}	Ширина на полувысоте, см^{-1}
1	1 330	33,3	1 065	199,1
2	1 362	257,6	1 265	173,8
3	1 586	107,6	1 320	28,1
4	1 863	49,0	1 552	163,9
5	—	—	1 629	57,7

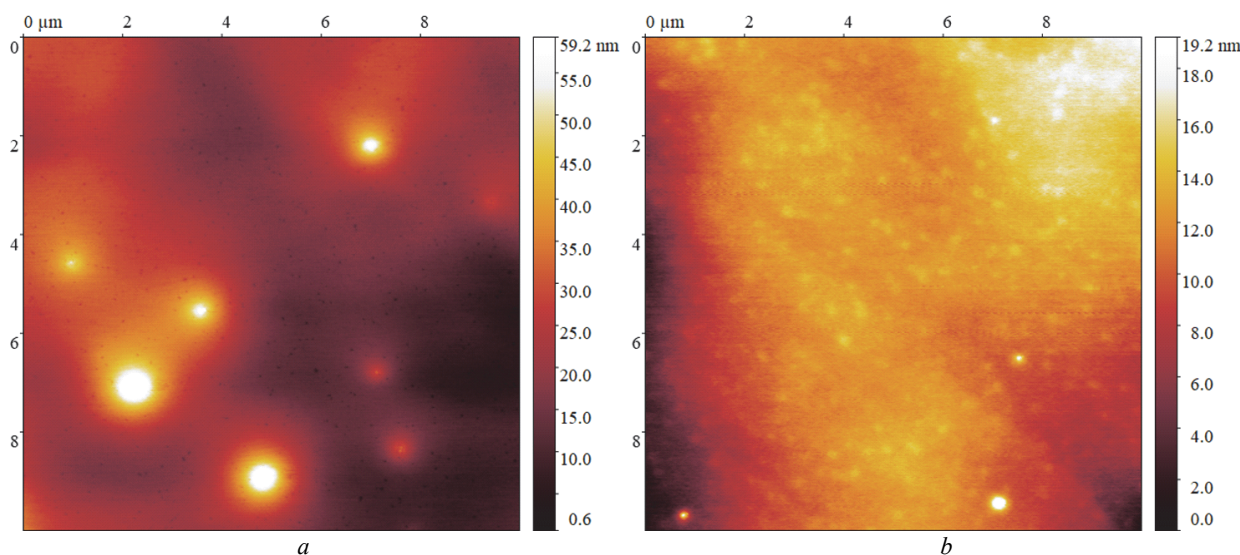


Рис. 8. АСМ-изображения образца ДНА после очистки отжигом (образец 3) и центрифугирования на 6 фракций: *a* – фракция 1 с наибольшим размером ДНА; *b* – фракция 6 с наименьшим размером ДНА

Fig. 8. AFM images of sample of detonation nanodiamonds after annealing purification (sample 3) and centrifugation into 6 fractions: *a*) the fraction 1 with the largest size of detonation nanodiamonds; *b*) the fraction 6 with the smallest size of detonation nanodiamonds

Анализ положений и полуширин полос комбинационного рассеяния позволяет предположить, что до очистки поверхность ДНА покрыта sp^2 -гибридизированным углеродом, ввиду этого полоса алмазного ядра на $1\,330\text{ см}^{-1}$ ослаблена и уширена. В КР-спектре доминируют D- и G-полосы графита на $1\,362$ и $1\,586\text{ см}^{-1}$, соответственно. Возможно, низкоинтенсивная полоса с максимумом $1\,863\text{ см}^{-1}$ связана с аморфными углеродными слоями [9–10].

Очистка отжигом приводит к сужению на полувысоте и смещению полосы sp^3 -гибридизированного углерода (нанодIAMЗОВ) в область меньших волновых чисел – на $1\,320\text{ см}^{-1}$. По-видимому, окисление поверхности ДНА привело к удалению графита, поэтому в КР-спектрах начала доминировать алмазная полоса с характерным смещением в область меньших волновых чисел, что наблюдалось и ранее для нанодIAMЗОВ [11], а также проявились полосы sp^3 -гибридизированного аморфного углерода на $1\,265$ и $1\,552\text{ см}^{-1}$, в то время как D- и G-полосы графита в КР-спектре не наблюдались. Окисление поверхности ДНА привело

к появлению в КР-спектре полосы $1\,065\text{ см}^{-1}$, отсутствующий до очистки. Данную полосу связывают с кислородосодержащими группами [11–13].

На рис. 8 приведены АСМ изображения, полученные после центрифугирования образца 3 и разделения его на фракции от 1 до 6 (1-я фракция – наибольший размер ДНА, 6-я фракция – наименьший размер ДНА). АСМ изображения получены с помощью атомного силового микроскопа Ntegra при размещении и сушке капель фракций 1 и 6 образца 3 на поверхности высокоориентированного графита созданного в Школе химических и биомедицинских технологий TERS-team.

Атомная силовая микроскопия позволила оценить максимальный размер ДНА во фракциях с наибольшим и наименьшим размером наночастиц в образце 3. Для фракции 1 с наибольшим размером наночастиц максимальный размер ДНА составил до 60 нм, в то время как для фракции 6 с наименьшим размером наночастиц максимальный размер ДНА составил до 20 нм.

В дальнейшем мы предполагаем провести исследование статистического распределения размеров отожжённых наночастиц, разделяемых на фракции с помощью центрифугирования, и установить связь среднего размера ДНА с составом их поверхности и спектрами их фотолюминесценции.

Заключение

В данной работе были исследованы образцы суспензии детонационных наноалмазов производства АО ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, разделенные на фракции методами седиментации и центрифугирования, в том числе очищенные от неалмазной фазы методом термического отжига. С помощью метода сканирующей электронной микроскопии наблюдалось дефрагментация и дробление агрегатов ДНА и коагуляционных структур после термической обработки при 500 °С. С помощью метода атомно-силовой микроскопии наблюдалось разделение центрифугированием отожженного образца ДНА на фракции с размерами наночастиц до 20 и до 60 нм. С помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния наблюдалось удаление и окисление

нарушенной углеродной оболочки ДНА в процессе отжига. При этом КР полосы sp^2 -гибридизированного углерода (1 362 и 1 586 cm^{-1}) исчезали из спектра, но усиливалась и смещалась в сторону меньших волновых чисел полоса sp^3 -гибридизированного алмазного ядра (с 1 330 до 1 320 cm^{-1}), а также проявлялись полосы sp^3 -гибридизированного аморфного углерода (1 265 и 1 552 cm^{-1}) и полоса кислородосодержащих функциональных групп (1 065 cm^{-1}).

Отметим, что ДНА с размерами до 20 нм имеют высокий потенциал для применения в биомедицинских технологиях как средства доставки функциональных групп и фотолюминесцирующих объектов. В то же время необходимо иметь возможность производить разделение на фракции ДНА не только по размеру наночастиц, но и по способности фотолюминесцировать, а также по содержанию конкретных центров окраски алмаза (NV^- , N_2V^0 и др.), в том числе в единичном количестве. На основе подобных алмазных наночастиц разрабатываются элементы для фотонных интегральных схем, контрасты для магнитно-резонансной томографии, зонды для атомно-силовой микроскопии, однофотонные источники и трехмерные фотонные кристаллы (алмазные опалы).

Список источников

1. Кулакова И.И., Лисичкин Г.В., Яковлев Р.Ю. Химическое модифицирование поверхности детонационного наноалмаза. М. : Техносфера, 2020.
2. Decarby P.S., Jamison T.S. Detonation nanodiamonds // *Science*. 1961. Vol. 133 (3466). P. 1821–1823.
3. Ставер А.М., Лямкин А.И. Получение ультрадисперсных алмазов из взрывчатых веществ // Ультрадисперсные алмазы: получение и свойства. Красноярск, 1990. 188 с.
4. Долматов В.Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение. СПб. : Профессионал, 2011. 536 с.
5. Даниленко В.В. Из истории открытия синтеза наноалмазов // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46, № 4. С. 581–584.
6. Кулакова И.И. Химия поверхности наноалмаза // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46, № 4. С. 621–628.
7. Хмельницкий Р.А., Талипов Н.Х., Чучева Г.В. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М. : ИКАР, 2017.
8. Чащин В.В., Лыга О.И., Шулепов М.А. Магниточувствительность фотолюминесценции N_2V^0 -центров в алмазе при различных температурах // *Технологии безопасности жизнедеятельности*. 2024. № 8. С. 22–27. doi: 10.17223/29491665/8/3
9. Mermoux M., Chang L.-Y. Raman spectroscopy study of detonation nanodiamond // *Diamond and Related Materials*. Vol. 87. P. 248–260.
10. Штехлин С., Мерму М. Влияние размера на химию поверхности и спектры комбинационного рассеяния наноалмазов размером менее 5 нм, окисленных под высоким давлением, при высокой температуре и детонации // *Журнал физической химии*. 2020. С. 125.
11. Korepanov V.I., Hiro-o Hamaguchi, Eiji Osawa, Ermolenkov V., Lednev I.K., Etzold B.J.M., Levinson O., Zousman B. и др. Carbon structure in nanodiamonds elucidated from Raman spectroscopy // *Carbon*. 2017. Vol. 121. P. 322–329.
12. Knapinska A.M., Tokmina-Roszyk D., Amar S., Tokmina-Roszyk M., Mochalin V.N., Gogotsi Yu., Cosme P., Terentis A.C., Fields G.B. // *Biopolymers*. 2015. Vol. 104(3). P. 186–195. doi:10.1002/bip.22636
13. Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond, Data Handbook. B: Springer Heidelberg, 2001. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0Z

References

1. Kulakova, I.I., Lisichkin, G.V. & Yakovlev, R.Y. (2020) *Himicheskoe modifitsirovanie poverhnosty nanoalmazov* [Chemical modification of the detonation nanodiamond surface]. M: Tehnosfera (in Russian)
2. Decarby, P.S. & Jamison, T.S. (1961) Detonation nanodiamonds *Science*. 133 (3466). p. 1821–1823.
3. Staver, A.M. & Lyamkin, A.I. (1990) *Poluchenie ultradispersnykhalmazov iz vzrivchatykhveshstv* [Production of ultrafine diamonds from explosives]. Ultrafine diamonds: production and properties KR: p. 188 (in Russian)
4. Dolmatov, V.Y. (2011) *Detomatsionnyenanoalmazy. Polyuchenie, svoystva, primeneniye* [Detonation nanodiamonds. Getting, properties, and application]. SPB: NPO PROFESIONAL p. 536 (in Russian)
5. Danilenko, V.V. (2004) *Is istorii otkritiya sintesa nanoalmazov* [From the history of the discovery of nanodiamond synthesis]. Fisica tverdogo tela. pp. 581–584 (in Russian)
6. Kulakova, I.I. (2004) *Himiya poverhnosty nanoalmazov* [Chemistry of the nanodiamond surface]. Fisica tverdogo tela. pp. 621–628. (in Russian)

7. Khmel'nitskiy, R.A., Talipov, N.H. & Chucheva, G.V. (2017) *Sinteticheskiy almaz dlya elektroniki i optiki* [Synthetic diamond for electronics and optics] M: IKAR (in Russian)
8. Chashchin, V.V., Lyga, O.I. & Shulepov, M.A. (2024) Magnetosensitivity of N2V0-photoluminescence centers in diamond at different temperatures. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeятel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 2227. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/3
9. Mermoux, M. & Chang L.-Y. (2020) Raman spectroscopy study of detonation nanodiamond. *Diamond and Related Materials*. 87. pp. 248–260.
10. Shtechlin, S. & Mermu, M. (2020) Effect of size on surface chemistry and RAMAN spectra of nanodiamonds smaller than 5 nm oxidized under high pressure, at high temperature and detonation *Jurnal fizicheskoy himii*. p. 125.
11. Korepanov, V.I. Hiro-o, Hamaguchi, Eiji, Osawa, Ermolenkov, V., Lednev, I.K., Etzold, B.J.M., Levinson, O., Zousman, B. et al. (2017) Carbon structure in nanodiamonds elucidated from Raman spectroscopy. *Carbon*. 121. pp. 322–329.
12. Knapinska, A.M., Tokmina-Roszyk, D., Amar, S., Tokmina-Roszyk, M., Mochalin, V.N., Gogotsi, Yu., Cosme, P., Terentis, A.C. & Fields, G.B. (2015) *Biopolymers*. 104 (3). pp. 186–195. doi:10.1002/bip.22636
13. Zaitsev, A.M. (2001) *Optical Properties of Diamond, Data Handbook*. B: Springer Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0Z

Информация об авторах:

Чеботова Анна Анатольевна – студент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия)

Бородулин Захар Игоревич – студент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com

Петров Илья Сергеевич – инженер-исследователь исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Томского политехнического университета (Томск, Россия). SPIN-код: 5485-9132, 1248594

Шеремет Евгения Сергеевна – доктор философии, профессор исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Томского политехнического университета (Томск, Россия). SPIN-код: 4712-8877, 551328

Лапин Иван Николаевич – заведующий испытательной лабораторией технических систем и средств досмотра Томского государственного университета (Томск, Россия). SPIN-код: 9760-7400, 136651

Липатов Евгений Игоревич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовых информационных технологий, доцент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: evlip@mail2000.ru. ORCID ID: 0000-0002-9665-9373, SPIN-код: 8550-5968

Ворожцов Александр Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, директор центра управления научно-технологическими и инновационными проектами Томского государственного университета (Томск, Россия). SPIN-код: 4764-7869, 44794

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Anna A. Chebotova, student at the Department of Quantum Electronics and Photonics, Faculty of Radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation)

Zakhar I. Borodulin, student at the Department of Quantum Electronics and Photonics, Faculty of Radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com

Ilya S. Petrov, research engineer at the Research School of Chemical and Biomedical Technologies, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 5485-9132, 1248594

Evgeniya S. Sheremet, Philosophy Doctor, Professor at the Research School of Chemical and Biomedical Technologies, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4712-8877, 551328

Ivan N. Lapin, Head of the Testing Laboratory of Technical Systems and Inspection Facilities, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 9760-7400, 136651

Evgeny I. Lipatov, Cand.Sc. (Physics and Mathematics), Head of the laboratory of quantum information technologies, associate professor of the department of quantum electronics and photonics, faculty of radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: evlip@mail2000.ru, ORCID ID: 0000-0002-9665-9373, SPIN-code: 8550-5968

Alexander B. Vorozhtsov, Doctor.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Center for Management of Scientific, Technological and Innovative Projects, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4764-7869, 44794

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 07.11.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 04.12.2025

The article was submitted 07.11.2025; approved after reviewing 01.12.2025; accepted for publication 04.12.2025