

**СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НРНТ МОНОКРИСТАЛЛА АЛМАЗА
С ПРЕДЕЛЬНЫМ УРОВНЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ АЗОТОМ**

**В.Н. Денисов, С.И. Жолудев, А.С. Галкин, Т.Е. Дроздова,
С.А. Носухин, М.С. Кузнецов, С.А. Терентьев, В.Д. Бланк**

Виктор Николаевич Денисов*

НИЦ «Курчатовский институт» — ТИСНУМ, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

Институт спектроскопии РАН, ул. Физическая, 5, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: denisovvn@tisnum.ru*

Сергей Иванович Жолудев, Артем Сергеевич Галкин, Таисия Евгеньевна Дроздова, Сергей Анатольевич Носухин, Михаил Сергеевич Кузнецов, Сергей Александрович Терентьев

НИЦ «Курчатовский институт» — ТИСНУМ, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: s.i.zholudev@gmail.com, as.galkin@physics.msu.ru, t.shpitontseva@mail.ru, dedsan@yandex.ru, mikuz@yandex.ru, s.ter@bk.ru

Владимир Давыдович Бланк

НИЦ «Курчатовский институт» — ТИСНУМ, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация, 141701

E-mail: blankvlad@gmail.com

Монокристалл алмаза типа 1b с предельной концентрацией азота выращен при высоком статическом давлении и высокой температуре (НРНТ). Из монокристалла алмаза при помощи лазера были вырезаны три пластины, параллельные кристаллографическим плоскостям (100): вблизи основания пирамиды, из ее середины и вблизи вершины. Данные пластины исследовались методами оптической спектроскопии и рентгеновской высокоразрешающей дифрактометрии. На пластинах отчетливо выделяются бесцветные и желтые сектора роста. По спектрам инфракрасного поглощения установлено, что эти области содержат А- и С- азотные центры, соответственно. Максимальные концентрации азота $[NA] \approx 510$ ррт и $[NC] \approx 320$ ррт были определены по пиковым интенсивностям полос А (1282 см^{-1})- и С (1130 см^{-1})- азотных центров в спектрах ИК поглощения пластины, вырезанной из кристалла алмаза вблизи основания пирамиды. В спектрах фотолюминесценции бесцветных областей наблюдались интенсивные дублетные полосы комплекса Со-N-V, а в желтых областях обнаружена дублетная полоса комплекса Со-N, с меньшей на два порядка интенсивностью. Параметры кристаллической решетки исследуемых алмазных пластин в областях с А- и С- центрами были определены с помощью метода высокоразрешающей дифрактометрии. Значение параметров составило для области с С-центрами $a_0 = 3,56760 \pm 0,00001\text{ \AA}$, а для области с А-центрами: $a_0 = 3,56750 \pm 0,00002\text{ \AA}$. Обнаружена обратная зависимость параметра решетки от содержания азота в соответствующих областях. За исключением вышеперечисленных структурных особенностей, образование А- и С- азотных центров, комплексов Со-N-V, образования других С-N центров, в том числе нитрида углерода C_3N_4 не наблюдалось.

Ключевые слова: HPHT алмазы, ИК-спектроскопия, фотолюминесценция, рентгеноструктурный анализ, азотно-вакансионные комплексы, азотные центры в алмазе

STRUCTURAL PROPERTIES OF HPHT SINGLE CRYSTAL DIAMOND WITH A LIMITED NITROGEN DOPING LEVEL

V.N. Denisov, S.I. Zholudev, A.S. Galkin, T.E. Drozdova,
S.A. Nosukhin, M.S. Kuznetsov, S.A. Terentyev, V.D. Blank

Victor N. Denisov*

NRC "Kurchatov Institute" — TISNCM, Tsentralnaya str., 7a, Troitsk, Moscow 108840, Russia
Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences, Fizicheskaya st., 5 Troitsk, Moscow 108840, Russia
E-mail: denisovvn@tisnum.ru

Sergey I. Zholudev, Artem S. Galkin, Taisiya E. Drozdova, Sergey A. Nosukhin, Mikhail S. Kuznetsov, Sergey A. Terentyev

NRC "Kurchatov Institute" — TISNCM, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow 108840, Russia
E-mail: s.i.zholudev@gmail.com, as.galkin@physics.msu.ru, t.shpitontseva@mail.ru, dedsan@yandex.ru, mikuz@yandex.ru, s.ter@bk.ru

Vladimir D. Blank

NRC "Kurchatov Institute" — TISNCM, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow 108840, Russia
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutsky Lane, 9, Dolgoprudny, Moscow reg., 141701, Russia
E-mail: blankvlad@gmail.com

A type 1b diamond single crystal with a high nitrogen concentration was grown at high static pressure and high temperature. Using laser this diamond single crystal were cut three plates parallel to the crystallographic planes (100): near the base of the pyramid, from its middle and near the top. These plates were studied by optical spectroscopy and X-ray high-resolution diffractometry. The colorless and yellow growth sectors are clearly visible on the plates. According to the infrared absorption spectra, these regions contain A- and C-nitrogen centers, respectively. The maximum nitrogen concentrations $[NA] \cong 510$ ppm and $[NC] \cong 320$ ppm were determined from the peak intensities of the A (1282 cm^{-1})- and C (1130 cm^{-1})- bands, observed in the IR absorption spectra of a plate cut from a diamond crystal near the base of the pyramid. Intense doublet bands of the Co-N-V complex were observed in the photoluminescence spectra of the colorless regions. A doublet band of the Co-N complex with a lower intensity by two orders of magnitude was detected in the yellow regions. The crystal lattice parameters of the studied diamond plates in the regions with A- and C-centers were determined using high-resolution diffractometry. The value of the parameters was $a_0 = 3.56760 \pm 0.00001\text{ \AA}$ for the region with C-centers, and $a_0 = 3.56750 \pm 0.00002\text{ \AA}$ for that of with A-centers. The inverse dependence of the lattice parameter on the nitrogen content in the corresponding regions is found. With the exception of the above structural properties: the formation of A- and C-nitrogen centers, Co-N-V complexes, the formation of other C-N centers, including carbon nitride C_3N_4 , was not observed.

Keywords: HPHT diamonds, IR spectroscopy, photoluminescence, X-ray diffraction analysis, nitrogen vacancy complexes, nitrogen centers in diamond

Для цитирования:

Денисов В.Н., Жолудев С.И., Галкин А.С., Дроздова Т.Е., Носухин С.А., Кузнецов М.С., Терентьев С.А., Бланк В.Д. Структурные особенности HPHT монокристалла алмаза с предельным уровнем легирования азотом. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 11. С. 80–86. DOI: 10.6060/ivkkt.20256811.14y.

For citation:

Denisov V.N., Zholudev S.I., Galkin A.S., Drozdova T.E., Nosukhin S.A., Kuznetsov M.S., Terentyev S.A., Blank V.D. Structural properties of HPHT single crystal diamond with a limited nitrogen doping level. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 11. P. 80–86. DOI: 10.6060/ivkkt.20256811.14y.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск сверхжестких структур на основе углерод-азотных соединений является одной из приоритетных задач материаловедения в течение последних 30 лет. В 1989 г. Лю и Коэн предложили структуру нитрида углерода C_3N_4 [1, 2], которая может обладать объемным модулем (В) выше, чем у алмаза. За этот период был опубликован ряд теоретических работ о возможности синтеза подобных соединений, включая экспериментальные работы по выращиванию монокристаллов алмазов с C-N связями [3-9], но фактически ни одна из этих работ не представила убедительных доказательств существования таких структур. Теоретически было предсказано, что для синтеза алмазов с C-N связями необходима высокая концентрации азота в ростовой среде. В нашей работе была поставлена задача вырастить монокристалл алмаза с максимальной концентрацией азота методом температурного градиента, определить предельную растворимость азота в нем и изучить структурные изменения и дефекты [10], образующиеся в процессе его роста при высоких давлениях и температуре. Решение этой задачи обусловлено интересом к применению алмазных пластин высокого структурного совершенства с прецизионным и однородным уровнем легирования для создания элементов алмазной электроники [11].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выращивания легированных азотом монокристаллов алмаза был использован метод синтеза при высоком статическом давлении (5-6 ГПа) в области термодинамической стабильности алмаза (температура 1770-1970 К) в поле температурного градиента [12-15]. В качестве металла катализатора использовали сплав железо – кобальт с чистотой исходных компонентов не хуже 99,98%. В качестве источника углерода использовался графит чистотой 99,99%. В качестве источника азота использовался нитрид железа Fe_3N . Для повышения концентрации азота в выращиваемом кристалле дополнительно в источник углерода вводился нитрид железа Fe_3N , содержание которого в ростовой среде составляла 1,33 и 3,28 масс. % по отношению к источнику углерода. Ростовые эксперименты проводились в аппарате высокого давления типа «тороид», длительность их варьировали от 50 до 150 ч.

Поскольку при воздействии высокой температуры нитрид железа разлагался на азот и железо, то элементный состав ростовой среды не изменялся. При концентрации азота в ростовой среде, равной 3,28 масс. %, регулярный рост монокристалла прекращался и наблюдалась спонтанная кристаллизация алмаза с дендритной структурой [16].

На рис. 1а показан 1b-монокристалл алмаза октаэдрической формы, выращенный при содержании азота в ростовой среде 1,33 масс. %.

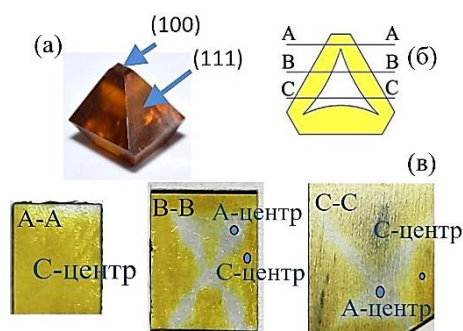


Рис. 1. (а) 1b-монокристалл алмаза октаэдрической формы, (б) схема лазерного раскроя кристалла алмаза, (в) оптические изображения пластин в сечениях (А-А), (В-В) и (С-С)

Fig. 1. (a) 1b is an octahedral diamond single crystal, (б) a laser cutting scheme for a diamond crystal, (в) optical images of plates in sections (A-A), (B-B) and (C-C)

Из монокристалла алмаза при помощи лазера производилась вырезка пластин параллельно плоскости (100) в сечениях (А-А), (В-В), (С-С) (рис. 1б), которые затем подвергались профилированию и полировке для удаления поврежденного поверхностного слоя (рис. 1в).

Дальнейшие исследования полученных пластин производилось классическим комплексом оптических и рентгеноструктурных методов для их характеристики.

Для определения концентрации азотных центров использовался количественный метод спектроскопии инфракрасного (ИК) поглощения с использованием Фурье-спектрометра Thermo Nicolet Nexus 470 FT-IR.

Для поиска других точечных дефектов, таких как азотно-вакансионные центры или иных центров, связанных с металлом катализатора, использовался полуколичественный метод фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света (КРС), в которых анализируется соотношение ин-

тенсивностей люминесцентных полос по отношению к алмазному пику. В работе использовался спектрометр TRIAX-552 HORIBA Jobin Yvon Inc.

Для определения параметров кристаллической решетки алмазных пластин был использован метод высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии на установке Empryeon PANalytical.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пластины монокристаллов алмаза в сечениях (А-А), (В-В) и (С-С) исследовались оптическими и рентгеновскими методами. Спектры ИК-поглощения и оптические изображения исследуемых алмазных пластин приведены на рис. 2.

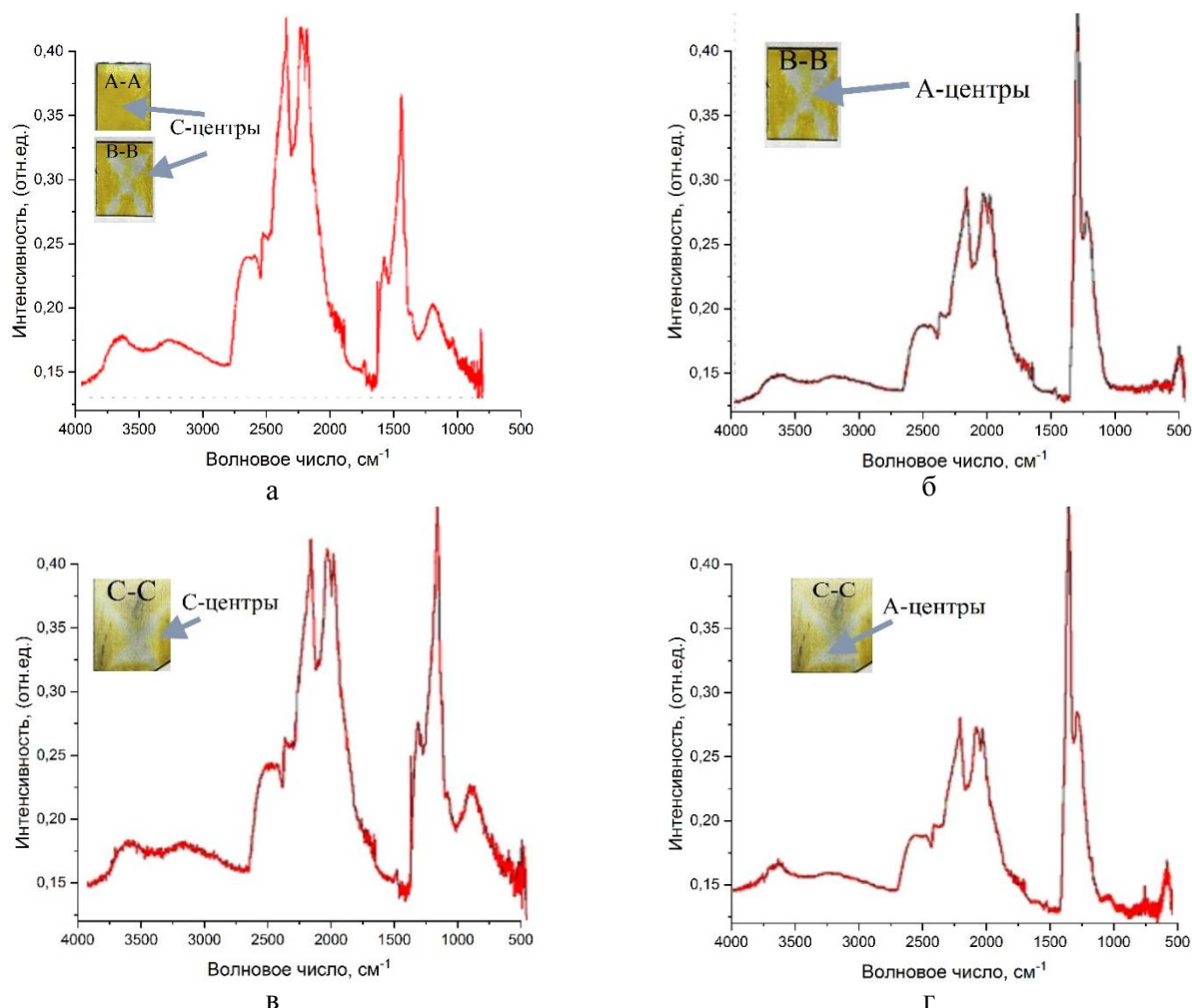


Рис. 2. Спектры ИК - поглощения и оптические изображения алмазных пластин, в сечениях (А-А), (В-В) и (С-С)
Fig. 2. IR absorption spectra and optical images of diamond plates, in sections (A-A), (B-B) and (C-C)

Из этих спектров, по интенсивностям полос А- и С- (1282 см^{-1} и 1130 см^{-1}) азотных центров были определены концентрации $[N_A]$ и $[N_C]$ с точностью $\sim 10\%$ [17]. В спектре пластины (А-А) (рис. 2а) наблюдается одна область желтого цвета, содержащая только С-центры. Концентрация С-центров составила $[N_C] \sim 270\text{ ppm}$.

На рис. 2а приведен ИК спектр пластины (В-В) с двумя характерными областями желтого цвета, совпадающего со спектром пластины (А-А), содержащий С-центры с концентрацией $[N_C] \sim 270\text{ ppm}$ и белого цвета (рис. 2б), содержащий А-центры

$[N_A] \sim 470\text{ ppm}$. Данная концентрация рассчитывалась по аналогии с С-центрами [17, 18].

На рис. 2 представлен также ИК спектр пластины (С-С) с двумя областями желтого цвета (рис. 2в) с концентрацией С-центров $[N_C] \sim 320\text{ ppm}$ и белого цвета (рис. 2г) с концентрацией А-центров $[N_A] \sim 510\text{ ppm}$, что является максимальным содержанием азота в монокристаллах алмаза, полученных данным методом.

В спектрах фотолюминесценции и КРС пластины (В-В), снятых при температуре $T \cong 80\text{ K}$ (рис. 3), наблюдаются фоновый пик алмаза $552,4\text{ nm}$

(1332,5 cm^{-1}) и дублеты, характерные для Co-N-V комплексов [19]. Следует отметить, что интенсивность дублетов комплексов Co-N-V в областях белого цвета (с А-центрами) (рис. 3а), на два порядка выше, чем в желтых областях (с С-центрами) (рис. 3б).

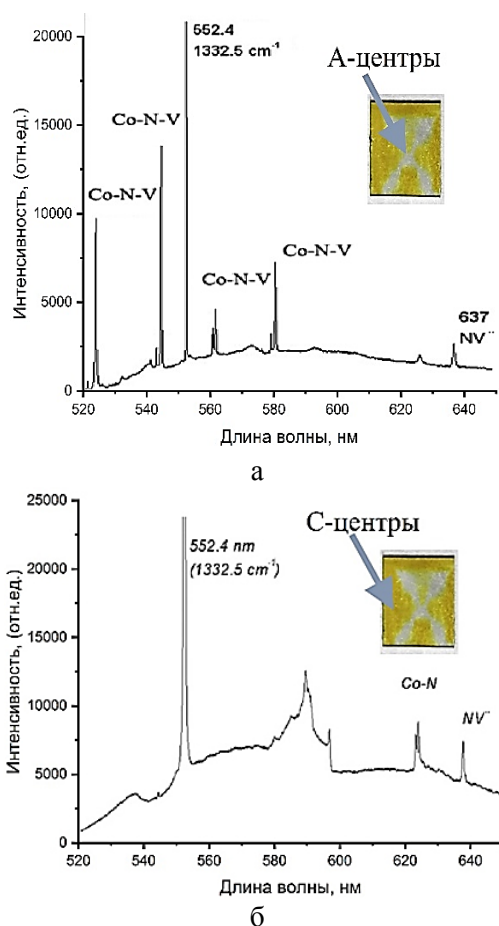


Рис. 3. Спектры КРС (а) и фотолюминесценции пластины (В-В) (б), снятые при температуре $T \approx 80\text{K}$
Fig. 3. Raman (a) and photoluminescence spectra (б) of the plate (В-В) taken at a temperature of $T \approx 80\text{K}$

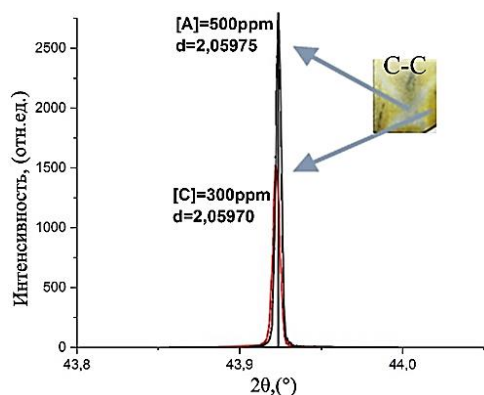


Рис. 4 Кривая дифракционного отражения монокристаллической алмазной пластины в сечении (С-С), для областей с А- и С-центрами

Fig. 4 Diffraction reflection curve of a single crystal diamond plate in cross section (C-C), for regions with A- and C-centers

С целью сравнения параметров кристаллической решетки алмазных пластин в областях с С- и А-центрами из сечения (С-С) (рис. 4) проведены исследования кристаллической структуры данных областей методом высокоразрешающей дифрактометрии [20]. Эти параметры сравнивались с измеренным параметром эталонного бездефектного монокристалла алмаза типа Па, $A_0 = 3,56669 \pm 0,00001 \text{ \AA}$.

В пластине алмаза из сечения (С-С), где концентрация азота в А-центрах составила $[N_A] \approx 510 \text{ ppm}$, что в $\sim 1,6$ раз больше, чем в С-центрах $[N_C] \approx 320 \text{ ppm}$, наблюдается обратная зависимость значений параметра кристаллической решетки. Значения параметров составили для области с С-центрами $A_0 = 3,56760 \pm 0,00001 \text{ \AA}$, а для области с А-центрами он оказался меньше и составил $A_0 = 3,56750 \pm 0,00002 \text{ \AA}$.

Образование областей с А-центрами происходит в тех частях кристалла, где наблюдается повышенная концентрация дислокаций и двойников, обычно в межсекториальных областях кристалла. Формирование азотных пар (А-центр) позволяет уменьшить не только удельный объем кристалла, но и снизить уровень напряжений, обусловленных линейными дефектами.

Основная часть азотных центров находится в секторах (111), что, в частности, объясняет и октаэдрическую форму кристалла, содержащего высокую концентрацию азота [14, 16]. Это, в свою очередь, должно приводить к нарушению кубической симметрии кристалла. Для проверки этого предположения был проведен эксперимент по исследованию микропорошка алмаза, полученного дроблением монокристаллической пластины, содержащей только С-центры.

Была измерена дифракционная кривая в диапазоне углов 2θ от 40° до 130° с использованием рентгеновского $\text{CuK}\alpha$ -излучения. На основе этих данных были идентифицированы два типа ячейки: кубическая и тетрагональная. Оказалось, что в пределах точности данного эксперимента тетрагональная ячейка лучше описывает полученные экспериментальные данные, чем кубическая. Предполагаем, что предельный уровень азотирования может приводить к частичному понижению симметрии кристалла алмаза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом НРНТ был выращен монокристалл алмаза с предельным уровнем легирования азотом. Оптическими методами были исследованы алмазные пластины, вырезанные из различных сечений монокристалла. Были обнаружены характерные области, содержащие только С-центры, вблизи

вершины пирамиды кристалла, и содержащие А- и С-центры, из середины кристалла и вблизи его основания.

Наибольшая концентрация азота в решетке монокристаллов была определена в пластине, вырезанной вблизи основания, с максимальным содержанием А-центров $[N_A] \cong 510$ ppm, а для С-центров $[N_C] \cong 320$ ppm. В спектрах фотолюминесценции белых областей наблюдались интенсивные дублетные полосы комплекса Со-N-V, а в желтых областях обнаружена дублетная полоса комплекса Со-N, с меньшей на два порядка интенсивностью.

Методами высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии были определены параметры решетки исследуемых пластин в различных областях, содержащих только или А- и С-центры. В области с максимальным уровнем легирования значение параметров составило для области С-центрами $a_0 = 3,56760 \pm 0,00001$ Å, а для области с А-центрами он оказался меньше и составил $a_0 = 3,56750 \pm 0,00002$ Å. Обнаружена обратная зависимость параметра решетки от содержания азота в соответствующих областях.

За исключением вышеперечисленных структурных особенностей, таких как образование А- и С-азотных центров, комплексов Со-N-V, иных образований, в частности, нитрида углерода C_3N_4 в оптических спектрах не наблюдалось. Для изучения физико-механических свойств, в т.ч. модуля Юнга Е и твердости таких кристаллов необходимы дополнительные исследования.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Часть работы выполнена при инструментальной поддержке Центра коллективного пользования «Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов» НИЦ «Курчатовский институт» — ТИСНУМ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Part of the work was carried out with the instrumental support of the Center for Shared Use "Research of Nanostructured, Carbon and Superhard Materials" of the National Research Center "Kurchatov Institute" - TISNCM.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Liu A.Y., Cohen M.L.** Prediction of new low compressibility solids. *Science*. 1989. V. 245. N 4920. P. 841–842. DOI: 10.1126/science.245.4920.841.
2. **Cohen M.L.** Novel materials from theory. *Nature*. 1989. V. 338. P. 291–292. DOI: 10.1038/338291a0.
3. **Komatsu T.** Attempted preparation of diamond-like carbon nitride by explosive shock compression of poly(methineimine). *J. Mater. Chem.* 1998. V. 8. N 11. P. 2475–2479. DOI: 10.1039/a804137g.
4. **Wixom M.R.** Chemical Preparation and Shock Wave Compression of Carbon Nitride Precursors. *J. Am. Ceram. Soc.* 1990. V. 73. N 7. P. 1973–1978. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1990.tb05254.x.
5. **Wang Y., Wang X., Antonietti M.** Polymeric Graphitic Carbon Nitride as a Heterogeneous Organocatalyst: From Photochemistry to Multipurpose Catalysis to Sustainable Chemistry. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012. V. 51. P. 68. DOI: 10.1002/anie.201101182.
6. **Ashfold M.N.R., Goss J.P., Green B.L., May P.W., Newton M.E., Peaker C.V.** Nitrogen in Diamond. *Chem. Rev.* 2020. V. 120. P. 5745–5794. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00518.
7. **Taylor W.R., Canil D., Milledge J.H.** Kinetics of Ib to IaA nitrogen aggregation in diamond. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1996. V. 60. N 23. P. 4725. DOI: 10.1016/S0016-7037(96)00302-X.
8. **Goss J.P., Briddon P.R., Papagiannidis S., Jones R.** Interstitial nitrogen and its complexes in diamond. *Phys. Rev. B*. 2004. V. 70. P. 235208. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.235208.
9. **Palyanov Y.N., Borzdov Y.M., Khokhryakov A.F., Kupriyanov I.N., Sokol A.G.** Effect of Nitrogen Impurity on Diamond Growth Processes. *Crystal Growth Des.* 2010. V. 10. P. 3169–3175. DOI: 10.1021/cg100322p.
10. **Кульницкий Б.А., Гордеева Т.А., Бланк В.Д.** Межплоскостные расстояния в деформированном алмазе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 9. С. 14–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.4y. **Kulnitskiy B.A., Gordееva T.A., Blank V.D.** Interplanar distances in deformed diamond. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 9. P. 14–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.4y.
11. **Буга С.Г., Галкин А.С., Кузнецов М.С., Корнилов Н.В., Лупарев Н.В., Приходько Д.Д., Тарелкин С.А., Бланк В.Д.** Двуслойные пластины из синтетических монокристаллов алмаза, легированных азотом для высокотемпературных диодов Шоттки n-типа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 27–33. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.7y. **Buga S.G., Galkin A.S., Kuznetsov M.S., Kornilov N.V., Luparev N.V., Prikhodko D.D., Tarelkin S.A., Blank V.D.** Double-layer plates from synthetic diamond single-crystals doped with nitrogen for high-temperature n-type schottky diodes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 11. P. 27–33. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.7y.
12. **Chen L., Miao X., Ma H., Guo L., Wang Z., Yang Z., Jia X.** Synthesis and characterization of diamonds with different nitrogen concentrations under high pressure and high temperature conditions. *Cryst Eng Comm.* 2018. V. 20. P. 7164–7169. DOI: 10.1039/c8ce01533c.

13. **Fang C., Zhang Y.W., Zhang Z.F., Shan C.X., Shen W.X., Jia X.P.** Preparation of 'Natural' Diamonds by HPHT Annealing of Synthetic Diamonds. *Cryst Eng Comm.* 2018. 20. P. 505-511. DOI: 10.1039/C7CE02013A.
14. **Blank V.D., Kuznetsov M.S., Nosukhin S.A., Terentiev S.A., Denisov V.N.** The influence of crystallization temperature and boron concentration in growth environment on its distribution in growth sectors of type IIb diamond. *Diamond Relat. Mater.* 2007. V. 16. N 4-7. P. 800. DOI: 10.1016/j.diamond.2006.12.010.
15. **Burns R.C., Chumakov A.I., Connell S.H., Dube D., Godfried H.P., Hansen J.O., Van Vaerenbergh P.** HPHT growth and x-ray characterization of high-quality type IIa diamond. *J. Phys.: Cond. Matter.* 2009. V. 21. N 36. P. 364224. DOI: 10.1088/0953-8984/21/36/364224.
16. **Polyakov S.N., Denisov V.N., Mavrin B.N., Kirichenko A.N., Kuznetsov M.S., Martyushov S.Y., Blank V.D.** Formation of Boron-Carbon Nanosheets and Bilayers in Boron-Doped Diamond: Origin of Metallicity and Superconductivity. *Nanoscale Res. Lett.* 2016. V. 11. P. 11. DOI: 10.1186/s11671-015-1215-6.
17. **Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S.** The relationship between infrared absorption and the A defect concentration in diamond. *Philos. Mag. B.* 1994. V. 69. N 6. P. 1149-1153. DOI: 10.1080/01418639408240185.
18. **Lawson S.C., Fisher D., Hunt D.C., Newton M.E.** On the existence of positively charged single-substitutional nitrogen in diamond. *J. Phys.: Condens. Matter.* 1998. V. 10. N 27. P. 6171-6180. DOI: 10.1088/0953-8984/10/27/016.
19. **Lawson S.C., Kanda H., Watanabe K., Kiflawi I., Sato Y., Collins A.T.** Spectroscopic study of cobalt-related optical centers in synthetic diamond. *J. Appl. Phys.* 1996. V. 79. P. 4348. DOI: 10.1063/1.361744.
20. **Seregin A.Yu., Prosekov P.A., Chukhovskiy F.N., Volkovskiy Yu.A., Blagov A.E., Kovalchuk M.V.** Experimental and theoretical study of a three-crystal scheme of high-resolution X-ray diffractometry in the reverse space mapping method. *Crystallography.* 2019. V. 64. N 4. P. 521-528. DOI: 10.1134/s1063774519040175.

Поступила в редакцию 06.05.2025

Принята к опубликованию 24.06.2025

Received 06.05.2025

Accepted 24.06.2025