

ЭВОЛЮЦИЯ ВАКАНСИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ В СИНТЕТИЧЕСКОМ АЛМАЗЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ И ОТЖИГА

С.Ю. Трошиев, С.В. Большедворский, С.Д. Трофимов, Н.В. Лупарев, С.А. Носухин, С.Г. Буга

Сергей Юрьевич Трошиев*, Сергей Дмитриевич Трофимов, Николай Викторович Лупарев, Сергей Анатольевич Носухин, Сергей Геннадьевич Буга

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: sergey.troschiev@gmail.com*

Сергей Юрьевич Трошиев

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, ул. Озерная, 46, Москва, Российская Федерация, 119361

Степан Викторович Большедворский

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп., 53, Москва, Российская Федерация, 119991

В работе исследовано формирование массивов азот-вакансионных комплексов (NV-центров) в синтетическом монокристалле алмаза в результате облучения высокоэнергетическими электронами и последующего высокотемпературного отжига. Методами оптической спектроскопии (поглощение и люминесценция) в видимой области спектра исследована эволюция дефектно-примесного состава облученного монокристалла HPHT-алмаза при вакуумном отжиге при температурах от 800 до 1500 °С. Использован метод оценки концентрации NV-центров по спектрам поглощения, позволивший оценить отдельно концентрации отрицательно заряженных и нейтральных NV-центров. Исследования проведены в двух ростовых секторах алмаза: {111} и {100}, отличающихся различными эффективностями встраивания примесных атомов в процессе роста. Показано, что в ростовом секторе {100} вероятность формирования нейтральных NV-центров в 1,6 раз превышает вероятность формирования отрицательно заряженных центров из-за малого количества донорной примеси азота. Для создания квантовых сенсоров магнитного поля и гироскопов предпочтительным является формирование NV-центров в ростовом секторе {111}. Было исследовано формирование H3-центров при высокотемпературном отжиге и показано, что отжиг следует выполнять при температуре 1000 °С или ниже, в противном случае азот формирует не NV-центры, а H3-центры. Показано, что оптимальная доза облучения для HPHT кристаллов составляет порядка 10^{18} см². В ростовых секторах {111} и {100} методом измерения биений Рамси было определено время когерентности $T_2^ = 0,88$ мкс, практически достигающее ограничения в 0,9 мкс, обусловленного наличием в решетке алмаза атомов углерода ¹³C с ядерным спином 1/2.*

Ключевые слова: синтетический алмаза, монокристалл, азот-вакансионный комплекс, электронное облучение, люминесцентная спектроскопия, спектроскопия поглощения, дефектно-примесный состав, ростовые сектора кристалла, квантовые сенсоры

Для цитирования:

Трошиев С.Ю., Большедворский С.В., Трофимов С.Д., Лупарев Н.В., Носухин С.А., Буга С.Г. Эволюция вакансионных комплексов в синтетическом алмазе под действием облучения высокоэнергетическими электронами и отжига. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 16–21

For citation:

Troschiev S.Yu., Bolshedvorskii S.V., Trofimov S.D., Luparev N.V., Nosukhin S.A., Buga S.G. Evolution of vacancy-based complexes in synthetic diamond under irradiation with high-energy electrons and annealing. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 12. P. 16–21

**EVOLUTION OF VACANCY-BASED COMPLEXES
IN SYNTHETIC DIAMOND UNDER IRRADIATION WITH HIGH-ENERGY ELECTRONS
AND ANNEALING**

S.Yu. Troschiev, S.V. Bolshedvorskii, S.D. Trofimov, N.V. Luparev, S.A. Nosukhin, S.G. Buga

Sergey Yu. Troschiev*, Sergei D. Trofimov, Nikolay V. Luparev, Sergey A. Nosukhin, Sergei G. Buga
Technological Institute of Superhard and New Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow,
108840, Russia

E-mail: sergey.troschiev@gmail.com*

Sergey Yu. Troschiev

All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Ozernaya st., 46, Moscow, 119361,
Russia

Stepan V. Bolshedvorskii

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskiy ave., 53, Moscow,
119991, Russia

In this work, the formation of nitrogen-vacancy complexes (NV-centers) in a synthetic single crystal diamond as a result of irradiation with high-energy electrons and subsequent high-temperature annealing is studied. The evolution of the defect-impurity composition of an irradiated HPHT diamond single crystal upon vacuum annealing at temperatures from 800 to 1500 °C has been studied by optical spectroscopy (absorption and luminescence) in the visible spectrum. We used a method for estimating the concentration of NV-centers by the absorption spectra, which made it possible to estimate separately the concentrations of negatively charged and neutral NV-centers. The studies were carried out for two diamond growth sectors: {111} and {100}, which have different efficiencies of the impurity atoms incorporation during growth. It is shown that in the {100} growth sector the probability of the formation of neutral NV centers is 1.6 times higher than the probability of the formation of negatively charged centers due to the small amount of nitrogen donor impurity. To create quantum magnetic field sensors and gyroscopes, it is preferable to form NV centers in the {111} growth sector. The formation of H3 centers during high-temperature annealing was studied and it was shown that annealing should be performed at a temperature of 1000 °C or lower, otherwise nitrogen forms H3 centers rather than NV centers. It was shown that the optimal irradiation dose for HPHT diamond crystals is about 10^{18} cm⁻². In the {111} and {100} growth sectors, the Ramsey fringes measurement method was used to measure the coherence time $T_2^ = 0.88$ μs, which reaches the limit of 0.9 μs due to the presence of ¹³C carbon atoms with nuclear spin 1/2 in the diamond lattice.*

Key words: synthetic diamond, single crystal, nitrogen-vacancy complex, electron irradiation, luminescence spectroscopy, absorption spectroscopy, defect-impurity composition, crystal growth sectors, quantum sensors

ВВЕДЕНИЕ

Отрицательно заряженный азот-вакансионный комплекс в алмазе (NV-центр, далее по тексту просто NV-центр) в настоящее время является одним из наиболее перспективных источников одиночных фотонов для квантовой криптографии, а также уникальной квантовой системой, которая при комнатной температуре позволяет устанавливать двустороннюю связь между квантовым миром и макромиром за счет оптической «записи» и «считывания» его состояния [1]. Одиночные NV-центры являются одними из

основных кандидатов на роль кубитов для квантового компьютера [2]. Плотные массивы NV-центров представляют собой чувствительную область для квантовых сенсоров (гироскопов и магнитометров), обладающих непревзойденной точностью [3, 4].

В настоящее время актуальна задача формирования множества NV-центров в одной монокристаллической алмазной подложке для разработки квантовых устройств на их основе: упорядоченных матриц одиночных центров [5] или максимально плотных массивов [6, 7]. Большинство исследовательских групп в мире формируют

NV-центры в алмазных пленках, выращенных методом осаждения из газовой фазы (CVD) [8, 9], так как эта технология хорошо отработана, недорога и позволяет выращивать химически и изотопно чистые кристаллы [10]. В то же время из-за неравновесного процесса роста CVD-пленки характеризуются внутренними механическими напряжениями, что негативно влияет на фотонные свойства образующихся NV-центров, в частности, вызывает неоднородное группирование центров в кристалле [11].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование формирования массивов NV-центров в монокристаллических пластинах Ib алмаза, выращенных методом температурного градиента при высоком давлении и высокой температуре (TG-HPHT) [12]. Метод заключается в выращивании крупного кристалла из расплава железа, содержащего углерод. При этом атомы углерода под действием температурного градиента «перетекают» из источника углерода (графита) и осаждаются на затравке, формируя основные кристаллографические плоскости: (100), (111), (113) и др. Благодаря различной поверхностной энергии каждой из плоскостей [13], эффективность встраивания примесей в их кристаллическую решетку отличается, что приводит к отличию их дефектно-примесного состава [14, 15]. Этот эффект называется секториальностью алмаза, и играет важную роль при создании электронных и квантовых устройств [11, 16].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Формирование NV-центров в монокристалле алмаза может осуществляться в ходе объединения атома азота и вакансии, находящихся в кристаллической решетке алмаза, в NV-центр. На практике этот метод заключается в воздействии высокоэнергетического ионизирующего излучения (ионов или электронов) на алмаз для формирования исходных дефектных центров (см., например, работу [11]). Одиночная вакансия в алмазе является дефектом кристаллической решетки и носит название GR-центр (от англ. general radiation), так как формируется под действием ионизирующего излучения при воздействии высокоэнергетической частицы на атом углерода, при котором этот атом выбивается из узла кристаллической решетки. Для объединения вакансии с примесным атомом азота (он может находиться как в позиции замещения, так и в междоузлии) образец нагревают до высокой температуры (более 600 °С),

при которой вакансии обретают подвижность и могут приблизиться к атому азота и образовать азот-вакансионный комплекс.

В работе использовались монокристаллы алмаза, выращенные в ФГБНУ ТИСЧУМ и подготовленные по методике, описанной в работе [17]. Концентрация азота в выращенных кристаллах составила 10^{16} - 10^{18} см⁻³ (50 ppb-5 ppm) в зависимости от ростового сектора [11]. Именно этот азот принимал участие в формировании NV-центров.

В отличие от CVD-кристаллов, HPHT монокристаллы алмаза высокого качества практически не имеют вакансий, поэтому для формирования NV-центров необходимо создать вакансии в объеме кристалла. Для этого в настоящей работе был использован импульсный линейный ускоритель электронов на энергию 1 МэВ с мощностью пучка до 25 кВт на базе НИИЯФ МГУ им. Ломоносова. Было выполнено облучение образцов с энергией 1 МэВ и дозой 15 Град ($6,25 \cdot 10^{17}$ электронов на 1 см²).

После облучения последовательно выполнялись шаги, состоящие из следующих операций:

- измерение спектра поглощения в видимом диапазоне при температуре жидкого азота 77 К (Bruker VERTEX 80v) для оценки концентрации оптически активных центров;
- измерение спектра поглощения в УФ диапазоне при комнатной температуре (Cary 4000) для оценки концентрации азота в образце по концентрации C-центров (азот в позиции замещения);
- картографирование спектра люминесценции (Renishaw inVia);
- отжиг в течение 1 ч при пошагово повышающейся на 100 °С температуре от 800 (первый шаг) до 1500 °С (последний шаг) в вакууме для исследования эволюции дефектно-примесного состава образца.

Расчет концентраций оптически активных центров (NV⁻, NV⁰, GR, H3) проводился в соответствии с методикой и с использованием коэффициентов пересчета, описанных в [18, 19].

Измерения времени когерентности T₂^{*} проводились методом измерения биений Рамси [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры поглощения в видимом диапазоне, измеренные для ростовых секторов алмаза {111} и {100} после облучения и после отжига, показаны на рис. 1.

Перед отжигом концентрация GR-центров в ростовых секторах {111} и {100} алмазе составляла около 1,5 ppm. После каждого отжига их

концентрация снижалась. После отжига при 1000 °С концентрация GR-центров стала ниже порога детектирования (< 1 ppb).

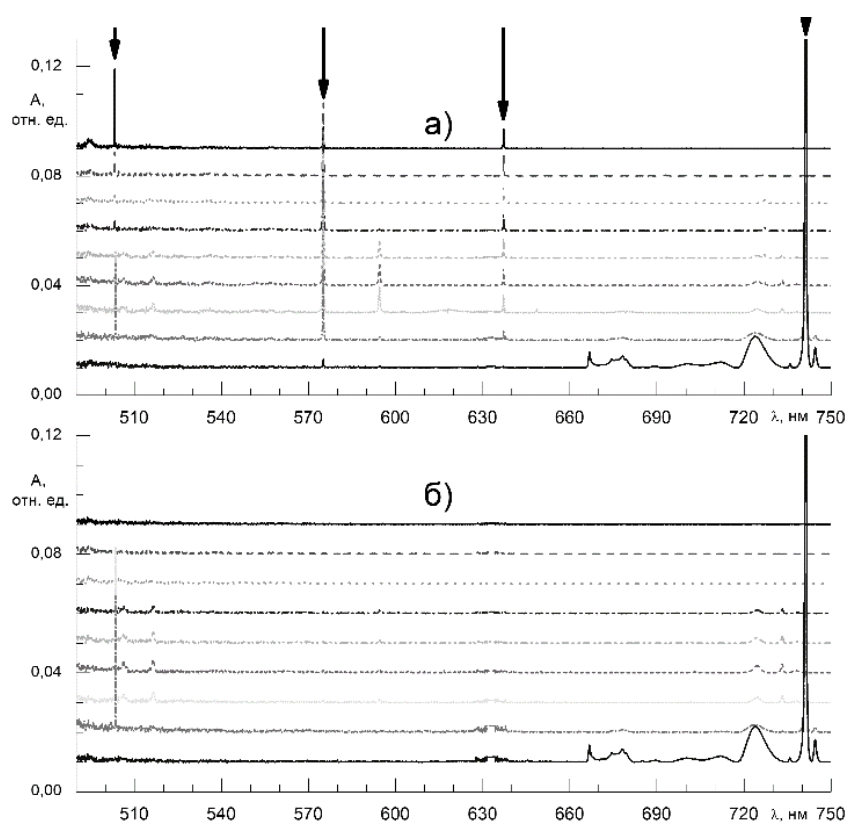


Рис. 1. Спектры поглощения $A(\lambda)$ ростовых секторов алмаза $\{111\}$ (а) и $\{100\}$ (б) в видимом диапазоне при 77 К после облучения и отжига. Для удобства чтения кривые сдвинуты друг относительно друга вертикально на 0,01 отн. ед. Снизу вверх: после облучения, после отжига 800 °С, 900 °С и далее до 1500 °С. Стрелками отмечены линии поглощения центров (слева направо): H3, NV0, NV⁻, GR

Fig. 1. Absorption spectra of diamond growth sectors $\{111\}$ (a) and $\{100\}$ (б) in the visible range at 77 K after irradiation and annealing. The curves have vertical offset by 0.01 rel. units. Starting from: after irradiation, after annealing at 800 °C, 900 °C and further up to 1500 °C. The arrows mark the absorption lines of the defects (from left to right): H3, NV0, NV⁻, GR

Наличие оптически активного азота оценивалось на качественном уровне по максимуму поглощения на длине волны 270 нм (рис. 2). Поглощение наблюдалось вплоть до отжига при 1400 °С и исчезло после отжига при 1500 °С. Спектры поглощения после отжига при температурах 800-1400 °С отличаются друг от друга на величину меньше погрешности измерений, поэтому на рис. 2 приведен лишь один из таких спектров. Можно сделать вывод о том, что концентрация созданных вакансий оказалась недостаточна для взаимодействия со всем имеющимся в образце азотом и образова-

ния NV-центров, поэтому для создания максимально плотных массивов NV-центров требуется облучение с большей дозой.

Исчезновение азота в виде С-центров (одиночный парамагнитный азот в положении замещения) при высокой температуре связано с формированием H3-центров (комплекс N-V-N) в алмазе. Максимум поглощения 503 нм, обусловленный поглощением света H3-центрами, наблюдался после отжига при 1100 °С и выше. Концентрация H3-центров после отжига при 1500 °С составила 140 ppb.

Люминесценция и поглощение NV⁻ (637 нм) и NV⁰-центров (575 нм) наблюдались в ростовом секторе $\{111\}$ уже после отжига при 800 °С и оставались неизменными до 1500 °С. Измеренная концентрация NV⁻ составила порядка 20 ppb. В ростовом секторе $\{100\}$ азот-вакансионные комплексы не были выявлены методом спектроскопии поглощения видимого излучения, поэтому их наличие устанавливалось методом фотолюминесценции.

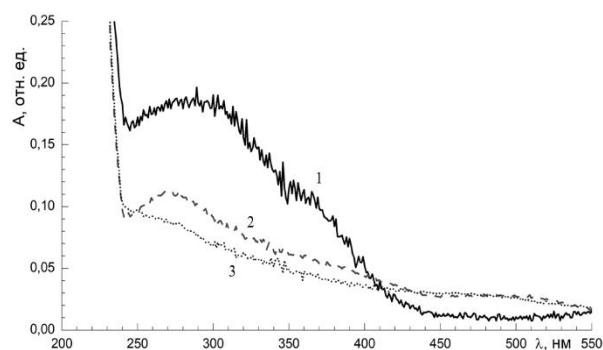


Рис. 2. Спектр поглощения $A(\lambda)$ ростового сектора алмаза $\{111\}$ в УФ диапазоне до облучения (сплошная кривая), после облучения и отжига при температуре 900 °С (штриховая кривая) и после отжига при температуре 1500 °С (пунктирная кривая)

Fig. 2. Absorption spectra of diamond growth sector $\{111\}$ in the UV range before irradiation (solid curve), after irradiation and annealing at 900 °C (dashed curve), and after annealing at 1500 °C (dotted curve)

На рис. 3 приведена карта соотношения интенсивности люминесценции NV⁰/NV⁻. Видно, что в ростовом секторе $\{100\}$ (в центре образца) соотношение выше, то есть вероятность нахождения NV-центра в нейтральном зарядовом состоя-

нии значительно выше, чем в отрицательном, предпочтительном для задач квантовой сенсорики и криптографии. Вероятно, преимущественное нейтральное зарядовое состояние NV-центров связано с малым содержанием в {001} ростовом секторе алмаза С-центров (донорного азота, который может отдать электрон NV-центру для его перевода в отрицательное состояние) [21].

Для исследования применимости полученных результатов при создании квантовых сенсоров (гироскопов и магнитометров) были измерены когерентные свойства созданных массивов NV-центров в ростовых секторах {100} и {111}. Результаты измерений приведены на рис. 4. Полученное время когерентности $T_2^* = 0,88$ мкс достигает ограничения в 0,9 мкс [22], обусловленного наличием в решетке алмаза атомов углерода ^{13}C с ядерным спином 1/2.

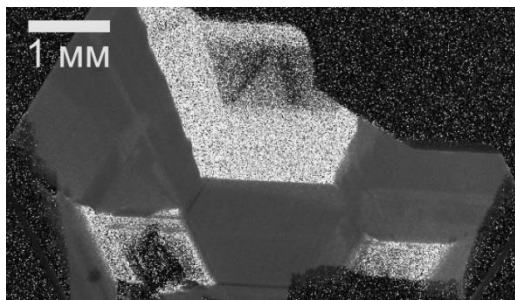


Рис. 3. Карта соотношения интенсивности люминесценции NV⁰/NV⁻. Максимальная яркость соответствует соотношению, равному 16

Fig. 3. Luminescence intensity ratio NV⁰/NV⁻ map. The maximum brightness equals to a ratio of 16

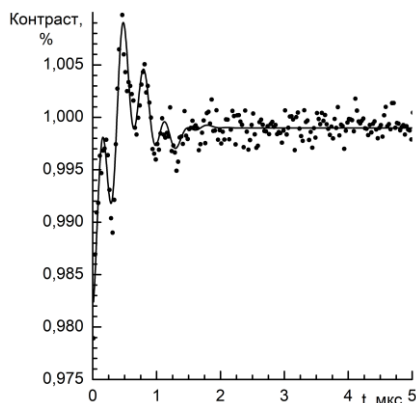


Рис. 4. Биения Рамси ансамбля электронных спинов NV-центров

Fig. 4. Ramsey fringes of NV-center ensemble

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало, что монокристаллы НРНТ алмаза являются перспективным материалом, подходящим для создания

квантовых сенсоров, таких как магнитометры и гироскопы. Для создания плотных массивов NV-центров в таких кристаллах необходимо использовать ростовой сектор {111}, содержащий достаточно много азота, и выполнять облучение с достаточно высокой дозой (порядка 10^{18} см⁻²). Повышение дозы облучения приведет к более полной конверсии азота в NV-центры, что позволит создавать более плотные массивы NV-центров и может повысить время их когерентности за счет снижения концентрации донорных центров. Отжиг следует выполнять при температуре 1000 °С или ниже для предотвращения образования НЗ-центров.

Авторы выражают благодарность Т.Е. Дроздовой, А.С. Галкину за проведение оптических измерений, а также С.А. Тарелкину за плодотворные научные дискуссии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-52-53051 с использованием оборудования ЦКП ФГУП «ВНИИОФИ» (www.ckr.vniiofi.ru) и ЦКП ТИСУМ (www.tisnum.ru/suec/suec.html).

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-52-53051 using equipment from the Center for Collective Use of the VNIIOFI (www.ckr.vniiofi.ru) and the Center for Collective Use of TISNUM (www.tisnum.ru/suec/suec.html).

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Childress L., Hanson R. Diamond NV centers for quantum computing and quantum networks. *MRS Bulletin*. 2013. V. 38. P. 134–138. DOI: 10.1557/mrs.2013.20.
2. Bradley C.E., Randall J., Abobeih M.H., Berrevoets R.C., Degen M.J., Bakker M.A., Markham M., Twitchen D.J., Taminiou N.H. A Ten-Qubit Solid-State Spin Register with Quantum Memory up to One Minute. *Phys. Rev. X*. 2019. V. 9. P. 031045. DOI: 10.1103/PhysRevX.9.031045.
3. Prawer S., Aharonovich I. Quantum information processing with diamond: principles and applications. *Woodhead Publ.* 2014. 345 p.
4. Barry J.F., Schloss J.M., Bauch E., Turner M.J., Hart C.A., Pham L.M., Walsworth R.L. Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry. *Rev. Mod. Phys.* 2020. V. 92. P. 015004. DOI: 10.1103/RevModPhys.92.015004.
5. Huang Z., Li W.-D., Santori C., Acosta V.M., Faraon A., Ishikawa T., Wu W., Winston D., Williams R.S., Beausoleil R.G. Diamond nitrogen-vacancy centers created by scanning focused helium ion beam and annealing. *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 103. P. 081906. DOI: 10.1063/1.4819339.

6. **Feng F., Zhang W., Zhang J., Lou L., Zhu W., Wang G.** Optimizing the density of nitrogen implantation for generating high-density NV center ensembles for quantum sensing. *Europ. Phys. J. D.* 2019. V. 73. P. 202. DOI: 10.1140/epjd/e2019-100047-8.
7. **Botsoa J., Sauvage T., Adam M.-P., Desgardin P., Leoni E., Courtois B., Treussart F., Barthe M.-F.** Optimal conditions for NV-center formation in type-1b diamond studied using photoluminescence and positron annihilation spectroscopies. *Phys. Rev. B.* 2011. V. 84. P. 125209. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.125209.
8. **Bogdanov S.A., Gorbachev A.M., Radishev D.B., Vikharev A.L., Lobaev M.A., Gusev S.A., Tatarsky D.A., Bolshedvorskii S.V., Akimov A.V., Chernov V.V.** Creation of Localized NV Center Ensembles in CVD Diamond by Electron Beam Irradiation. *Tech. Phys. Lett.* 2019. V. 45. P. 281–284. DOI: 10.1134/S1063785019030222.
9. **Edmonds A.M., D’Haenens-Johansson U.F.S., Crudace R.J., Newton M.E., Fu K.-M.C., Santori C., Beausoleil R.G., Twitchen D.J., Markham M.L.** Production of oriented nitrogen-vacancy color centers in synthetic diamond. *Phys. Rev. B.* 2012. V. 86. P. 035201. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.035201.
10. **Lühmann T., Raatz N., John R., Lesik M., Rödiger J., Portail M., Wildanger D., Kleißler F., Nordlund K., Zaitsev A., Roch J.-F., Tallaire A., Meijer J., Pezzagna S.** Screening and engineering of colour centres in diamond. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51. P. 483002. DOI: 10.1088/1361-6463/aadfab.
11. **Trofimov S.D., Tarelkin S.A., Bolshedvorskii S.V., Bormashov V.S., Troshchiov S.Yu., Golovanov A.V., Luparev N.V., Prikhodko D.D., Boldyrev K.N., Terentiev S.A., Akimov A.V., Kargin N.I., Kukin N.S., Gusev A.S., Shemukhin A.A., Balakshin Y.V., Buga S.G., Blank V.D.** Spatially controlled fabrication of single NV centers in IIa HPHT diamond. *Opt. Mater. Express.* 2020. V. 10. P. 198. DOI: 10.1364/OME.10.000198.
12. **Burns R.C., Hansen J.O., Spits R.A., Sibanda M., Welbourn C.M., Welch D.L.** Growth of high purity large synthetic diamond crystals. *Diam. Rel. Mater.* 1999. V. 8. P. 1433–1437. DOI: 10.1016/S0925-9635(99)00042-4.
13. **Doronin M.A., Larionov K.V., Troschiev S.Y., Terentiev S.A.** Dependence of Synthetic Diamond Wear Rate on Lattice Orientation at Traditional Mechanical Treatment. *J. Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2017. V. 11. P. 1192–1195. DOI: 10.1134/S1027451017060052.
14. **Burns R.C., Cvetkovic V., Dodge C.N., Evans D.J.F., Rooney M.-L.T., Spear P.M., Welbourn C.M.** Growth-sector dependence of optical features in large synthetic diamonds. *J. Cryst. Growth.* 1990. V. 104. P. 257–279. DOI: 10.1016/0022-0248(90)90126-6.
15. **Бормашов В.С., Тарелкин С.А., Кузнецов М.С., Терентьев С.А., Буга С.Г., Семенов А.Н.** Электрофизические свойства синтетических монокристаллов алмаза с различной концентрацией легирующей примеси бора. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2013. Т. 56. Вып. 7. С. 9–12.
Bormashov V.S., Tarelkin S.A., Kusnetsov M.S., Terentiev S.A., Buga S.G., Semenov A.N. Electrical properties of synthetic single-crystal diamonds with different concentration of boron dopant. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2013. V. 56. N 7. P. 9–12 (in Russian).
16. **Садовой В.Ю., Бланк В.Д., Терентьев С.А., Тетерук Д.В., Трошчиев С.Ю.** Исследование влияния кристаллографического направления синтетического монокристалла алмаза на коэффициент вторичной электронной эмиссии. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 59. Вып. 8. P. 21. DOI: 10.6060/tcct.20165908.30y.
Sadovoy V.Yu., Blank V.D., Terentiev S.A., Teteruk D.V., Troschiev S.Yu. Crystallographic orientation influence on secondary electron emission coefficient of a single crystal of synthetic diamond. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 59. N 8. P. 21 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20165908.30y.
17. **Doronin M.A., Polyakov S.N., Kravchuk K.S., Molchanov S.P., Lomov A.A., Troschiev S.Yu., Terentiev S.A.** Limits of single crystal diamond surface mechanical polishing. *Diam. Rel. Mater.* 2018. V. 87. P. 149–155. DOI: 10.1016/j.diamond.2018.05.016
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.: Cond. Matter.* 1998. V. 10. P. 6171–6180. DOI: 10.1088/0953-8984/10/27/016.
19. **Davies G., Lawson S.C., Collins A.T., Mainwood A., Sharp S.J.** Vacancy-related centers in diamond. *Phys. Rev. B.* 1992. V. 46. P. 13157–13170. DOI: 10.1103/PhysRevB.46.13157.
20. **Rubinas O.R., Vorobyov V.V., Soshenko V.V., Bolshedvorskii S.V., Sorokin V.N., Smolyaninov A.N., Vins V.G., Yelisseyev A.P., Akimov A.V.** Spin properties of NV centers in high-pressure, high-temperature grown diamond. *J. Phys. Comm.* 2018. V. 2. P. 115003. DOI: 10.1088/2399-6528/aae992.
21. **Lühmann T., John R., Wunderlich R., Meijer J., Pezzagna S.** Coulomb-driven single defect engineering for scalable qubits and spin sensors in diamond. *Nat. Com.* 2019. V. 10. P. 4956. DOI: 10.1038/s41467-019-12556-0.
22. **Bauch E., Hart C.A., Schloss J.M., Turner M.J., Barry J.F., Kehayias P., Singh S., Walsworth R.L.** Ultralong Dephasing Times in Solid-State Spin Ensembles via Quantum Control. *Phys. Rev. X.* 2018. V. 8. P. 031025. DOI: 10.1103/PhysRevX.8.031025.

Поступила в редакцию 07.10.2020
Принята к опубликованию 21.10.2020

Received 07.10.2020
Accepted 21.10.2020