

Научная статья
УДК 535, 548.4
doi: 10.17223/29491665/8/6

Катодо-, фото- и рентгенолюминесценция синтетического алмаза, содержащего NV⁰-центры

Василий Сергеевич Рипенко¹, Дарья Александровна Переседова², Иван Сергеевич Гусев³,
Михаил Александрович Шулепов⁴, Александр Геннадьевич Бураченко⁵,
Александр Александрович Крылов⁶, Константин Петрович Артёмов⁷,
Борис Григорьевич Гольденберг⁸, Виктор Генрихович Винс⁹

^{1, 2, 4, 5, 6, 7} *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*
^{1, 2, 4, 5, 6} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*
^{3, 8} *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*
⁹ *ООО «ВЕЛМАН», Новосибирск, Россия*
¹ *dsws@vripenko.ru*
⁴ *mixshlp@yandex.ru*

Аннотация. Проведено исследование спектров свечения синтетического алмазного образца при трех различных видах воздействия: электронным пучком, лазерным и рентгеновским излучением. Спектры катодолюминесценции представлены в широком температурном диапазоне – от 80 до 700 К. Катодолюминесценция возбуждалась электронным пучком с энергией до 300 кэВ. Спектры фотолюминесценции были получены при возбуждении кристалла лазерами на длине волны 371, 405, 450 и 520 нм. Рентгенолюминесценция возбуждалась синхротронным пучком с энергией до 6 кэВ. Показана возможность использования подобных кристаллов для создания мониторов-визуализаторов синхротронного пучка.

Ключевые слова: алмаз, катодолюминесценция, рентгенолюминесценция, фотолюминесценция, монитор, NV-центр, синхротронное излучение

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы «Учебного центра коллективного проектирования электронной компонентной базы для систем беспроводной связи» (соглашение от 06.03.2024 г. № 075-02-2024-1524) в Томском государственном университете.

Для цитирования: Рипенко В.С., Переседова Д.А., Гусев И.С., Шулепов М.А., Бураченко А.Г., Крылов А.А., Артёмов К.П., Гольденберг Б.Г., Винс В.Г. Катодо-, фото- и рентгенолюминесценция синтетического алмаза, содержащего NV⁰-центры // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 45–51. doi: 10.17223/29491665/8/6

Original article
doi: 10.17223/29491665/8/6

Luminescence of synthetic diamonds depending on the method of excitation

Vasily S. Ripenko¹, Darya A. Peresedova², Ivan S. Gusev³, Mikhail A. Shulepov⁴,
Alexander G. Burachenko⁵, Alexander A. Krylov⁶, Konstantin P. Artemov⁷,
Boris G. Goldenberg⁸, Viktor G. Vins⁹

^{1, 2, 4, 5, 6, 7} *Institute of High-current Electronics SB RAS, Russian Federation*
^{1, 2, 4, 5, 6} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*
^{3, 8} *Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation*
⁹ *WELMAN LLC, Novosibirsk, Russian Federation*
¹ *dsws@vripenko.ru*
⁴ *mixshlp@yandex.ru*

Abstract. A synthetic diamond, due to its unique properties, is widely used in various fields of science and technology. In addition, diamond has a large number of color centers, one of the most common of which is the NV⁰ center. To create crystals with such centers, synthetic diamonds grown by the temperature gradient method with a high content of substitutional nitrogen are

usually used. Such crystals are subjected to radiation-heat treatment to create the necessary color centers. Diamonds with a high content of NV⁰ centers are excellent indicators of various kinds of action (electrons, X- and γ -photons, α -particles etc). This article examines the spectra of a synthetic diamond sample under three different types of excitation: electron beams, laser irradiation, and X-ray radiation. The cathodoluminescence (CL) spectra are presented over a wide temperature range from 80 to 700 K. Cathodoluminescence was excited by an electron beam with energies up to 300 keV. Photoluminescence (PL) spectra were obtained by exciting the crystal with lasers at wavelengths of 371, 405, 450, and 520 nm. X-ray luminescence (XL) was excited by a synchrotron beam with energies up to 6 keV. The paper shows the possibility of using such crystals to create synchrotron-beam imaging monitors designed for a high level of X-ray flux.

Keywords: diamond, cathodoluminescence, X-ray luminescence, photoluminescence, monitor, NV center, synchrotron radiation

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project «Personnel Training and scientific foundation for the electronic industry» of the State Program of the Russian Federation «Scientific and Technological Development of the Russian Federation» during the implementation of the Program «Training Center for Collective Design of electronic component Base for wireless communication systems» (Agreement No. 075-02-2024-1524 dated 03/06/2024) at Tomsk State University.

For citation: Ripenko, V.S., Peresedova, D.A., Gusev, I.S., Shulepov, M.A., Burachenko, A.G., Krylov, A.A., Artemov, K.P., Goldenberg, B.G. & Vins, V.G. (2024) Luminescence of synthetic diamonds depending on the method of excitation. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 45–51. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/6

Введение

Алмаз обладает высокой радиационной стойкостью (энергия образования вакансии составляет от 35 до 80 эВ) по сравнению с другими полупроводниковыми материалами, такими как кремний (7 эВ) или арсенид галлия (~5,0 эВ). Во многом благодаря этому алмаз является отличным кандидатом для работы в условиях длительного радиационного воздействия. Для сравнения: длительность работы алмазных детекторов излучений на порядок больше, чем кремниевых детекторов [1]. Синтетический алмаз уже используют в качестве квантовых сенсоров, детекторов излучения и мониторов положения и интенсивности пучков заряженных частиц (электронных, синхротронных и т.д.), а также в других высокотемпературных приложениях в электронике [2–4].

Технологии синтеза алмазов с использованием методов высокого давления, высокой температуры (НРНТ) и химического осаждения из газовой фазы (CVD) постоянно совершенствуются. Метод НРНТ позволяет получать крупные образцы алмазов размером до 20 × 17 × 11 см [5]. Технология CVD позволяет создавать алмазные пластины диаметром до 120 мм и толщиной до 3 мм [6]. Облучение алмаза пучками электронов с энергией единицы МэВ позволяет производить направленное и контролируемое изменение свойств кристалла, в результате которого создаются точечные радиационные дефекты [7]. Последующий высокотемпературный отжиг приводит к диффузии радиационных дефектов и перестройке примесно-дефектного состава.

В спектрах катодолуминесценции (КЛ), фотолуминесценции (ФЛ) или рентгенолуминесценции (РЛ) примесно-дефектные центры проявляются в виде характеристических максимумов (линий) и их

колебательных систем. К наиболее изученным и технологически простым примесно-дефектным центрам относятся NV-центры в нейтральном NV⁰ с БФЛ на длине волны 575 нм (2,157 эВ) и в отрицательном NV⁻ с БФЛ на длине волны 637 нм (1,947 эВ) зарядовых состояниях. Кроме NV-центров, существуют также и другие центры окраски алмаза, формирующиеся при радиационно-термической обработке.

Цель работы и современное состояние вопроса

В большинстве рассмотренных нами литературных источников исследуются либо природные образцы, либо синтезированные методом газохимического осаждения (ГХО). В данной работе был исследован алмазный образец, полученный методом температурного градиента в условиях высокого давления и высокой температуры (ВДВТ) и подвергнутый радиационно-термической обработке, содержащий NV⁰-центры с концентрацией несколько единиц частиц на миллион (ppm).

Целью данной работы являлось сравнение спектров свечения алмазного образца, полученных различными методами воздействия, и их анализ, а также проверка возможности использования алмазных кристаллов с NV⁰-центрами в качестве мониторов-визуализаторов рентгеновских синхротронных пучков.

Материалы и методы исследований

В данной работе исследованы спектры КЛ, ФЛ и РЛ алмазного ВДВТ образца (С147), предоставленного ООО «ВЕЛМАН», г. Новосибирск. Данный образец был подвергнут радиационно-термической обработке (РТО) для формирования в них NV центров в состоянии нейтрального заряда.

Точная концентрация центров NV⁰ неизвестна, но находится в диапазоне от 1 до 10 ppm.

Вместе с образцом С147 были исследованы спектры РЛ алмазных ВДВТ образцов С144, С145, С146 от того же производителя.

Исследование катодолуминесценции проводилось на экспериментальной установке НОРА с отпаянной электронной трубкой ИМА3-150Э. В установке использовался импульсный сильноточный пучок, имелась возможность охлаждения и нагрева образцов от 90 до 800 К. Однако если специально не указано, то люминесценция измерялась при комнатной температуре.

Более подробно данная установка описана в других наших работах (при охлаждении [8], при нагреве [9]). Энергия электронов в пучке ускорителя достигала 300 кэВ. Источниками возбуждения фотолуминесценции алмазного образца выступали полупроводниковые лазеры на длинах волн 371, 405, 450 и 520 нм. Регистрация спектров производилась при помощи спектрометра Ocean Optics HR2000 со спектральным диапазоном чувствительности от 200 до 1100 нм. Исследование РЛ производилось на экспериментальной станции синхротронного излучения ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

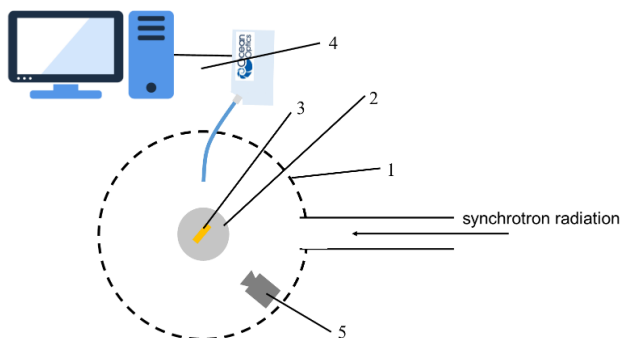


Рис. 1. Схема исследования рентгенолюминесценции алмаза под действием синхротронного излучения: 1 – вакуумная камера; 2 – оптический стол; 3 – образец алмаза; 4 – спектральный комплекс; 5 – видеокамера

Fig. 1. The scheme of investigation of diamond X-ray luminescence under the action of synchrotron radiation: 1 – vacuum chamber; 2 – optical table; 3 – diamond sample; 4 – spectral complex; 5 – video camera

Расчет и моделирование РЛ алмаза под действием синхротронного излучения проводились в программе GEANT4.

Результаты

В ходе экспериментов были получены спектры катодолуминесценции алмазного образца С147 в температурном диапазоне от 90 до 800 К (рис. 2). В спектрах свечения данного образца наблюдались линии и

полосы, обусловленные различными примесно-дефектными центрами. При понижении температуры до 90 К в спектрах КЛ проявлялись бесфононные линии (БФЛ) и их фононные повторения, что позволяло более детально исследовать спектры свечения.

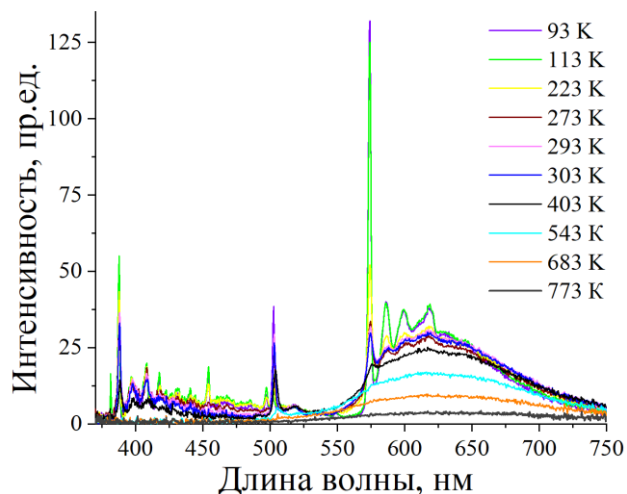


Рис. 2. Спектры катодолуминесценции для синтетического алмазного образца С147 в диапазоне температур 93–773 К

Fig. 2. The cathodoluminescence spectra of synthetic diamond sample C147 in the temperature range 93–773 K

В диапазоне 380–450 нм наблюдалась электронно-колебательная система (ЭКС) с БФЛ на длине волны 389 нм (3,188 эВ), которая соответствует дефекту структуры, в котором атом замещающего азота связан с атомом углерода, находящимся в междоузельном положении. В максимуме полосы 456–471 нм на длине волны 467,8 нм (2,65 эВ) наблюдался дефект TR12.

Полоса с максимумом на 484 нм (2,562 эВ) является ЭКС, которая наблюдается в спектрах катодолуминесценции у образцов, выращенных с использованием катализатора-растворителя, содержащего никель. Модель данного дефекта содержит один атом никеля или замещающий ион Ni_s^- [10]. Линия с максимумом на длине волны 497 нм (2,49 эВ) – это S3 центр, моделью которого является ион Ni в положении дивакансии, с двумя атомами азота в первой координационной сфере N-V-Ni-V-N [11].

БФЛ на длине волны 503 нм обусловлена расщепленным междоузельным центром 3Н (503,4 нм (2,463 эВ)) [12]. В области от 550 до 800 нм наблюдалась ЭКС с БФЛ на длине волны 575 нм, которая обусловлена NV° -центром.

Спектры фотолуминесценции алмазного образца С147 представлены на рис. 3.

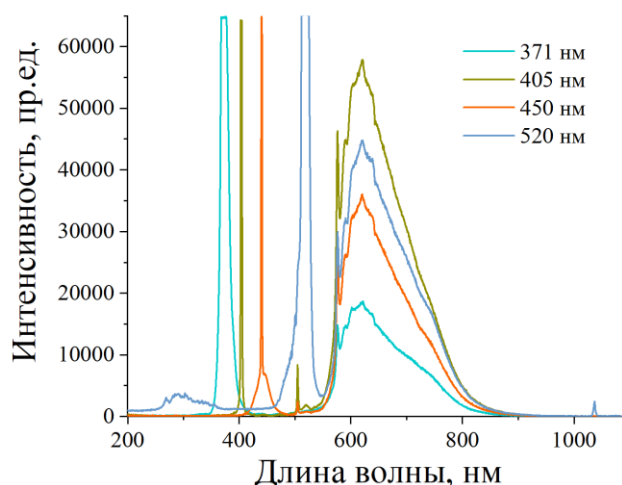


Рис. 3. Спектр фотолюминесценции синтетического алмазного образца при возбуждении на различных длинах волн

Fig. 3. The photoluminescence spectrum of a synthetic diamond sample under excitation at various wavelengths

Данные спектры оказались менее информативными по сравнению со спектрами КЛ. Так, при облучении образца длиной волны 520 нм возбуждается ЭКС с БФЛ на длине волны 389 нм. При возбуждении образца лазерами 405 и 450 нм возбуждалась БФЛ на длине волны 503 нм центров 3Н. При действии на образец лазерным излучением на всех длинах волн возбуждалась БФЛ на длине волны 575 нм NV⁰-центров.

На рис. 4 приведены фотография свечения алмазного образца C146 под действием рентгеновского синхротронного пучка и спектры синхротронной РЛ алмазных образцов C144, C145, C146 и C147.

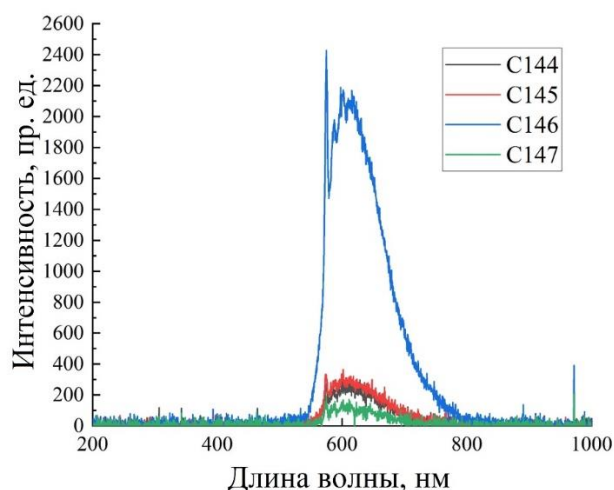


Рис. 4. Спектры рентгенолюминесценции алмазных образцов C144, C145, C146, C147 и фотография свечения образца C146

Fig. 4. X-ray luminescence spectra of diamond samples C144, C145, C146, C147 and a photo of the luminescence of the sample C146

Из рисунка видно, что в спектрах излучения алмазных образцов преобладает свечение NV⁰-центра с БФЛ на длине волны 575 нм. По фотографии свечения можно судить о достаточной четкости получаемого изображения синхротронного пучка.

В случае использования таких образцов в качестве мониторов пучков следует располагать их таким образом, чтобы рентгеновское излучение не попадало напрямую в детектирующее устройство. Было предложено расположить кристалл под углом 45° к траектории пучка.

Авторы провели расчеты площади рентгеновского свечения синхротронного пучка на поверхности образца алмаза с NV⁰-центрами. На рис. 5 приведен результат моделирования генерации фотонов видимого спектра при прохождении через кристалл алмаза рентгеновского излучения. Кристалл располагался под углом 45° к траектории пучка. Величина световых выходов принималась как 1100 квантов/МэВ, толщина кристалла – 250 мкм. Поперечные размеры пучка составляли 2 × 2 мм. Моделирование проводилось для пучка рентгеновских фотонов 10,305 кэВ (ось X – горизонтальная, ось Y – вертикальная; кристалл развернут на 45° вокруг оси X). Кроме того, был проведен расчет зависимости интенсивности РЛ от угла поворота кристалла алмаза (рис. 6).

Параметры кристалла и рентгеновского пучка в данном случае были такими же, как при моделировании «отпечатка» пучка (см. рис. 5). При этом кристалл вращался с шагом 5 градусов от полностью поперечного расположения к траектории пучка до полностью продольного.

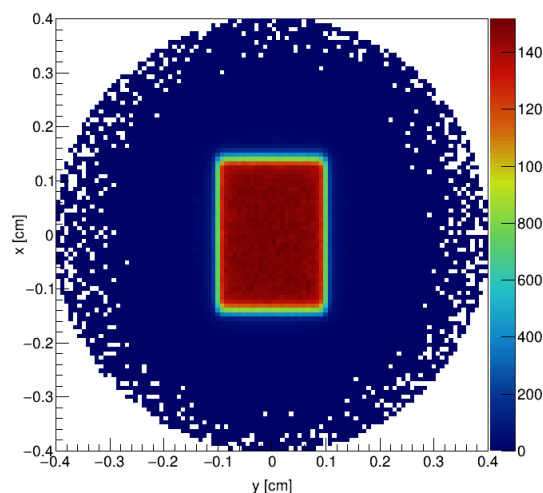


Рис. 5. Моделирование генерации фотонов видимого спектра при прохождении рентгеновского излучения через алмазный кристалл

Fig. 5. The simulation of the generation of photons of the visible spectrum during the passage of X-ray radiation through a diamond crystal

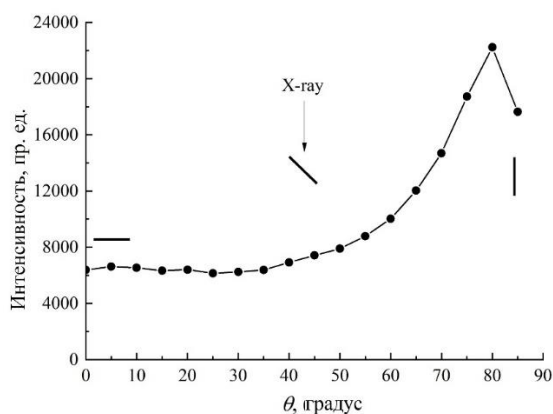


Рис. 6. Моделирование зависимости интенсивности РЛ от угла поворота алмазного кристалла

Fig. 6. The modeling the dependence of the X-ray luminescence intensity on the angle of rotation of a diamond crystal

Регистрация светового излучения осуществлялась под углом 45° к траектории пучка на расстоянии 15 мм от геометрического центра (точки вращения) кристалла алмаза с помощью детектирующей области в виде круга с телесным углом 0,536 ср.

Для вычисления каждой точки на графике проводилось моделирование для 10^7 рентгеновских квантов/с.

Заключение

В данной работе было представлено сравнение спектров КЛ, ФЛ и РЛ алмазного образца С147, синтезированного методом ВДВТ. При возбуждении интенсивным электронным пучком в спектрах КЛ наблюдаются линии и полосы практически всех центров окраски, присутствующих в алмазном образце.

При всех видах воздействия в спектрах люминесценции наблюдались БФЛ в спектрах всех образцов NV⁰-центра на длине волны 575 нм и её фононные повторения. Таким образом, монокристаллические алмазы, содержащие NV⁰-центры, являются отличным визуализатором оптических, рентгеновских и катодных излучений, включая синхротронные пучки.

Несмотря на низкий световыход, полученный в результате моделирования, в условиях, когда фотонный поток будет в интервале 10^{12} – 10^{13} фотонов/с (например, ускорителя СКИФ), яркости свечения будет достаточно для задач визуализации положения и измерения интенсивности синхротронного излучения, что подтверждается экспериментальными данными, полученными на установке ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск).

Список источников

1. Meier D., Adam W., Bauer C., Berdermann E., Bergonzo P., Bogani F., Borch E., Bruzzi M. et al. Proton irradiation of CVD diamond detectors for high-luminosity experiments at the LHC // *Nuclear instruments and methods in physics research A*. 1999. Vol. 426. P. 173–180. doi: 10.1016/S0168-9002(98)01488-0
2. Umezawa H. Recent advances in diamond power semiconductor devices // *Materials science in semiconductor processing*. 2018. Vol. 78. P. 147–156. doi: 10.1016/j.mssp.2018.01.007
3. Rouvalis E., Baynes F.N., Xie X., Li K., Zhou Q., Quinlan F., Fortier T.M., Diddams S.A., Steffan A.G. et al. High-power and high-linearity photodetector modules for microwave photonic applications // *Journal of lightwave technology*. 2014. Vol. 32 (20). P. 3810–3816. doi: 10.1109/JLT.2014.2310252
4. Lobaev M.A., Radishev D.B., Bogdanov S.A., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Isaev V.A., Kraev S.A., Okhapkin A.I., Arhipova E.A., Drozdov M.N., Shashkin V.I. Diamond p-i-n diode with nitrogen containing intrinsic region for the study of nitrogen-vacancy center electroluminescence // *Physica Status Solidi*. 2020. Vol. 14, № 11. P. 2000347.
5. Deljanin B., Alessandri M., Peretti A., Astrom M. NDT breaking the 10 carat barrier: World record faceted and gem-quality synthetic diamonds investigated // *Contributions to Gemology*. 2015. Vol. 15 (1). P. 1–7.
6. Anokin E., Muhr A., Bennett A., Twitchen D. J., de Wit H. Diamond optical components for high-power and high-energy laser applications // *Components and Packaging for Laser Systems*. 2015. Vol. 9346. Art. no. 93460T-1. P. 172–180. doi: 10.1117/12.2079714
7. Винс В.Г., Елисеев А.П., Старостенков М.Д. Генерация и отжиг радиационных дефектов в алмазах, облученных электронами // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2011. № 8. С. 66–79.
8. Переседова Д.А., Рипенко В.С. Спектральные и температурные зависимости импульсной катодолюминесценции азотно-вакансионных центров в алмазе при температурах от 80 до 300 К. Томск : СКТ, 2023. С. 72–75.
9. Ripenko V.S., Burachenko A.G., Peresedova D.A., Lipatov E.I. Edge luminescence of diamonds at temperatures from 80 to 800 K // *Russian Physics J*. 2023. Vol. 65. P. 1934–1939. doi: 10.17223/00213411/65/11/132
10. Pereira E., Pereira L., Hofmann D.M., Stadler W., Meyer B.K. Excited levels of the 2.56 eV emission in synthetic diamond // *Radiation Effects and Defects in Solids*. 1995. № 68. P. 72–79. doi: 10.17223/19988621/68/7
11. Nadolinny V.A., Yelisseyev A.P. New paramagnetic centres containing nickel ions in diamond // *Diamond and Related Materials*. 1993. Vol. 3. P. 17–21. doi: 10.1016/0925-9635(94)90024-8
12. Steeds J.W., Charles S., Davis T.J., Gilmore A., Hayes J., Pickard D., Butler J.E. Creation and mobility of self-interstitials in diamond by use of a transmission electron microscope and their subsequent study by photoluminescence microscopy // *Diamond and Related Materials*. 1999. Vol. 8. P. 94–100. doi: 10.1016/S0925-9635(98)00443-9

References

1. Meier, D., Adam, W., Bauer, C., Berdermann, E., Bergonzo, P., Bogani, F., Borch, E. & Bruzzi, M. (1999) Proton irradiation of CVD diamond detectors for high-luminosity experiments at the LHC. *Nuclear instruments and methods in physics research A*. 426. pp. 173–180. doi: 10.1016/S0168-9002(98)01488-0

2. Umezawa, H. (2018) Recent advances in diamond power semiconductor devices. *Materials science in semiconductor processing*. 78. pp. 147–156. doi: 10.1016/j.mssp.2018.01.007
3. Rouvalis, E., Baynes, F.N., Xie, X., Li, K., Zhou, Q., Quinlan, F., Fortier, T.M., Diddams, S.A. & Steffan, A.G. et al. (2014) High-power and high-linearity photodetector modules for microwave photonic applications. *Journal of lightwave technology*. 32 (20). pp. 3810–3816. doi: 10.1109/JLT.2014.2310252
4. Lobaev, M.A., Radishev, D.B., Bogdanov, S.A., Vikharev, A.L., Gorbachev, A.M., Isaev, V.A., Kraev, S.A., Okhapkin, A.I., Arhipova, E.A., Drozdov, M.N. & Shashkin, V.I. (2020) Diamond p-i-n diode with nitrogen containing intrinsic region for the study of nitrogen-vacancy center electroluminescence. *Physica Status Solidi*. 14 (11). pp. 2000347.
5. Deljanin, B., Alessandri, M., Peretti, A. & Astrom, M. (2015) NDT breaking the 10 carat barrier: World record faceted and gem-quality synthetic diamonds investigated. *Contributions to Gemology*. 15 (1). pp. 1–7.
6. Anokin, E., Muhr, A., Bennett, A., Twitchen, D. J. & de Wit, H. (2015) Diamond optical components for high-power and high-energy laser applications. *Components and Packaging for Laser Systems*. 9346. Art. no. 93460T-1. pp. 172–180. doi: 10.1117/12.2079714
7. Vince, V.G., Eliseev, A.P. (2011) Generaciya i otzhig radiacionnyh defektov v almazah, obluchennyh elektronami [Generation and annealing of radiation defects in diamonds irradiated with electrons]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 8. pp. 66–79.
8. Peresedova, D.A., Ripenko, V.S. (2023) *Spektral'nye i temperaturnye zavisimosti impul'snoj katodoluminescencii azotno-vakansionnyh centrov v almaze pri temperaturah ot 80 do 300 K* [Spectral and temperature dependences of pulsed cathodoluminescence of nitrogen vacancy centers in diamond at temperatures from 80 to 300 K]. Tomsk: STT. pp. 72–75.
9. Ripenko, V.S., Burachenko, A.G., Peresedova, D.A. & Lipatov, E. I. (2023) Edge luminescence of diamonds at temperatures from 80 to 800 K. *Russian Physics J*. 65. pp. 1934–1939. doi: 10.17223/00213411/65/11/132
10. Pereira, E., Pereira, L., Hofmann, D.M., Stadler, W. & Meyer, B.K. (1995) Excited levels of the 2.56 eV emission in synthetic diamond. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 135. pp. 143–148. doi: 10.1080/10420159508229824
11. Nadolinny, V.A. & Yelissev, A.P. (1993) New paramagnetic centres containing nickel ions in diamond. *Diamond and Related Materials*. 3. pp. 17–21. doi: 10.1016/0925-9635(94)90024-8
12. Steeds, J.W., Charles, S., Davis, T.J., Gilmore, A., Hayes, J., Pickard, D. & Butler, J.E. (1999) Creation and mobility of self-interstitials in diamond by use of a transmission electron microscope and their subsequent study by photoluminescence microscopy. *Diamond and Related Materials*. 8. pp. 94–100. doi: 10.1016/S0925-9635(98)00443-9

Информация об авторах:

Рипенко Василий Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: dsws@vrpenko.ru. ORCID ID: 0000-0003-1216-4881

Переседова Дарья Александровна – инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия); студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). ORCID ID: 0009-0002-9935-1101

Гусев Иван Сергеевич – аспирант Института ядерной физики СО РАН (Новосибирск, Россия). SPIN-код: 8290-8593

Шулупов Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: mixshlp@yandex.ru. SPIN-код: 4917-2804

Бураченко Александр Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). ORCID ID: 0000-0002-5929-5697

Крылов Александр Александрович – инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия); студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия).

Артёмов Константин Петрович – младший научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). ORCID ID: 0000-0002-2948-3195

Гольденберг Борис Григорьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН (Новосибирск, Россия). SPIN-код: 2622-2363.

Винс Виктор Генрихович – доктор физико-математических наук, директор ООО «ВЕЛМАН» (Новосибирск, Россия). ORCID ID: 0000-0002-0773-0810

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Ripenko Vasily S., Junior researcher, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dsws@vrpenko.ru. ORCID ID: 0000-0003-1216-4881

Peresedova Daria A., Engineer, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0009-0002-9935-1101

Gusev Ivan S., Postgraduate student, Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). SPIN-code: 8290-8593

Shulepov Mikhail A., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); senior researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: mixshlp@yandex.ru. SPIN-code: 4917-2804

Burachenko Alexander G., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0000-0002-5929-5697

Krylov Alexander A., Engineer, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics SB RAS (Tomsk, Russian Federation); student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

Artemov Konstantin P., Junior researcher, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0000-0002-2948-3195

Goldenberg Boris G., Cand. Sc. (Technics), senior researcher, Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). SPIN-code: 2622-2363

Vince Victor G., Doct. Sc. (Physics and Mathematics), director, VELMAN LLC (Novosibirsk, Russian Federation). ORCID ID: 0000-0002-0773-0810

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024