Научная статья
УДК 537.635, 535, 548.4
doi: 10.17223/29491665/8/4

NV- и N_2V-центры окраски в спектрах электролюминесценции алмаза

Людмила Александровна Васильева[1], Захар Игоревич Бородулин[2], Михаил Александрович Шулепов[3]

[1, 2, 3] *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*
[2, 3] *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*
[1] *wassil_93@mail.ru*
[2] *zahar.borodulin12@gmail.com*

Аннотация. В статье исследованы спектры электролюминесценции двух синтетических алмазных образцов. Замещающий азот, встраиваясь в кристаллическую решетку алмаза, после дополнительной постростовой радиационно-термической обработки образует NV-центры и N_2V-центры окраски в двух зарядовых состояниях. Данные центры окраски люминесцируют в диапазоне от 500 до 800 нм, который используется для управления квантовыми сенсорами и кубитами на основе алмаза.

Ключевые слова: алмаз, азот-вакансионные центры окраски, дефекты структуры, электролюминесценция, фотолюминесценция, катодолюминесценция, спектр пропускания, спектр поглощения

Благодарности: работа выполнена 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 развития учебного дизайн-центра «Микроэлектроника квантовой радиографии» (соглашения от 29.02.2024 г. № 075-02-2024-1500 и № 075-02-2024-1504) в Институте сильноточной электроники СО РАН.

Для цитирования: Васильева Л.А., Бородулин З.И., Шулепов М.А. NV и N_2V-центры окраски алмаза в спектрах электролюминесценции алмаза // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 28–36. doi: 10.17223/29491665/8/4

Original article
doi: 10.17223/29491665/8/4

NV and N_2V color centers in electroluminescence spectra of diamond

Lyudmila A. Vasilyeva[1], Zakhar I. Borodulin[2], Mikhail A. Shulepov[3]

[1, 2, 3] *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*
[2, 3] *Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation*
[1] *wassil_93@mail.ru*
[2] *zahar.borodulin12@gmail.com*

Abstract. Diamond, because of its unique properties, is a promising material for optoelectronic devices based on it: LEDs and lasers. The article examines the main optically active color centers of diamond, their characteristics and methods of production, and provides a literary overview of the most common light-emitting structures based on diamond – PIN-structures. The ways of creating these structures, their advantages and disadvantages, are considered. In the practical part of the work, it is shown that substitutional nitrogen can be embedded in the diamond structure and form, for example, such color centers as NV centers or N_2V centers in two charge states. The color of the sample, the method of excitation and the intensity of luminescence, and the width of the emission spectrum depend on the method of inclusion, concentration, and charge state of the nitrogen color centers. The spectra of photoluminescence, cathodoluminescence and electroluminescence are considered using the example of two samples. The intensity of electroluminescence in both samples is noticeably lower than that of cathodoluminescence and photoluminescence. Optically active centers are determined based on the spectra. The analysis of peaks at a certain wavelength and the width of the spectrum allow us to identify and distinguish one center from another. In sample C122, nitrogen was embedded in the structure in the form of an NV center, and in sample C130 in the form of an N_2V center. Since the intensity of electroluminescence directly depends on the current in the sample, Raman spectra are given to determine inhomogeneous inclusions affecting the flow of current. The analysis of Raman spectra shows the presence of non-diamond forms of carbon in samples such as carbine and graphite.

Key words: diamond, nitrogen-vacancy color centers, structural defects, electroluminescence, photoluminescence, cathodoluminescence, transmission spectrum, absorption spectrum

© Л.А. Васильева, З.И. Бородулин, М.А. Шулепов, 2024

Acknowledgments: The work 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 for the development of the educational design center «Microelectronics of Quantum Radiography» (agreements dated 29.02.2024 № 075-02-2024-1500 and № 075-02-2024-1504) at the Institute of High-current Electronics SB RAS.

For citation: Vasilyeva, L.A., Borodulin, Z.I. & Shulepov, M.A. (2024) NV and N_2V color centers in electroluminescence spectra of diamond. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 28–36. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/4

Введение

Алмаз привлекает внимание исследователей и разработчиков в области электроники и фотоники благодаря высокой теплопроводности, высокой радиационной стойкости и химической инертности. Одним из перспективных направлений развития, в которых может применяться алмаз, являются квантовые технологии. Алмазные структуры рассматриваются как потенциальные источники одиночных фотонов [1–3]. На основе алмаза разрабатываются квантовые сенсоры [2–5]. Предполагается применение центров окраски алмаза для квантовых вычислений [6, 7]. Наиболее отработанными являются технологии создания азот-вакансионных центров окраски в алмазе в процессе постростовой обработки, включая радиационно-термическую [8], облучение фемтосекундным лазером [9], ионную имплантацию [10].

Современное состояние исследований в области электролюминесценции алмаза

В настоящий момент многие научные коллективы, занимающиеся исследованиями алмаза, уделяют большое внимание изучению электролюминесценции (ЭЛ). Долгое время данное явление не исследовалось на синтетических алмазах. Прежде всего это было связано с особенностями синтеза алмаза: сложность в получении материала приборного качества, трудности в изготовлении многослойных структур, плохая адгезия контактов к алмазу, проблемы с получением различных центров окраски, низкая повторяемость результатов.

В алмазе выделяют более 500 центров окраски, не все они являются оптически активными. К наиболее перспективным оптически активным центрам можно отнести следующие [11].

NV-центр. Данный центр окраски представляет собой азот-вакансионный комплекс, расположенный в соседних узлах решетки алмаза, и является наиболее изученным. Это связано с тем, что данный центр наиболее просто получить в синтетических алмазах, при этом изначально он был обнаружен в природных алмазах. На NV-центре в лабораторных условиях были получены генерация связанных состояний света и квантовая память со временем жизни более 1 с. Для NV-центров характерно сильное электрон-фононное взаимодействие с решеткой алмаза, поэтому не более 3% энергии люминесценции NV-центров приходится на бесфононную линию (БФЛ), в то время как остальная энергия высвечивается в фононном крыле [11]. В зависимости от положения уровня Ферми, обычно определяемого концентрацией свободного замещающего азота Ns (С-центры), NV-центр может находиться в двух зарядовых состояниях – нейтральном (БФЛ 575 нм) и отрицательном (БФЛ 637 нм).

SiV-центр. Данный центр окраски, представляющий собой атом кремния, заместивший два атома углерода, привлек внимание исследователей как перспективный кандидат для квантовых технологий. Важной особенностью этого центра является то, что в отрицательном зарядовом состоянии на его БФЛ 738 нм приходится порядка 70% интенсивности излучения люминесценции, а её ширина составляет всего около 5 нм при комнатной температуре. Квантовая эффективность люминесценции SiV-центра при этом составляет порядка 5% [11].

GeV-центр. Примерно в 2015 г. появились первые работы по обнаружению полосы с БФЛ 602 нм в спектрах люминесценции алмаза, легированного германием, либо в алмазе после ионной имплантации германия и последующего отжига. Данная полоса обусловлена GeV-центром в отрицательном зарядовом состоянии. Было установлено, что данный центр обладает всеми свойствами источника одиночных фотонов. В отличие от SiV-центра в спектрах данного центра не наблюдалось изотопного разделения БФЛ при низких температурах [12].

N_2V-центр возникает при захвате N_2-центром (А-центром) свободной вакансии или при диссоциации N_4V_2-дефекта. N_2V-центр в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ 503 нм является весьма перспективным для квантовых технологий [13]. Ранее сообщалось о создании светоизлучающих алмазных структур, в том числе на основе ЭЛ N_2V-центров при высоких напряженностях электрического поля – от 100 до 150 кВ/см [14]. При этом спектры ЭЛ N_2V-центров были очень близки к спектрам катодолюминесценции (КЛ) тех же образцов.

Следует отметить, что не каждое зарядовое состояние центров окраски можно наблюдать в спектрах

ЭЛ, хотя они имеют место при оптическом возбуждении. Это связано с тем, что при оптической накачке центры окраски ведут себя подобно изолированным атомам, взаимодействуя с решеткой алмаза только посредством фононов. Электрическое же возбуждение, наоборот, базируется на передаче возбуждения от свободных носителей заряда к электронам центра окраски. Необходимость получения ЭЛ обосновывается стремлением к миниатюризации уже имеющихся приборов, работающих на основе фотолюминесценции. В перспективе – создание принципиально новых квантовых устройств, которые ранее никто просто не рассматривал ввиду невозможности таких процессов при оптической накачке [15].

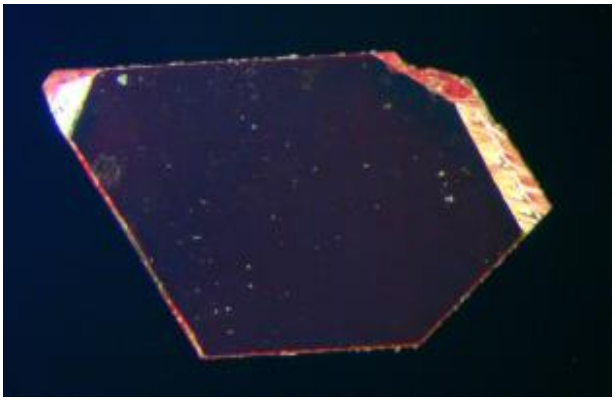
Для создания светоизлучающего прибора на основе алмаза необходимо изготовить токопроводящую PIN-структуру. В такой эпитаксиальной структуре имеются различные алмазные слои с разным типом проводимости. Дырочный тип проводимости обеспечивается легированием алмаза бором. Слой, легированный азотом, кремнием или германием, будет иметь собственный тип проводимости, т.е. термически азотная примесь будет ионизоваться только при высоких температурах [16] или не ионизоваться вовсе, если примесь изоэлектрическая (кремний или германий). Для получения слоя с n-типом проводимости в уже имеющуюся PI-структуру вводят соответствующую примесь. На данный момент возможными легирующими примесями n-типа для алмаза являются азот, фосфор, сера, литий, церий, но полученные на сегодняшний день результаты противоречивы [17, 18]. В большинстве попыток синтезировать CVD-алмаз с n-типом проводимости используют фосфор, но фосфор имеет больший ковалентный радиус по сравнению с ковалентным радиусом азота, что затрудняет изоморфное замещение углерода в решетке алмаза [19]; возможно, встраиваясь в алмазную решетку, фосфор пассивируется водородом. Поэтому наиболее важная технологическая задача для углеродной электроники сегодня – это поиск решений для создания низкоомного алмаза с n-типом проводимости.

Целью настоящей работы является исследование ЭЛ синтетических алмазных образцов, содержащих азот-вакансионные центры окраски типа NV и N_2V в различных зарядовых состояниях, а также сравнение свечения ЭЛ с фото- и катодолюминесценцией этих же образцов.

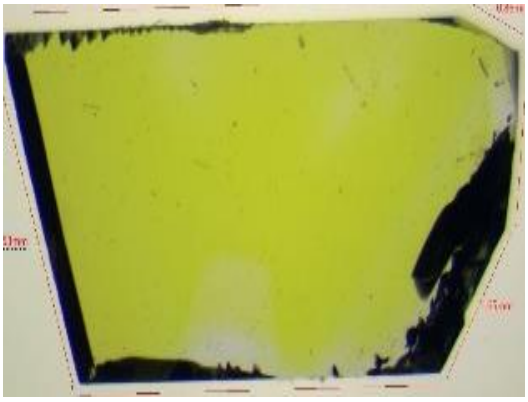
Материалы и методы исследований

В работе исследовались алмазные образцы, характеристики которых приведены в таблице.

Обозначение алмазного образца	Содержащиеся азот-вакансионные центры	Толщина образца, мм	Напряжение появления электролюминесценция, В
C122	NV	0,652	150 В
C130	N_2V	0,779	100 В



C122



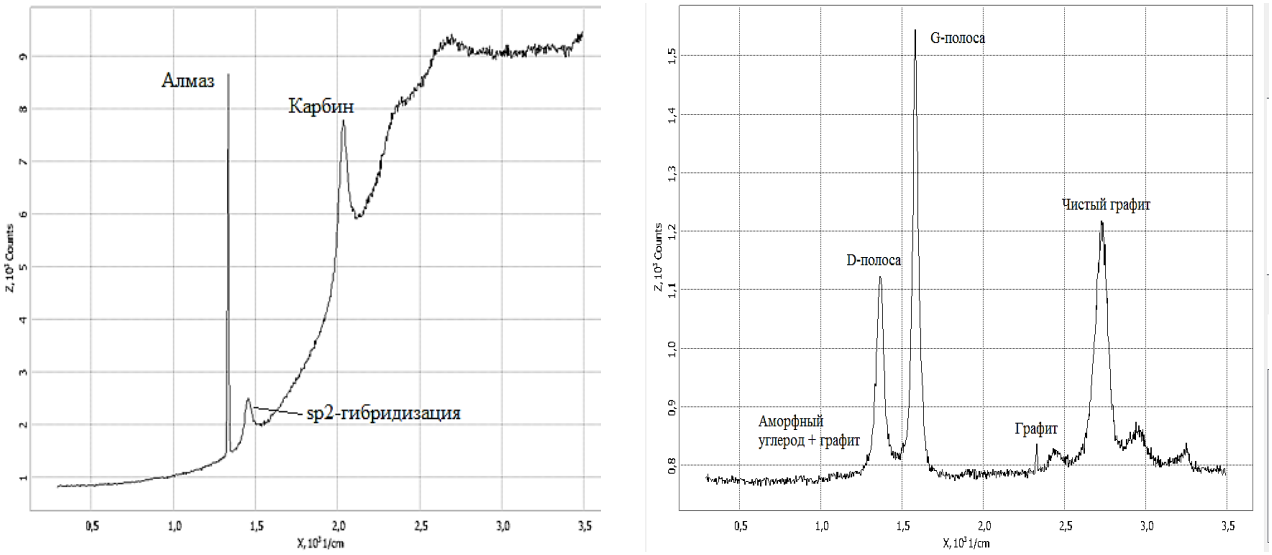
C130

Рис. 1. Фотографии исследованных алмазных образцов с условными обозначениями C122 и C130

Fig. 1. Pictures of the studied diamond samples with the symbols C 122 and C130

На рис. 1 приведены фотографии алмазных образцов C122 и C130. Данные образцы были выращены методом температурного градиента в условиях высоких давлений и высоких температур (ВДВТ) и изначально содержали атомы азота в свободной замещающей форме Ns.

Хотя фотографиях образцы, за исключением сколов и трещин, выглядят довольно однородно, они содержат неалмазные формы углерода. На рис. 2 приведены спектры комбинационного рассеяния (КР) алмазных образцов C122 и C130 при возбуждении лазером на 633 нм.



a *b*

Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния алмазных образцов С122 (*a*) и С130 (*b*) при возбуждении лазером на 633 нм

Fig. 2. Raman spectra of diamond samples C122 (*a*) and C130 (*b*) when excited by a laser at 633 nm

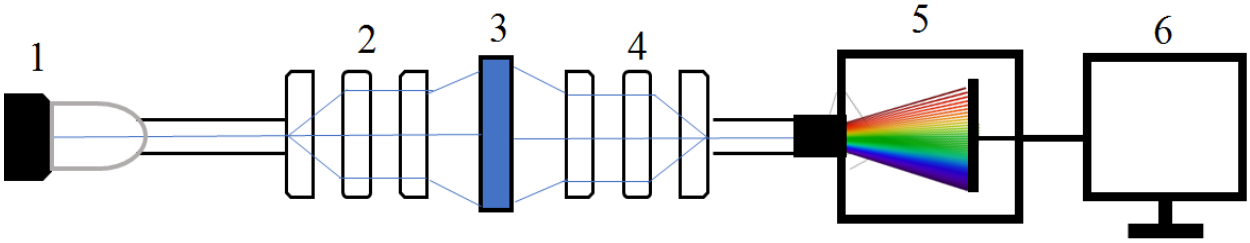


Рис. 3. Схема установки для измерения спектров пропускания: *1* – широкополосный источник оптического излучения; *2, 4* – световоды; *3* – образец в держателе; *5* – спектрометр; *6* – персональный компьютер с программным обеспечением для обработки спектров

Fig. 3. The scheme of measuring transmission spectra: *1* – broadband optical source; *2, 4* – optical fibers; *3* – sample in a holder; *5* – spectrometer; *6* – personal computer with software for processing spectra

Из спектров КР следует (см. рис. 2, *a*), что в образце С122 присутствуют углерод в виде sp^2-гибридизированных углеродных связей (1 456 $см^{-1}$), а также карбин (2 037 $см^{-1}$).

Спектр КР образца С130 продемонстрировал наличие различных неалмазных форм углерода (см. рис. 2, *b*). В данном образце отмечается наличие D-полосы sp^2-гибридизированного углерода на 1 334 $см^{-1}$. Фаза метастабильного углерода, которая включает аморфный углерод и графит, проявляет себя в спектре КР данного образца на 1 493 $см^{-1}$. На 1 577 $см^{-1}$ наблюдается G-полоса графита, свойственная низкокачественным алмазам, содержащим графит в сочетании с алмазной фазой углерода. При волновых числах более 2 000 $см^{-1}$ отмечается графит в различных формах на 2 333 и 2 732 $см^{-1}$.

Наличие таких неалмазных фаз может влиять на протекание тока в образце и, как следствие, на ЭЛ. Предположительно неалмазные включения появились в данных образцах в результате радиационно-термической обработки, проведенной по схеме: облучение электронами с поверхностной дозой около $2 \cdot 10^{18}$ $е^-/см^2$ и последующий отжиг в аргоне при температуре 1 000 °С в течение 2 ч.

Несмотря на изначально одинаковую азотную примесь, алмазные образцы отличаются по цвету (см. рис. 1). Это свидетельствует о том, что замещающий азот образовал разные центры окраски. Определить тип азотных центров окраски позволяют спектры поглощения, вычисляемые из спектров пропускания образцов. Блок-схема установки для измерения спектров пропускания представлена на рис. 3.

Алмазный образец закреплялся в держателе *3*, к образцу с двух сторон были подведены световоды *2* и *4*; один – от источника широкополосного источника излучения SL5 Stellar-Net *1*, другой – от спектрометра Ocean

Optics HR2000 *5*. Опорный спектр широкополосного источника измерялся в отсутствие алмазного образца в держателе. Спектр пропускания вычислялся автоматически программным обеспечением спектрометра после измерения опорного спектра и установки алмазного образца в держатель. Из полученного спектра пропускания с использованием стандартной методики вычислялся спектр поглощения образца.

Для сравнения, а также наблюдения люминесцирующих центров окраски, возбуждаемых селективно или изменяющих в процессе возбуждения своё зарядовое состояние, исследовались спектры фотолюминесценции и катодолюминесценции на установках, схемы которых приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

При измерении спектров фотолюминесценции в качестве источника излучения использовались УФ эксимерные лампы с длиной волны 222 и 308 нм. Излучение от лампы *1* подавалось на образец *2*, вызывая фотолюминесценцию, свечение которой системой линз *4* подавалось на вход спектрометра Ocean Optics HR2000 *5*. Светофильтр *3* не пропускал в спектрометр излучение УФ лампы.

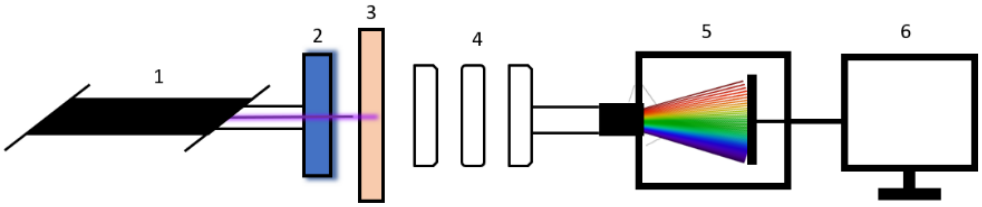


Рис. 4. Схема установки для измерения спектров фотолюминесценции: *1* – эксимерная лампа; *2* – алмазный образец; *3* – светофильтр; *4* – фокусирующие линзы; *5* – спектрометр; *6* – персональный компьютер с программным обеспечением для обработки спектров

Fig. 4. The scheme of measuring photoluminescence spectra: *1* – excimer lamp; *2* – diamond sample; *3* – light filter; *4* – focusing lens; *5* – spectrometer; *6* – personal computer with software for processing spectra

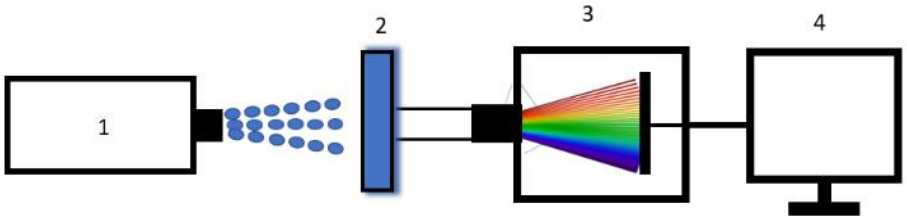


Рис. 5. Схема установки для измерения спектров катодолюминесценции: *1* – импульсный сильноточный ускоритель электронов; *2* – алмазный образец; *3* – спектрометр; *4* – персональный компьютер с программным обеспечением для обработки спектров

Fig. 5. The scheme of measuring cathodoluminescence spectra: *1* – pulsed high-current electron accelerator; *2* – diamond sample; *3* – spectrometer; *4* – personal computer with software for processing spectra

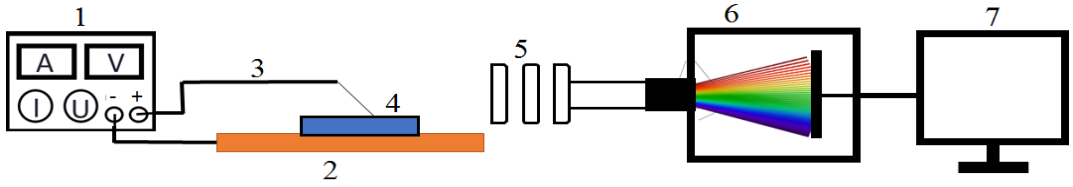


Рис. 6. Схема установки для измерения спектров электролюминесценции: *1* – источник питания; *2* – плоский электрод; *3* – игольчатый электрод; *4* – алмазный образец; *5* – фокусирующая линза и световод; *6* – спектрометр; *7* – персональный компьютер с программным обеспечением для обработки спектров

Fig. 6. The scheme of measuring electroluminescence spectra: *1* – power source; *2* – flat electrode; *3* – needle electrode; *4* – diamond sample; *5* – focusing lens and optical fiber; *6* – spectrometer; *7* – personal computer with software for processing spectra

В качестве источника излучения при измерении спектров катодолюминесценции использовался ускоритель электронов НОРА с частотой 2 Гц и энергией «бомбардирующих» электронов порядка 100–200 кэВ. ЭЛ алмазных образцов исследовалась с помощью установки, схема которой приведена на рис. 6.

Измерение ЭЛ проводилось следующим образом: алмазный образец *4* закреплялся на плоском электроде *2*. От источника питания Rigol DP832 *1* подавалось напряжение, игольчатый электрод *3* прикладывался к поверхности образца в разных областях. При обнаружении люминесцирующей области к образцу подносился световод с концевой фокусирующей линзой *5*. Спектр ЭЛ измерялся спектрометром Ocean Optics HR2000 *6*.

Измерение всех спектров проводилось при комнатной температуре образцов.

Результаты

На рис. 7, *a*, *b* представлены спектры поглощения и ЭЛ алмазных образцов С122 и С130.

На рис. 7, *a* приведены спектры поглощения (черная кривая) и люминесценции (синяя кривая) образца С122. Спектр ЭЛ данного образца коррелирует со спектром NV-центра (в отрицательном зарядовом состоянии), наблюдаемого в спектрах фотолюминесценции с БФЛ на длине волны 637 нм, и спектральным максимумом – на длине волны 680 нм.

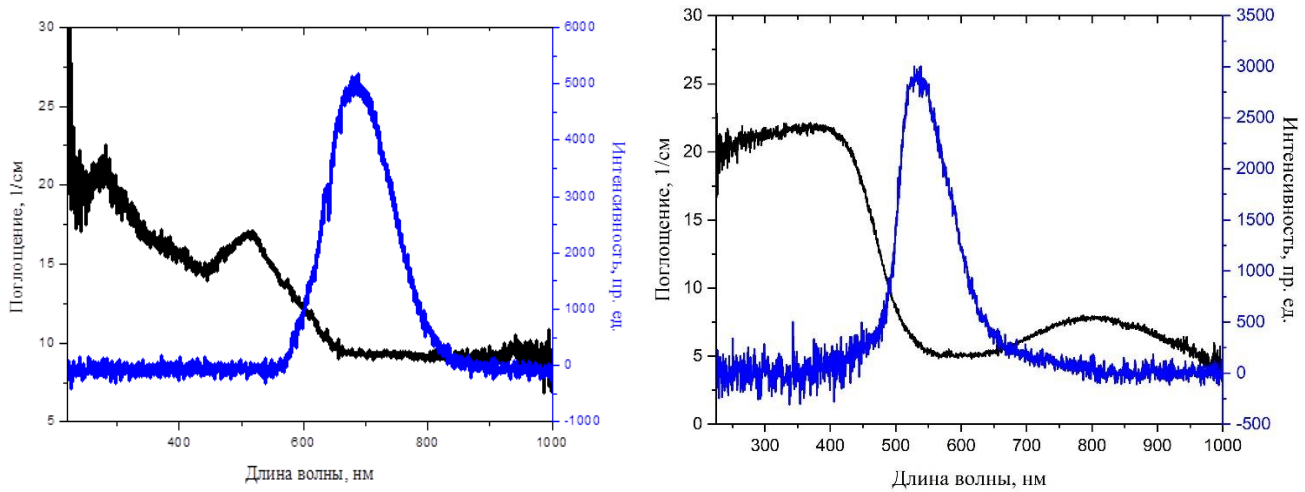


Рис. 7. Спектры поглощения (черные кривые) и электролюминесценции (синие кривые) алмазных образцов С122 (*a*) и С130 (*b*)

Fig. 7. The spectra of absorption and electroluminescence of diamond samples C 122 (*a*) and C130 (*b*)

При этом в спектре ЭЛ образца С122 наблюдается сильное антистоксовое фононное крыло в области 590–635 нм. В то же время в спектре поглощения данного образца полоса NV-центров в отрицательном зарядовом состоянии практически отсутствует, однако наблюдается сильная полоса поглощения NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 575 нм и максимумом фононного крыла поглощения вблизи 510 нм. Слабое поглощение в области 580–640 нм можно отнести на счёт антистоксового крыла поглощения NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии. Помимо полос NV-центров, наблюдается интенсивный континуум поглощения свободного замещающего азота Ns, располагающий в спектре от 450 нм в коротковолновую область.

На рис. 7, *b* приведены спектры поглощения (черная кривая) и люминесценции (синяя кривая) образца С130. Полосы поглощения данного образца указывают на наличие в нем свободного замещающего азота Ns (континуум в УФ и синей части спектра), а также N_2V-центров в обоих зарядовых состояниях с БФЛ на 503 нм для нейтрального и с БФЛ на 986 нм – для отрицательного соответственно. В спектре ЭЛ данного образца наблюдается суперпозиция полосы N_2V-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 503 нм и полосы с максимумом около 480 нм, возможно, обусловленной одним из никель-азотных центров.

Для сравнения дополнительно были измерены спектры катодолюминесценции (КЛ) и фотолюминесценции (ФЛ) алмазных образцов С122 и С130. На рис. 8, *a*, *b* приведены спектры ЭЛ (синие кривые), КЛ (красные кривые) и ФЛ (зеленые кривые) алмазных образцов С122 и С130.

Необходимо отметить, что свечение КЛ и ФЛ образцов визуально наблюдалось во всем объеме образцов, в то время как ЭЛ возникала только в области скола на грани образцов, т.е. в областях, которые имели токопроводящие каналы.

КЛ и ФЛ спектры образца С122 подтверждают наличие в нём NV-центров в обоих зарядовых состояниях: явно наблюдается БФЛ на длине волны 575 нм с характерными фононными повторениями в области 580–630 нм, а также БФЛ 637 нм в виде линии самопоглощения в спектре ЭЛ.

Это позволяет сделать вывод о механизме наблюдения в спектре ЭЛ образца С122 полосы NV-центров в отрицательном зарядовом состоянии, которые не являются электрически активными [20].

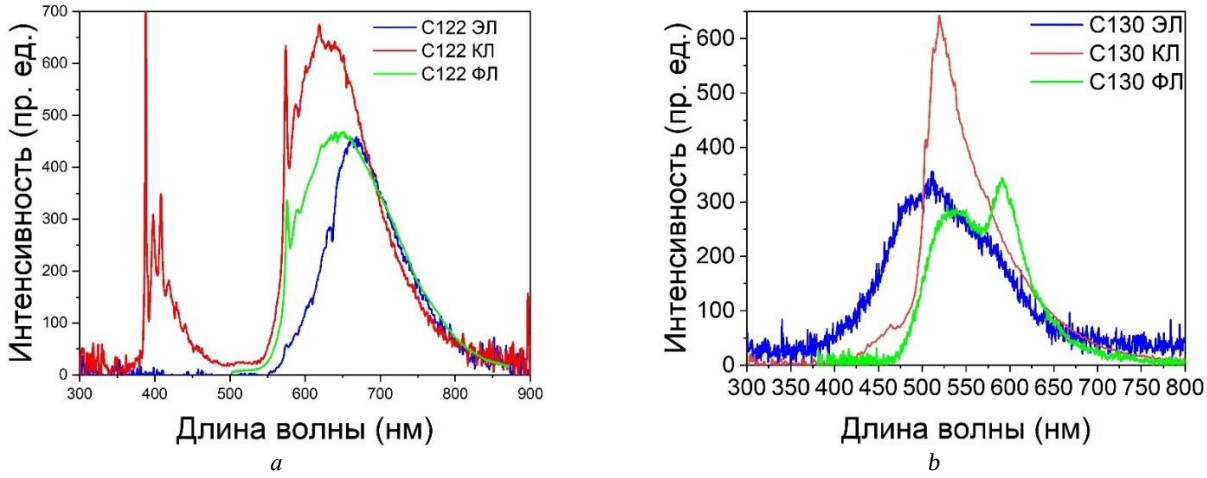


Рис. 8. Спектры электро- (синие кривые), катодо- (красные кривые) и фотолюминесценции (зеленые кривые) алмазных образцов С122 (*a*) и С130 (*b*)

Fig. 8. Spectra of electro- (blue curves), cathodo- (red curves) and photoluminescence (green curves) of diamond samples C122 (*a*) and C130 (*b*)

Ввиду достаточно высокого показателя поглощения NV-центров в отрицательном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 637 нм (до 17 см$^{-1}$, см. рис. 7, *a*) полоса NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 575 нм практически не наблюдается в спектре ЭЛ (рис. 8, *a*). Протекая по токоведущим каналам внутри образца, электрический ток возбуждает интенсивную ЭЛ NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 575 нм, излучение которой возбуждает ФЛ NV-центров в отрицательном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 637 нм. Само же излучение NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 575 нм поглощается, проходя через образец с NV-центрами в отрицательном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 637 нм.

Помимо свечения NV-центров, в спектре КЛ образца С122 наблюдается полоса люминесценции с БФЛ 389 нм, которая обусловлена примесно-дефектными комплексами Ns-Ci, включающими азотный замещающий атом (Ns) и собственное междоузлие (Ci).

На рис. 8, *b* представлены спектры ЭЛ, КЛ и ФЛ образца С130. Его сложный примесно-дефектный состав вызывает появление полос люминесценции различной природы – N_2V-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ на длине волны 503 нм, NV-центров в нейтральном зарядовом состоянии с БФЛ 575 нм и никель-азотных центров с максимумом вблизи 480 нм. В зависимости от способа возбуждения наблюдаются различные интенсивности и относительные вклады данных полос в суммарный спектр люминесценции.

Заключение

Исследованы спектры комбинационного рассеяния, поглощения, электролюминесценции, катодолюминесценции и фотолюминесценции двух синтетических алмазных образцов, содержащих неалмазную фазу углерода в виде аморфного углерода, графита и карбина (линии и полосы комбинационного рассеяния 1456, 1493, 1577, 2037, 2333, 2732 см$^{-1}$). Предположительно неалмазные включения, визуально не наблюдаемые, формируют разветвлённую сетку токоведущих каналов, обеспечивающих протекание электрического тока и электролюминесценцию алмазных образцов. В спектрах исследованные алмазные образцы содержат NV- и N_2V-центры окраски, каждый в отрицательном и нейтральном зарядовом состоянии (БФЛ 503, 575, 637 и 936 нм), замещающий азот Ns (континуум поглощения от 450 нм в коротковолновую сторону), Ns-Ci-центры (БФЛ на длине волны 389 нм) и никель-азотные центры (полоса люминесценции 480 нм). Получение алмазных образцов, содержащих только NV- и N_2V-центры окраски, позволит создавать светоизлучающие токопроводящие структуры, востребованные в квантовых технологиях для управления сенсорами и кубитами.

Список источников

1. *Lobaev M.A., Radishev D.B., Bogdanov S.A.* Diamond p–i–n Diode with Nitrogen Containing Intrinsic Region for the Study of Nitrogen-Vacancy Center Electroluminescence // Physica Status Solidi - Rapid Research Letters. 2020. Vol. 14 (11). Art. no. 2000347. P. 1–5. doi: 10.1002/pssr.202000347

2. *Богданов С.А. Горбачев А.М., Лобаев М.А., Радищев Д.Б.* Создание локализованных ансамблей NV-центров в CVD-алмазе с помощью облучения электронным пучком // Письма в ЖТФ. 2019. № 46. С. 36–39. doi: 10.21883/PJTF.2019.06.47498.17634
3. *Fedyanin D.Yu., Agio M.* Ultrabright single-photon source on diamond with electrical pumping at room and high temperatures // New journal of physics. 2016. Vol. 18 (7). Art. no. 073012. P. 1–27. doi: 10.1088/1367-2630/18/7/073012
4. *Горбачев А.М., Лобаев М.А., Радищев Д.Б., Вихарев А.Л., Богданов С.А., Большедворский С.В., Зеленеев А.И., Сошенко В.В., Акимов А.В., Дроздов М.Н., Исаев В.А.* Формирование многослойных наноструктур NV-центров в монокристаллическом CVD-алмазе // Письма в ЖТФ. 2020. № 46. С. 19–23.
5. *Рубинас О.Р., Сошенко В.В., Большедворский С.В., Кожокару И.С., Зеленеева А.И., Воробьев В.В., Сорокин В.Н., Вин В.Г., Смолянинов А.Н., Акимов А.В.* Оптическое детектирование ансамбля С-центров в алмазе и когерентное управление им с помощью ансамбля NV-центров // Квантовая электроника. 2021. Т. 51, № 10. С. 938–946.
6. *Pezzagna S., Meijer J.* Quantum computer based on color centers in diamond // Applied physics review. 2021. № 8. Art. no. 011308.
7. Российский квантовый центр. URL: https://rqc.ru/backend/uploads/RQC_Annual_report_2023_web_rus_c515b7ed1f.pdf (дата обращения: 27.11.2024).
8. *Dobrinets I.A., Vins V.G., Zaitsev A.M.* HPHT-Treated Diamonds // Springer Series in Materials Science. 2013. P. 1–270.
9. *Кузьмин Е.В., Красин Г.К., Гулина Ю.С.* Структурная микромодификация алмаза фемтосекундными лазерными импульсами через оптический контакт с нелинейной сильнорефрактивной иммерсионной средой // Письма в ЖЭТФ. 2024. № 4. С. 267–272.
10. *Вавилов В.С.* Возможности и ограничения ионной имплантации в алмаз и их сопоставление с другими методами введения электрически активных примесей // Успехи физических наук. 1994. № 4. С. 429–433.
11. *Большедворский С.В.* Исследование центров окраски в алмазах и их агрегатах : дис. … канд. физ.-мат. наук. М., 2022. 104 с.
12. *Екимов Е.А., Кондрин М.В.* Примесно-вакансионные комплексы в алмазе: перспективы синтеза и применений // Успехи физических наук. 2017. С. 577–598.
13. *Патент* № 2816560 Российская Федерация. Квантовый магнитометр на основе N_2V-центров в алмазе / Бураченко А.Г., Винс В.Г., Генин Д.Е., Елисеев А.П., Липатов Е.И., Лыга О.И., Рипенко В.С., Чащин В.В., Шулепов М.А. № 2023136053, заявл. 29.12.2023; опубл.02.04.2024. Бюл. № 10. 7 с.
14. *Burchard B., Zaitsev A.M., Fahrner W.R., Melnikov A.A., Denisenko A.V., Varichenko V.S.* Diamond based light emitting structures // Diamond and related materials.1994. Vol. 3. P. 947–950.
15. Алмаз – основа квантовой связи и компьютеров будущего. URL: https://indicator.ru/physics/uchenye-zayavlyayut-chto-kvantovyj-almaz-stanet-osnovoj-kvantovoj-svyazi-i-kompyuterov-budushego-03-08-2016.htm (дата обращения: 27.11.2024).
16. *Парфенов В.В., Закиров Р.Х.* Полупроводниковый инжекционный лазер : методическое пособие. Казань : Казанский университет, 2014. 22 с.
17. *Спицин Б.В., Алексеенко А.Е.* Химическая кристаллизация алмаза и нанесение алмазных покрытий из газовой фазы // Защита металлов. 2007. Т. 43, № 5. С. 456–474.
18. *Wang X., Wang L., Yhang B., Yao N.* Eltctroluminescenc of diamond: Ce thin films // Semiconductor Science and Technology. 2003. Vol. 18. P. 144–146.
19. *Шуберт Ф.Е.* Светодиоды. М. : Физматлит, 2008. 495 с.
20. *Zaitsev A.M.* Optical properties of diamond. Bochum : Springer, 2001. 486 p.

References

1. Lobaev, M.A., Radishev, D.B. & Bogdanov, S.A. (2020) Diamond p–i–n Diode with Nitrogen Containing Intrinsic Region for the Study of Nitrogen-Vacancy Center Electroluminescence. *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters.* 14 (11). Art. no. 2000347. pp. 1–5. doi: 10.1002/pssr.202000347
2. Bogdanov, S.A. Gorbachev, A.M., Lobashev, M.A. & Radishchev, D.B. (2019) Creation of localized ensembles of NV centers in a CVD diamond using electron beam irradiation. *Letters in ZhTF*. 46. pp. 36–39, DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47498.17634
3. Fedyanin, D.Yu. & Agio, M. (2016) Ultrabright single-photon source on diamond with electrical pumping at room and high temperatures. *New journal of physics*. 18 (7). Art. no. 073012. pp. 1–27. doi: 10.1088/1367-2630/18/7/073012
4. Gorbachev, A.M., Lobaev, M.A., Radishchev, D.B., Vikharev, A.L., Bogdanov, S.A., Drozdov, M.N., Isaev, V.A., Kraev, S.A., Okhapkin, A.I. & Arkhipova, E.A. (2020) Creation of localized ensembles of NV centers in a diamond grown in a microwave CVD reactor and study of their properties. *Radiophysics and quantum electronics*. 63 (7). pp. 530–541. doi: 10.1007/s11141-021-10077-9
5. Rubinas, O.R., Zeleneev, A.I., Sorokin, V.N., Soshenko, V.V., Bolshedvorskii, S.V., Cojocaru, I.S., Smolyaninov, A.N., Akimov, A.V., Vorobyov, V.V. & Vins, V.G. (2021) Optical detection of an ensemble of C centres in diamond and their coherent control by an ensemble of NV centres. *Quantum electronics*. 51 (10). pp. 938–946. doi: 10.1070/QEL17624
6. Pezzagna, S. & Meijer, J. (2021) Quantum computer based on color centers in diamond. *Applied physics review.* 8. Art. no. 011308.
7. Russian Quantum Center. URL: https://rqc.ru/backend/uploads/RQC_Annual_report_2023_web_rus_c515b7ed1f.pdf (date of access 11/27/2024).
8. Dobrinets, I.A., Vins, V.G. & Zaitsev, A.M. (2013) HPHT-Treated Diamonds. *Springer Series in Materials Science*. pp. 1–270.
9. Kuzmin, E.V., Krasin, G.K. & Gulina, Yu.S. (2024) Structural micromodification of diamond by femtosecond laser pulses through optical contact with a nonlinear highly refractive immersion medium. *Letters to JETP*. 4. pp. 267–272.
10. Vavilov, V.S. (1994) Possibilities and limitations of ion implantation in diamond, and comparison with other doping methods. *Physics-Uspekhi.* 37. pp. 407–411. doi: 10.1070/PU1994v037n04ABEH000023
11. Bolshedvorsky, S.V. (2022) Study of color centers in diamonds and their aggregates: diss. Cand. phys.-math. sciences. Moscow.
12. Ekimov, E.A. & Kondrin, M.V. (2017) Vacancy-impurity centers in diamond: perspectives of synthesis and applications. *Physics-Uspekhi.* 60. pp. 539–558. doi: 10.3367/UFNe.2016.11.037959
13. Burachenko, A.G., Vins, V.G., Genin, D.E., Eliseev, A.P., Lipatov, E.I., Lyga, O.I., Ripenko, V.S., Chashchin, V.V. & Shulepov, M.A. (2024) Kvantovyj magnitometr na osnove N2V centrov v almaze [Quantum magnetometer based on N2V centers in diamond] Patent No. 2816560 Russian Federation. № 2023136053, appl. 29.12.2023; publication date 04.02.2024. Bul. No. 10.

14. Burchard, B., Zaitsev, A.M., Fahrner, W.R., Melnikov, A.A., Denisenko, A.V. & Varichenko, V.S. (1994) Diamond based light emitting structures. *Diamond and related materials*. 3. pp. 947–950.
15. Diamond – the basis of quantum communication and computers of the future. URL: https://indicator.ru/physics/uchenye-zayavlyayut-chto-kvantovyj-almaz-stanet-osnovoj-kvantovoj-svyazi-i-kompyuterov-budushego-03-08-2016.htm (date of access: 11/27/2024).
16. Parfenov, V.V. & Zakirov, R.Kh. (2014) Semiconductor injection laser / Methodological manual. Kazan: Kazan University.
17. Spitsyn, B.V. & Alekseenko, A.E. (2007) Chemical crystallization of diamond and application of diamond coatings from the gas phase. *Protection of metals*. 43 (5). pp. 456–474.
18. Wang, X., Wang, L., Yhang, B. & Yao, N. (2003) Eltctroluminescenc of diamond: Ce thin films. *Semiconductor Science and Technology*. 18. pp. 144–146.
19. Schubert, F.E. (2008) Light-emitting diodes. M.: Fizmatlit.
20. Zaitsev, A.M. (2001) Optical properties of diamond. Bochum: Springer.

Информация об авторах:
Васильева Людмила Александровна – лаборант лаборатории квантовых информационных технологий, аспирант радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: wassil_93@mail.ru
Бородулин Захар Игоревич – лаборант лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com
Шулепов Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). SPIN-код: 4917-2804

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:
Vasilyeva Lyudmila A., Laboratory assistant, laboratory of quantum information technologies, postgraduate student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: wassil_93@mail.ru
Borodulin Zakhar I., Laboratory assistant, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); engineer of the laboratory of optical radiation, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com
Shulepov Mikhail A., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4917-2804

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