

08,09

Новые линии люминесценции в полученных методом химического газофазного осаждения наноалмазах

© В.Г. Голубев¹, С.А. Грудинкин^{1,2,¶}, В.Ю. Давыдов¹, А.Н. Смирнов¹, Н.А. Феоктистов¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: grudink.gvg@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 5 июня 2017 г.)

Исследованы спектральные характеристики обнаруженных линий фотолюминесценции наноалмазов, полученных методом реактивного ионного травления в кислородной плазме алмазных частиц, осажденных методом химического газофазного осаждения на кремниевую подложку. При комнатной температуре в видимой и инфракрасной областях спектра наблюдались узкие линии с полной шириной на полувысоте максимума в диапазоне 1–2 nm при практически полном отсутствии широкополосного фонового сигнала фотолюминесценции. При понижении температуры линии сужались до 0.2–0.6 nm при $T = 79$ К и минимальная ширина линий составила 0.055 nm при $T = 10$ К. С ростом температуры узкие линии сдвигались в длинноволновую область спектра и их интенсивность уменьшалась.

DOI: 10.21883/FTT.2017.12.45235.182

1. Введение

В последние годы большое внимание уделяется созданию и исследованию центров окраски в алмазе, излучающих в видимой и ближней ИК области спектра [1–7]. Благодаря таким свойствам алмаза как широкая запрещенная зона, высочайшая теплопроводность и твердость, химическая инертность, высокая температура Дебая, радиационная стойкость этот материал является исключительно удачной матрицей для центров окраски [8]. Такие центры обладают яркой и стабильной фотолюминесценцией (ФЛ) при комнатной температуре, узкой бесфонной линией (БФЛ) и короткими излучательными временами жизни ФЛ [1,2,6]. Это открывает возможность их применения в качестве однофотонных источников излучения в устройствах обработки квантовой информации и интегральной нанофотоники. Биосовместимость, химическая инертность, низкая токсичность и возможность химической функционализации поверхности наноалмазов открывает перспективу применения наноалмазов с центрами окраски для биомедицины [7]. В алмазных пленках и частицах, полученных методом химического газофазного осаждения (chemical vapor deposition-CVD), наибольший интерес прикован к следующим центрам окраски: кремний–вакансия (SiV) [9–20], Ni-содержащим [21–25], Cr-содержащим [26–28], азот–вакансия (NV) [29,30]. Недавно в спектрах ФЛ в алмазе, полученном методом CVD, обнаружены узкие линии ФЛ [31–33], структура и механизм формирования которых остаются не до конца установленными.

Для практического использования эмиттеров на основе центров окраски необходимо подавление фоно-

вого сигнала ФЛ и уменьшение влияния безызлучательных каналов люминесценции, что может быть достигнуто в алмазе с низким содержанием структурных дефектов.

Данная работа посвящена обнаружению и исследованию спектральных характеристик узких линий ФЛ наноалмазов в видимом и ближнем ИК спектральном диапазоне в интервале температур 10–300 К. Наноалмазы получены методом реактивного ионного травления (РИТ) в кислородной плазме алмазных частиц, выращенных методом микроволнового химического газофазного осаждения (MWCVD) на кремнии [34]. Травление удаляет из алмазных частиц наиболее дефектные области, имеющие внутренние напряжения, которые ответственны за уширение рамановской линии и неоднородное уширение линий ФЛ центров окраски [34].

2. Методика эксперимента

Наноалмазы детонационного синтеза с характерным размером ~ 4 nm использовались в качестве центров зародышеобразования и контролируемо наносились на кремниевую подложку методом аэрозольного распыления [35]. Деагломерированные детонационные наноалмазы получены в ФТИ им. А.Ф. Иоффе методом, описанном в [36]. Поверхностная плотность наноалмазов детонационного синтеза составляла $\sim 10^6$ cm⁻². Параметры процесса MWCVD были следующие: микроволновая мощность — 600 W (2.45 GHz), температура подложки — 700°C, расход водорода — 500 sccm, концентрация метана — 2.8%, рабочее давление в реакторе — 15 Torr. Время роста частиц составляло около 40 min.

Травление алмазных частиц осуществлялось в кислородно-азотной смеси (O_2 — 20 vol%, N_2 — 80 vol%) при следующих параметрах: микроволновая мощность — 250 W (2.45 GHz), температура подложки — 500–600°C, расход кислородно-азотной смеси — 100 sccm, рабочее давление в реакторе — 10 Torr, время травления — 30 min. Подробное описание процессов роста, контроля размеров частиц в процессе роста и реактивного ионного травления изложены в работе [34]. Спектры ФЛ регистрировались от ансамблей наноалмазов, сформированных после травления исходных частиц.

Измерения методами комбинационного рассеяния света (КРС) и микрофотолюминесценции (μ -ФЛ) проводились на спектрометре Horiba Jobin Yvon T64000, оснащенный конфокальным микроскопом, охлаждаемой жидким азотом кремниевой ПЗС матрицей и дифракционной решеткой 1800 lines/mm. При измерениях использовалась длина волны возбуждающего света 532 nm (2.33 eV). Спектры КРС измерялись при комнатной температуре в пятне $\sim 1 \mu\text{m}$ на образце, полученном с использованием объектива $100\times$ ($NA = 0.9$). Все КРС измерения проводились в режиме тройного монохроматора со сложением дисперсии, что обеспечивало максимальное спектральное разрешение 0.35 cm^{-1} . Измерения низкотемпературной μ -ФЛ проводились в гелиевой системе замкнутого цикла для микроскопии (Cryo Industries, Inc.), либо в приставке для микроскопии Linkam THMS600. Для фокусировки падающего пучка в пятно диаметром $\sim 2 \mu\text{m}$ при ФЛ измерениях использовался объектив Mitutoyo $100\times$ ($NA = 0.50$) с большим рабочим расстоянием.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Спектры ФЛ трех различных ансамблей наноалмазов (NDE1-NDE3), измеренных при комнатной температуре показаны на рис. 1. Интенсивности линий в спектрах нормированы на интенсивность линии центра SiV с максимумом на длине волны 738 nm. Эта линия характерна для алмазов, полученных методом химического газофазного осаждения на кремний содержащие подложки. Центры окраски SiV введены в алмазные частицы в процессе их синтеза. Травление атомарным водородом кремниевой подложки обеспечивало поступление кремния в газовую смесь. Кремний из газовой фазы встраивался в решетку растущих алмазных частиц. Внедряясь в решетку алмаза, атомы Si стимулируют образование вакансий в соседних узлах решетки, что приводит к формированию точечных дефектов — оптически активных центров SiV. Отметим, что существует также возможность контролируемого введения центров окраски SiV в алмаз путем добавления силана в рабочую газовую смесь как источника примесных атомов Si в процессе химического газофазного осаждения частиц

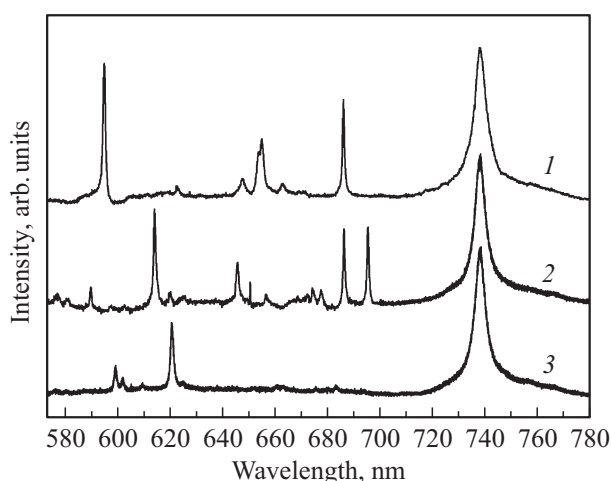


Рис. 1. Спектры ФЛ трех различных ансамблей наноалмазов (1 — NDE1, 2 — NDE2, 3 — NDE3), измеренные при $T = 300 \text{ K}$. Мощность возбуждающего лазера 0.4 mW.

на подложки, не содержащей кремний (например, сапфир [37] и AlN [38]).

В спектрах ФЛ на рис. 1 наблюдается набор узких линий для каждого ансамбля наноалмазов. Спектральные положения максимумов наиболее интенсивных линий ФЛ зарегистрированы на длинах волн 594.5 (1.16) nm, 647.4 (2.2) nm, дуплет 653.4 nm и 654.8 nm, 685.87 (1.3) nm для ансамбля NDE1; 589.4 nm, 613.8 (1) nm, 645.3 (1.3) nm, 686.17 (0.85) nm и 695.3 (1.05) для NDE2; 599 (1) nm, 601.6 (1.15) nm и 620.4 (4.2) nm для NDE3. В скобках указана FWHM для линий, в которых она надежно определялась. При комнатной температуре FWHM обнаруженных линий (1–2 nm) меньше, чем у БФЛ ансамбля центров окраски SiV [9,11,12,15,18,19,34], Si-содержащих центров [26,27], и сравнима с шириной БФЛ одиночных центров окраски SiV в алмазе [13,20]. В спектрах исследованных наноалмазов практически отсутствует фоновый сигнал в виде широкой полосы ФЛ с максимумом в видимой области спектра, которая характерна для различных гетероэпитаксиальных алмазов [10,11,15]. Широкая полоса ФЛ связана с оптическими переходами внутри запрещенной зоны алмаза, обусловленными присутствием неупорядоченного sp^2 -гибридизованного углерода [39]. Значительное уменьшение содержания sp^2 -углерода и неупорядоченного sp^3 -алмаза в исследуемых наноалмазах достигнуто селективным РИТ в кислородной плазме [34]. Низкая интенсивность фоновой ФЛ исследуемых наноалмазов является преимуществом в случае их применения в качестве твердотельной матрицы для однофотонных источников излучения.

На рис. 2 показаны фрагменты спектров ФЛ ансамбля наноалмазов (NDE1) при мощностях излучения возбуждающего лазера 0.04 mW и 1 mW. Спектры измерены при комнатной температуре. Интенсивность сигнала ФЛ нормирована на интенсивность ли-

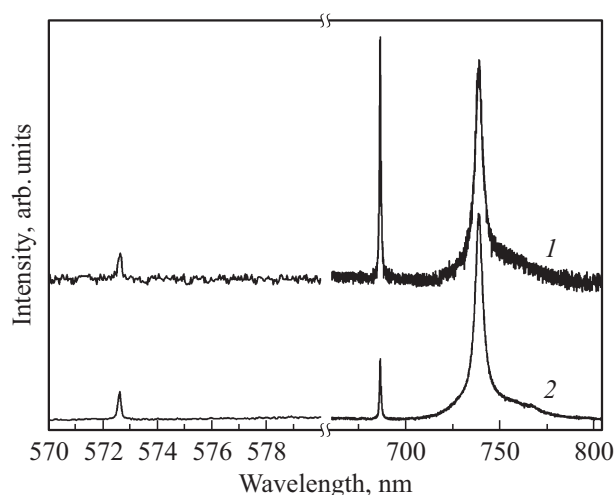


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции ансамбля наноалмазов NDE1 при мощности возбуждающего лазера 1 — 0.04 мВт и 2 — 1 мВт. Спектры измерены при $T = 300$ К и нормированы на рамановскую линию алмаза (572.5 нм).

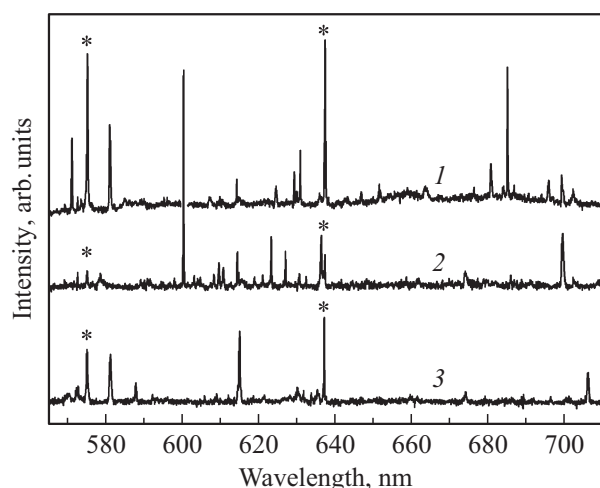


Рис. 3. Спектры ФЛ трех различных ансамблей наноалмазов (1 — NDE4, 2 — NDE5, 3 — NDE6) при $T = 77$ К. Линии, соответствующие оптическим центрам окраски NV^0 и NV^- обозначены звездочками.

нии 1332.5 cm^{-1} (572.5 нм), которая является линией рамановского рассеяния, соответствующего трехкратно вырожденному ТО фону в алмазе [40]. FWHM этой линии, измеренная с использованием спектрометра с тройным монохроматором, обеспечивающего спектральное разрешение 0.35 cm^{-1} , составляет $\sim 2.5 \text{ cm}^{-1}$. Соотношение интенсивностей линий 686 нм и 738 нм зависит от мощности накачки. При мощности лазера 0.04 мВт интенсивность линии 686 нм больше интенсивности линии 738 нм центра SiV. При увеличении мощности лазера до 1 мВт сдвиг спектрального положения и уширение БФЛ центра SiV не наблюдается. Линия 686 нм практически не изменяет спектрального положения своего максимума, а ее FWHM увеличивается с 0.89 нм до 1 нм.

На рис. 3 показаны спектры ФЛ трех различных ансамблей наноалмазов (NDE4–NDE6) при $T = 77$ К. Наиболее интенсивные узкие линии на рис. 3 (FWHM указана в скобках) соответственно 571.04 (0.25) нм, 575.13 (0.29) нм, 581 (0.47) нм, 630.82 (0.2) нм, 637.35 (0.3) нм, 680.67 (0.5) нм и 685 (0.2) нм для NDA4; 600.3 (0.15) нм, 623.27 (0.17) нм, 626.95 (0.21) нм, 636.27 (0.5) нм, 637.3 (0.25) нм, 699.38 (0.65) нм для NDA5; 575.05 (0.45) нм, 614.9 (0.38) нм, 637.06 (0.19) нм, 706.06 (0.54) нм для NDA6. По сравнению с комнатной температурой в спектрах ФЛ при азотной температуре наблюдается больше узких линий в исследованном спектральном диапазоне и уменьшение их ширин. Во всех трех спектрах наблюдаются узкие линии вблизи 575 и 637 нм, соответствующие оптическим центрам окраски соответственно NV^0 и NV^- (обозначены звездочками на рис. 3). Из рис. 1 и 3 видно, что с понижением температуры до $T = 79$ К увеличилось количество регистрируемых узких линий в спектрах. Можно предположить, что новые наблюдаемые линии связаны с эмиттерами, имеющими различные вероятности излучательных переходов и активационные энергии безызлучательных переходов. ФЛ эмиттеров с малыми вероятностями излучательных переходов и малыми активационными энергиями безызлучательных переходов детектируются только при низкой температуре.

Температурная зависимость сигнала ФЛ ансамбля наноалмазов NDE4 в спектральном интервале 570–590 нм и в диапазоне температур 79–300 К представлена на рис. 4. При росте температуры от 79 К до 300 К для всех линий ФЛ наблюдается длинноволновый сдвиг, увеличение ширины, а также имеет место температурное гашение их интенсивности.

На рис. 5 представлены спектры ФЛ ансамбля наноалмазов NDE5 при $T = 79, 140$ и 220 К в ближней инфракрасной области спектра. Узкая линия 699.4 нм с ростом

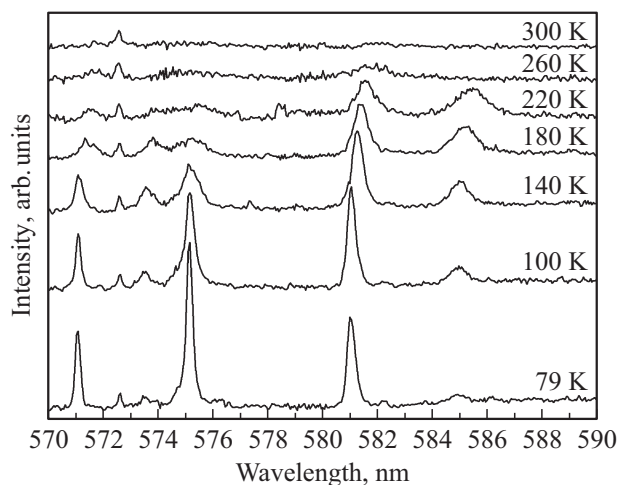


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции ансамбля наноалмазов NDE4, измеренные в диапазоне температур $T = 79$ –300 К. Спектры нормированы на интенсивность рамановской линии алмаза 572.5 нм.

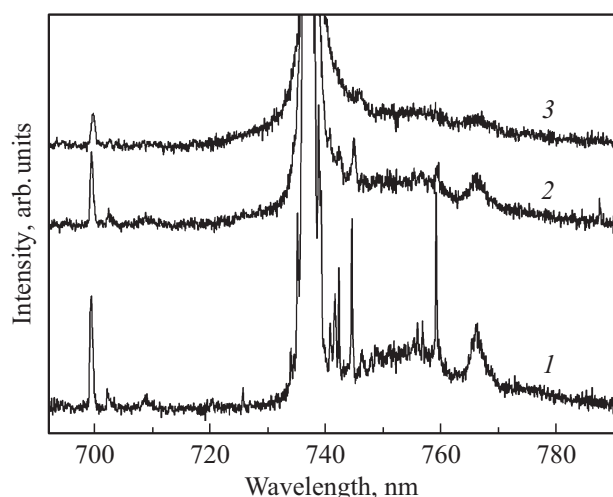


Рис. 5. Спектры ФЛ ансамбля нанодIAMONDS NDE5 при температуре: 1 — 79 К, 2 — 140 К, 3 — 220 К. Спектры нормированы на интенсивность рамановской линии алмаза.

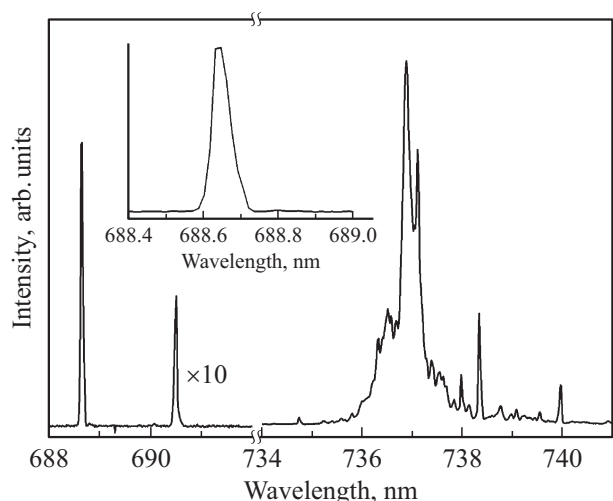


Рис. 6. Спектры ФЛ ансамбля нанодIAMONDS при $T = 10$ К. На вставке показан спектр ФЛ линии 688.64 нм в увеличенном масштабе.

температуры сдвигается в длинноволновую область и уширяется, ее интенсивность падает относительно интенсивности БФЛ центров SiV. В спектральной области БФЛ центров SiV при $T = 79$ К наблюдаются узкие линии (FWHM линий указана в скобках) 738.8 (0.25) nm, 742.2 (0.2) nm, 744.52 (0.3) nm и 759.1 (0.2) nm. Эти линии могут быть обусловлены одиночными центрами SiV в областях с различными внутренними напряжениями в нанодIAMONDS [11,13]. При $T = 79$ К интенсивности узких линий в области фоновой крышки БФЛ центра SiV сравнимы с интенсивностью узкой линии 699.4 nm, но с ростом температуры они затухают сильнее. В спектрах ФЛ NDE5 при $T = 79$ К регистрируются полосы 756 nm и 766 nm, обусловленные локальными колебательными модами [41].

Фрагменты спектра ФЛ нанодIAMONDS, измеренные при $T = 10$ К, приведены на рис. 6. В спектрах наблюдается БФЛ ансамбля центров SiV с максимумом на длине волны ~ 736.8 nm. В соответствии с четырехуровневой электронной структурой центра SiV его БФЛ при температуре жидкого гелия имеет тонкую структуру и состоит из четырех линий, образовавшихся из-за расщепления основного и возбужденного состояний центра SiV [11,13,16–18,41]. Неоднородное уширение из-за присутствия остаточных напряжений в нанодIAMONDS приводит к замыканию линий тонкой структуры [11,13]. БФЛ ансамбля центров SiV является суперпозицией БФЛ одиночных центров SiV, находящихся в областях нанодIAMONDS с различными внутренними напряжениями. Следствием распределения напряжений в нанодIAMONDS являются различные спектральные положения БФЛ центров SiV [16]. Присутствие одиночных узких линий в области длин волн больше 738 nm связано центрами SiV в областях нанодIAMONDS с различными напряжениями [34]. В спектре на рис. 6 наблюдаются две такие линии на длинах волн 738.33 nm и 739.96 nm с FWHM соответственно 0.045 nm и 0.055 nm.

На рис. 6 приведены также две узкие линии 688.64 (0.055) nm и 690.5 (0.061) nm (в скобках указана их FWHM) при $T = 10$ К. Наблюдаемое уменьшение ширины линий при понижении температуры (с 1–2 nm при комнатной температуре до 0.055 nm при $T = 10$ К) связано с уменьшением влияния однородного уширения [13]. Можно предположить, что при $T = 10$ К основной причиной уширения линий является неоднородное уширение.

В спектрах ФЛ центров окраски в алмазе электрон-фононное взаимодействие приводит к появлению длинноволнового крыла в спектре БФЛ (см. линию SiV на рис. 5). В спектрах обнаруженных узких линий ФЛ фонное крыло не наблюдается, что указывает на слабое электрон-фононное взаимодействие. Спектральные положения наблюдаемых новых линий не позволяют приписать их какому-либо известному в алмазе центру окраски [42]. Мы не располагаем надежными основаниями, чтобы сделать вывод о том, какие примесные атомы входят в состав точечных дефектов и какова структура дефектов, которые ответственны за обнаруженные линии ФЛ. Возможно, эти точечные дефекты имеют различные структурные конфигурации и сильно чувствительны к локальным напряжениям.

4. Выводы

В работе исследованы спектральные характеристики обнаруженных узких линий ФЛ ансамблей нанодIAMONDS, полученных методом реактивного ионного травления в кислородной плазме алмазных частиц, синтезированных методом химического газофазного осаждения на кремниевой подложке. Исследованные нанодIAMONDS характеризуются узкой рамановской линией алмаза 1332.5 cm^{-1} , ши-

рина которой при комнатной температуре не превышает 2.5 cm^{-1} . Новые узкие линии наблюдались в спектрах ФЛ наноалмазов при практически полном отсутствии фонового сигнала в виде широкой бесструктурной полосы, характерной для гетероэпитаксиальных алмазов газофазного синтеза. Отсутствие у узких линий фононного крыла свидетельствует о слабом электрон-фононном взаимодействии. С ростом температуры обнаруженные линии ФЛ испытывают сдвиг в длинноволновую область, сопровождающийся увеличением их ширины и температурным гашением. FWHM линий увеличивается с $0.2\text{--}0.6 \text{ nm}$ при $T = 77 \text{ K}$ до $1\text{--}2 \text{ nm}$ при $T = 300 \text{ K}$. При температуре $T = 10 \text{ K}$ минимальная обнаруженная ширина линий составила 0.055 nm .

Список литературы

- [1] J. Orwa, A. Greentree, I. Aharonovich, A. Alves, J. Van Donkelaar, A. Stacey, S. Praver. *J. Lumin.* **130**, 1646 (2010).
- [2] S. Pezzagna, D. Rogalla, D. Wildanger, J. Meijer, A. Zaitsev. *New J. Phys.* **13**, 035024 (2011).
- [3] I. Aharonovich, A.D. Greentree, S. Praver. *Nature Photon.* **5**, 397 (2011).
- [4] K. Beha, H. Fedder, M. Wolfer, M.C. Becker, P. Siyushev, M. Jamali, A. Batalov, C. Hinz, J. Hees, L. Kirste, H. Obloh, E. Gheeraert, B. Naydenov, I. Jakobi, F. Dolde, S. Pezzagna, D. Twittchen, M. Markham, D. Dregely, H. Giessen, J. Meijer, F. Jelezko, C.E. Nebel, R. Bratschitsch, A. Leitenstorfer, J. Wrachtrup. *Beilstein J. Nanotechnol.* **3**, 895 (2012).
- [5] M.W. Doherty, N.B. Manson, P. Delaney, F. Jelezko, J. Wrachtrup, L.C. Hollenberg. *Phys. Rep.* **528**, 1 (2013).
- [6] I. Aharonovich, E. Neu. *Adv. Opt. Mater.* **2**, 911 (2014).
- [7] A. Nagl, S.R. Hemelaar, R. Schirhagl. *An. Bioanal. Chem.* **407**, 7521 (2015).
- [8] A. Neves, M.H. Nazaré. *Properties, growth and applications of diamond*. IET, London (2001). 427 p.
- [9] I.I. Vlasov, A.S. Barnard, V.G. Ralchenko, O.I. Lebedev, M.V. Kanzyuba, A.V. Saveliev, V.I. Konov, E. Goovaerts. *Adv. Mater.* **21**, 808 (2009).
- [10] A. Basov, M. Rahn, M. Pärs, I. Vlasov, I. Sildos, A. Bolshakov, V. Golubev, V. Ralchenko. *Phys. Status Solidi A.* **206**, 2009 (2009).
- [11] E. Neu, C. Arend, E. Gross, F. Guldner, C. Hepp, D. Steinmetz, E. Zscherpel, S. Ghodbane, H. Sternschulte, D. Steinmüller-Nethl, Y. Liang, A. Krueger, C. Becher. *Appl. Phys. Lett.* **98**, 243107 (2011).
- [12] S.A. Catledge, S. Singh. *Adv. Sci. Lett.* **4**, 512 (2011).
- [13] E. Neu, C. Hepp, M. Hauschild, S. Gsell, M. Fischer, H. Sternschulte, D. Steinmüller-Nethl, M. Schreck, C. Becher. *New J. Phys.* **15**, 043005 (2013).
- [14] B. Pingault, J.N. Becker, C.H. Schulte, C. Arend, C. Hepp, T. Godde, A.I. Tartakovskii, M. Markham, C. Becher, M. Atatüre. *Phys. Rev. Lett.* **113**, 263601 (2014).
- [15] С.А. Грудинкин, Н.А. Феокистов, К.В. Богданов, М.А. Баранов, А.В. Баранов, А.В. Федоров, В.Г. Голубев. *ФТП* **48**, 283 (2014).
- [16] C. Arend, J.N. Becker, H. Sternschulte, D. Steinmüller-Nethl, C. Becher. *Phys. Rev. B.* **94**, 045203 (2016).
- [17] K. Li, Y. Zhou, A. Rasmita, I. Aharonovich, W. Gao. *Phys. Rev. Appl.* **6**, 024010 (2016).
- [18] J.L. Zhang, H. Ishiwata, T.M. Babinec, M. Radulaski, K. Müller, K.G. Lagoudakis, C. Dory, J. Dahl, R. Edgington, V. Soulière, G. Ferro, A.A. Fokin, P.R. Schreiner, Z.-X. Shen, N.A. Melosh, J. Vučković. *Nano Lett.* **16**, 212 (2015).
- [19] L. Himics, S. Tóth, M. Veres, M. Koós. *Opt. Quant. Electron.* **48**, 394 (2016).
- [20] C. Arend, P. Appel, J.N. Becker, M. Schmidt, M. Fischer, S. Gsell, M. Schreck, C. Becher, P. Maletinsky, E. Neu. *Appl. Phys. Lett.* **108**, 063111 (2016).
- [21] J. Rabeau, Y. Chin, S. Praver, F. Jelezko, T. Gaebel, J. Wrachtrup. *Appl. Phys. Lett.* **86**, 131926 (2005).
- [22] E. Wu, J. Rabeau, G. Roger, F. Treussart, H. Zeng, P. Grangier, S. Praver, J.-F. Roch. *New J. Phys.* **9**, 434 (2007).
- [23] M. Wolfer, A. Kriele, O. Williams, H. Obloh, C.-C. Leancu, C. Nebel. *Phys. Status Solidi A.* **206**, 2012 (2009).
- [24] S. Castelletto, A. Edmonds, T. Gaebel, J. Rabeau. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **18**, 1792 (2012).
- [25] S. Tóth, L. Himics, M. Koós. *J. Lumin.* **176**, 367 (2016).
- [26] I. Aharonovich, S. Castelletto, D.A. Simpson, A. Stacey, J. McCallum, A.D. Greentree, S. Praver. *Nano Lett.* **9**, 3191 (2009).
- [27] I. Aharonovich, S. Castelletto, D. Simpson, A. Greentree, S. Praver. *Phys. Rev. A.* **81**, 043813 (2010).
- [28] S. Castelletto, A. Boretti. *Opt. Lett.* **36**, 4224 (2011).
- [29] A. Stacey, D.A. Simpson, T.J. Karle, B.C. Gibson, V.M. Acosta, Z. Huang, K.M.C. Fu, C. Santori, R.G. Beausoleil, L.P. McGuinness, K. Ganesan, S. Tomljenovic-Hanic, A.D. Greentree, S. Praver. *Adv. Mater.* **24**, 3333 (2012).
- [30] S.A. Momenzadeh, F.F. de Oliveira, P. Neumann, D.B. Rao, A. Denisenko, M. Amjadi, Z. Chu, S. Yang, N.B. Manson, M.W. Doherty, J. Wrachtrup. *Phys. Rev. Appl.* **6**, 024026 (2016).
- [31] R.G. Sandstrom, O. Shimoni, A.A. Martin, I. Aharonovich. *Appl. Phys. Lett.* **105**, 181104 (2014).
- [32] D.G. Monticone, P. Traina, E. Moreva, J. Forneris, P. Olivero, I. Degiovanni, F. Taccetti, L. Giuntini, G. Brida, G. Amato, M. Genovese. *New J. Phys.* **16**, 053005 (2014).
- [33] K. Bray, R. Sandstrom, C. Elbadawi, M. Fischer, M. Schreck, O. Shimoni, C. Lobo, M. Toth, I. Aharonovich. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **8**, 7590 (2016).
- [34] S.A. Grudinkin, N.A. Feoktistov, M.A. Baranov, A.N. Sмирнов, V.Y. Davydov, V.G. Golubev. *Nanotechnol.* **27**, 395606 (2016).
- [35] Н.А. Феокистов, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, В.А. Толмачев, И.В. Коркин, А.Е. Алексенский, А.Я. Вуль, В.Г. Голубев. *ЖТФ* **81**, 132 (2011).
- [36] А.Е. Алексенский, Е.Д. Ейдельман, А.Я. Вуль. *Nanosci. Nanotechnol. Lett.* **3**, 68 (2011).
- [37] S.A. Grudinkin, N.A. Feoktistov, A.V. Medvedev, K.V. Bogdanov, A.V. Baranov, A.Y. Vul, V.G. Golubev. *J. Phys. D.* **45**, 062001 (2012).
- [38] V. Sedov, A. Khomich, V. Ralchenko, A. Martyanov, S. Savin, O. Poklonskaya, N. Trofimov. *J. Coat. Sci. Technol.* **2**, 38 (2015).
- [39] L. Bergman, M. McClure, J. Glass, R. Nemanich. *J. Appl. Phys.* **76**, 3020 (1994).
- [40] S. Praver, R.J. Nemanich. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Phys. Eng. Sci.* **362**, 2537 (2004).
- [41] H. Sternschulte, K. Thonke, R. Sauer, P. Münzinger, P. Michler. *Phys. Rev. B.* **50**, 14554 (1994).
- [42] A.M. Zaitsev. *Optical properties of diamond: a data handbook*, Springer Science & Business Media, Berlin (2013). 502 p.