

## ЦЕНТРЫ ОКРАСКИ В ЛЕГИРОВАННЫХ КРЕМНИЕМ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНКАХ

В. С. Седов<sup>1,2\*</sup>, В. С. Кривобок<sup>3</sup>, А. В. Хомич<sup>4</sup>,  
В. Г. Ральченко<sup>1,2</sup>, А. А. Хомич<sup>1,4</sup>, А. К. Мартьянов<sup>1</sup>,  
С. Н. Николаев<sup>3</sup>, О. Н. Поклонская<sup>5\*</sup>, В. И. Конов<sup>1,2</sup>

УДК 539.232;535.37:546.26-162

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской АН,  
119991, Москва, ул. Вавилова, 38, Россия; e-mail: sedovvadim@yandex.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>3</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской АН, Москва, Россия

<sup>4</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской АН,  
Фрязино Московской обл., Россия

<sup>5</sup> Белорусский государственный университет,  
220030, Минск, просп. Независимости, 4, Беларусь; e-mail: olga.poklonskaya@tut.by

(Поступила 4 ноября 2015)

Методом химического газофазного осаждения в СВЧ плазме в смесях метан—водород—силан на подложках из нитрида алюминия, вольфрама и кремния выращены легированные кремнием микрокристаллические алмазные пленки толщиной 1 мкм. Исследованы спектральные характеристики недавно обнаруженной полосы 720—722 нм фотолюминесценции пленок, расположенной вблизи известной линии центра окраски кремний-вакансия (SiV) в алмазе на длине волны  $\lambda = 737$  нм. Установлена связь возникновения полосы 720—722 нм с условиями синтеза, показано, что она проявляется лишь в присутствии кремния в алмазе независимо от материала подложки. Описана температурная динамика спектров в диапазоне 5—294 К. Обсуждается возможная природа и механизмы формирования центров окраски, ответственных за полосу 720—722 нм.

**Ключевые слова:** алмаз, фотолюминесценция, центр окраски, поликристаллическая пленка, легирование, силан, кремний-вакансия, метод химического газофазного осаждения.

*Silicon-doped microcrystalline diamond films of 1  $\mu\text{m}$  thickness were grown by chemical vapor deposition in microwave plasma from mixtures of methane—hydrogen—silane on substrates of aluminum nitride, tungsten and silicon. The diamond films are found to contain optically active silicon vacancy (SiV) centers giving rise to the 737-nm band in the photoluminescence spectra. The spectral features of a newly discovered narrow band of comparable intensity at 720—722 nm have been studied. It is shown that the band at 720—722 nm occurs in the photoluminescence spectra only in the presence of silica in the diamond, regardless of the substrate material. The temperature dynamics of the photoluminescence spectra in the range of 5—294 K has been investigated. The possible nature and mechanisms of formation of the color centers responsible for the 720—722 nm band are discussed.*

**Keywords:** diamond, photoluminescence, color center, polycrystalline film, doping, silane, SiV-center, chemical vapor deposition method.

## COLOR CENTERS IN SILICON-DOPED DIAMOND FILMS

V. S. Sedov<sup>1,2\*</sup>, V. S. Krivobok<sup>3</sup>, A. V. Khomich<sup>4</sup>, V. G. Ralchenko<sup>1,2</sup>, A. A. Khomich<sup>1,4</sup>,  
A. K. Martyanov<sup>1</sup>, S. N. Nikolaev<sup>3</sup>, O. N. Poklonskaya<sup>5\*</sup>, and V. I. Konov<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>A. M. Prokhorov General Physics Institute Russian Academy of Sciences, 38 Vavilov Str., Moscow, 119991, Russia; e-mail: sedovvadim@yandex.ru; <sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia; <sup>3</sup>P. N. Lebedev Physical Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <sup>4</sup>Institute of Radio Engineering and Electronics Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow region, Russia; <sup>5</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220030, Belarus; e-mail: olga.poklonskaya@tut.by)

**Введение.** Алмаз, синтезируемый в виде наночастиц, пленок и монокристаллов, вызывает большой интерес как материал для нанофотоники и квантовой оптики в силу уникальных оптических свойств. В последнее время особое внимание уделяется созданию и исследованию однофотонных эмиттеров на основе центров окраски (ЦО) в алмазе, которые обладают высокими яркостью и стабильностью при комнатной температуре, высокой квантовой эффективностью, короткими излучательными временами жизни и узкими линиями [1, 2]. Наиболее активно изучаются обладающие яркой фотолюминесценцией (ФЛ) центры азот-вакансия NV и кремний-вакансия SiV, технология создания которых путем ионной имплантации или легирования хорошо отработана [3—5]. Особенностью дефектов SiV (атом Si встраивается между двумя вакантными узлами решетки) и их преимуществом по сравнению с центрами NV является слабое электрон-фононное взаимодействие SiV в алмазной решетке. Как следствие, дефекты SiV характеризуются узкополосной люминесценцией с бесфононной линией (БФЛ) на 737 нм при комнатной температуре, причем небольшая доля энергии (~30 %) приходится на длинноволновое крыло БФЛ с фононными повторениями [6, 7]. Схожими характеристиками также обладают центры германий-вакансия (GeV) в алмазе, проявляющиеся узкополосной люминесценцией с БФЛ на  $\lambda = 602$  нм [8—10].

Легирование алмаза кремнием в процессе синтеза из газовой фазы (CVD-процесс) позволяет в широком диапазоне концентраций формировать ЦО с совершенной кристаллической структурой и высоким квантовым выходом ФЛ, в том числе не только для задач квантовой оптики, но и для оптических биомаркеров на основе наноалмаза [11, 12]. В то время как изучению однофотонной эмиссии из пленок и кристаллов с относительно низким содержанием SiV-центров посвящено большое количество работ (см., например, [1, 2]), сведений о ФЛ алмазов с высокой концентрацией примесного кремния почти не имеется. Удобным способом легирования кремнием CVD-алмаза является введение небольших добавок силана в реакционную смесь в процессе синтеза, причем возможно достижение высоких концентраций Si в материале. В работах [13—15] определены оптимальные концентрации добавок силана в газовой смеси метан—водород и температуры при синтезе микрокристаллических алмазных пленок в СВЧ плазме, при которых достигается наиболее яркая ФЛ центров SiV. Одновременно в спектрах ФЛ регистрировалась дополнительная полоса неизвестной природы вблизи 722 нм [14]. Интересно, что аналогичная дополнительная полоса ФЛ недавно наблюдалась в спектрах монокристаллов алмазов, синтезированных при высоких давлениях (HPHT-алмазов) в системе Mg-Si-C [16], но также не была интерпретирована. Таким образом, происхождение линии 722 нм остается неясным, требуется более детальное изучение связи возникновения этого центра с условиями синтеза и примесями, а также его спектральных характеристик. В настоящей работе исследовано поведение линии 722 нм в спектрах ФЛ в широком диапазоне температур (от 5 К до комнатной) в легированных кремнием образцах микрокристаллических алмазных пленок (АП) и на основе полученных результатов высказано предположение о комплексной структуре дефекта, соответствующего линии 722 нм, — спутника центра SiV в спектрах ФЛ АП.

**Методика эксперимента.** В качестве подложек для осаждения АП использованы полированные пластины поликристаллического нитрида алюминия размером  $10 \times 10 \times 1$  мм (ООО “С-компонент”, Россия). Несколько экспериментов проведено на подложках из вольфрама и кремния с целью установления возможного влияния материала подложки на формирование ЦО в пленке. Синтез АП проведен в СВЧ плазме в плазмохимическом реакторе ARDIS-100 (2.45 ГГц, 5 кВт) в газовой смеси  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{SiH}_4$  при общем расходе газа  $500 \text{ см}^3/\text{мин}$ , давлении в камере до 90 торр и СВЧ мощности до 4.0 кВт [13]. Концентрация метана к суммарному газовому потоку 5 %, концентрация силана по отношению к метану поддерживалась на уровне 0.6 %  $\text{SiH}_4/\text{CH}_4$ . Корректировкой давления и СВЧ мощности задавалась температура подложки в диапазоне 750—950 °С для разных образцов, которая измерялась двухлучевым пирометром Williamson 81-35-С. До процесса осаждения АП подложки подвергались ультразвуковой обработке в суспензии наноалмазного порошка (размер частиц ~5 нм), в результате чего на поверхности подложки образовывался слой алмазных зародышей плотностью  $>10^{10}$  частиц/ $\text{см}^2$ . Толщины АП измерялись *in situ* в процессе синтеза методом лазерной интерферометрии [14, 15], заключающимся в измерении осцилляции интенсивности отраженного от системы пленка—подложка луча полупроводникового лазера с  $\lambda = 655$  нм. Толщина всех синтезированных АП одинаковая ( $1000 \pm 50$  нм).

Структурное совершенство АП определялось с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) на установках LABRAM HR-800 и Nanofinder HE с использованием возбуждающего излучения твердотельных лазеров на  $\lambda = 473$  и 532 нм. Для возбуждения спектров ФЛ применялся

твердотельный YAG:Nd-лазер на  $\lambda = 473$  нм, измерения при комнатной температуре проводились на установке LABRAM HR-800, в диапазоне 5—294 К — на установке Spec-10 (Princeton Instruments) со спектральным разрешением 0.07 нм.

**Результаты и их обсуждение.** Изучение морфологии и структуры осажденных АП методами растровой электронной микроскопии и КР показывает, что они являются микрокристаллическими пленками (характерный размер кристаллитов 0.3—0.5 и 0.5—0.8 мкм для нелегированных и легированных кремнием), содержащими включения неалмазной фазы (аморфного углерода с  $sp^2$ -гибридизацией), локализованные преимущественно на межкристаллитных границах [14]. Легирование АП кремнием приводит к уширению алмазной полосы от 5 до  $7.5 \text{ см}^{-1}$ . По данным КР, с ростом температуры осаждения доля неалмазного  $sp^2$ -углерода незначительно снижается. Вследствие различия коэффициентов термического расширения нитрида алюминия и алмаза алмазный пик в спектрах КР испытывает высокочастотный сдвиг на  $3\text{—}4 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует сжимающему напряжению  $\sim 2$  ГПа [14].

Спектры ФЛ АП, полученных CVD-методом из смеси  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{SiH}_4$  (при  $\text{SiH}_4/\text{CH}_4 = 0.6\%$ ), в зависимости от температуры осаждения представлены на рис. 1. При измерениях спектров ФЛ при 5 К, как и при комнатной температуре [14], регистрируются две полосы: 737 (SiV-центр) и 720—722 нм. При нормировке по амплитуде алмазной полосы в спектрах КР интенсивность эмиссии SiV-центров возрастает в 3—4 раза при повышении температуры осаждения от 750 до 950 °С, тогда как интенсивность коротковолновой полосы 720—722 нм увеличивается более чем на порядок.

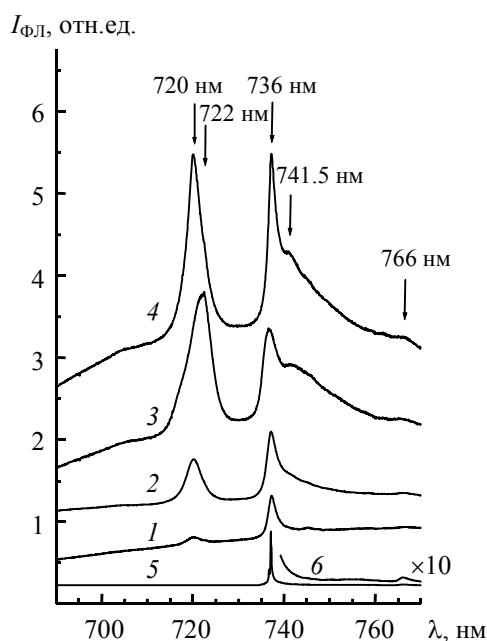


Рис. 1. Спектры ФЛ ( $\lambda_{\text{возб}} = 473$  нм) алмазных пленок, осажденных при температурах подложки 750 (1), 800 (2), 900 (3) и 950 °С (4); 5 и 6 — спектр ФЛ легированной кремнием гомоэпитаксиальной алмазной пленки и его длинноволновое крыло [17],  $T_{\text{изм}} = 5$  К; для наглядности спектры смещены по оси ординат

Анализ формы полосы 720—722 нм показывает (см. рис. 2, вставка), что она может быть хорошо аппроксимирована двумя лоренцевыми кривыми с максимумами 720—720.5 нм (полуширина  $\Delta\lambda_{0.5} = 3\text{—}4$  нм при  $T = 5$  К) и 721.5—722.5 нм ( $\Delta\lambda_{0.5} = 2\text{—}3$  нм). Как правило, при низких температурах компонента 720 нм в 5—20 раз более интенсивная, чем 722 нм, однако, как и в спектре 3 (рис. 1) для АП, осажденной при 900 °С, эти компоненты могут иметь близкие интенсивности. Ввиду очень небольшого различия в положении этих компонент дублета (слаборазрешенного) нельзя заранее исключить, что мы имеем дело с пространственно неоднородным изменением структуры и напряжений в пленке и смещением максимума ФЛ одного и того же дефектного оптического центра. Связь сдвига полосы 720—722 нм с напряжением (давлением)  $\sigma$  неизвестна, но для линии 737 нм центра SiV уста-

новлено соотношение 1.04 мЭВ/ГПа или 0.44 нм/ГПа [15]. Если предположить для дефекта 722 нм близкий коэффициент пересчета напряжения  $\sigma$  в сдвиг линии  $\Delta\lambda$ , то смещение максимума от 722 к 720 нм вполне возможно. Локальные измерения спектров ФЛ, проведенные вдоль ростовой поверхности АП, показывают, что в пределах одного и того же образца могут изменяться амплитуды и полуширины полос 720, 722 и 737 нм, однако положение их максимумов и соотношение интенсивностей остаются неизменными. Кроме того, полоса 720—722 нм наблюдается и для АП, осажденной на подложки из кремния, на которых уровень термических напряжений в АП существенно ниже ( $\sigma \approx -0.25$  ГПа). Вопрос о том, является полоса 720—722 нм проявлением двух различных оптических центров или отвечает одному дефекту, неоднородно уширенному в результате изменения структуры микроокружения с температурой синтеза АП, остается открытым.

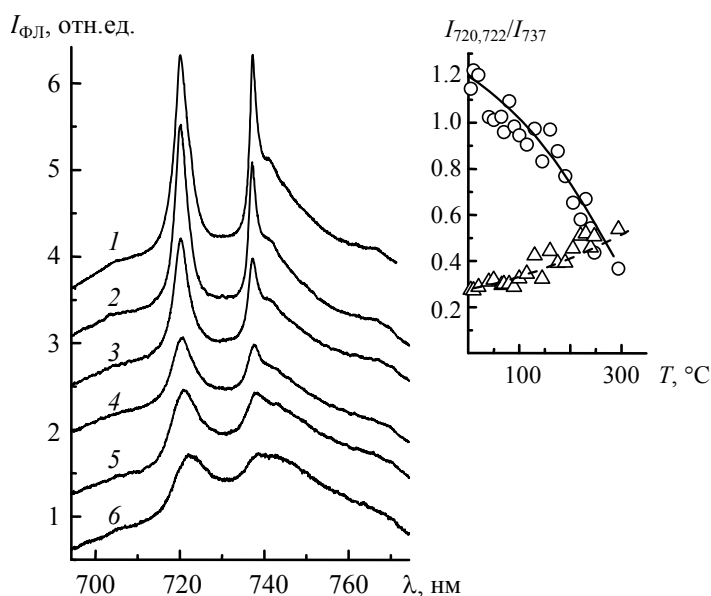


Рис. 2. Трансформация спектров ФЛ осажденной при температуре подложки 950 °С алмазной пленки в зависимости от температуры измерения: 5 (1), 50 (2), 130 (3) 190 (4) 247 (5) и 294 К (6); на вставке — зависимость отношения интегральных интенсивностей полос 720 и 737 нм (○), 722 и 737 нм (Δ) в спектрах ФЛ осажденной при температуре подложки 950 °С алмазной пленки от температуры измерения

Полоса SiV с максимумом при 737 нм в спектрах ФЛ исследуемых микрокристаллических АП уширена ( $\Delta\lambda_{0.5} = 2.5$  нм,  $T = 5$  К) по сравнению с наблюдаемой для гомоэпитаксиальных АП ( $\Delta\lambda_{0.5} = 0.3$  нм) [15], осажденных на монокристаллические подложки (рис. 1, спектры 5 и 6). Особенность вблизи 766 нм (см. рис. 1 и 2) соответствует наиболее яркой линии фоннного крыла в спектрах ФЛ SiV-центров (рис. 2, спектр 6). Широкая слабоструктурная полоса на длинноволновом крыле центра SiV с максимумом вблизи 741.5 нм (рис. 2), вероятно, относится к фоннным повторениям полосы 720—722 нм, поскольку такая полоса отсутствует в спектрах SiV-центра (рис. 1, спектры 5 и 6).

При повышении температуры измерений полосы в спектрах ФЛ легированных кремнием АП уширяются (рис. 2). Разложение коротковолновой полосы на две лоренцевы компоненты показывает, что по мере повышения температуры измерений от 5 до 294 К относительная интегральная интенсивность полосы 720 нм монотонно снижается с 75 до 45 % от общей площади коротковолновой полосы (рис. 2). Следует отметить, что в случае, когда легирование кремнием не проводилось (силан в камеру в процессе роста АП не подавался), линии 720, 722 и 737 нм отсутствуют в спектрах ФЛ АП, осажденных на подложки как из нитрида алюминия, так и из вольфрама или кремния. В то же время для АП, осажденных в газовой смеси  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{SiH}_4$  на подложки W и Si, наряду с полосой SiV присутствует достаточно интенсивная коротковолновая полоса, близкая по форме и положению к наблюдаемым на рис. 1. Таким образом, можно утверждать, что появление полосы 720—722 нм связано не с составом материала подложки (или примесей в ней), а с фактом легирования алмаза кремнием.

Узкие полосы вблизи 720 и/или 722 нм ранее неоднократно наблюдались в спектрах ФЛ алмазов различного происхождения [14, 16, 18—22], полученных в основном методом температурного градиента (НРНТ), причем в работах [18—21] они приписаны Ni-содержащему ЦО. Основанием для этого являлось технологическое присутствие никеля в шихте для получения НРНТ-алмазов, способность никеля формировать многочисленные ЦО в алмазе, а также выделение в спектрах ФЛ фононных спутников с энергией 31 мэВ, что, согласно [23], соответствует энергии квазилокальных колебаний центра, включающего в себя одиночный атом никеля.

Исследования [24—26] не подтвердили вхождение никеля в состав данного центра. Так, в [24] выполнена ионная имплантация ионов никеля в диапазоне флюенсов  $10^{11}$ — $10^{15}$  см<sup>-2</sup> с имплантацией ионов азота и без нее и проведены последующие отжиги в диапазоне температур 800—1400 °С, однако ЦО с БФЛ вблизи 720—722 нм в спектрах ФЛ не обнаружены. В [25] подробно исследованы центры, содержащие примеси никеля и азота, однако ни один из них не имел БФЛ вблизи 720 нм. В недавно изданном справочнике по спектральным линиям в алмазе [26] вопрос о строении центра остается открытым, при этом сами центры с БФЛ на 720 и 722 нм отсутствуют в перечне центров, обусловленных примесью никеля. В [27] при измерениях корреляционной функции второго порядка экспериментально продемонстрировано, что центры с БФЛ на 720 нм могут являться источниками одиночных фотонов. Тот факт, что полоса 720—722 нм появляется только в присутствии ФЛ SiV-центра, свидетельствует о вероятном присутствии атомов Si в дефекте, ответственном за эту полосу. Предположение о наличии некоторой неконтролируемой примеси в керамике AlN, приводящей к образованию центра 720—722 нм, опровергается тем, что при осаждении АП на подложки вольфрама и кремния при легировании из силана также наблюдается пара линий 720—722 и 737 нм. Напомним, что интенсивность линии 722 нм относительно линии 737 нм возрастает с увеличением температуры подложки от 750 до 950 °С. Аналогично, усиление линии 720—722 нм в спектрах монокристаллов НРНТ-алмазов, выращенных при высоких давлениях в системе Mg-Si-C, наблюдалось при повышении температуры синтеза от 1600 до 1900 °С [16]. Это можно объяснить, если принять во внимание ускорение диффузии примесного атома Si (возможно, в комплексе с вакансией) с ростом температуры синтеза, что способствует образованию комплексного дефекта с двумя или более атомами кремния. Так как поверхностная диффузия облегчена по сравнению с объемной (предполагаем, что при росте алмазной пленки дефект с линией 722 нм формируется сразу на ее поверхности, аналогично дефекту SiV), то характерные температуры синтеза, обеспечивающие необходимую диффузию и появление линии 720—722 нм, существенно ниже для CVD-алмаза (<1000 °С) по сравнению с НРНТ-алмазом (>1600 °С).

**Заключение.** Исследованы спектры фотолюминесценции микрокристаллических алмазных пленок, осажденных из газовой смеси CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> на подложки из нитрида алюминия, вольфрама или кремния. Обнаружено, что при обогащении газовой среды силаном в алмазных пленках формируются не только хорошо известные центры кремний-вакансия SiV с бесфононной линией на 737 нм в спектрах фотолюминесценции, но и их спутники — центры с полосой 720—722 нм, интенсивность свечения которых с повышением температуры осаждения растет опережающим темпом по сравнению с интенсивностью полосы SiV и может стать сравнимой с ней. Полоса 720—722 нм проявляется обязательно в присутствии центра SiV. Результаты проведенных экспериментов указывают на то, что за полосы фотолюминесценции с максимумами в области 720—722 нм могут быть ответственны комплексные дефекты, связанные с примесными атомами кремния.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00243).

[1] I. Aharonovich, E. Neu. *Adv. Opt. Mater.*, **2**, N 10 (2014) 911—928

[2] *Quantum Information Processing with Diamond: Principles and Applications*, Eds. S. Prawer, I. Aharonovich, Cambridge, Elsevier (2014)

[3] S. Pezzagna, D. Rogalla, D. Wildanger, J. Meijer, and A. Zaitsev. *New J. Phys.*, **13**, N 3 (2011) 035024

[4] А. А. Хомич, О. С. Кудрявцев, А. П. Большаков, А. В. Хомич, Е. Е. Ашкинази, В. Г. Ральченко, И. И. Власов, В. И. Конов. *Журн. прикл. спектр.*, **82**, № 2 (2015) 248—253 [A. A. Khomich, O. S. Kudryavtsev, A. P. Bolshakov, A. V. Khomich, E. E. Ashkinazi, V. G. Ralchenko, I. I. Vlasov, V. I. Konov. *JAS*, **82** (2015) 242—248]

- [5] 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**, N 24 (2011) 243107
- [6] 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**, N 7 (2009) 808—812
- [7] E. Neu, D. Steinmetz, J. Riedrich-Moeller, S. Gsell, M. Fischer, M. Schreck, C. Becher. *New J. Phys.*, **13**, N 2 (2011) 025012
- [8] V. G. Ralchenko, V. S. Sedov, A. A. Khomich, V. S. Krivobok, S. N. Nikolaev, S. S. Savin, I. I. Vlasov, V. I. Konov. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **42**, N 6 (2015) 165—168
- [9] T. Iwasaki, F. Ishibashi, Y. Miyamoto, Y. Doi, S. Kobayashi, T. Miyazaki, K. Tahara, K. D. Jahnke, L. J. Rogers, B. Naydenov, F. Jelezko, S. Yamasaki, S. Nagamachi, T. Inubushi, N. Mizuochi, M. Hatano. *Sci. Rep.*, **7**, N 5 (2015) 12882
- [10] Yu. N. Palyanov, I. N. Kupriyanov, Y. M. Borzdov, N. V. Surovtsev. *Sci. Rep.*, **5**, Article number: 14789 (2015) doi:10.1038/srep14789
- [11] A. S. Barnard, I. I. Vlasov, V. G. Ralchenko. *J. Mater. Chem.*, **19**, N 3 (2009) 360—365
- [12] Y. Y. Hui, C. L. Cheng, H. C. Chang. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, N 37 (2010) 374021
- [13] V. Sedov, V. Ralchenko, A. A. Khomich, I. Vlasov, A. Vul, S. Savin, A. Goryachev, V. Konov. *Diam. Relat. Mater.*, **56** (2015) 23—28
- [14] V. S. Sedov, A. A. Khomich, V. G. Ralchenko, A. K. Martyanov, S. S. Savin, O. N. Poklonskaya, N. S. Trofimov. *J. Coat. Sci. & Techn.*, **2**, N 2 (2015) 38—45
- [15] A. Bolshakov, V. Ralchenko, V. Sedov, A. Khomich, I. Vlasov, A. Khomich, N. Trofimov, V. Krivobok, S. Nikolaev, R. Khmel'nitskii, V. Saraykin. *Phys. Status Solidi A*, **212** (2015) 2525—2532
- [16] Yu. N. Palyanov, I. N. Kupriyanov, Y. M. Borzdov, Y. V. Bataleva. *Cryst. Eng. Commun.*, **17**, N 38 (2015) 7323—7331
- [17] A. A. Smolin, V. G. Ralchenko, S. M. Pimenov, T. V. Kononenko, E. N. Loubnin. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, N 26 (1993) 3449—3451
- [18] A. Osvet, A. P. Yelissev, B. N. Feigelson, N. A. Mironova, I. Sildos. *Radiat. Effects & Defects in Solids*, **146**, N 1-4 (1998) 339—348
- [19] A. Yelissev, S. Lawson, I. Sildos, A. Osvet, V. Nadolinny, B. Feigelson, J. M. Baker, M. Newton, O. Yuryeva. *Diam. Relat. Mater.*, **12**, N 12 (2003) 2147—2168
- [20] A. Yelissev, H. Kanda. *New Diam. Front. Carb. Techn.*, **17**, N 3 (2007) 127—178
- [21] A. Yelissev, Yu. Babich, V. Nadolinny, D. Fisher, B. Feigelson. *Diam. Relat. Mater.*, **11**, N 1 (2002) 22—37
- [22] Yu. N. Palyanov, Yu. M. Borzdov, I. N. Kupriyanov, A. F. Khokhryakov, D. V. Nechaev. *Cryst. Eng. Commun.*, **17** (2015) 4928—4936
- [23] A. M. Zaitsev. *Phys. Rev. B* **61**, N 19 (2000) 12909—12922
- [24] J. O. Orwa, I. Aharonovich, F. Jelezko, G. Balasubramanian, P. Balog, M. Markham, D. J. Twitchen, A. D. Greentree, S. Praver. *J. Appl. Phys.*, **107**, N 9 (2010) 093512
- [25] D. Steinmetz, E. Neu, J. Meijer, W. Bolse, C. Becher. *Appl. Phys. B*, **102**, N 3 (2011) 451—458
- [26] B. Dischler. *Handbook of Spectral Lines in Diamond*, Vol. 1, Tables and Interpretations, Berlin, Springer (2012)
- [27] S. Castelletto, A. Edmonds. *Proc. SPIE*, **8518** (2012) 85180R