

4. Politova G. A., Pankratov N. Y., Vanina P. Y., et al. // Magnetocaloric effect and magnetostrictive deformation in Tb-Dy-Gd-Co-Al with laves phase structure. J. Magn. Mater. 2019. 470. P.50–54.
5. Г.А. Политова, М.А. Ганин, А.Б. Михайлова и др. Магнитострикционные аномалии редкоземельных фаз Лавеса с морфотропным фазовым переходом. ФТТ 2020. 62. № 6. С. 839–845.
6. D.C. Jiles. Acta Mater. 51, 5907 (2003).
7. M. Ahart, M. Somayazulu, R.E. Cohen, et al. Nature (London) 451, 545 (2008).
8. W.F. Liu, X.B. Ren. Phys. Rev. Lett. 103, 257602 (2009).
9. R.G. Burkovsky, Yu. Bronwald, D. Andronikova, et al.. Sci. Rep. 7, 41512 (2017).
10. S. Yang, H.X. Bao, C. Zhou, et al. Phys. Rev. Lett. 104, 197201 (2010).
11. R. Bergstrom, Jr., M. Wuttig, J. Cullen, et al. Phys. Rev. Lett. 111, 017203 (2013).
12. C. Zhou, S. Ren, H. Bao, et al.. Phys. Rev. B 89, 100101(R) (2014).
13. A. Murtaza, S. Yang, M. Mi, et al. Appl. Phys. Lett. 106, 132403 (2015).
14. A. Murtaza, S. Yang, C. Zhou, et al. Ren. Appl. Phys. Lett. 109, 052904 (2016).
15. T.Y. Ma, X.L. Liu, J. Gou, Y. Wang, C. Wu, C. Zhou, Y. Wang, S. Yang, X.B. Ren. Phys. Rev. Mater. 3, 034411 (2019).
16. Politova G.A., Tereshina I.S., Cwik J. Multifunctional phenomena in Tb-Dy-Gd(Ho)-Co(Al) compounds with a Laves phase structure: Magnetostriction and magnetocaloric effect // J. Alloys Comp. 2020. V. 843. P. 155887.
17. Tereshina I.S., Chzhan V.B., Tereshina E.A., et al.. Magnetostructural phase transitions and magnetocaloric effect in Tb–Dy–Ho–Co–Al alloys with a Laves phase structure // J. Appl. Phys. 2016. V. 120. P. 013901(10).

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ NV ЦЕНТРОВ В СЦИНТИЛЛЯТОРАХ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА

М. С. Русецкий, Н. М. Казючиц, В. Н. Казючиц, А. С. Ляшенко

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: rusetsky@bsu.by*

Проведено сравнительное исследование светового выхода от сцинтилляторов на основе монокристаллов синтетического НРПТ алмаза, содержащих одновременно NV^0 и NV^- центры люминесценции. Спектры ионо- и фотолюминесценции таких образцов имели близкую структуру. Доминирование NV^- центров приводило к поглощению люминесценции NV^0 центров и снижению светового выхода сцинтилляторов.

Ключевые слова: синтетический НРПТ алмаз; NV центры; сцинтиллятор; спектрометрия α -частиц.

FEATURES OF USING LUMINESCENCE OF NV CENTERS IN DIAMOND- BASED SCINTILLATORS

M. S. Rusetsky, N. M. Kazuchits, V. N. Kazuchits, A. S. Lashenko

*Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: M. S. Rusetsky (Rusetsky@bsu.by)*

A comparative study of the light output from scintillators based on single crystals of synthetic HPHT diamond containing both NV^0 and NV^- luminescence centers was carried out. It was shown that the structure of the ionoluminescence spectra is close to the structure of the photoluminescence spectra. It was found that at a high concentration of the NV^- center, an intense absorption band is formed, coinciding with the position of the maximum of

the NV^0 center luminescence, which leads to a significant decrease in the light output of the scintillator.

Key words: synthetic HPHT diamond; NV centers; scintillator; α -particle spectrometry.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая радиационная стойкость алмаза [1] и малые времена затухания люминесценции для большинства центров в нем [2] обуславливают перспективность этого материала для использования в качестве сцинтиллятора. Наиболее распространенными центрами люминесценции в алмазе являются NV^0 и NV^- центры с длинами волн бесфоновых линий 575 и 638 нм, соответственно. Относительная простота формирования этих центров (облучение электронами с последующим отжигом) делают их весьма привлекательными для изготовления сцинтилляторов. Оба центра присутствуют в кристаллах алмаза совместно и их спектры поглощения и люминесценции существенно перекрываются.

Цель работы – оценка эффективности сцинтилляторов на основе алмаза с NV центрами.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах использовали полированные пластины синтетического HPHT алмаза толщиной 180–300 мкм, вырезанные из кристаллов с одинаковым дефектно-примесным составом. Для формирования NV центров образцы облучались электронами дозами $1.13 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (образец № 1) и $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ (образец № 2) с последующим термическим отжигом в вакууме при температуре 1450 °С в течение 4 часов. После отжига измеряли спектры поглощения, катодо- и фотолюминесценции (КЛ и ФЛ) в спектральном диапазоне 360..900 нм. Измерения амплитудных спектров α -частиц проводилось с использованием слабоактивного источника на основе Pu^{239} с энергией 5.2 МэВ. Методика и установка для измерения амплитудных спектров описаны в [3].

Низкая интенсивности источника α -частиц не позволяет проводить прямые измерения ионोलюминесценции (ИЛ). Поэтому для оценки структуры спектров ИЛ была предложена и реализована методика, в которой между сцинтиллятором и ФЭУ последовательно устанавливались светофильтры и проводились измерения амплитудных спектров. Фильтры выбирались так, чтобы последовательно отсекал часть спектра ФЛ, снижая тем самым световой выход сцинтиллятора.

В первом приближении спектры пропускания фильтров можно аппроксимировать ступенчатой функцией с граничной длиной волны. Построив зависимость амплитуды сцинтилляций от граничной длины волны фильтра и беря производную от этой зависимости, можно получить грубую оценку вклада различных спектральных областей в световой выход сцинтиллятора и визуализировать структуру спектра ИЛ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены спектры пропускания и ФЛ образцов № 1 и № 2, измеренные при температуре 77 К. ФЛ возбуждалась излучением лазера с длиной волны 355 нм. Спектры ФЛ содержат бесфоновые линии 389 нм, 503 нм ($H3$ центр), 575 нм (NV^0 центр). Воздействие лазерного излучения с длиной волны 355 нм и электронов, как правило, не возбуждает ФЛ NV^- центра [2]. Поэтому в спектре ФЛ образца № 1 NV^- центр не проявляется. Особенностью спектра ФЛ образца № 2 является то, что бесфоновая линия NV^- центра проявляется через поглощение на длине вол-

ны 638 нм. Спектр КЛ образца № 2, измеренный при комнатной температуре, качественно совпадает со спектров ФЛ, однако соотношение интенсивностей спектральных линии значительно отличается. Так, интенсивность люминесценции NV^0 центра значительно снижается относительно полосы в области 680 нм. Бесфононная линия NV^- центра проявляется, как и в случае ФЛ, через поглощение.

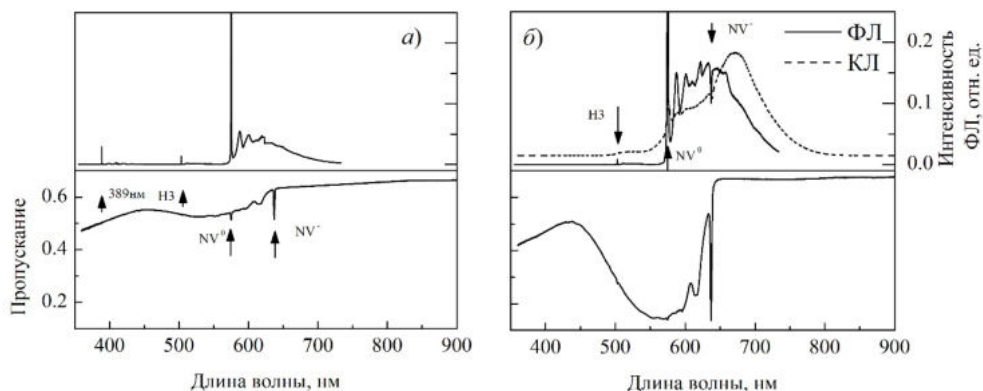


Рис. 1. Спектры ФЛ и пропускания, измеренные при температуре 77 К: а – образец № 1; б – образец № 2. Длина волны возбуждения ФЛ 355 нм. Шкалы интенсивности ФЛ и пропускания одинаковы для обоих рисунков. Спектр КЛ на рисунке (б) измерен при комнатной температуре

В спектрах пропускания регистрировались слабые центры $H3$ и NV^0 и практически полностью доминировал NV^- центр, проявляющийся в виде бесфононной линии и широкого фонного крыла в коротковолновой области. Четко регистрируемая бесфононная линия при 638 нм позволила оценить концентрацию NV^- центра по её интегральной интенсивности [5]. Полученные значения составили $2.3 \cdot 10^{17}$ и $4.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для образцов № 1 и № 2, соответственно. Обращает на себя внимание, что минимум пропускания, обусловленный NV^- центрами, практически совпадает с положением максимума интенсивности ФЛ NV^0 центров. Как видно из рисунка 1, NV^- центры не возбуждаются УФ излучением и пучком электронов, но они формируют полосу поглощения – своеобразный « NV^- фильтр». Полоса поглощения NV^- центрами «вырезает» ФЛ и КЛ NV^0 центров на участке спектра 500..638 нм.

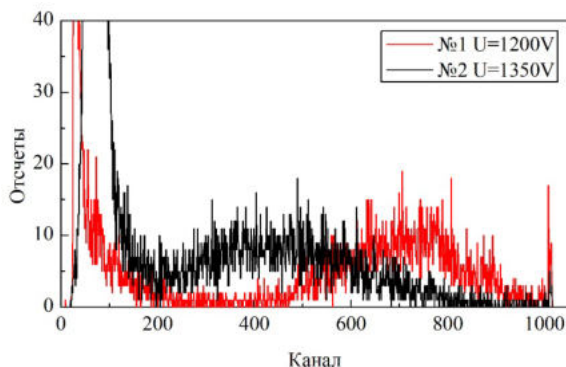


Рис. 2. Амплитудные спектры α -частиц, полученные с помощью образцов № 1 и № 2 в качестве сцинтилляторов. Напряжение питания ФЭУ составляло 1200 и 1350 В для образцов № 1 и № 2, соответственно

Наиболее отчетливо этот эффект проявляется в образце № 2 с очень высокой концентрацией NV^- центров. Ожидается, что такое поглощение может приводить к снижению светового выхода сцинтиллятора за счет эффекта самопоглощения.

Для оценки светового выхода исследованных образцов измерялись амплитудные спектры α -частиц при использовании этих образцов в качестве сцинтиллятора. Показанные на рисунке 2 амплитудные спектры свидетельствуют о том, что, несмотря на меньшую интенсивность ФЛ (рисунок 1), амплитуда сигналов от образца № 1 примерно в 5 раз превышает сигналы от образца № 2.

Значительная разница в световом выходе образцов скорее всего связана со значительной разницей в спектрах поглощения либо с различием в спектрах ИЛ. Для оценки структуры спектров ИЛ была использована описанная выше методика. Полученные спектры ИЛ приведен на рисунке 3 в виде гистограмм.

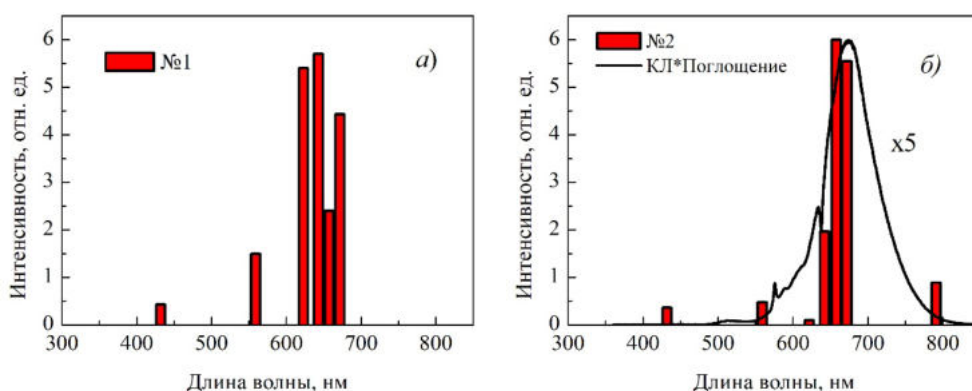


Рис. 3. Оценочные спектры ионOLUMИнесценции: а – образец № 1; б – образец № 2.

На рисунке (б) сплошной линией показан спектр катодOLUMИнесценции, измеренный при комнатной температуре и умноженный на спектр пропускания образца

Из этих рисунков видно, что качественно спектры ИЛ образцов близки к спектрам ФЛ и КЛ. Кроме того, для образца № 1 вклад спектральной области 500..630 нм значительно выше, чем для образца № 2, что связано с высоким коэффициентом поглощения в этой области для образца № 2. Это свидетельствует о том, что сильное поглощение NV^- центра приводит к почти полному подавлению светового выхода от NV^0 центра, снижая таким образом общую эффективность сцинтиллятора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что структура спектров ИЛ близка к структуре спектров КЛ и ФЛ для ультрафиолетового возбуждения. При формировании в алмазе одновременно NV^0 и NV^- центров световой выход сцинтилляций определяется не только абсолютной концентрацией центров, но и их соотношением. NV^- центры не возбуждаются α -частицами и не участвуют в сцинтилляциях, но они формируют полосу поглощения, совпадающую с максимум люминесценции NV^0 центров. Это приводит к существенному снижению светового выхода сцинтиллятора на основе NV^- центров. Таким образом, для повышения светового выхода сцинтилляторов на основе алмаза предпочтительным является формирование только NV^0 центров люминесценции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Saada D. Transformation of Diamond (sp³) to Graphite (sp²) Bonds by Ion-Impact / D. Saada, J. Adler, R. Kalish // International Journal of Modern Physics C. – 1998. – Vol. 09, № 01 – P. 61–69.
2. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: A data handbook, 1–3 Springer-Verlag Berlin Heidelberg // New York. – 2001. – 502 p.
3. Оценка сцинтилляционных характеристик кристаллов синтетического алмаза / М.С. Русецкий [и др.] // Материалы и структуры современной электроники : материалы X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – С. 192–197.
4. Винс В.Г. Оптическая спектроскопия синтетических алмазов, облученных нейтронами / Винс В.Г., Елисеев А.П., Малоголовец В.Г. // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 2. – С. 18–23.
5. Lawson S.C. et al. On the existence of positively charged single-substitutional nitrogen in diamond // J. Phys.: Condens. Matter. – 1998. – Vol. 10, № 27 – P. 6171–6180.

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ФОТОРЕЗИСТОВ НА ОСНОВЕ СМЕШАННЫХ ОКСИДОВ МОЛИБДЕНА-ВАНАДИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОЛИКОНДЕНСАЦИЕЙ ОКСОКИСЛОТ

Т. В. Свиридова, А. С. Логвинович, В. Б. Оджаев, Д. В. Свиридов

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: sviridova@bsu.by*

Показано, что пленки $V_2O_5:MoO_3$, полученные из водных растворов олигомеризованной молибден-ванадиевой оксокислоты (средний размер олигомерных оксочастиц 37 нм) имеют упорядоченное слоистое строение. Сшивание отдельных структурных элементов пленки под действием актиничного (УФ) облучения обеспечивает формирование компактного смешанного оксида молибдена-ванадия, равномерно травящегося в кислых водных растворах и теряющего растворимость при высоких экспозициях. Это, в свою очередь, открывает возможность получения топологических изображений со сложным рельефом.

Ключевые слова: смешанные оксиды молибдена-ванадия; поликонденсация; оксосоединения; неорганические фоторезисты.

STRUCTURAL FEATURES OF THIN-FILM PHOTORESISTS BASED ON MIXED MOLYBDENUM-VANADIUM OXIDES DERIVED VIA POLYCONDENSATION OF OXOACIDS

T. V. Sviridova, A. S. Logvinovich, V. B. Odzaev, D. V. Sviridov

*Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: T.V. Sviridova (sviridova@bsu.by)*

It has been shown that $V_2O_5:MoO_3$ films derived from oligomeric molybdenum-vanadium oxoacid (the mean size of oxo-particles was estimated to be 37 nm) possess lamellar structure. The binding of structural elements of the film under actinic (UV) illumination ensures forma-