

**О. Г. Лысенко^{1,*}, В. И. Грушко¹, Е. И. Мицкевич¹,
Г. Д. Ильницкая¹, А. Ю. Бояринцев², Ю. Д. Онуфриев²,
В. Ф. Попов³, Л. Г. Левчук³, Н. М. Казючиц⁴,
М. С. Русецкий⁴, В. В. Лысаковский¹, С. А. Ивахненко¹**

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля

НАН Украины, г. Киев, Украина

²Институт сцинтилляционных материалов

НАН Украины, г. Харьков, Украина

³Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, г. Харьков, Украина

⁴Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

*ismdiadep@gmail.com

Люминесцентные и радиационные характеристики монокристаллических алмазных порошков

Изучены различные типы люминесценции (фотолюминесценция, катодолюминесценция, рентгенолюминесценция) в диапазоне от 360 до 900 нм монокристаллических порошков алмаза с размерами зерна от 125/100 до 250/200, разделенных на различные группы по степени совершенства кристаллической структуры и значениям магнитной восприимчивости. При комнатной температуре во всех группах кристаллов преобладало свечение H3 дефекта алмаза, при температуре жидкого азота в спектрах катодолюминесценции доминировали никелевые центры. С использованием отобранных алмазов и полисилоксанового эластомера Sylgard 184 изготовлены образцы композиционных сцинтилляторов и проведено исследование их радиационной стойкости. Установлена более высокая относительно стандартного YSO:Ce сцинтиллятора радиационная стойкость алмазных композитных сцинтилляторов к облучению быстрыми электронами.

Ключевые слова: монокристаллические порошки алмаза, фотолюминесценция, катодолюминесценция, рентгенолюминесценция.

ВВЕДЕНИЕ

Люминесценцию алмазов изучают почти целое столетие [1–12]. По спектрам люминесценции определяют энергетические характеристики регистрируемого излучения, примесный и дефектный состав, радиационную стойкость алмазов. Исследования люминесценции под действием рентгеновского излучения особенно актуальны при изучении сцинтилляционных свойств алмазов. Систематические исследования рентгенолюминесценции алмазов проводили еще Раман с сотрудниками на образцах из индийских месторождений [13]. Было установлено, что, несмотря на сильное различие в интенсивности и цвете люминесценции отдельных алмазов, спектры излучения всех образцов содержали линию 415,2 нм с примыкающим к ней с длин-

новолновой стороны серией линий. В отдельных образцах наблюдали люминесценцию с длиной волны 503,3 нм и ряд прилегающих к ней с длинноволновой стороны равноотстоящих линий излучения. Цвет люминесценции алмазов определялся соотношением интенсивностей этих двух систем (синей и зеленой), а также окраской образцов, зависящей от примесей, которые вызывают частичное поглощение люминесценции, что влияет на наблюдаемый цвет свечения алмаза [14].

Исследования люминесценции алмазов обычно связаны с крупными кристаллами размером > 1 мм. Люминесценция алмазных микропорошков изучена в меньшей степени. В частности, влияние примесей азота на фотолюминесценцию природных порошков алмаза изучали в [15]. Исследования связанных состояний на поверхности синтетических алмазных порошков методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии приведены в [16]. Радиационная стойкость синтетических алмазных микропорошков с учетом предельной механической прочности была исследована методами рентгеновской дифракции в [17].

Алмазные микропорошки могут стать перспективным материалом для создания новых композиционных сцинтилляторов, пригодных для регистрации ионизирующих излучений в широком спектральном диапазоне. Композиционные сцинтилляторы представляют собой многокомпонентную систему, состоящую из сцинтилляционных гранул (порошков), распределенных в оптически прозрачной среде. На основе композиционных сцинтилляторов могут быть разработаны сцинтилляционные детекторы ионизирующего излучения большой площади для исследований в области физики элементарных частиц. В связи с этим представляют интерес комплексные исследования люминесценции синтетических алмазных порошков, включая фотолюминесценцию (ФЛ), катодолюминесценцию (КЛ) и рентгенолюминесценцию (РЛ), а также влияния на характеристики люминесценции радиационного облучения.

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Исходными материалами для исследований были стандартные алмазные шлифовальные порошки марок 125/100 АС80, 125/100 АС100, 160/125 АС80, 250/200 АС160, полученные в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины методом спонтанного синтеза при температурах 1300–1900 °С и давлении 5–6 ГПа. В качестве металлов-растворителей углерода использовали Fe, Co, Ni. Первые цифры в обозначении марки порошков соответствуют максимальным и минимальным размерам кристаллов алмаза в микрометрах. Маркировка АС20 обозначает порошки синтетических алмазов, зерна которых представлены отдельными кристаллами с развитой поверхностью, агрегатами, сростками и вырожденными кристаллами с коэффициентом формы зерен от 1,3 до 3,0. Порошки марки АС80 содержат кристаллы и сростки кристаллов, а порошки АС100 и АС160 состоят только из кристаллов без сростков. Коэффициент формы зерен в обоих случаях не больше 1.1.

Порошки марок 125/100 АС80 и 125/100 АС100 были подвергнуты магнитной сепарации и разделены на магнитные и немагнитные фракции. Удельная магнитная восприимчивость χ немагнитной фракции была равна $2,16 \cdot 10^{-8}$ м³/кг, магнитной – $5,61 \cdot 10^{-8}$ м³/кг. С применением микроскопа Kopus-5604, оснащенного видеокамерой DCM 200, из немагнитных порошков были отобраны монокристаллы в форме октаэдра и/или кубооктаэдра без видимых включений (рис. 1). В дальнейших экспериментах магнито- и опти-

чески сепарированные порошки обозначали MS (Magnetic Separation). Часть исходных порошков марок 150/125 AC80 и 125/100 AC20 была подвергнута термической обработке в аргоне при температуре 1100 °С в течение 20 мин. Отожженные порошки обозначали HT (Heat Treatment). Остальные группы алмазов не подвергали специальной обработке или отбору.

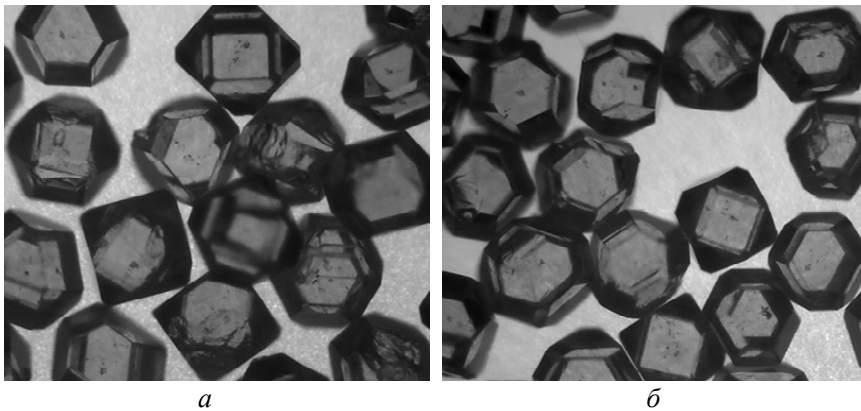


Рис. 1. Микрокристаллы алмаза 125/105 AC100 до (а) и после (б) магнито-оптической сепарации.

Композиционные сцинтилляторы на основе алмазных порошков были изготовлены по методике, описанной в [18]. В качестве связующего материала использовали полисилоксановый эластомер Sylgard 184. Как было установлено в [19], оптические свойства Sylgard 184 меняются незначительно при облучении электронами с энергией 8,3 МэВ до интегральной радиационной дозы 90 Мрад. Для оценки свечения образцов микрокристаллов алмаза и композиционных сцинтилляторов на их основе применяли измерительный комплекс Санберга. В качестве фотоприемника использовали фотоэлектронный умножитель R1307 Hamamatsu. Возбуждение люминесценции микрокристаллов осуществлялось источником бета-частиц $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$, который размещали в центре сцинтиллятора. В качестве отражающего покрытия сцинтиллятора использовали диффузный отражатель.

Спектры РЛ были получены с помощью спектрофотометра Specord 40. В качестве источника гамма-квантов и бета-частиц использовали ^{137}Cs . Времена затухания люминесценции измерены с использованием фотоприемника ФЭУ 9214В ("ET Enterprises", Великобритания) и осциллографа Rigol DS6064 с частотой пропускания 600 МГц.

Измерения спектров КЛ были выполнены в спектральном диапазоне 360–900 нм с разрешением 0,2 нм с использованием решеточного монохроматора МДР-23 и ФЭУ-100. Энергия возбуждающих люминесценцию электронов составляла 10 кэВ, ток электронного пучка – 0,3 мкА, диаметр области возбуждения – ~ 1 мм. Образцы алмазных порошков были запрессованы в тонкую пленку индия, нанесенную на медный хладопровод металлического криостата, что позволяло проводить измерения спектров КЛ при температуре комнатной и 80 К (при охлаждении жидким азотом).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведены нормированные на максимум спектры ФЛ, РЛ и КЛ алмазного порошка зернистостью 125/100, записанные при комнатной температуре. Такой же вид имеют спектры и других марок алмазных порошков.

Как видно на рис. 2, структура спектра люминесценции не зависит от вида возбуждения. При комнатной температуре люминесцентное излучение регистрируется на участке 480–650 нм с максимумом при 520–530 нм.

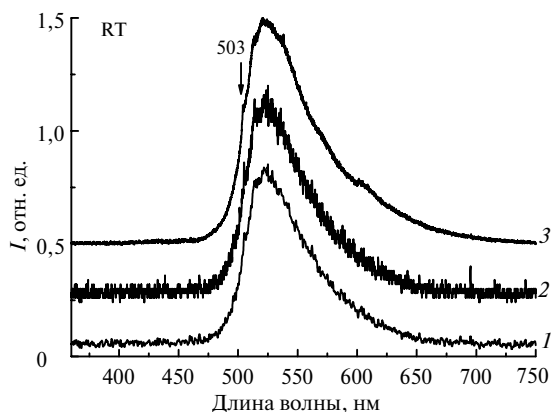


Рис. 2. Типичные спектры ФЛ (1), РЛ (2) и КЛ (3) исходных микропорошков алмаза зернистостью 125/100 при комнатной температуре; спектры 2 и 3 смещены вдоль оси ординат.

Регистрация люминесценции в алмазах, охлажденных до криогенных температур, позволяет наблюдать тонкую структуру спектров и тем самым идентифицировать некоторые примеси и дефекты в образцах. На рис. 3 показаны спектры КЛ микропорошков алмаза 125/100 при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Спектры КЛ других исследованных алмазных порошков имеют такой же вид. Приведенные на рис. 3 спектры характерны для большинства синтетических алмазов *Ib* типа, выращенных методом температурного градиента в условиях высоких давлений и высоких температур из никельсодержащих расплавов-растворителей углерода [20, 21]. Общей чертой этих спектров является доминирование “никелевого” центра с бесфонной линией при 484 нм с широкой электрон-фононной полосой в окрестности 540 нм. В результате расщепления возбужденного состояния центр 484 нм состоит из четырех линий с энергиями 2,5587, 2,5602, 2,5618, 2,5634 эВ. Считается, что линии 508 и 513 нм являются фонными повторениями наиболее интенсивной линии центра 484 нм, так как смещены на 125 мэВ – энергию оптических фононов.

Наблюдается также слабое излучение связанного с никелем центра при 884 нм (дублет 1,4008, 1,4035 эВ). Обычно интенсивность центра 884 нм составляет ~ 5–10 % от интенсивности центра 484 нм. Как известно, центр 884 нм характеризуется относительно низкой температурной стабильностью и может исчезнуть после отжига под давлением при температуре до 1350 °С [22]. Центр 484 нм более стабилен и при этой температуре не разрушается. Таким образом, низкая интенсивность центра 884 нм свидетельствует о синтезе порошков при повышенных температурах или о дополнительном отжиге после синтеза. В частности, в спектрах отожженных порошков излучение центра 884 нм не наблюдается. Оба центра 484 и 884 нм имеют простую атомную структуру и, согласно [20], содержат один атом Ni.

Характерные для большинства алмазов азот-вакансионные центры 503,2 нм (N3) и 575,5 нм (NV⁰) проявляются в спектрах КЛ алмазных порошков всех размеров. Центр 575,5 нм (2,156 эВ) образуется в любых азотсодержащих природных и синтетических алмазах, включая алмазные пленки. Он

создается облучением или пластической деформацией во время полировки или высокотемпературного отжига под давлением. Атомная модель центра 575,5 нм – вакансия в нейтральном зарядовом состоянии, связанная с ближайшим замещающим атомом азота (NV^0) [20].

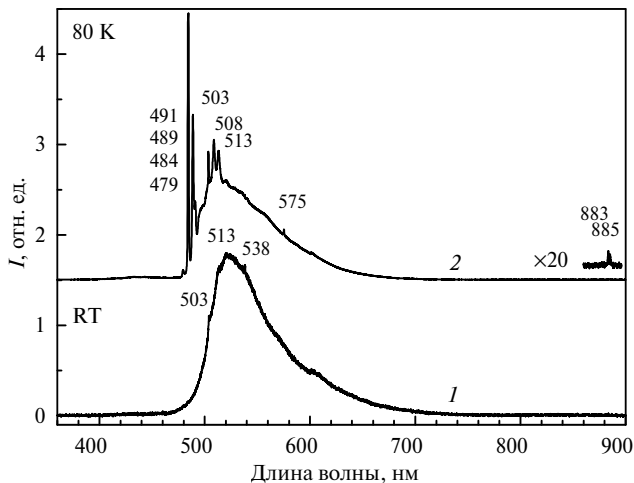


Рис. 3. Спектры КЛ микропорошков алмаза 125/100 при комнатной температуре (1) и температуре жидкого азота (2); спектр 2 смещен вдоль оси ординат.

Центр НЗ с бесфононной линией 503,2 нм (2,463 эВ) является характерным дефектом природных азотосодержащих алмазов. Структура НЗ центра представляет собой комплекс N–V–N – пара замещающих атомов азота в ближайших соседних узлах решетки алмаза, разделенных вакансией в нейтральном зарядовом состоянии [20]. Центр НЗ образуется в алмазах типа Ia любым радиационным излучением и последующим отжигом при температурах выше 500 °С. В синтетических алмазах типа Ib центр НЗ создается и без облучения при температурах отжига выше 1800 °С. Регистрация излучения НЗ центра свидетельствует о процессах частичной агрегации азота в течение синтеза алмазных порошков.

С увеличением температуры от жидкого азота до комнатной интенсивность люминесценции центра 884 нм уменьшается приблизительно в 50 раз, в то время как интенсивность НЗ центра почти не меняется [23, 24]. В результате, как видно на рис. 3, при комнатной температуре регистрируется преимущественно излучение НЗ центра с бесфононной линией 503,2 нм и широкой электрон-фононной полосой с максимумом в окрестности 520–530 нм.

На рис. 4 приведены спектры РЛ двух марок алмазных порошков до и после отжига в аргоне при температуре 1100 °С в течение 20 мин. Для порошка марки 160/125 при комнатной температуре регистрируется бесфононная линия 503,2 нм и ее фонное повторение – линия 513 нм. Максимум широкой полосы находится в окрестности 520–530 нм. На рис. 4 видно уменьшение интенсивности РЛ отожженных алмазных порошков.

Для исследования радиационной стойкости алмазных микропорошков в составе композиционного сцинтиллятора регистрировали их амплитудные спектры свечения до и после радиационного облучения. Облучение проводилось электронами с энергией $E_0 = 8,3$ МэВ при комнатной температуре. Суммарные накопленные дозы облучения составляли 50 ± 3 % и 100 ± 3 % Мрад. На рис. 5 в качестве примера приведены амплитудные спектры свечения сцин-

тиллятора на основе микропорошков алмаза 125/100 AC80 HT-MS до и после облучения электронами до накопленной дозы в 50 Мрад. Время накопления спектров в обоих случаях было одинаковым. После облучения до накопленной дозы 50 Мрад (см. рис. 5) уменьшилось число событий (отсчетов), другими словами уменьшилась интенсивность свечения. Аналогичным образом были испытаны на радиационную стойкость другие композиционные алмазные сцинтилляторы. Результаты испытаний представлены в таблице.

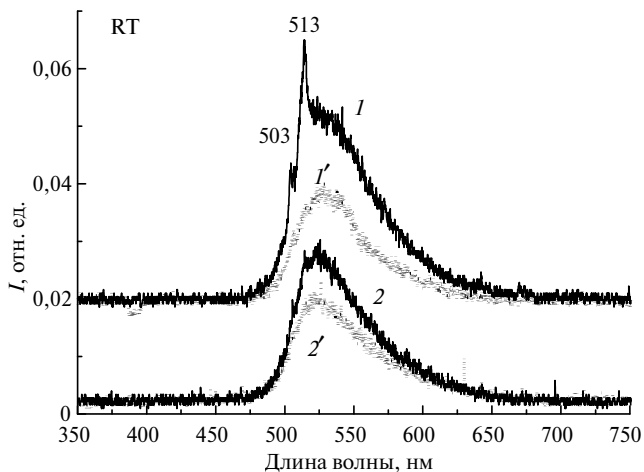


Рис. 4. Спектры РЛ алмазных порошков с размером зерна 160/125 (1, 1') и 125/100 (2, 2') до (1, 2) и после (1', 2') отжига; спектры записаны при комнатной температуре.

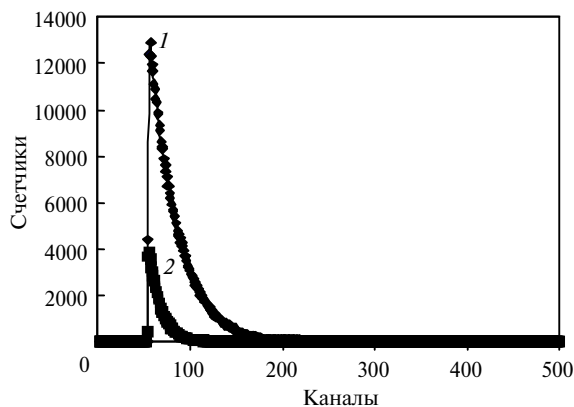


Рис. 5. Амплитудные спектры композиционного сцинтиллятора на основе монокристаллов алмаза 125/100 AC80 HT-MS до (1) и после (2) облучения электронами с энергией 8,3 МэВ до накопленной дозы в 50 Мрад.

Приведенные в таблице значения относительного светового выхода композиционных алмазных сцинтилляторов сравниваются со световым выходом стандартного сцинтиллятора на основе иттрий-алюминиевого перовскита $YAlO_3$, активированного церием (YSO:Ce). Световой выход стандартного сцинтиллятора YSO:Ce принят равным 100 %. Видно, что исходная эффективность свечения композиционных алмазных сцинтилляторов существенно ниже и составляет, в лучшем случае, ~ 30 % от эффективности свечения стандартного сцинтиллятора. Время спада излучательной рекомбинации в алмазных сцинтилляторах составляет ~ 20 нс.

Некоторые характеристики композиционных сцинтилляторов на основе алмазных порошков

Номер образца	Композиционный сцинтиллятор	Время затухания, нс	Относительный световой выход, %		
			до облучения	после облучения, Мрад	
				50	100
Стандарт	YSO:Ce, монокристалл	–	100	0	0
1	125/100 AC100 НТ-MS	22	20	3	0,7
2	125/100 AC80 НТ-MS	–	7	3	0
3	160/125 AC80	17	3	0,2	0
4	160/125 AC80 НТ	18	3	0,3	0
5	125/100 AC20	21	23	разрушение	
6	125/100 AC20 НТ	21	21	2	0
7	125/100 AC100	–	31	0	0
8	250/200 AC160	–	28	0	0

После облучения электронами дозой 50 Мрад люминесценцию в YSO:Ce сцинтилляторе зарегистрировать не удалось. Люминесценция отсутствовала также и в композиционных сцинтилляторах, в составе которых были исходные алмазные порошки 125/100 AC100 и 250/200 AC160. У большинства остальных композиционных сцинтилляторов на основе алмазных порошков световой выход уменьшился в 6–10 раз, а для порошков 125/100 AC80 НТ-MS – всего в 2.3 раза. Светимость алмазных сцинтилляторов после облучения электронами дозой 50 Мрад осталась на уровне 0,2–3,0 % от исходной светимости стандартного сцинтиллятора YSO:Ce. Наиболее стойкими к электронному облучению оказались сцинтилляторы из отожженных “немагнитных” алмазных порошков, состоящих из отдельных кристаллов (125/100 AC100 НТ-MS) или кристаллов и сростков (125/100 AC80 НТ-MS). Наименее стойкими оказались сцинтилляторы из крупнозернистых порошков 125/100 AC100 и 250/200 AC160 без отжига, состоящих только из отдельных кристаллов. Несмотря на относительно высокую исходную светимость (~ 30 % от светимости стандартного сцинтиллятора), после облучения электронами дозой 50 Мрад люминесценцию в этих сцинтилляторах обнаружить не удалось. Порошки 125/100 AC20 с зернами из отдельных кристаллов с развитой поверхностью, агрегатами, сростками и вырожденными кристаллами с коэффициентом формы зерен от 1,3 до 3,0 полностью разрушились при электронном облучении. В то же время композиты на основе этих же, но предварительно отожженных порошков 125/100 AC20 оказались относительно стойкими.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно на рис. 2 и 3, доминирующим в люминесценции всех групп алмазных образцов при комнатной температуре является НЗ-центр с излучением в диапазоне 480–650 нм. НЗ-центр состоит из вакансии в соединении с азотом (N–V–N). Время затухания излучения НЗ центра, составляет ~ 16–17 нс в диапазоне температур 77–700 К [20], что хорошо согласуется с наблюдаемыми значениями этого параметра в композиционных алмазных сцинтилляторах. Время затухания НЗ центра может быть уменьшено до нескольких наносекунд за счет создания напряжений в алмазах [25].

В синтетических алмазах интенсивность НЗ центра может быть увеличена отжигом при 1100 °С при нормальном давлении, что связано с дополнительной агрегацией азота [26]. На наш взгляд значительная диффузия атомов азота при 1100 °С маловероятна. В то же время при этой температуре подвижны вакансии. В только что выращенных порошках могут уже существовать димеры азота (N–N), которые не успели захватить вакансию в течение короткого времени синтеза. Последующий отжиг в режиме диффузии вакансий приводит к захвату вакансий с образованием N–V–N структуры. Можно ожидать увеличение интенсивности НЗ центра при отжиге без стабилизирующего алмаз давления только в структурно совершенных кристаллах с небольшим количеством альтернативных стоков для вакансий. В порошках с включениями графита и металлов-катализаторов внутри кристаллов отжиг без давления неизменно будет приводить к графитизации алмазов как на поверхности, так и на внутренних границах между алмазом и включениями. Следствием этого может быть генерация напряжений в кристаллах. В наших экспериментах наблюдается уменьшение интенсивности люминесценции с отжигом.

Для выяснения причин лучшей или худшей радиационной стойкости некоторых композиционных алмазных сцинтилляторов необходим всесторонний анализ характеристик этих сцинтилляторов после облучения электронами с энергией 8,3 МэВ. Дозы облучения, по-видимому, следует выбрать меньшими, чем 50 Мрад, такими, чтобы интенсивность остаточной люминесценции была достаточной для надежной регистрации спектров ФЛ, КЛ, РЛ.

Вместе с тем, в результате этой работы эмпирически установлена более высокая стойкость алмазных сцинтилляторов на основе монокристаллических порошков к облучению быстрыми электронами, чем стойкость стандартных сцинтилляторов YSO:Ce. В образцах композитных сцинтилляторов, содержащих алмазы размером зерна 125/100, имеющие совершенную кристаллическую структуру и магнитную восприимчивость $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ м³/кг люминесценция сохранилась даже после радиационного воздействия дозой 100 Мрад. Апробированы некоторые приемы отбора и сортировки порошков, режимы их обработки, найдены относительно стойкие к облучению высокоэнергетическими электронами марки алмазных порошков. Все это позволит уменьшить поле поиска оптимальных алмазных материалов для сцинтилляционных детекторов.

Согласно данным таблицы, при дозе облучения в 50 Мрад две группы (125/100-AC100 HT-MS и 125/100 AC80 HT-MS) показали остаточную люминесценцию 3 % относительно номинальной светимости стандартного сцинтиллятора. Как видно из данных КЛ, при температуре жидкого азота (см. рис. 3) все образцы имели включения никеля. Преобладающим дефектом кристаллической решетки микрокристаллов, как следует из графиков ФЛ, КЛ и РЛ (см. рис. 2–4), является точечный дефект типа НЗ. Наблюдаемое отличие в светимости одной группы образцов от другой (см. таблицу) можно объяснить различной концентрацией доминирующей примеси в структуре микрокристаллов. Это отличие может быть обусловлено отбором и магнитной сепарацией, а также различными режимами термической обработки (отжига) микрокристаллов этих групп, что привело к различному уменьшению общего числа центров НЗ.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования люминесценции монокристаллических алмазных порошков, полученных методом спонтанного синтеза при температурах

1300–1900 °С и давлении 5–6 ГПа, показали наличие светимости в видимом диапазоне как при возбуждении ультрафиолетовым, так и при возбуждении рентгеновским излучением или электронным пучком. Установлено, что структура спектров люминесценции не зависит от размеров микрокристаллов алмаза. При температуре жидкого азота в спектрах КЛ доминируют никелевые центры, а при комнатной температуре – азот-вакансионные центры N3. Спектры РЛ алмазных порошков показали четкую зависимость светимости микрокристаллов от режима их термической обработки.

Исследования радиационной стойкости композитов с алмазными порошками показали, что образцы с микрокристаллами алмаза зернистостью 125/100, прошедшие магнитную и визуальную сепарацию, сохранили остаточную (относительно стандартного сцинтиллятора до облучения) светимость в 3 и 0,7 % после облучения электронами дозой 50 и 100 Мрад соответственно.

Представляется перспективным проведение дальнейших исследований радиационной стойкости монокристаллических алмазных порошков, синтезированных и отобранных разными методами, с различным содержанием металлических включений и дефектов структуры для создания радиационно-стойких сцинтилляторов.

Виявлено різні типи люмінесценції (фотолюмінесценція, катодолюмінесценція, рентгенолюмінесценція) в діапазоні від 360 до 900 нм монокристалічних порошоків алмазу з розмірами зерна від 125/100 до 250/200, поділених на різні групи за ступенем досконалості кристалічної ґратки і значенням магнітної сприйнятливості. При кімнатній температурі у всіх групах кристалів переважало випромінювання N3 дефекту алмазу. При температурі рідкого азоту в спектрах катодолюмінесценції домінували нікелеві центри. З відібраних алмазів і полісилоксанового еластомеру Sylgard 184 виготовлено зразки композиційних сцинтиляторів і проведено дослідження їх радіаційної стійкості. Встановлено більш високу відносно стандартного YSO:Ce сцинтилятора радіаційну стійкість алмазних композиційних матеріалів до опромінювання швидкими електронами.

Ключові слова: монокристалічні порошки алмаза, фотолюмінесценція, катодолюмінесценція, рентгенолюмінесценція.

Different types of luminescence (photoluminescence, cathodoluminescence, X-ray luminescence in the range from 360 to 900 nm of monocrystalline diamond powders with grains from 125/100 to 250/200) were studied. The powders were divided into different groups according to the perfection degree of their crystal structure and magnetic susceptibility value. At the room temperature the N3 luminescence of a diamond defect prevailed in all groups of crystals. At the liquid nitrogen temperature in the spectra of cathodoluminescence nickel centers dominated. Using selected diamonds and Sylgard 184 polysiloxane elastomer the samples of composite scintillators were made and their radiation resistance investigated. The higher radiation resistance relative of the standard YSO:Ce scintillators to the irradiation with fast electrons was installed.

Keywords: monocrystalline diamond powders, photoluminescence, cathodoluminescence, X-ray luminescence.

1. Becquerel M.E. Sources de Lumiere: Ses Causes et Ses Effets [Sources of Light: Its Causes and Effects]. Paris, Librairie de Firmin Didot Freres, 1868. 431 p.
2. Mani A. The fluorescence and absorption spectra of diamond in the visible region. *Proc. Indian Academy Sci. A.* 1944. Vol. 19. P. 231–252.
3. Shipley R.M. Notes on the abundance and color of fluorescent diamonds. *G&G.* 1947. Vol. 5, no. 9. P. 395–397.
4. Wild G.O., Biegel H. The fluorescence of diamonds. *The Gemmologist.* 1947. Vol. 16, no. 193. P. 228–229.
5. Cotty W. F. Identification of diamonds by their fluorescence. *J. Gemmology.* 1956. Vol. 5, no. 7. P. 339–341.

6. Dyer H.B., Matthews I.G. The fluorescence of diamond. *Proc. Royal Society of London: Series A, Mathem. Phys. Sci.* 1958. Vol. 243, no. 1234. P. 320–335.
7. Collins A.T. Visible luminescence from diamond. *Industrial Diamond Rev.* 1974. Vol. 34. P. 131–137.
8. Collins A. T. Colour centers in diamond. *J. Gemmology.* 1982. Vol. 18, no. 1. P. 37–75.
9. Fritsch E., Waychunas G.A. Gemstones. In: *Fluorescence: Gems and Minerals Under Ultraviolet Light*. Ed. M. Robbins. Geoscience Press Inc., Phoenix, AZ, 1994.
10. Eaton-Magana S., Post J.E., Heaney P.J., Walters R. A., Breeding C.M., Butler J.E. Fluorescence spectra of colored diamonds using a rapid, mobile spectrometer. *G&G.* 2007. Vol. 43, no. 4. P. 332–351.
11. Holloway G. Blue fluorescence in diamond. *The Australian Gemmologist.* 2009. Vol. 23, No. 9. P. 408–414.
12. Shigley J.E., Breeding C. M. Optical defects in diamond: A quick reference chart. *G&G.* 2013. Vol. 49, no. 2. P. 107–111.
13. Raman C.V. The nature and origin of the luminescence of diamond. *Proc. Indian Acad. Sci. A.* 1944. Vol. 19. P.199–215.
14. Шлезингер М.А. Люминесцентный анализ. Москва: Физ.-мат. литература, 1961. 401 с.
15. Hsiao-Chi Lu, Bing-Ming Cheng. Analysis of nitrogen defects in diamond with VUV photoluminescence. *Anal. Chem.* 2011. Vol. 83. P. 6539–6544.
16. Iizuka K., Furukawa Y., Oshima R. Analysis of binding state of heat treated diamond powder. *Am. J. Chem. Mater. Sci.* 2014. Vol. 1, no. 1. P. 7–10.
17. Shishonok E.M., Luhin V.G., Koltunowicz T.N. XRD analysis of synthetic diamond powders irradiated with electrons. *Acta Physica Polonica A.* 2015. Vol. 128, no. 5. P. 912–914.
18. Бояринцев А.Ю., Непокупна Т.А., Онуфрієв Ю.Д., Караваєва Н.Л., Креч А.В., Галунов М.З. Сцинтиляційний елемент та спосіб його виготовлення. Пат. на винахід № 111455; від 25.04.2016.
19. Boyarintsev A.Yu., Galunov N.Z., Karavaeva N.L., Krech A.V., Lazarev I.V. Study of radiation-resistant gel bases for composite detectors. *Func. Mater.* 2013. Vol. 20, no. 4. P. 471–476.
20. Zaitsev A.M. *Optical properties of diamond: A Data Handbook*. Springer, Berlin, 2001.
21. Kazuchits N.M. Rusetsky M.S., Kazuchits V.N., Zaitsev A.M. Cathodoluminescence of synthetic diamonds annealed at high temperature without stabilizing pressure. *Diamond Relat. Mater.* 2017. Vol. 74. P. 41–44.
22. Елисеєв А.П., Винс В.Г., Надольный В.А., Чепуров А.И., Пальянов Ю.Н. Влияние условий получения синтетических алмазов на их рентгенолюминесценцию. *Сверхтв. материалы.* 1987. № 4. С. 3–9.
23. Yamamoto N., Spence J.C.H., Fathy D. Cathodoluminescence and polarization studies from individual dislocations in diamond. *Philosophical Magazine B.* 1984. V. 49, no. 6. С. 609–629.
24. Melnikov A.A., Denisenko A.V., Zaitsev A.M., Fahrner W.R., Varichenko V.S. In: *Proc. 3rd Int. Conf. on Appl. of Diam. Films and Related Materials*. Gaithersburg, Maryland, USA, 1995. P. 639.
25. Crossfield M.D., Davies G., Collins A.T., Lightowers E.C. The role of defect interactions in reducing the decay time of H3 luminescence in diamond. *J. Physics C: Solid State Physics.* 1974. Vol. 7, no. 10. P. 1909.
26. Webb S.W., Jackson W.E. Synthetic diamond crystal strength enhancement through annealing at 50 kbar and 1500 °C. *J. Mater. Res.* 1995. Vol. 10, no. 7. P. 1700–1709.

Поступила в редакцию 20.03.18

После доработки 31.05.18

Принята к публикации 31.05.18