

ПРИЧИНЫ НЕСТАБИЛЬНОСТИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛОВ CsI:Tl С МАТИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

А. В. Шкоропатенко¹, А. М. Кудин², Л. А. Андриющенко¹,

Л. И. Волошина¹, Д. И. Зосим¹, А. В. Волошин³

¹Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков,

²Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков,

³Институт монокристаллов НАН Украины, Харьков,

Поступила в редакцию 19.05.2015

Рассмотрены причины нестабильности оптических свойств отражающих граней сцинтиллятора CsI:Tl. Нестабильность коэффициента отражения обусловлена деградацией поверхностного рельефа из-за релаксации дислокационной подсистемы в нарушенном слое. В результате полигонизации возникает структура с характерным размером зерна, меньшим начальной шероховатости. Сглаживание преднамеренно созданного рельефа изменяет условий светосбора и деградации спектрометрических характеристик. Размер образовавшихся зерен соответствует начальной шероховатости только в том случае, если начальная шероховатость была меньше 0,2 мкм. Старение образцов с таким рельефом поверхности не приводит к изменению коэффициента светосбора. Показано, что матирование поверхности абразивными материалами нового поколения на полимерной гибкой основе с зернистостью 0,3–1,0 мкм позволяет для сцинтилляторов CsI:Tl размерами 30 × 30 × 380 мм достигать неоднородность светового выхода менее 2 % и обеспечивает стабильность сцинтилляционных характеристик во времени.

Ключевые слова: модификация поверхности, шероховатость, отражательная способность, спектрометрические характеристики, кристалл CsI:Tl.

ПРИЧИНИ НЕСТАБИЛЬНОСТІ СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛІВ CsI:Tl З МАТОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

А. В. Шкоропатенко, О. М. Кудін, Л. А. Андриющенко,

Л. І. Волошина, Д. І. Зосим, О. В. Волошин

Розглянуто причини нестабільності оптичних властивостей відбиваючих граней сцинтилятора CsI:Tl. Нестабільність коефіцієнта відбивання обумовлена деградацією поверхневого рельєфу із-за релаксації дислокаційної підсистеми у спотвореному шарі. Як наслідок полігонізації виникає структура з характерним розміром зерна, меншим ніж початкова шорсткість. Згладжування навмисно створеного рельєфу змінює умови світлозбору і призводить до деградації спектрометричних характеристик. Розмір зерен, що утворилися, відповідає початковій глибині рельєфу лише в тому випадку, якщо початкова шорсткість була менше 0,2 мкм. Старіння зразків з таким рельєфом поверхні не призводить до зміни коефіцієнта світлозбору. Показано, що матування поверхні абразивними матеріалами нового покоління на полімерній гнучкій основі із зернистістю 0,3–1,0 мкм дозволяє для сцинтиляторів CsI:Tl розмірами 30 × 30 × 380 мм досягати неоднорідність світлового виходу менше 2 % і забезпечує стабільність сцинтиляційних характеристик в часі.

Ключові слова: модифікація поверхні, шорсткість, відбиваюча здатність, спектрометричні характеристики, кристал CsI:Tl.

REASON OF SPECTROMETRIC CHARACTERISTICS UNSTABILITY OF MATTED CsI:Tl CRYSTAL

A. V. Shkoropatenko, A. M. Kudin, L. A. Andruschenko,

L. I. Voloshina, D. I. Zosim, A. V. Voloshin

The factors that lead to instability of the optical properties of the reflective faces of the CsI:Tl crystal are discussed. Variability of the reflective coefficient is connected with degradation of the surface relief due to relaxation of the dislocation subsystems within the damaged layer. As a result of polygonization the grain structure is formed with specific grain size less than rate of initial roughness. The smoothing of created relief results in deterioration of light collection conditions and

spectrometric characteristics of the crystal. If initial roughness is less than 0.2 mm, it has been shown that specific size of grains which are formed after polygonization is coincided with initial roughness. Aging of samples with such surface relief do not leads to deterioration of light collection coefficient. It has been shown that matting of the surface by abrasives of new generation on flexible polymer base with the grain size of 0.3–1.0 μm allows reach the heterogeneity of the light output of less than 2 %, and ensures the stability of the scintillation characteristics in time.

Keywords: modification of surface, roughness, reflectivity, spectrometric characteristics, CsI:Tl crystal.

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллы CsI:Tl широко используются в различных областях науки и сцинтилляционной техники [1, 2]. За последние 10–15 лет для кристаллов CsI детально отработаны методы корректировки их спектрометрических характеристик за счет модификации отражающих поверхностей. Так, в [3] показано, что частичное матирование боковых поверхностей элементов в виде усеченных пирамид позволяет выравнивать осевую неоднородность светового выхода и, тем самым, минимизировать энергетическое разрешение длинномерных сцинтилляционных элементов. В работах [4, 5] показано, что матировка отражающих граней позволяет создавать заданное распределение светового выхода вдоль боковых граней длинномерных элементов размером $30 \times 30 \times 350$ мм и придавать подобным изделиям позиционную чувствительность.

Проблемой такого подхода к выравниванию неоднородности светового выхода является нестабильность достигнутых характеристик [3, 6]. Причина нестабильности связана с морфологической неустойчивостью поверхностного рельефа [6]. В литературе рассматривались две причины нестабильности. Во-первых, это релаксация вакансионной подсистемы внутри нарушенного слоя, созданного механической обработкой поверхности [7, 8]. Во-вторых, — релаксация дислокационной структуры нарушенного слоя [9, 10]. Однако данные об изменении светового выхода кристаллов с изменением рельефа отражающих поверхностей противоречивы. Считается, что для детекторов цилиндрической формы с высотой меньше диаметра изменение эффективной зеркальности вследствие эволюции рельефа не приводит к заметному изменению характеристик при γ -возбуждении [11]. В то же время хорошо известно, что для длинномерных

сцинтилляторов изменение состояния поверхности приводит к потере осевой однородности светового выхода [6, 11].

В настоящей работе рассматриваются причины нестабильности отражающих свойств матированного рельефа в зависимости от размера зерна абразива и степени шероховатости поверхности. Даны рекомендации по предотвращению указанной нестабильности за счет применения новых абразивных материалов, в том числе наноразмерных.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения исследований были выбраны образцы кристаллов CsI:Tl двух различных размеров. Во-первых, для удобства наблюдений за эволюцией поверхностного рельефа под оптическим микроскопом МБС-10 (либо при помощи прибора ПМТ-3) и измерений степени шероховатости тестером TR-200 были вырезаны образцы размерами $45 \times 20 \times 10$ мм. Выбор размера обоснован тем, что такие образцы удобны, как для создания равномерной матировки, так и для измерения характеристик, чувствительных к изменению шероховатости и эффективной зеркальности поверхности. Все образцы такого размера были изготовлены из однородной части монокристалла и имели концентрацию активатора ($C_{Ti} = 6,2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$), оптимальную для детектирования γ -квантов [12] со стандартным ФЭУ (в нашем случае фотоумножитель R1306 фирмы Hamamatsu). В то же время такая C_{Ti} позволяет изучать влияние обработки поверхности на выход α -сцинтилляций L_A и изменение α/γ -отношения со временем [13].

Поверхность образцов, входная к падающему излучению, обрабатывалась шлифовальной шкуркой на бумажной основе P240, либо композицией на основе этиленгликоля и шлифовального порошка F400. Для удобства сравнения перечень образцов с указанием их размеров

и метода матировки приведен в табл. 1. Следует заметить, что в настоящей работе также были испытаны шлифовальные материалы нового поколения, смотри строки 3–5 таблицы. Это гибкие пленочные материалы [14], которые включают микронные и субмикронные зерна абразива, закрепленные при помощи полимерного связующего на структурно однородной высокопрочной пленке полиэфира. Однородная высокопрочная пленочная основа не дает абразивным зернам осыпаться или вдавливаясь в обрабатываемую поверхность материала.

Кроме образцов в виде пластин, были изготовлены две длинномерные заготовки размерами $30 \times 30 \times 350$ мм, смотри строки 6 и 7 табл. 1. Такие сенсорные элементы применяются в космических телескопах [5, 15] вместе с кремниевыми PIN фотодиодами. Нашей целью было достижение однородного распределения светового выхода вдоль оси сцинтиллятора за счет частичной матировки длинных граней заготовки. Распределение светового выхода L вдоль образцов 6 и 7 с шагом 20 мм проводилось с помощью коллимированного источника ^{22}Na с энергией квантов 551 и 1275 кэВ. Параметр неоднородности (u , %) определялся как $u = \Delta L / L_{ave}$, т. е. максимальное отклонение L от его среднего значения, деленное на средний выход L_{ave} .

Концентрация таллия в этих образцах была однородной вдоль оси и составляла ($C_{Tl} = 1,1 \times 10^{19}$ см $^{-3}$). Световой выход измерялся при помощи «синего» ФЭУ R1306 (с максимальной чувствительностью при $\lambda_{max} = 410$ нм) либо «красного» R669 ($\lambda_{max} = 600$ нм) фирмы Hamamatsu, т. к. его спектральная чувствительность последнего хорошо соответствует таковой кремниевого фотодиода.

Все грани образца № 6 были обработаны стандартным способом глубокой шлифовки-полировки с последовательным уменьшением зерна абразива до 0,2 мкм и финишной полировкой на смеси спиртов. После измерений распределения светового выхода по длине образца проводилось выравнивание осевой неоднородности выхода путем матировки отдельных участков его поверхности с использованием состава № 2 на основе этиленгликоля и электрокорунда.

Аналогичным образом были обработаны грани образца № 7, однако финишная матировка для выравнивания светового выхода изделия проводилась с использованием абразивного пленочного материала на полимерной гибкой основе с зернистостью 0,3–1 мкм.

При изучении спектрометрических характеристик (световой выход и α/γ -отношение) образцы № 1–5 располагались на входном окне ФЭУ R669. В качестве оптического контакта между кристаллами и ФЭУ использовался каучук Sylgard-184. В качестве отражающего покрытия использовался зеркальный отражатель BM-2000 толщиной 70 мкм, а также диффузный отражатель Тувек. В центре отражающих оболочек располагался коллиматор α -частиц. Образцы возбуждались одновременно α -частицами от изотопа ^{239}Pu с энергией 5,15 МэВ и γ -квантами с энергией 0,662 МэВ от источника ^{137}Cs . В отличие от облучения изотопом ^{239}Pu , когда использовался коллиматор α -частиц, при возбуждении γ -квантами коллиматор не применялся, а сам источник был удален от поверхности образца на расстояние 120 мм. Время интегрирования сигнала составляло 5 мкс.

Таблица 1

Перечень исследуемых образцов и условия их матировки

№ п/п	Размер образца, мм	Наименование	Абразив	Зерно, мкм
1	45 × 20 × 10	Шкурка Р-240	Электрокорунд	50–63
2	45 × 20 × 10	Этиленгликоль	порошок F400	20–28
3	45 × 20 × 10	Пленка	Al ₂ O ₃	5–20
4	45 × 20 × 10	Пленка	Al ₂ O ₃	2–8
5	45 × 20 × 10	Пленка	Al ₂ O ₃	0,3–1,0
6	30 × 30 × 350	Частичная матировка составом № 2		
7	30 × 30 × 350	Частичная одно- или двукратная матировка пленкой № 5		

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные данные об изменении шероховатости поверхности и спектрометрических характеристик кристаллов приведены в табл. 2. Анализируя данные этой таблицы, начнем с главного — обсудим изменение морфологии рельефа.

Шероховатость поверхности. Профилограммы поверхности исследуемых образцов размерами $45 \times 20 \times 10$ мм³ приведены на рис. 1. Степень шероховатости R_a (среднеарифметическая) определялась в двух взаимно перпендикулярных направлениях — поперек преимущественного направления царапин (R_{a1}) и вдоль их распространения (R_{a2}). В качестве примера на рис. 1 приведены профили поперечной (кривая 1) и продольной (кривая 2) шероховатости на начальной стадии старения. Из данных рисунка видно, что поперечная шероховатость выражена более отчетливо, как это и следовало ожидать априори.

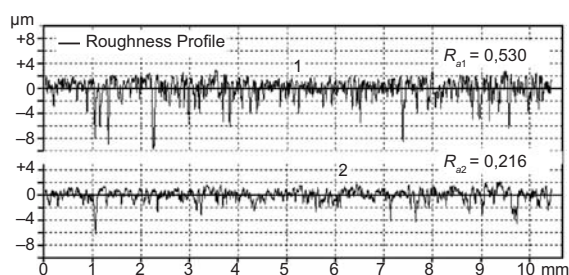


Рис. 1. Профили поперечной (1) и продольной (2) шероховатости для образца № 3 после матирования

Сведения об изменении шероховатости с течением времени представлены в табл. 2 для образцов, обработанных различным абразивом. Из данных этой таблицы видно, что степень шероховатости во многих случаях уменьшается в процессе старения. Так, после матирования пленкой со стандартным абразивом с характерным размером зерна 5–20 мкм поперечная шероховатость составляет 0,530 мкм и через месяц хранения уменьшается до величины 0,178 мкм. Аналогичные изменения наблюдаются и для продольной шероховатости, но ее изменение выражено менее заметно. Можно сделать вывод о том, что после грубой шлифовки морфология поверхности подвержена заметным изменениям в процессе старения. Сам факт залечивания (сглаживания) царапин хорошо известен [16]

и подробно изучался ранее. Отличительной особенностью материала CsI есть то, что процесс релаксации остаточных напряжений эффективно протекает даже при комнатной температуре.

Однако, в противоположность сказанному, продольная и поперечная шероховатость остаются практически неизменными в случае, если начальная $R_{a1} \leq 0,2$ мкм, как это видно из сравнения данных вначале и после 30 дней хранения, приведенных в строке 5 табл. 2. Так, начальная шероховатость $R_{a1} = 0,192$ мкм изменилась незначительно и составила 0,183 мкм через месяц старения.

Можно констатировать, что использование полимерной пленки с абразивом с размером зерна 0,3–1,0 мкм для матирования образцов CsI:Tl позволяет получать стабильный во времени рельеф поверхности, а значит и неизменную эффективную зеркальность этих поверхностей. Важно также отметить, что повторное матирование входной поверхности этой же пленкой также не приводит к нестабильности сформированного рельефа, сравни строки 5 и 6 табл. 2.

Полигонизация нарушенного слоя. Вывод об устойчивости рельефа при начальной $R_{a1} \leq 0,2$ мкм, который напрашивается из результатов об изменении шероховатости, строго говоря, не соответствует действительности. Как показали наблюдения за выбранными участками поверхности при помощи оптического микроскопа, изменения рельефа происходят всегда. Оказалось, что общей особенностью шероховатой поверхности кристаллов CsI является сильная полигонизация и рекристаллизация нарушенного слоя. Эволюция глубоких царапин приводит к их залечиванию и уменьшению степени шероховатости [16].

В случае мелких царапин полигонизация приводит к исчезновению собственно царапин, но возникающие зерна имеют характерный размер, практически совпадающий с начальной степенью шероховатости. Сказанное лучше всего иллюстрировать модельными экспериментами, результаты которых приведены на рис. 2. На полированную поверхность образца наносилась отдельная царапина, параллельные царапины или их веер при помощи алмазного индентора

Результаты опытов по выравниванию осевой неоднородности светового выхода сцинтилляционных элементов размером

№	Абразив, мкм	Отражатель	Характеристики детекторов CsI:TI							
			После обработки				Через 30 суток			
			R_a , мкм		Сцинтилляционные характеристики		R_a , мкм		Сцинтилляционные характеристики	
			R_{a1}	R_{a2}	L , отн. ед.	α/γ	R_{a1}	R_{a2}	L , отн. ед.	α/γ
1	50–63	–	2,100	1,800	–	–	2,022	1,424	–	–
2	20–28	Tyvek	1,186	0,705	0,94	0,64	1,027	0,665	0,95	0,63
		BM-2000			1,00	0,63			0,99	0,62
3	5–20	Tyvek	0,530	0,216	0,97	0,67	0,178	0,200	0,98	0,63
		BM-2000			0,98	0,65			1,01	0,63
4	2–8	Tyvek	0,343	0,284	0,94	0,65	0,279	0,239	0,95	0,63
		BM-2000			1,01	0,64			0,99	0,63
5	0,3–1,0	Tyvek	0,192	0,183	1,01	0,66	0,183	0,181	0,99	0,66
		BM-2000			1,03	0,64			0,97	0,64
6	0,3–1,0 дважды	–	0,370	0,330	–	–	0,352	0,344	–	–

прибора ПМТ-3. Из данных рисунка видно, что рельеф нестабилен. С течением времени царапина уплощается и превращается в систему блоков. По этой причине матированные грани кристалла в процессе старения теряют поверхностную анизотропию, характер отражений становится изотропным, а шероховатость сглаживается из-за залечивания царапин. Мелкие царапины исчезают, вместо них наблюдается цепочка блоков. Наблюдения показали, если начальная степень шероховатости $R_{al} \leq 0,2$ мкм, полигонизация приводит к образованию блоков и зерен такого же размера, поэтому параметр шероховатости не изменяется и эффективная зеркальность поверхности остается постоянной.

Сцинтилляционные характеристики. Прежде всего, отметим, что изменение эффективной зеркальности верхнего торца в незначительной степени влияет на световой выход при гамма-возбуждении L_G [11, 17]. По этой причине в табл. 2 приведены результаты исследований по влиянию состояния поверхности на световой выход L_A и α/γ -отношение. Оказалось, что изменения выхода

L_A в процессе старения невелики и находятся в пределах точности измерений, которая для данного метода измерений составляет $\pm 3,2\%$ [18]. Следует заметить, что при использовании «синего» ФЭУ выход L_A всегда увеличен после матировки входной поверхности и медленно релаксирует в процессе старения. Объяснение нестыковки наших данных с предыдущими очевидно связано с тем, что использованный нами «красный» ФЭУ не чувствует дополнительные центры свечения (вакансии) в нарушенном слое, поскольку обусловленное ими свечение приходится на синюю область спектра [19].

Несмотря на указанное обстоятельство, связанное с «красным» ФЭУ, измеренные значения α/γ -отношения четко отражают характер релаксации нарушенного слоя. Величина этого отношения всегда выше после матировки, когда в нарушенном слое много дополнительных центров свечения, и снижается в процессе релаксации. Хорошо видно, что только в одном случае — при использовании пленки с абразивом 0,3–1,0 (строка 5 табл. 2) значения α/γ -отношения

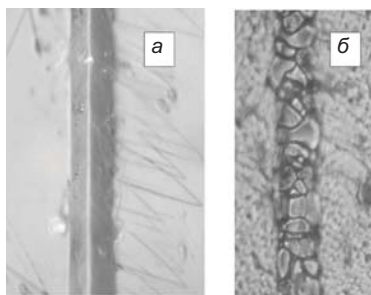


Рис. 2. Эволюция царапины на полированной поверхности CsI. Фотография в первый день (а) после нанесения царапины и через 30 дней старения (б). $\times 16$

стабильны во времени. Несмотря на вакансии, выбранная концентрация достаточна, процесс (отношение) отражает только изменение рельефа.

Рекомендации по предотвращению неустойчивости. Итак, причиной морфологической неустойчивости преднамеренно созданного рельефа является полигонизация приповерхностного нарушенного слоя. Низкие значения напряжений старта для скольжения дислокаций, которые по данным [20, 6] составляют всего лишь $1\text{--}2\text{ г/мм}^2$ для кристаллов CsI, определяют относительно быструю релаксацию остаточных напряжений, полигонизацию и сглаживание матированной поверхности в процессе старения. при комнатной температуре. (подробнее) Изменение рельефа приводит к изменению эффективной зеркальности отражающей поверхности и неустойчивости коэффициента светосбора. Эффект явно выражен для длинномерных сцинтилляторов с матированными боковыми гранями, поскольку для выравнивания осевой неоднородности выхода используются как мелкие, так и грубые абразивные материалы.

Из вышеизложенного вытекает очевидная рекомендация — для выравнивания неоднородности следует использовать пленочный абразивный материал на гибкой полимерной основе с зернистостью абразива $0,3\text{--}1\text{ мкм}$. Применение этого материала обеспечивает достижение заданной степени шероховатости не более $0,2\text{ мкм}$ и стабильность отражающих свойств поверхности и сцинтилляционных характеристик изделий. Старение образцов с таким рельефом поверхности не приводит к изменению коэффициента светосбора.

Экспериментальная проверка. Полученные результаты послужили основанием для проведения экспериментальной проверки высказанных рекомендаций. Эксперименты проводились со сцинтилляторами размером $30 \times 30 \times 350\text{ мм}$ (образец № 6, см. табл. 1). Цель опытов состояла в выравнивании продольной неоднородности светового выхода. Выравнивание осевой неоднородности светового выхода проводили в конструкции двухоконного детектора. В качестве светоотражающего элемента использовался зеркальный отражатель VM-2000. Для создания оптического контакта сцинтиллятора с ФЭУ использовали элементы оптической связи толщиной 3 мм , выполненные из композиции Sylgard-184.

Начальное распределение светового выхода вдоль оси сцинтиллятора CsI:Tl размерами $30 \times 30 \times 350\text{ мм}$ иллюстрируют кривые 1, 2 и 3 на рис. 3а. Кривая 1 соответствует измерениям при помощи левого ФЭУ, 2 — правого, 3 — одновременно двумя фотоприемниками. Хорошо видно (кривые 1 и 2), что для образца с полированными боковыми гранями световой выход уменьшается с увеличением расстояния от фотоприемника до места вспышки.

Непрерывным условием хорошего энергетического разрешения длинномерных сцинтилляторов является однородность сигнала по длине образца. Для достижения равномерного светового выхода боковые грани образца (две противоположные или все четыре) матировались в соответствии с рекомендацией. Конечный результат после выравнивания светового выхода иллюстрируют кривые 1, 2 и 3 на рис. 3б. Из сравнения частей «а» и «б» рисунка отчетливо видно, что поставленная цель достигнута.

Численные значения неоднородности светового выхода вдоль оси сцинтиллятора до и после выравнивания (u_1 и u_2 , соответственно) представлены в табл. 3. Видно, что использованный абразивный материал позволяет добиваться однородного распределения светового выхода, достигнутые значения u_2 составляют 2% и даже меньше. С другой стороны, как оказалось, характеристики остаются стабильными на протяжении 30 дней, что свидетельствует

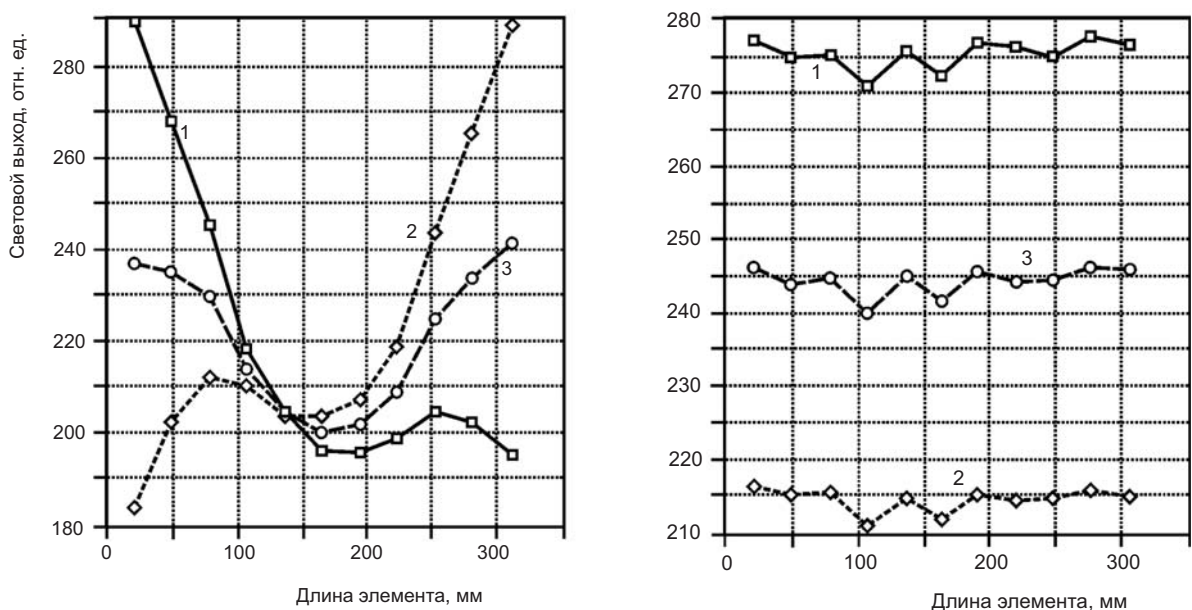


Рис. 3. Начальное (а) и конечное (б) распределение светового выхода вдоль оси сцинтиллятора: 1 — измерения при помощи левого ФЭУ, 2 — правого, 3 — одновременно двумя фотоприемниками

о неизменности эффективной зеркальности, т. е. о постоянстве параметров рельефа поверхности.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что абразив на основе пленочного гибкого материала с зернистостью абразива 0,3–1 мкм может успешно применяться для проведения операций по изменению коэффициента светосбора для выравнивания неоднородности светового выхода детекторов. При этом низкая зернистость абразива не приводит к риску нарушить жесткие допуски по размерам, предъявляемые к сцинтилляционным элементам.

ВЫВОДЫ

Причиной морфологической неустойчивости преднамеренно созданного рельефа является сильная полигонизация приповерхностного нарушенного слоя. Низкие значения напряжений старта для скольжения дислокаций предопределяют сглаживание матированной поверхности в процессе старения при комнатной температуре. Изменение рельефа приводит к изменению эффективной зеркальности отражающей поверхности и нестабильности коэффициента светосбора. Эффект явно выражен для длинномерных сцинтилляторов с матированными боковыми гранями.

Таблица 3

Результаты опытов по выравниванию осевой неоднородности светового выхода сцинтилляционных элементов размером 30 × 30 × 350 мм при помощи пленочного абразивного материала с зернистостью 0,3–1 мкм

Состояние поверхности	ФЭУ R669		ФЭУ R1306	
	$u_1, \%$	$u_2, \%$	$u_1, \%$	$u_2, \%$
После полировки	6,61	2,39	7,86	2,3
Матированы все 4 грани	5,95	6,28	9,20	9,08
Матированы 2 грани	2,10	3,30	2,04	3,78
Комбинированная доводка (однократное + двукратное матирование)	1,90	2,00	1,90	2,00

Показано, что полигонизация нарушенного слоя приводит к образованию зерен с характерным размером, соответствующим начальной степени шероховатости, в том случае если начальная шероховатость была меньше 0,2 мкм. Старение образцов с таким рельефом поверхности не приводит к изменению коэффициента светосбора.

Применение пленочного абразивного материала нового поколения на гибкой полимерной основе с зернистостью абразива 0,3–1 мкм обеспечивает:

– достаточную степень шероховатости поверхности для выравнивания осевой неоднородности светового выхода кристаллов CsI:Tl;

– стабильность созданного поверхностного рельефа, эффективной зеркальности поверхности и сцинтилляционных характеристик изделий.

ЛИТЕРАТУРА

- Lecoq P., Annenkov A., Gektin A., Korzhik M., Pedrini C. Inorganic Scintillators for Detector Systems. — Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. — 325 p.
- Grinyov B., Ryzhikov V., Kim J. K., Jae M. Scintillator Crystals, Radiation Detector & Instruments on Their Base // Ukraine, Kharkov, 2004. — 374 p.
- Vavra P. M. The Tuning of CsI:Tl crystals: Methods and Results // Conf. Record of 1998 IEEE Nucl. Sci. Symp. — 1998. — Vol. 1. — P. 525–530.
- Gektin A. V., Grinev B. V., Zosim D. I., Boyarintsev A. Yu. Light output tuning for the long-length CsI:Tl scintillators // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. — 2009. — Vol. A598, 1. — P. 270–272.
- Зосим Д. І. Довгомірні сцинтиляційні позиційно-чутливі детектори гама радіації : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.01 / Д. І. Зосим — Харків, 2007. — 20 с.
- Кудін О. М. Розробка науково-технологічних основ модифікації поверхні кристалів для корегування їх сцинтиляційних характеристик: автореф. дис. ... док. тех. наук: 05.02.01 / О. М. Кудін — Харків. — 2007. — 39 с.
- Kudin A. M., Sysoeva E. P., Trefilova L. N., Zosim D. I. Factors which define the alpha / gamma ratio in CsI:Tl crystals // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. — 2005. — Vol. A537. — P. 105–112.
- Кудин А. М., Андрущенко Л. А., Гресь В. Ю., Диденко А. В., Чаркина Т. А. Влияние условий обработки поверхности на собственную люминесценцию кристаллов CsI // Оптический журнал. — 2010. — Т. 77, № 5. — С. 7–10.
- Гектин А. В., Ром М. А. Эволюция приповерхностного нарушенного слоя смешанных щелочно-галлоидных монокристаллов // Физика и химия обработки материалов. — 1992. — № 2. — С. 124–127.
- Выдай Ю. Т., Тарасов В. А., Кудин А. М. и др. Стабильность спектрометрических характеристик детекторов CsI:Tl в зависимости от способа обработки поверхности // ПТЭ. — 2006, № 3. — С. 23–26.
- Глобус М. Е., Гринев Б. В. Неорганические сцинтилляторы: новые и традиционные материалы. — Харьков: «Акта», 2001. — 408 с.
- Trefilova L. N., Kudin A. M., Kovaleva L. V., et al. Concentration dependence of the light yield and energy resolution of NaI:Tl and CsI:Tl crystals excited by gammas, soft X-rays and alpha particles // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. — 2002. — Vol. A486. — P. 474–481.
- Kudin A. M., Sysoeva E. P., Trefilova L. N., Zosim D. I. Factors which define the alpha/gamma ratio in CsI:Tl crystals // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. — 2005. — Vol. A537. — P. 105–112.
- Нанопром. Суперфинишная обработка неметаллических деталей. <http://www.nanoprom.pro>.
- Bergenius G. S., Carius S., Carlson P., et al. Radiation tests of CsI:Tl crystals for the GLAST satellite mission // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. — 2005. — Vol. A545. — P. 842–851.
- Гегузин Я. Е., Кагановский Ю. С. Диффузионные процессы на поверхности кристалла. — М.: «Энергоатомиздат», 1984. — 124 с.
- Tarasov V. A., Kilimchuk I. V., Vyday Yu. T. Light collection simulation in the scintillation detectors of short-range radiation // Func. Materials. — 2010. — Vol. 17, 1. — P. 100–106.
- Sysoeva E., Tarasov V., Zelenskaya O. Comparison of the Methods for Determination of Scintillation Light Yield // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. — 2002. — Vol. A486. — P. 67–73.

19. Гектин А. В., Ширан Н. В., Серебряный В., Кудин А. М., Чаркина Т. А. Роль вакансионных дефектов в люминесценции CsI // *Оптика и спектр.* — 1992. — Т. 72, № 5. — С. 1061–1063.
20. Тьягараджан Р., Урусовская А. А. Движение и размножение дислокаций в кристаллах йодистого цезия // *ФТТ.* — 1965. — Т. 7, № 1. — С. 88–91.
- No. 2. — P. 124–127.
10. Vydaj Yu. T., Tarasov V. A., Kudin A. M. i dr. Stabil'nost' spektrometricheskikh harakteristik detektorov CsI:Tl v zavisimosti ot sposoba obrabotki poverhnosti // *PTE.* — 2006, No. 3. — P. 23–26.
11. Globus M. E., Grinev B. V. Neorganicheskie scintillyatory: novye i tradicionnye materialy. — Har'kov: «Akta», 2001. — 408 p.
12. Trefilova L. N., Kudin A. M., Kovaleva L. V., et al. Concentration dependence of the light yield and energy resolution of NaI:Tl and CsI:Tl crystals excited by gammas, soft X-rays and alpha particles // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* — 2002. — Vol. A486. — P. 474–481.
13. Kudin A. M., Sysoeva E. P., Trefilova L. N., Zosim D. I. Factors which define the alpha/gamma ratio in CsI:Tl crystals // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* — 2005. — Vol. A537. — P. 105–112.
14. Nanoprom. Superfinishnaya obrabotka nemetallicheskikh detalej. <http://www.nanoprom.pro>.
15. Bergenius G. S., Carius S., Carlson P., et al. Radiation tests of CsI:Tl crystals for the GLAST satellite mission // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* — 2005. — Vol. A545. — P. 842–851.
16. Geguzin Ya. E., Kaganovskij Yu. S. Diffuzionnye processy na poverhnosti kristalla. — M.: «Energoatomizdat», 1984. — 124 p.
17. Tarasov V. A., Kilimchuk I. V., Vydaj Yu. T. Light collection simulation in the scintillation detectors of short-range radiation // *Func. Materials.* — 2010. — Vol. 17, 1. — P. 100–106.
18. Sysoeva E., Tarasov V., Zelenskaya O. Comparison of the Methods for Determination of Scintillation Light Yield // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* — 2002. — Vol. A486. — P. 67–73.
19. Gektin A. V., Shiran N. V., Serebryanyj V., Kudin A. M., Charkina T. A. Rol' vakansionnyh defektov v lyuminescencii CsI // *Optika i spektr.* — 1992. — Vol. 72, No. 5. — P. 1061–1063.
20. Tyaagaradzhan R., Urusovskaya A. A. Dvizhenie i razmnozhenie dislokacij v kristallah jodistogo ceziya // *FTT.* — 1965. — Vol. 7, No. 1. — P. 88–91.

LITERATURA

1. Lecoq P., Annenkov A., Gektin A., Korzhik M., Pedrini C. *Inorganic Scintillators for Detector Systems.* — Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. — 325 p.
2. Grinyov B., Ryzhikov V., Kim J. K., Jae M. *Scintillator Crystals, Radiation Detector & Instruments on Their Base* // Ukraine, Kharkov, 2004. — 374 p.
3. Vavra P. M. The Tuning of CsI:Tl crystals: Methods and Results // *Conf. Record of 1998 IEEE Nucl. Sci. Symp.* — 1998. — Vol. 1. — P. 525–530.
4. Gektin A. V., Grinev B. V., Zosim D. I., Boyarintsev A. Yu. Light output tuning for the long-length CsI:Tl scintillators // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* — 2009. — Vol. A598, 1. — P. 270–272.
5. Zosim D. I. Dovgomirni scintilyacijni pozicijno-chutlivi detektori gama radiacii: avtoref. dis. ... kand. teh. nauk: 05.02.01 / D. I. Zosim — Harkiv, 2007. — 20 p.
6. Kudin O. M. Rozrobka naukovo-tehnologichnih osnov modifikacii poverhni kristaliv dlya koreguvannya ih scintilyacijnih harakteristik: avtoref. dis. ... dok. teh. nauk: 05.02.01 / O. M. Kudin — Harkiv. — 2007. — 39 p.
7. Kudin A. M., Sysoeva E. P., Trefilova L. N., Zosim D. I. Factors which define the alpha/gamma ratio in CsI:Tl crystals // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* — 2005. — Vol. A537. — P. 105–112.
8. Kudin A. M., Andryuschenko L. A., Gres' V. Yu., Didenko A. V., Charkina T. A. Vliyanie uslovij obrabotki poverhnosti na sobstvennyuyu lyuminescenciyu kristallov CsI // *Opticheskij zhurnal.* — 2010. — Vol. 77, No. 5. — P. 7–10.
9. Gektin A. V., Rom M. A. Evolyuciya pripoverhnostnogo narushennogo sloya smeshannyh schelочно-galoidnyh monokristallov // *Fizika i himiya obrabotki materialov.* — 1992. —