

## СЦИНТИЛЯЦИОННЫЙ ОТКЛИК КРИСТАЛЛОВ CsI(Tl) и CsI(Na) НА ВОЗБУЖДЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИМИ И ГАММА-КВАНТАМИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

*А.М.Кудин, А.А.Ананенко, Ю.Т.Выдай, В.Ю.Гресь, Б.Г.Заславский, Д.И.Зосим  
НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины*

Досліджувалась залежність питомого світловиходу  $L/E$  від енергії  $E$  в зоні 5.9...60 кеВ в процесі старіння кристалів CsI(Na) та для CsI(Tl) з різним вмістом активатора та для різних умов світлосбору. В протилежність літературним даним про збільшення  $L/E$  в зоні ~15кеВ (так названа непропорційність світловиходу до +24%) показано, що величина непропорційності та її знак в вирішальній мірі визначаються умовами світлосбору (видом відбивача) і в меншій мірі сцинтиляційним матеріалом (концентрацією центрів висвічування). Між непропорційністю та енергетичним розділенням спостерегається чітка кореляція навіть в зоні низьких енергій, де її вклад в розділення вважають дуже малим. Зроблено висновок про те, що непропорційність світловиходу відносно енергії не є фундаментальною властивістю сцинтилятора, а впливає (як і розділення) із умов світлосбору для квантів з різною глибиною проникнення та довжиною спалаху.

Исследована зависимость удельного световыхода  $L/E$  от энергии  $E$  в области 5,9...60 кэВ в процессе старения кристаллов CsI(Na) и для CsI(Tl) с различным содержанием активатора и для разных условий светособирания. В противоположность литературным данным об увеличении  $L/E$  в области ~15кэВ (так называемая непропорциональность световыхода до +24%) показано, что величина непропорциональности и ее знак в решающей степени определяются условиями светособирания (типом отражателя) и в меньшей степени сцинтиляционным материалом (концентрацией центров свечения). Между непропорциональностью и энергетическим разрешением наблюдается четкая корреляция даже в области низких энергий, где ее вклад в разрешение полагают пренебрежимо малым. Сделан вывод о том, что непропорциональность световыхода по отношению к энергии не является фундаментальным свойством сцинтиллятора, а происходит (как и разрешение) из особенностей светособирания для квантов с разной глубиной проникновения и протяженностью вспышки.

The dependence on the response ( $L/E$ ) from energy ( $E$ ) in the range of 5.9...60 keV has been investigated for CsI(Na) during the aging and for CsI(Tl) crystals with different activator concentrations and light collection conditions. On the contrast to data on increasing of  $L/E$  in the range of ~15keV (so called the response non-proportionality up to +24%), we have shown that value and sign of non-proportionality are determined by light collection conditions, mainly and scintillation material (luminescence centers concentration) in the minor. The distinct correlation is observed between non-proportionality and energy resolution in the low energy range even where is supposed the non-proportionality contribution is insignificant. The main conclusion is the response non-proportionality is not fundamental property of the scintillator. It (and energy resolution) rise from light collection conditions for the quantum with different penetration depth and scintillation long.

### ВВЕДЕНИЕ

Сцинтиляционные материалы CsI(Tl) и CsI(Na) широко используются на практике. Однако по ряду причин применение этих материалов ограничено областью энергий ( $E$ )  $\gamma$ -квантов  $E > 60$  кэВ. Кристалл CsI(Na) гигроскопичен и характеризуется нестабильностью светового выхода ( $L$ ), энергетического разрешения ( $R$ ) и эффективности регистрации ( $\epsilon$ ) во времени при регистрации слабопроникающих излучений [1]. Кристалл CsI(Tl) имеет максимум излучения на  $\lambda = 550$  нм и преимущественно используется с фотоприемниками со спектральной чувствительностью в длинноволновой области спектра (400...800 нм). Он хорошо подходит для детектирования  $\alpha$ -частиц, но из-за высокого уровня шумов таких фотодиодов и фотоумножителей (ФЭУ) не используется для спектрометрии квантов с  $E < 60$  кэВ [2,3].

В работе [4] исследована энергетическая зависимость удельного светового выхода ( $L/E$ ) кристаллов CsI(Tl) и CsI(Na) в области низких энергий. Констатируется высокая непропорциональность удельного светового выхода (НСВ) по отношению к энергии возбуждающих квантов, особенно в области 15...20 кэВ. Как известно [5], энергетическое разрешение

спектрометра  $R$  состоит из собственного разрешения сцинтиллятора ( $R_c$ ) и разрешения ФЭУ ( $R_{ФЭУ}$ ). В свою очередь, в  $R_c$  вносят вклад разрешение, связанное с «разбросом» светособирания  $R_\tau$ , и разрешение, определяемое непропорциональностью светового выхода по отношению к энергии гамма-квантов  $R_{нсв}$ . Именно вышеуказанной непропорциональностью принято объяснять довольно большие значения (4...5%)  $R_c$  сцинтилляторов в области 400 кэВ и выше [6-8]. Расчеты [6] показывают, что вклад  $R_{нсв}$  мал при  $E < 100$  кэВ, и плохое  $R_c$  сцинтилляторов в области низких энергий обычно объясняют просто низким световыходом [9]. Теория «уширения линии спектрометра» из-за НСВ [6] была построена на основе экспериментальных данных, полученных при возбуждении сцинтилляций внешними источниками излучения, в том числе слабопроникающими. Критика такого подхода дана в работе [10]. На основе анализа результатов для детекторов с радионуклидами, введенными в решетку кристалла, авторы приходят к выводу об ошибочности представлений о НСВ как о фундаментальном свойстве материала. По мнению авторов [10], часто наблюдаемая в экспериментах НСВ скорее всего связана с влиянием поверхности и особенностями светособирания вблизи

поверхности.

В работе [4] при анализе результатов, полученных для кристалла CsI(Na), проблема несцинтиллирующего “мертвого слоя” (МС) не рассматривалась. Однако именно из-за МС авторам не удалось опуститься в область ниже 20 кэВ. В работе [11] изучалась кинетика формирования МС в кристалле CsI(Na) в процессе его старения, а в работах [1,12] исследовалась глубина МС с использованием  $\alpha$ -частиц и протонов разной энергии. Во всех цитируемых работах для анализа результатов данные об изменении R не привлекались.

Целью настоящей работы было исследование вклада непропорциональности световыхода в энергетическое разрешение в области низких (до 60 кэВ) энергий в кристаллах CsI(Na) и CsI(Tl), а также определение факторов, влияющих на эти параметры. Для решения этой задачи мы проследили за кинетикой деградации сцинтилляционных свойств в процессе старения кристаллов CsI(Na) при возбуждении сцинтилляций излучениями с разной глубиной проникновения. Для негигроскопичных кристаллов CsI(Tl) мы целенаправленно изменяли условия светособирания или концентрацию активатора с целью воздействовать на непропорциональность световыхода и энергетическое разрешение.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе изучались кристаллы CsI(Na) и CsI(Tl), которые имели исходные размеры  $\varnothing 250 \times 350$  мм и были выращены автоматизированным методом вытягивания на затравку с подпиткой расплавленным сырьем [13]. Все образцы были вырезаны из одной и той же части монокристалла с известной кристаллографической ориентацией и однородным ( $\pm 5\%$ ) распределением активатора. Из выбранной части слитка на нитяной пиле вырезались заготовки, из которых на токарном станке изготавливались детекторы размером  $\varnothing 30 \times 5$  мм. Поверхность кристаллов CsI была сильно рекристаллизована после механической обработки, что свидетельствует о ее значительной деформации. При хранении во влажной атмосфере со временем такой поликристаллический приповерхностный слой частично разрушается, во избежание чего он удаляется полировкой. Состояние поверхности и качество полировки контролировали визуально под оптическом микроскопом в обычном и поляризованном свете. Монокристалличность и кристаллографическую ориентацию поверхности дополнительно проверяли рентгеноструктурным анализом. Мы сознательно выбрали заготовку с содержанием натрия  $C_{Na} = 8,2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что немного меньше его оптимального содержания в CsI ( $9,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) и заведомо меньше известной предельной растворимости NaI в CsI [14].

НСВ изучалась в области 5,9...60 кэВ, т.е. там, где по литературным данным наблюдается ее максимальное изменение. Использовались изотопы с энергией квантов 5,9 кэВ ( $^{55}\text{Fe}$ ); 17 кэВ и 59,5 кэВ ( $^{241}\text{Am}$ ); 22,6 кэВ ( $^{109}\text{Cd}$ ); а также источник  $\alpha$ -частиц

$^{239}\text{Pu}$  (5,15 МэВ). Характеристики  $L$  и  $R$  измерялись стандартным образом. Данные по световому выходу, за исключением специально оговоренных случаев, приведены в виде удельного световыхода  $\eta = L/E$  в относительных единицах. Степень НСВ ( $\xi$ ) мы характеризовали как отношение разности максимального и минимального значений  $\eta$  к значению  $\eta$  для 60 кэВ ( $\eta_{60}$ ):  $\xi = (\eta_{5,9} - \eta_{60}) / \eta_{60}$ . В подавляющем большинстве случаев  $\xi$  определяется именно таким образом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Сцинтиллятор CsI(Na).** Зависимости  $\eta$  ( $E$ ) и их изменение со временем приведены на рис. 1, а, г. Кривые на рис. 1, а, в соответствуют кристаллу без отражателя, на рис. 1, б, г - тому же кристаллу, но с отражателем. На рис. 1, а, б по нижней оси абсцисс отложена энергия падающих  $\gamma$ -квантов, по верхней - для наглядности показана глубина  $d$  90% ослабления потока излучения. Видно, что кривые  $\eta(E)$  для разных условий светособирания значительно отличаются. Так, для неупакованного кристалла НСВ имеет знак “-” в области 5,9...17 кэВ и знак “+” в области 22...60 кэВ (+(-) означает увеличение (уменьшение)  $\eta$  с ростом  $E$ ). В то же время для кристалла с отражателем имеем знак “-” в области 22...60 кэВ. В обоих случаях в начальный период времени из зависимостей  $\eta(E)$  «выпадает» точка 5,9 кэВ, удельный световыход для которой заметно выше, чем для остальных энергий. В процессе старения  $\eta_{5,9}$  через некоторое время сравнивается по величине с  $\eta_{60}$ , и в этот момент численное значение степени непропорциональности световыхода  $\xi$  достигает минимума. Отметим, что  $\xi$  минимальна в разные дни: на 21-й день для неупакованного кристалла, и на 5-й день - для обернутого отражателем. Через 35 дней образец утрачивает способность регистрировать излучение с энергией 5,9 кэВ. В первую очередь, это проявляется в катастрофическом ухудшении разрешения и параметра пик/долина. Форма пика полного поглощения сильно искажается, и корректно определить значения световыхода и разрешения невозможно. Кроме того, удлиняется время набора амплитудного спектра, что означает ухудшение пиковой эффективности регистрации  $\epsilon$ . Ранее было показано, что  $\epsilon$  снижается пропорционально  $t^{1/3}$  [15]. Это свойство кристаллов CsI(Na), образно говоря, и называется «эффектом образования МС» [11].

Эффект МС отчетливее всего проявляется при регистрации  $\alpha$ -излучения [7,9]. Для сравнения на рис. 1, в, г приведена зависимость выхода  $\alpha$ -сцинтилляций от времени в процессе старения (для сохранения масштаба кривая 1 приведена на обоих рис. в, г) для кристалла с торцевым отражателем, в качестве которого использовался тефлоновый коллиматор частиц толщиной 0,5 мм [16]. Видно, что хранение кристалла в течение 24 дней при влажности около 70% приводит к падению световыхода на 70%, а разрешение становится больше 100% (первоначальное его значение составляло 15%).

Изменение  $\eta(t)$  для квантов с энергиями 5,9 и 60 кэВ не коррелирует с монотонным ухудшением выхода  $\alpha$ -сцинтилляций. Величина  $\eta_{60}$  остается постоянной в течение 37 дней (см. рис. 1, в, г, кривые 2). Ранее было показано, что для CsI(Na) она остается почти постоянной даже через один год [17]. Кривые 3 (см. рис. 1, в, г), которые представляют зависимость  $\eta_{5,9}(t)$ , показывают немонотонный характер изменения световыходов. Общим свойством двух кривых есть факт, что в определенный момент времени они пересекают зависимость  $\eta_{60}(t)$ . Для одного и того же кристалла с разными условиями светособирания этот момент наступает в разные дни и естественно соответствует минимальному значению степени непропорциональности  $\xi$ . Следуя формальной логике работ [6,9], можно предположить, что разрешение

для квантов с  $E = 60$  кэВ, которые в наибольшей степени характеризуют объем сцинтиллятора, будет минимальным тогда, когда минимальна  $\xi$ . Несмотря на некоторую смелость такого предположения ( $\eta_{60} = \text{const}$ , т.е. возможно, что и  $R_{60} = \text{const}$ ; если же часть квантов регистрируется в той же области, что и  $\alpha$ -частицы, то  $R_{60}$  должно неуклонно ухудшаться), оно полностью подтверждается экспериментально. Как для неупакованного кристалла, так и для кристалла с отражателем (см. рис. 1, в, г, кривые 4) зависимость  $R(t)$  проходит через минимум, и лучшие (т.е. минимальные) значения  $R$  соответствуют во времени минимальной степени непропорциональности световыходов  $\xi$ . Тенденция к неуклонному возрастанию  $R_{60}$  становится преобладающей после прохождения минимума.

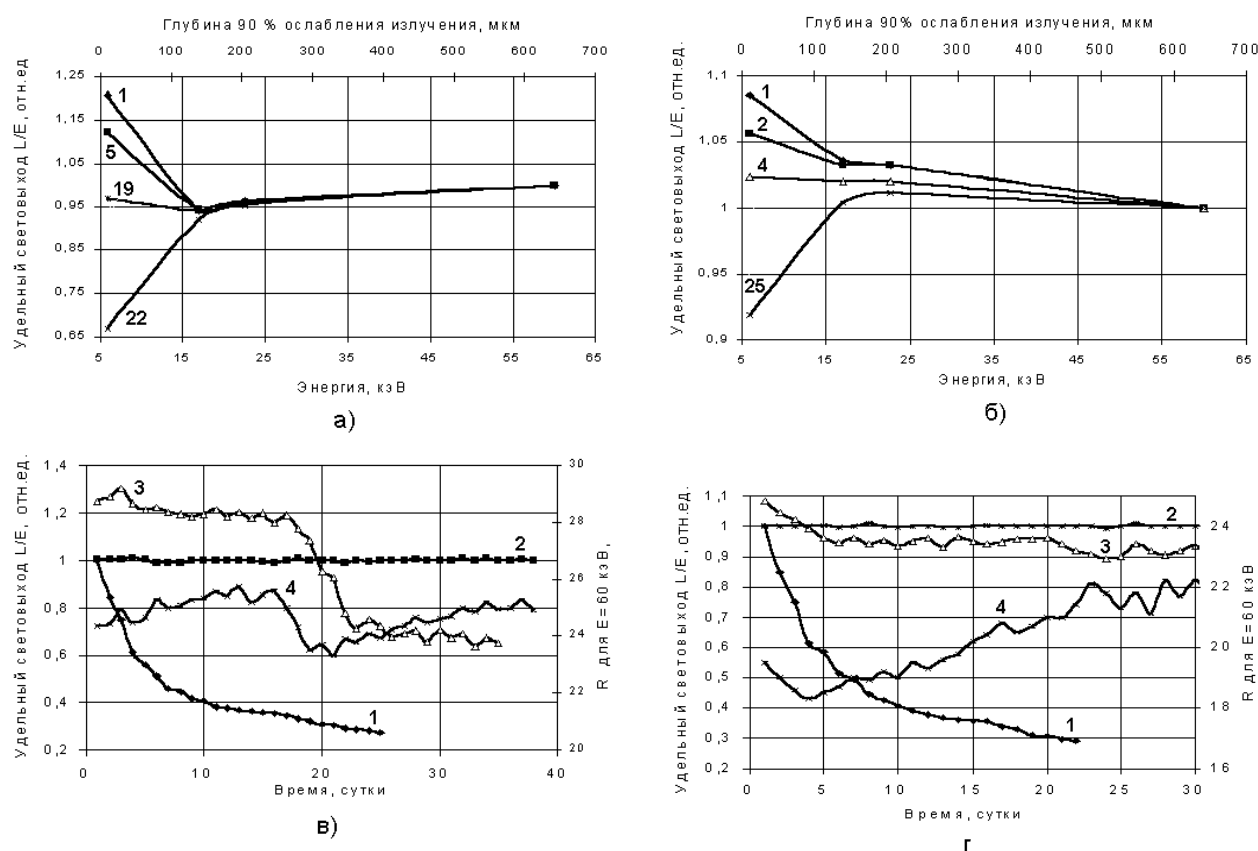


Рис. 1. Изменение сцинтилляционных свойств кристалла CsI(Na) со временем.

а – изменение удельного световыхода в зависимости от энергии для неупакованного кристалла;

б – то же для кристалла с отражателем типа «майлар»;

в – изменение выхода  $\alpha$ -сцинтилляций (кривая 1),  $\eta_{60}$  (2),  $\eta_{5,9}$  (3) и разрешения  $R_{60}$  (4) в зависимости от времени старения кристалла без отражателя;

г – то же для кристалла с отражателем «майлар».

Цифры возле кривых на рис. а, б соответствуют времени хранения кристалла в сутках

Таким образом, получен нетривиальный результат: при непрерывной деградации выхода  $\alpha$ -сцинтилляций и  $R_{\alpha}$ , что свидетельствует о формировании существенной неоднородности сцинтилляционных свойств кристалла, разрешение  $R_{60}$ , которое по теоретическим представлениям не зависит от  $\xi$  (вклад  $R_{нсв}$  мал), должно было бы неуклонно ухудшаться. На самом деле изменение  $R_{60}$  немонотонно и коррелирует изменению  $\xi$ .

Таким образом, получен нетривиальный результат: при непрерывной деградации выхода  $\alpha$ -сцинтилляций и  $R_{\alpha}$ , что свидетельствует о формировании существенной неоднородности сцинтилляционных свойств кристалла, разрешение  $R_{60}$ , которое по теоретическим представлениям не зависит от  $\xi$  (вклад  $R_{нсв}$  мал), должно было бы неуклонно ухудшаться. На самом деле изменение  $R_{60}$  немонотонно и коррелирует изменению  $\xi$ .

## Сцинтиллятор CsI(Tl)

Хорошо известно, что в кристаллах CsI(Tl) мертвый слой не образуется. Выход  $\alpha$ -сцинтилляций пропорционален энергии в диапазоне 0,3...5,5 МэВ [1]. Наши эксперименты подтвердили, что сцинтилляционные свойства поверхностных слоев удивительно стабильны во времени по значениям  $L$  и  $R$ . Это свойство делает материал CsI(Tl) очень удобным для исследований факторов, определяющих НСВ.

Имеет смысл рассмотреть влияние двух факторов на НСВ: во-первых, концентрации таллия; во-вторых, условий светособирания.

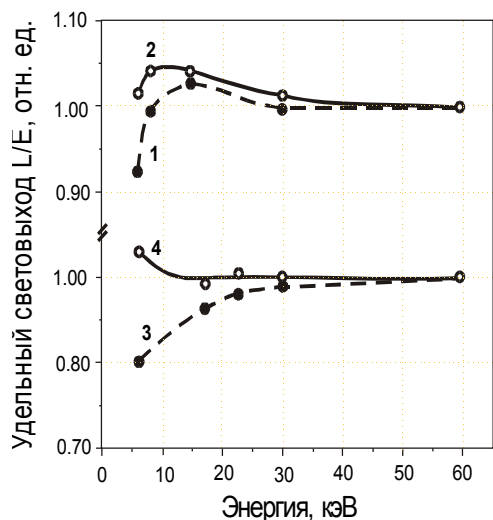


Рис.2. Влияние содержания таллия на зависимость удельного световыхода от энергии.

1,2 - кривые для кристаллов NaI(Tl) в стандартной упаковке, отражатель типа «майлар» [17] с концентрацией Tl:

$$C = 2,1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3} (1) \text{ и } C = 1,1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3} (2);$$

3,4 - кривые для кристаллов CsI(Tl), отражатель типа «тетратек»

$$C = 6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3} (3), C = 2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3} (4)$$

На рис.2 представлены зависимости  $\eta(E)$  для двух детекторов CsI(Tl). Кристалл с содержанием таллия  $C_{\text{Tl}} = 6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  размерами  $\varnothing 25 \times 4$  мм, выход  $\alpha$ -сцинтилляций которого был одинаков при возбуждении с любого торца, был плотно обернут отражателем типа «тетратек» и сочленен с ФЭУ при помощи оптического контакта. Отражатель фиксировался тефлоновым кольцом на боковой поверхности кристалла. Аналогичным образом был выбран и приготовлен кристалл с  $C_{\text{Tl}} = 2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Кристаллы с выбранными  $C$  мало отличаются по значениям световыхода для энергии 60 кэВ, в то же время их световойход по 5,9 кэВ отличается заметно. Из анализа кривых 3 и 4 (см. рис.2) видно, что НСВ с ростом  $C$  изменяет знак, и степень непропорциональности  $\xi$  уменьшается по величине от +7,5 до -3 %. Ранее такой же результат был получен одним из авторов настоящей работы [18] для рентгеновских детекторов NaI(Tl) в стандартной упаковке. Для сравнения мы приводим (см. рис.2) также результаты [18] (кривые

114

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ. 2001. №4.

Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (80), с. 111-116.

1,2). Итак, для одних и тех же условий светособирания параметром НСВ можно управлять путем увеличения концентрации активатора в известных пределах, которые определяются, главным образом, зависимостью световыхода для энергии 5,9 кэВ от концентрации таллия [19]. При одинаковом световыходе  $L_{60}$  разрешение  $R$  лучше при меньшей степени непропорциональности  $\xi$  (большем содержании активатора).

Рассмотрим далее влияние условий светособирания на НСВ в области 5,9...60 кэВ. В табл. 1 приведены данные для CsI(Tl) с  $C = 6,3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Измерения проведены для кристалла без отражателя, затем образец окружался тефлоновым кольцом и накрывался сверху торцевым отражателем из материалов типа «майлар», «тайвек» и «тетратек». Сравнение колонок 1-4 для одного и того же кристалла обнаруживает необычный факт: тип отражателя не только влияет на относительную величину  $L_{60}$ , что естественно, но также на  $\xi$ , что в рамках сложившихся представлений понять трудно, и, наконец, даже на знак  $\xi$ , что полностью обескураживает. Оказывается, что знак и абсолютная величина  $\xi$  определяются типом отражателя, т.е. коэффициентом светособирания  $\tau$ , который, в свою очередь, по-видимому, зависит от энергии (глубины проникновения):  $\tau(d)$ . Здесь уместно еще раз напомнить, что НСВ в работе [6] постулирована как фундаментальное свойство кристалла. Более того, «стандартная» кривая  $\eta(E)$  с максимальным отклонением от единицы +24% при  $E = 15$  кэВ закладывается в расчеты для определения как предельно возможного [6], так и для оценки предполагаемого разрешения конкретного типоразмера детектора [2].

Таблица 1

Изменение сцинтилляционных свойств кристалла CsI(Tl) в зависимости от материала отражателя

Материал отражателя	$\eta_{60}$ , отн.ед.	$\xi$ , %	$\xi$ , %
		5,9...60 кэВ	17...60 кэВ
Без	10,2	- 11	+ 8
Майлар	14,8	0	+ 6
Тайвек	14,9	+ 7	+ 6
Тетратек	19,7	+ 9	+ 5

Результаты предыдущей части нашей работы указывают на то, что минимальные значения  $R$  и  $\xi$  коррелируют друг с другом. Этот факт послужил основанием для следующего шага. Мы предположили, что выбором соответствующего отражателя можно реализовать минимальные значения  $R$  даже при некотором снижении  $L$ , если критерием выбора отражателя иметь в виду лучшие значения  $\xi$ . Реализовать такой подход оказалось проще всего для специфических условий светособирания, а именно, когда диаметр кристалла (70 мм) больше диаметра ФЭУ (51 мм). По условиям реализации этот случай

похож на важный с практической точки зрения случай детектора для гамма-камеры. Образец CsI(Tl), толщиной 5 мм, отполированный со всех сторон, сочленялся с ФЭУ оптическим контактом. Боковой отражатель не использовался, условия светособирания изменялись подбором торцевого отражателя и использованием компенсатора (затемнением периферийной области). Результаты приведены в табл.2.

Из результатов табл.2 следует, что:

- 1) конкретная величина степени непропорциональности  $\xi$  определяется типом отражателя;
- 2) лучшее разрешение достигается при минимальной  $\xi$ ;
- 3) минимальным значениям  $R_{60}$  не обязательно соответствуют максимальные значения световыхода для этой же энергии.

Таблица 2

**Влияние условий светособирания на сцинтилляционные свойства кристалла CsI(Tl)**

Отражатель	$\xi$ , %	$\eta_{60}$ , отн.ед.	$R_{60}$ , %
Тетрагэк	+29	6,5	26
Тетрагек+ компенсатор	+23	5,2	23
Тайвек	+26	5,85	25
Тайвек+ компенсатор	+21	5,2	20

**ОБСУЖДЕНИЕ**

Итак, нам удалось показать, что в области низких энергий минимальные значения разрешения не обязательно соответствуют максимальному световыходу. Сделано это в двух вариантах. В первом случае мы изучали кинетику деградации сцинтилляционных свойств CsI(Na) вблизи поверхности и попросту дождалась и зафиксировали тот момент, когда  $\xi$  и  $R_{60}$  приняли свои минимальные значения. Во втором случае мы целенаправленно изменяли условия светособирания или концентрацию активатора с целью достижения минимальных  $\xi$  и  $R_{60}$ .

Влияние концентрации активатора вполне понятно и вытекает из вида зависимостей  $\eta(C)$ : увеличение  $C$  приводит к росту  $\eta_{5,9}$  и не влияет на  $\eta_{60}$  в пределах рассматриваемых концентраций [19]. Сложнее обстоит дело с влиянием условий светособирания. Разрешение спектрометра с плоским детектором в виде диска в общем случае определяется как сумма вкладов [5]:

$$R^2 = R_{нсв}^2 + R_{\tau}^2 + A/L + R_{фэу}^2 \quad (1)$$

где  $R_{\tau}$  – вклад из-за непостоянства коэффициента светособирания  $\tau$  (учитывает коэффициенты поглощения  $k$  и отражения  $n$  кристалла, оптические свойства материала отражателя),  $A$  – спектрометрическая постоянная ФЭУ,  $R_{фэу}$  – вклад неоднородности фотокатода. Первые два члена характеризуют собственное разрешение детектора  $R_c$ . В области низких энергий обычно пренебрегают всеми членами, кро-

ме  $A/L$ , который часто называют статистическим (из-за статистических флуктуаций сигнала). Для сцинтилляторов относительно небольших размеров, например  $\varnothing 25 \times 4$  мм, такой подход оправдан по следующим соображениям [5]: вклад  $R_{нсв}^2$  в области низких энергий мал; вклад  $R_{\tau}^2$  для плоских детекторов иногда интерпретируют как вклад неоднородности по площади выходного окна и также полагают малым, поскольку реальные значения  $k$  существенны только для объемных детекторов; вклад  $R_{фэу}^2$  также невелик для современных ФЭУ и может быть дополнительно скомпенсирован. Это приближение вполне оправдало себя для однотипных детекторов небольшого диаметра, изготовленных из однородных по свойствам кристаллов, и при использовании фотоумножителя с малой по площади неоднородностью фотокатода.

Приближенная формула  $R^2 = A/L$  означает: чем выше световыход, тем лучше разрешение, и полностью противоречит нашим результатам. При изменении конструкции детектора, например, замене типа отражателя, ее применение не оправдано. Введение компенсатора приводит к частичной потере световыхода и, тем не менее, к снижению  $R$ . На наш взгляд, правильнее следует написать

$$R^2 = R_{\tau}^2 + A/L, \quad (2)$$

тогда термин “компенсация” означает уменьшение вклада  $R_{\tau}$ , следовательно, улучшить  $R$  возможно даже снижением  $L$ . Мы сознательно опустили в правой части член  $R_{нсв}$ , хотя по ходу изложения неоднократно подчеркивали, что изменение  $R$  коррелирует с изменением НСВ. Мы опускаем  $R_{нсв}$  по той причине, что не считаем, как и авторы работы [10], НСВ фундаментальным свойством кристалла. Конечно же мы полагаем, что это реально наблюдаемое физическое явление, связано с особенностями светособирания при возбуждении кристалла вблизи поверхности. Взаимосвязь между  $R$  и  $\xi$  указывает на то, что обе характеристики проистекают из одного источника – коэффициента светособирания  $\tau$ , который, в свою очередь, зависит от координаты вспышки:  $\tau(x,y,z)$ . Для объяснения НСВ в области 5,9...60 кэВ, по-видимому, необходимы тщательные расчеты  $\tau$  с учетом того факта, что источник света не обязательно точечный.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Непропорциональность световыхода по отношению к энергии электронов не является фундаментальным свойством сцинтилляторов, во всяком случае, для таких материалов как NaI(Tl), CsI(Tl) и CsI(Na), так как в значительной степени определяется условиями светособирания и концентрацией центров свечения. Между степенью непропорциональности и разрешением детектора наблюдается четкая корреляция – разрешение минимально при минимальной непропорциональности даже в области низких энергий. Обе характеристики проистекают из

одной причины – разных условий светособирания для квантов с разной глубиной проникновения. Тем не менее, связь между непропорциональностью и разрешением существует. По-видимому, эти две характеристики сцинтиллятора связаны между собой через коэффициент светособирания  $\tau$ , который зависит от свойств отражателя, координаты вспышки и, видимо, от протяженности вспышки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.А.Ананенко, Ю.Т.Выдай, В.Ю.Гресь и др. Влияние состояния поверхности сцинтилляторов на регистрацию слабопроникающих излучений // *Труды XIV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению*. 2000, с.327.
2. М.Е. Глобус, Б.В. Гринев // *Неорганические сцинтилляторы. Новые и традиционные материалы*. Харьков: «Акта». 2001, 402с.
3. Л.В. Атрошенко, С.Ф.Бурачас, Л.П.Гальчинец-кий и др. // *Кристаллы сцинтилляторов и детекторы ионизирующих излучений на их основе*. Киев: «Наукова думка». 1998, 310с.
4. D.W. Aitken, V.L. Beron, G. Yenicay et al. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1967, v.NS-14, p.468.
5. Ю.А.Цирлин, Е.П.Сысоева, М.Е.Глобус // *Оптимизация детектирования гамма-излучения сцинтилляционными кристаллами*, М.: «Энергоатомиздат». 1991, 153 с.
6. C.D. Zerby, A.Meyer and R.V. Murray. // *Nucl.Inst.Meth.* 1961, v. 12, p.115.
7. P. Iredale. // *Nucl. Instr.* 1961, v. 11, p.336.
8. P. Dorenbos, J.T.M. de Haas, C.W.E. van Eijk // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1995, v. 42, p.2190.
9. Ю.А.Цирлин *Физика и химия органических и неорганических материалов*. Харьков: ВНИИМ, 1986, № 16, с. 8.
10. Н. Leutz, С. D'Ambrosio // *IEEE Trans.Nucl.Sci.* 1997, v.44, №2, p.190.
11. В.В.Аверкиев, В.К.Ляпидевский и др. // *ПТЭ*. 1982, № 3, с.152.
12. Ю.Т.Выдай, Ю.И. Усиков, Г.И. Применко // *ПТЭ*. 1983, № 2, с. 86.
13. B.G.Zaslavsky, S.I.Vasetsky, A.M.Kudin et al. // *Journal of Crystal Growth*. 1999, v.198/199, p.856.
14. A.N. Panova, E.L.Vinograd, N.N.Kosinov et al. // *Functional Materials*. 1998, v.5, p.480.
15. Г.Х.Розеберг, Ю.Т.Выдай, Г.В.Птицын и др. // *Изв. АН СССР, серия физическая*. 1977, т.41, с.2365.
16. V.R. Lyubynskiy, N.N. Smirnov, E.P.Sysoeva et al. // *Proc. Inter. Conf. SCINT-99*, Moscow. 2000, p.735.
17. И.Д.Власова, С.Н.Козлов, В.И.Лукашенко и др. // *Оптические и сцинтилляционные материалы*. Харьков: ВНИИМ, 1982, № 9, с.28.
18. Л.Б.Загарий, Ю.Т.Выдай // *Оптические и сцинтилляционные материалы*. Харьков: ВНИИМ, 1982, № 9, с.154.
19. Л.Б.Загарий, Ю.Т.Выдай, Ю.А.Цирлин // *Оптические и сцинтилляционные материалы*. Харьков: ВНИИМ, 1982, № 9, с.89.