

Сцинтилляторы для прецизионных γ -спектрометров

В статье анализируются возможности применения современных сцинтилляторов, обеспечивающих относительное энергетическое разрешение по γ -линии ^{137}Cs $ER_{662\text{keV}} \leq 5\%$. Прецизионные гамма-спектрометры актуальны для применения в технологических процессах атомной промышленности, на атомных электростанциях для мониторинга активности воздуха, сбросных вод и прилегающих территорий и т. п.

Сейчас известны 36 сцинтилляционных кристаллов, удовлетворяющих вышеобозначенному требованию. Из них только 8 производятся промышленностью. Семь кристаллов являются кандидатами для освоения в промышленном производстве. Остальные мало пригодны для практического применения из-за малого световыхода LY ($\text{Cs}_2\text{NaGdCl}_6:\text{Ce}$, $\text{Tl}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$ и TlCaCl_3 , например). Кристаллы с Eu-активатором обладают высоким световыходом ($LY = 60 \div 100 \text{ ph/MeV}$) и низким значением нелинейности световыхода ($NLY = 7 \div 10\%$) в широком диапазоне энергий электронов, что крайне важно для спектрометрии «мягкого» γ -излучения ($ER_{662\text{keV}} \leq 10\%$). Из-за высокого самопоглощения света эти сцинтилляторы теряют свои преимущества в диапазоне энергий $E_\gamma = 200 \div 3000 \text{ кэВ}$.

В статье показано, что среди сцинтилляторов, пригодных для одновременной регистрации гамма- и нейтронного излучений, более предпочтительны кристаллы, содержащие ^6Li .

Ключевые слова:

сцинтилляторы, фотоумножитель, относительное энергетическое разрешение, собственное разрешение, световыход, нелинейность световыхода, постоянные высвечивания, самопоглощение.

М.П.Белоусов, О.В.Игнатьев

(Уральский федеральный университет,
г. Екатеринбург)

Сцинтилляционные γ -спектрометры имеют широкое применение на предприятиях и в исследовательских организациях ГК Росатом и других ведомств. Они являются основой многих установок и систем для контроля технологических процессов и мониторинга радиационной обстановки на объектах и территориях атомной отрасли. В связи с отсутствием в РФ производства особо чистого германия (HPGe) для изготовления γ -детекторов высокого разрешения, в последнее время стало особенно актуальным улучшение энергетического разрешения (ER) сцинтилляционных спектрометров, которое в подавляющей степени определяется свойствами применяемых неорганических сцинтилляционных кристаллов.

Настоящая работа посвящена анализу применимости в γ -спектрометрах появившихся в последние годы новых сцинтилляторов.

В число анализируемых сцинтилляционных кристаллов вошли те, которые будут востребованы в будущих российских прецизионных γ -спектрометрах и удовлетворяют следующим требованиям:

- Относительное энергетическое разрешение по линии $E_\gamma = 661,7 \text{ кэВ}$ $ER_{662\text{keV}}$ источника

$^{137}\text{Cs} \leq 5\%$ (достигнутый минимум 2%), а по линии 60 keV (^{241}Am) – $\leq 10\%$ (достигнутый минимум 6,5%).

- Нелинейность световыхода (NLY) в диапазоне энергий 14÷1275 кэВ не более $\pm 10\%$ (практически достигнутый в мире минимум 2%).
- Компоненты высвечивания должны лежать в диапазоне от десятков до нескольких сотен нс – это гарантирует быстродействие спектрометра до 10^6 1/с; меньшие значения τ_d , особенно при высоком LY , неприемлемы из-за ограниченного быстродействия спектрометрических электровакуумных фотоумножителей (PMT), эффектов насыщения фотокатодов и кремниевых фотоумножителей (SiPM) из-за ограниченного числа микропикселей.
- Максимум спектра высвечивания должен быть в области 400 нм для применения с PMT и SiPM (в той области их квантовая эффективность $QE_{max} \approx 40\%$) и 550 нм для сопряжения с лавинными фотодиодами (APD), для которых $QE_{max} \geq 70\%$.
- Возможность выращивания кристаллов размерами более, чем $\varnothing 38 \times 38$ мм с плотностью материала $\rho \geq 4,5$ г/см³ (для достижения достаточной т. н. «Peak-to-Total» эффективности регистрации).
- Отсутствие гигроскопичности. Это обеспечивает возможность придания кристаллу сферической или иной формы для эффективного сбора света со сцинтиллятора полупроводниковыми фотосенсорами (у них чувствительная поверхность не превышает 100 мм²).

1. Перспективные новые кристаллы

Перечень перспективных кристаллов взят в основном из базы данных [1]. Их основные характеристики с комментариями авторов сведены в табл.1. Отметим, что в подавляющем большинстве работ, чьи результаты вошли в табл.1, измерения энергетического разреше-

ния проводились на кристаллах малых размеров. Одновременное поглощение в кристалле малого размера и электрона отдачи, и комптоновски рассеянного γ -кванта маловероятно из-за вылета последнего за пределы детектора, поэтому пики полного поглощения 662 кэВ аппаратурных спектров формировались в основном электронами от фотоэффекта. Образованные фотоэлектроны имеют одну и ту же энергию, поэтому зависимость световыхода от энергии электронов не сказывается на числе образованных в сцинтилляторе фотонов света. Величина собственного энергетического разрешения ER_{intr} оказывается меньшей, чем с теми же кристаллами, имеющими размеры достаточные для поглощения комптоновски рассеянных γ -квантов. В силу этого приведенные результаты можно считать предельно достижимыми с данным типом кристалла и фотоприемника.

Основные характеристики перспективных сцинтилляторов сведены в табл.1.

2. Основные выводы

2.1 По данным табл.1 можно утверждать, что допированные Eu^{2+} сцинтилляторы, которых достаточно много, характеризуются:

- а) повышенным световыходом (вплоть до $LY \approx 100000$ ph/MeV для BaBrI, CsBa₂I₅ и SrI₂, например);
- б) малой нелинейностью световыхода в широком диапазоне энергий (2÷5%);
- в) умеренно медленными основными компонентами высвечивания ($\tau_{d,main} = 0,4\div 3,5$ мкс);
- г) относительно низкими (благодаря свойствам «а» и «б») значениями ER при $E_\gamma \leq 120$ кэВ (от $ER_{60keV} \leq 10\%$ для SrI₂:Eu до $ER_{60keV} \leq 7,2\%$ для KСr₂I₅:Eu);
- д) повышенным самопоглощением [41] – для SrI₂, например, при переходе от облучения узко коллимированным пучком к облучению широким центр тяжести пика смещается на $\approx 1\%$ [42].

Табл.1.1. Новые сцинтилляционные кристаллы, происходящие по ER традицию применяемые для γ -спектрометрии в РФ (Цветовое кодирование качества по 10-бальной шкале: голубой – 10; зеленый – 8÷9; желтый – 5÷7; серый – ≤5)

Формула	ρ , г/см ³	LY, ph/Mev	τ_d , нс	λ_{max} , нм	ER _{662keV} , % (условия измерений)	Комментарии и доп. информация	Ис-точ.
CsI:TI (для сравнения) Очень низкая гидрофобность!	4,51	≈6000	730 (47,5%); 3,1 мкс (30%); 16 мкс (22,5%)	540	5,5 (Ø9×9 мм ³ , APD; $T_{peak} = 28$ мкс)	Хорошее разрешение благодаря малым размерам и QE ≥ 80% для APD. Спектрометры с $T_{peak} = 28$ мкс не имеют практического значения. Нелинейность LY ≤ 12,5% для Eγ ≥ 20 кэВ (для NaI:TI ≤ 17%)	[2]
							850 (44,79%); 3,2 мкс (25,84%); 14 мкс (18,32%); 65 мкс (11,05%)
1. BaBrCl:Eu ²⁺ 5% Eu	4,5	30800			4,25 (0,5 см ³)	Допирование европием приводит к высокому самопоглощению (есть фото до и после), это ограничивает объем кристалла.	[4]
2. BaBrI:Eu ²⁺ Вращаются в линиюго Глоуинг СО РАН (Иркутск)	5,2	97000	70 (1,5%); 432 (70%); 9,5 мкс (28,5%)	3,01 eV (42%); 2,91 eV (58%)	9,4 (0,001 см ³) 9,1% @ 60 кэВ	Судя по фото кристалла 1,5×1,5×0,7 мм, он прозрачный [5]. ER лучше, чем с LaBr ₃ :Ce в диап. Eγ = 18÷511 кэВ (вероятно сказывается меньшая нелинейность в этой области) LY определялся по NaI:TI (взято 44000 ph/Mev) – результаты явно завыщен . NLY ≈ 7% в диап. Eγ = 18÷1332 кэВ. Интенсивный, особенно на тонких кристаллах, пик вылета К-серии Ва может быть помехой в X-области энергий.	[6]
5% Eu	5,3	71000	480	413	4,3 (Ø1×1 см = 0,79 см ³) 8,7% @ 60 кэВ	На фото кристалл прозрачный. LY определялся по NaI:TI (принято LY _{NaI} = 38000 ph/Mev) NLY ≈ 2% в диап. Eγ = 32÷1275 кэВ	[7]
3. BaCl ₂ :Eu ²⁺ , 5% Eu	3,89	52000 (0,016 см ³) 49000 (0,35 см ³)	25 (15%); 138 (21%); 642 (61%)	406	3,5 (2×2×4 мм = 0,016 см ³) 3,8 (8×4×11 мм = 0,35 см ³)	Высокое самопоглощение (видно по изменению LY и ER с увеличением размера кристалла). Интенсивный пик вылета К-серии Ва.	[8]
4. BaClBr:Eu ²⁺ , 5% Eu	4,5	52000			3,55	Высокое самопоглощение (на фото кристалл с серым оттенком). Интенсивный пик вылета К-серии Ва.	[9]
5. CeBr ₃ Intrinsic Противопоказ: 1) Berkeley Nuclearcs; 2) Epic-Crystal; 3) Hellma; 4) Scionix; 5) Shalom EO	5,2	68000	17	380	3,4 (на малых размерах) 4,0 (≥ 100 см³ Scionix) ER _{662keV} ≈ 15%	Отсутствие допирующего элемента вероятно упрощает получение кристаллов с повторяющимися характеристиками. Потенциально большая однородность кристаллов больших объемов. NLY = -17% в диап. 20÷100 кэВ (для LaBr ₃ – 13%); в диап. 50÷100 кэВ –6% (–3% для LaBr ₃) [10]. ER _{662keV} крайне слабо зависит от размеров вплоть до Ø27×27!	[11]

Формула	ρ , г/см ³	LY , рл/Мев	τ_{d1} , нс	λ_{max} , нм	ER_{662keV} , % (условия измерений)	Комментарии и доп. информация	Ис- точ.
6. $CeBr_3 \cdot Ca^{2+}$, 1,9% Ca	5,2	58000	21	360; 380	3,2 (?)	$NLY \leq 5,0\%$ в диапазоне 100÷1275 кэВ. Вероятно возможно выращивание кристаллов коммерчески значимых размеров (по аналогии с недопированным).	[12]
7. $CeCl_3$ Intrinsic	3,9	46000	25 (69%) менее 1000 ns	350	3,4	Отсутствие допирующего элемента улучшает технологию . Менее гигроскопичен, чем NaI:Tl (за несколько часов, когда NaI превращается в гель, у $CeCl_3$ только слегка повреждается поверхность).	[13]
8. Cs_2HfCl_6 Intrinsic	3,78	54000	300 (5%); 4,4 мкс (95%)	400	3,3 (0,65 см ³)	Non-hygroscopic! Это позволяет придать кристаллу форму сферы для эффективного светосбора Si-фотосенсорами. Отмечается простота выращивания методом <i>Bridgman</i> . $NLY \leq \pm 2,0\%$ (+17% для NaI:Tl) в диапазоне 5÷660 кэВ	[14]
9. $Cs_2LiLaBr_6 \cdot Ce^{3+}$ (CLLB). 10% Ce Производное 1) Berkeley Nucl. Corp. ($Cs_2LiLaBr_{4,8}Cl_{1,2} \cdot Ce$ с $ER = 3,2\%$) 2) S.-Gobain	4,2	60000	-	410	3,0 (1 см ³)	с-пик ⁶¹Li соответствует энергии 3,2 мэВ γ-излучения и хорошо определяется в γ-спектре. ¹³⁸ La дает собственный β - и γ -фон, но его интенсивность в 2,5 раза ниже, чем у кристаллов $LaBr_3 \cdot Ce$.	[15]
10. $Cs_2LiLaCl_6 \cdot Ce^{3+}$ (CLLC). 0,1% Ce	4,2	50000	55; > 270	390; 420	2,9 ($\emptyset 1 \times 2' = 8,2$ см ³) 8,3% @ 60 кэВ	Нелинейность $LY \leq 2,5\%$ в диапазоне (14÷1275) кэВ. Размеры до $\emptyset 3 \times 3'$.	[16]
11. $Cs_2NaGdBr_6 \cdot Ce^{3+}$ (CNGB). 4% Ce^{3+}	4,19	48000	≈ 500	400	3,4 (1 см ³)	α -пик ⁶¹ Li соответствует энергии 3,1 мэВ γ-излучения и легко определяется в γ -спектре. Фон от ¹³⁸ La в 2,5 раза ниже, чем у кристаллов $LaBr_3 \cdot Ce$.	[19]
12. $Cs_2NaGdCl_6 \cdot Ce^{3+}$ (CNGC). 2% Ce	3,52	27000	65 (48%); 193 (24%); 884 (8%); > 6 мкс (20%)	389; 418	3,3 (≈ 1 см ³)	Высокая эффективность регистрации α . Большое число γ-линий в области 75÷1300 кэВ от $\alpha(\gamma)$ -реакций и высокий фон от γ -квантов с энергиями более 5 мэВ. Одноуровневая регистрация нейтронов и γ -квантов проблематична. Интенсивный пик вылета от K-серии Gd (42 кэВ).	[17]
13. $Cs_2NaLaBr_6 \cdot Ce^{3+}$ (CNLB) 4% Ce	3,93	46000	110 (15%); 353 (18%); 1,572 (24%); > 6 мкс (44%)	375; 403	4,0	Достоинства и недостатки такие же как у CNGB при худшем <i>ER</i> . Низкий световыход	[18]

Формула	ρ , г/см ³	LY , рл/Мев	τ_d , нс	λ_{max} , нм	ER_{60keV} , % (условия измерений)	Комментарии и доп. информация	Ис-точ.
14. CsBa ₂ I ₅ :Eu ²⁺	5,0	97000	48 (1%) ; 383 (26%) ; 1500 (68%) ; 9,9 мкс (25%)	435	3,8	Допирование европием должно приводить к малому стоковому сдвигу и самопоглощению.	[19]
			4% Eu	384 (10%) ; 1200 (58%) ; 14 мкс (32%)	435 (45%); 460 (19%); 466 (36%)	2,55 (3×1×1 мм) 6,1% @ 60 кэВ	LY определялся сравнением с NaI:Тl (взято 44000 рл/Мев) – результат явно завышен. $NLY \approx \pm 2\%$ в диапазоне 18÷1332 кэВ.
15. K ₂ BaI ₄ :Eu ²⁺ 7% Eu	80000	80000	900	430	3,9		[17]
			5% Eu	350	434	2,3% (Ø5×2 мм ³) 7,5% @ 60 кэВ	$NLY \leq \pm 2\%$ от 10 кэВ (ниже, чем у LaBr ₃ :Ce). Температурный коэффициент LY в диапазоне -25 ÷ +50 °С $\approx 0,2\%/^{\circ}C$.
16. KBa ₂ I ₅ :Eu ²⁺ 4% Eu	4,52	95300 (2×2×1 мм)	890	448	2,9 (2×2×1 мм) 3,0 (5×5×7 мм)	Наблюдались зависимости ER_{60keV} и LY от размеров кристаллов. $NLY \leq 3,0\%$ в диапазоне 14÷1275 кэВ.	[21]
			3% Eu	720 (67%) ; 3,100 (33%)	445	2,8 (2×2×1 мм) 2,7 (5×8×13 мм) 7,6% @ 60 кэВ	Наблюдались зависимости ER_{60keV} и LY от размеров кристаллов. $NLY \leq 3,0\%$ в диапазоне 14÷1275 кэВ.
17. KCaI ₃ :Eu ²⁺ 3% Eu	3,81	72000	1060	465	3 (Ø2×5 мм) 6,1% @122 кэВ 4,4 (Ø17×17мм) 7,3% @122 кэВ	Есть зависимость ER от размеров кристалла. Авторы полагают, что это обусловлено неоднородным распределением активатора по объему кристалла. $NLY = (-4,0 \div +2\%)$ в диапазоне 14÷1000 кэВ.	[22]
			5% Eu	1076	427	3,5 (4×3×2 мм) 6,7% @ 122 кэВ 7,9% @ 60 кэВ	Нет данных по самопоглощению. $NLY \leq \pm 5,0\%$ в диапазоне 14÷1275 кэВ (для LaBr ₃ :Ce ≤ -10%; для NaI:Тl ≈ 15%).
19. KSt ₂ I ₅ :Eu ²⁺ 4% Eu	4,39	94000	990 (30%) ; 5,000 (11%)	452	2,4 (4×3×3 мм) 7,2% @ 60 кэВ	Наблюдались слабые зависимости ER и LY от размеров кристаллов. $NLY \leq 3,0\%$ в диапазоне 14÷1275 кэВ.	[24]
			1% Pr	11 мкс		3,2	Уровень собственного фона на ≈ 30% выше, чем у LaBr ₃ :Ce.
21. LaBr ₃ :Ce ³⁺	5,1	61000	30	356; 387	2,9		[26]

Формула	ρ , г/см ³	LY , рл/Мев	τ_{dt} , нс	λ_{max} , нм	ER_{662keV} , % (условия измерений)	Комментарии и доп. информация	Ис- точ.
Прозводные 1) Berkeley Nucleonics; 2) Epic-Crystal; 3) S.-Gobain; 4) Shalom EO	5,1 5% Ce	73000			2,7-3,2 (размеры 5-76 мм)	Уровень фона от ¹³⁷ La 0,01Вг/см ³ [27]. Размеры вплоть до Ø76x76 мм (S.-Gobain).	[28]
22. LaBr₃:Ce³⁺ Sr²⁺ or Ca²⁺ co-doping Прозводные S.-Gobain (co Sr ²⁺)	5,1	78000	-17 + slower		2,0 (3x3x1мм) 6,5% @ 60 кэВ	Собственный фон как у LaBr₃:Ce. $NLY \leq 2,5\%$ для $E_{\gamma} \geq 10$ кэВ. Возможны кристаллы больших размеров ($\leq \text{Ø76x76 мм}$).	[29]
23. LaBr_{2,85}Cl_{0,15}:Ce Прозводные 1) Berkeley Nucleonics; 2) Scintnix	4,9	1,4xLY_{NM}	35 + slower	380	3,0 ($\leq \text{Ø38x38 мм}$) 10% @ 60 кэВ	Собственный фон как у LaBr₃:Ce.	[30]
24. LaCl₃:Ce³⁺ 10% Ce Прозводные S.-Gobain	3,8	49000	25 + slow	330; 352	3,1	Собственный фон как у LaBr₃:Ce. Нет никаких преимуществ относительно LaBr ₃ :Ce!	[19]
25. LaSr₂I₃:Eu²⁺ 3% Eu		60000	1330 (γ); 1262 (n^γ)	493; 417 (size ep.)	3,5	Как гамма-детектор не представляет интереса из-за самопоглощения, обусловленного Eu ²⁺ .	[31]
26. LuI₃:Ce³⁺ 5% Ce	5,68	98000 = $T_{sh} = 10$ мкс, @ room	complex	540	3,3	Сильная температурная зависимость LY. Приведенные данные получены с APD в качестве фотосенсора. С РМТ результаты будут хуже. Отмечается высокая сложность выращивания.	[32]
27. NaI:Ti, Eu²⁺ Ca²⁺ 0,1% Ti⁴⁺, 0,1% Eu²⁺, 0,2% Ca²⁺	3,67	52000			4,9	Вряд ли стоит тратить усилия на выращивание такого сложного кристалла при его скромных характеристиках. Допирование Eu ²⁺ приведет, вероятно, к росту самопоглощения.	[33]
28. Rb₂LaBr₆:Ce³⁺ 0,5% Ce	3,82	23000 83000 pA/n^γ	42 (β); 140 (23%); 1600 (74%)	381; 414	4,7	Как γ-детектор не годится из-за низкого γ-световыхода при значительной доминирующей постоянной высвечивания. Пригоден в n ^γ -радиометрах, если свойства γ-поля не важны.	[34]
29. RbGd₂Br₇:Ce³⁺ 5% Ce	4,7	55000	60	420	3,8	Высокая эффективность регистрации n^γ. Большое число γ-линий в области 75-1300 кэВ от n ^γ (γ)-реакций и высокий фон от γ-квантов с энергиями более 5 мэВ. Одновременная регистрация нейтронов и γ-квантов проблематична.	[35]

Формула	ρ , г/см ³	LY , рл/Мев	τ_d , нс	λ_{max} , нм	ER_{662keV} , % (условия измерений)	Комментарии и доп. информация	Ис-точ.
30. SrI ₂ :Eu ²⁺ 2,5% Eu Прозвондигер 1) Berkeley Nucleonics; 2) Scionix	4,55	104000	1100	432	2,62 (вероятно 0,13 см ³)	$NLY \leq 5\%$ в диал. от 14 кэВ до 3 мэВ. Промышленные производители гарантируют максимальный размер Ø38×38 мм, при этом $ER_{662} = \mathbf{3,5\%}$, а не 2,62% . Имея ввиду высокий световыход и малую нелинейность, характерную для сцинтилляторов, благодаря Eu, можно сделать вывод о сильном влиянии самопоглощения (положение пика ¹³⁷ Cs зависит от условий облучения).	[36]
31. SrI ₂ :Yb ²⁺ 0,5% Yb	4,55	56000	610	414	4,35 (0,13 см ³)	Отсутствуют данные о стоковом сдвиге и нелинейности LY .	
32. Tl ₂ LaCl ₅ :Ce ³⁺ 3% Ce	5,31	76000 (8×6×4мм)	36 (89%) ; 217 (6%) ; 1500 (11%)	383	3,4 (8×6×1 мм)	$NLY \approx \mathbf{5\%}$ в диапазоне 20÷1275 кэВ. Уровень фона от ¹³⁸ La вдвое ниже , чем в LaBr ₃ .	[37]
33. Tl ₂ LiYCl ₆ :Ce ³⁺ 3% Ce	4,5	26000	57 (3%) ; 481 (46%) ; 1055 (83%)	435	4,2	Очень низкий световыход.	[38]
34. TlCaCl ₃ Intrinsic	3,77	30600 ± 3060	317 (44%) ; 727 (56%)	425	5	Низкий световыход. Низкая плотность.	[39]
35. TlSr _{1-x} F _x :Eu ²⁺ 3% Eu	5,3	70000	535 (27%) ; 3300 (73%)	463	4,2	Самопоглощение из-за европия.	[40]

Примечания.

Во всех, кроме специально отмеченных, случаях энергетическое разрешение измерялось при сьеме света с кристалла с помощью РМТ (как правило, *Namatsu R6231-100 с QEmax ≈ 40%*).

Нелинейность LY во всех случаях измерялась в функции от энергии γ -квантов (а не электронов) путем набора спектров от соответствующих радионуклидов. В подавляющем числе случаев кристаллы растаплились методом *Bridgman*.

Свойства «а» и «б» обеспечивают малое значение энергетического разрешения (реализуется на тонких кристаллах), а свойство «в» обуславливает появление зависимости количества собранных фотонов света от места взаимодействия γ -кванта с веществом сцинтиллятора. В итоге, ER быстро ухудшается с ростом объема кристалла. Применение таких сцинтилляторов в области жесткого γ -излучения, где требуются кристаллы достаточно больших объемов (как минимум $\geq \text{Ø}38 \times 38$ мм), проблематично.

Предпочтительными областями применения активированных европием сцинтилляторов являются: рентгенофлуоресцентный элементный анализ редкоземельных и трансураниевых элементов по k -линиям ($E_x = 25 \div 115$ кэВ) в технологических растворах при переработке отработанных ТВЭЛов и денситометрия этих растворов с использованием источника ²⁴¹Am. В этих задачах допустимы небольшие кристаллы и сильная коллимация излучения. Мешающим фактором может оказаться характеристическое излучение тяжелых элементов, входящих в материал сцинтиллятора (Ba, например).

2.2 Чрезвычайно привлекательна идея применять γ -спектрометр и для одновременной радиометрии тепловых

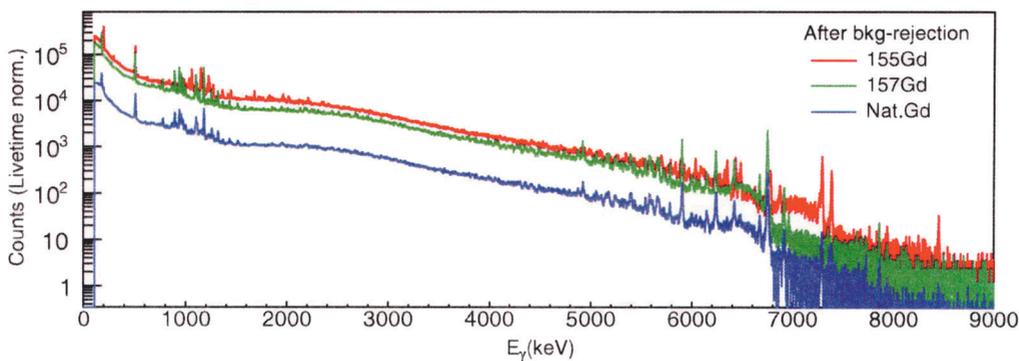


Рис.1. Гамма-спектры, инициированные тепловыми нейтронами в Gd-155, Gd-157 и в природном Gd [43].

нейтронов по инициированным нейтронами характерным пикам в аппаратурном спектре. Кристаллы, содержащие ${}^6\text{Li}$ и Gd (${}^{155}\text{Gd}$ – ${}^{158}\text{Gd}$, ${}^{160}\text{Gd}$), потенциально решают эту задачу.

Сцинтилляторы с Gd имеют уникально высокое сечение взаимодействия с тепловыми нейтронами (в несколько сотен раз большее, чем у других конверторов – ${}^{10}\text{B}$, ${}^3\text{He}$, ${}^6\text{Li}$), не требуют обогащения (по ${}^{157}\text{Gd}$, например). Продуктами реакции являются конверсионные электроны и γ -кванты. Проблема в обилии порожденных нейтронами γ -линий – только в диапазоне 110–1300 кэВ их около десяти. Кроме того, около десятка интенсивных γ -линий присутствует в диапазоне 5–9 мэВ [43]. Последние создают настолько интенсивный континуум в стандартном рабочем диапазоне энергий γ -спектрометра от 50 до 3000 кэВ, что применение его для γ -спектрометрии в присутствии нейтронов становится бессмысленным – только для радиометрии тепловых нейтронов (лучше с экранированием γ -излучения)! Более того, радиометрию нейтронов следует вести по γ -линиям в области 5–9 МэВ, где отсутствует внешний γ -фон, но для этого размеры кристалла должны быть $\geq \varnothing 76 \times 76$ мм. В литературе отсутствуют сведения о промышленном производстве Gd-содержащих сцинтилляторов.

Сцинтилляторы с ${}^6\text{Li}$ в практическом плане гораздо более предпочтительны. α -частицы с $E\alpha = 4,78$ МэВ, являющиеся продуктом реакции нейтронов с ${}^6\text{Li}$, формируют в аппаратурном γ -спектре одиночный пик с эквивалентной энергией $E\gamma \approx 3$ МэВ, без континуума слева (рис.2).

2.3 Данные таблицы подтверждают, что наличие зависимости $LY = f(E)$ существенным образом сказывается на разрешающей способности спектрометра с соответствующим сцинтилляционным детектором. Особенно наглядно это проявляется на низкоэнергетичных пиках (60 кэВ).

2.4 Крайне интересен результат «*co-doping*» традиционного NaI:Tl европием (Eu^{2+}) и кальцием (Ca^{2+}). Световыход увеличился до 52000 ph/MeV, а ER улучшилось с 6,3 до 4,9%. К сожалению, нет сведений о самопоглощении нового сцинтиллятора. Можно надеяться, что если бы исходным кристаллом был CsI:Tl, то результаты были бы еще лучше из-за большего LY_{CsI} и гораздо меньшей нелинейности этого сцинтиллятора.

2.5 Промышленно производятся кристаллы с практически значимыми размерами и др. характеристиками, перечисленные в табл.2.

Заметим, что кристаллы $\text{SrI}_2:\text{Eu}$ не нашли сколько-нибудь заметного применения в ядерно-физической аппаратуре мировых производителей. Причины этого изложены в п.2.1.

2.6 Сцинтилляционные кристаллы, производство которых актуально для РФ.

Из приведенного в табл.1 перечня из 35-и сцинтилляторов с $ER_{662\text{keV}}$ лучшим, чем у NaI:Tl и CsI:Tl, только 12 типов (их порядковые номера в табл.1 выделены красным) заслуживают усилий по созданию их производства в РФ. В число этих 12-и входят перечисленные в табл.2, за исключением $\text{SrI}_2:\text{Eu}^{2+}$.

Табл.2. Коммерчески доступные прецизионные сцинтилляционные кристаллы.

Формула	CeBr ₃	Cs ₂ LiLaBr ₆ :Ce ³⁺ (10%)	LaBr ₃ :Ce ³⁺ (5%)	LaBr ₃ :Ce ³⁺ & Sr ²⁺	LaBr _{2,85} Cl _{0,15} :Ce	LaCl ₃ :Ce ³⁺ (10%)	SrI ₂ ;Eu ²⁺
Производители	1) Berkeley Nucleonics; 2) Epic-Crystal; 3) Hellma; 4) Scionix; 5) Shalom EO	1) Berkeley Nucl. Corp. (Cs ₂ LiLaBr _{4,8} Cl _{1,2} :Ce с ER = 3,2%) 2) S.-Gobain	1) Berkeley Nucleonics; 2) Epic-Crystal; 3) Kenheng Crystal; 4) S.-Gobain; 5) Shalom EO	1) S.-Gobain	1) Berkeley Nucleonics; 2) Scionix	1) S.-Gobain	1) Berkeley Nucleonics; 2) Scionix
ER _{662keV} (при размерах)	≤ 4% (до Ø76×76 мм)	≤ 4% (до Ø51×76 мм)	2,7–3,2%, size-dependent (до Ø76×76 мм)	2,2% (≥ Ø38×38 мм)	3,8% (для Ø25,4×25,4 мм)	4,0%	3,5% (max. Ø38×38 мм)
≈ Цена в РФ (Ø1,5" ×1,5")	\$ 8000,0	-	\$ 10000,0	-	\$ 8500,0	-	-

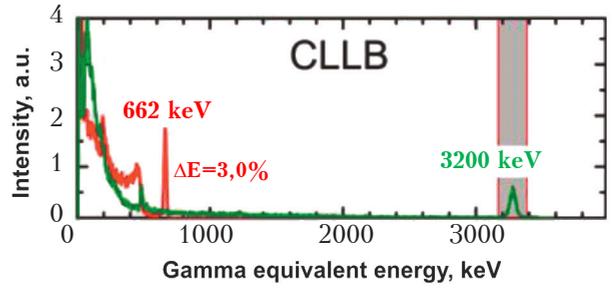


Рис.2. Гамма-спектры от ¹³⁷Cs и от тепловых нейтронов [15].

Табл.3. Перспективные, но неосвоенные в производстве сцинтилляционные кристаллы.

Формула	CeBr ₃ :Ca ²⁺ (1,9%)	CeCl ₃ :Intr	Cs ₂ HfCl ₆ :Intr	Cs ₂ LiLaCl ₆ :Ce ³⁺ (0,1%) (CLLC)	Cs ₂ NaLaBr ₆ :Ce ³⁺ (4%) (CNLB)	Tl ₂ LaCl ₅ :Ce ³⁺ (3%)
Предельное (при малых размерах) ER _{662keV} , %	3,2	3,4	3,3 (0,65 см ³)	3,4	3,9	3,4 (8×6×1 мм)
LY, ph/MeV	58000 (68000 без Ca)	46000	54000	35000	46000	76000
Нелинейность LY	≤ 5% (без Ca – 17%)	-	2%	-	-	5%
ER _{39,5}	≤ 9% (без Ca – 15%)	-	-	-	-	-

По причинам, изложенным в п.2.1, из числа перспективных для освоения в производстве кристаллов исключены допированные Eu^{2+} (таких 14 шт.), хотя среди них и могут найтись имеющие достаточный для отсутствия заметного самопоглощения стоксов сдвиг (≈ 1 эВ). Очень мало сведений о $\text{SrI}_2:\text{Yb}^{2+}$. Его можно было бы включить в число перспективных при условиях слабого самопоглощения и нелинейности световых выходов не более 7,5%.

Другой критерий отбора – величина световых выходов. Исключены кристаллы с $LY \leq 30000$ ph/MeV (4 типа). Низкий световых выход, особенно при «длинной» доминирующей постоянной высвечивания (1÷3 мкс) затрудняет применение с ними полупроводниковых фотоприемников (шум) и создание спектрометров с быстродействием более 50×10^3 1/с.

Применение «нейтронных» сцинтилляторов с гадолинием ($\text{Cs}_2\text{NaGdBr}_6:\text{Ce}$, $\text{Cs}_2\text{NaGdCl}_6:\text{Ce}$ и $\text{RbGd}_2\text{Br}_7:\text{Ce}$) достаточно проблематично. Причины этого указаны в п.2.2. Ни один из мировых производителей ядерно-физической

аппаратуры не анонсирует приборы с этими сцинтилляторами.

Таким образом, к числу перспективных для применения в γ -спектрометрах нового поколения сцинтилляторов следует отнести перечисленные в табл.3.

Помимо кристаллов, вошедших в табл.3, чрезвычайно интересны кристаллы CsI:Tl и NaI:Tl с уникальными свойствами [44], выращенные по методу Бриджмэна (а не по Чохральскому). Особенности технологии выращивания этих кристаллов, помимо иного метода, были: очень высокая чистота исходных материалов (99,999%) и малая массовая доля допирующего таллия (0,005%). Полученные авторами характеристики кристаллов размерами $\varnothing 25 \times 25$ мм отражены в табл.4, а спектры ^{137}Cs , полученные с кристаллами CsI:Tl разной формы, приведены на рис.4.

Улучшение $ER_{662\text{keV}}$ для обоих сцинтилляторов нельзя объяснить только увеличением световых выходов, поскольку преобладающей составляющей полного разрешения при $E_\gamma = 662$ кэВ является, как известно, собственное разрешение

Табл.4. Свойства выращенных по нетрадиционной технологии кристаллов [44].

Кристалл	Основные характеристики				
	$ER_{662\text{keV}}$, %	$ER_{60\text{keV}}$, %	LY , ph/MeV	NLY , %	τ_d , нс
CsI:Tl	4,9	≥ 10	87000	≤ 9	500 (55%); 3000 (45%)
NaI:Tl	5,4	-	≥ 50000	17,5	234 (93%); 2600 (7%)

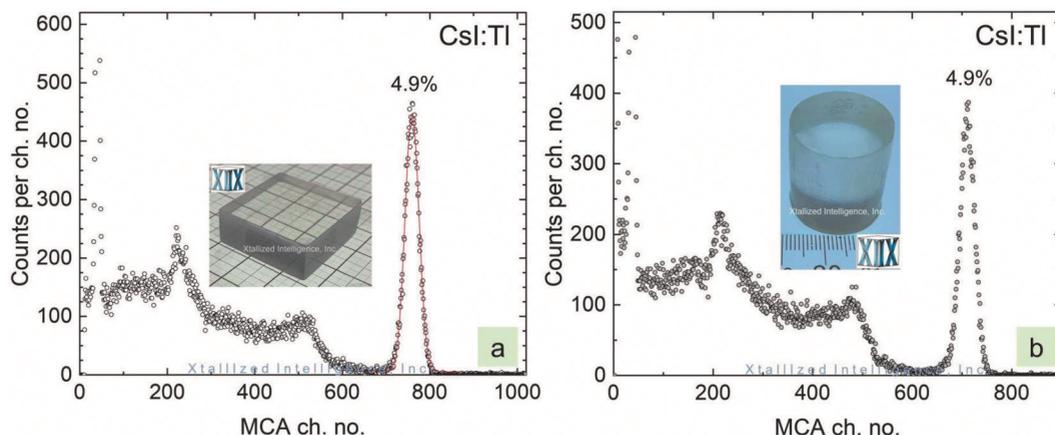


Рис.3. Спектры ^{137}Cs , полученные с кристаллами $30 \times 30 \times 10$ мм (а) и $\varnothing 1'' \times 1''$ (б).

ER_{intr} [2], обусловленное нелинейностью световых выходов, пространственной неоднородностью кристалла и другими, мало изученными факторами. Судя по всему, применение трехзонной печи по методу Бриджмана уменьшило нелинейность и улучшило однородность сцинтилляторов.

Отметим, что $ER_{662keV} = 4,9\%$ получено для CsI:Tl с PMT Hamamatsu R6231 и с 4-мя SiPM SensL размерами 6×6 мм. В ближайшее время можно ожидать появления коммерческих кристаллов CsI:Tl и NaI:Tl, созданных по этой технологии.

Литература

1. S.E. Derenzo, Scintillation Properties Database. 2019. URL: <http://scintillator.lbl.gov> (дата обращения: 10.09.2021).
2. M. Grodzicka, M. Moszynski, T. Szczesniak, W. Czarnacki, M. Szawlowski, L. Swiderski, L. Kazmierczak, K. Grodzicki, «Characterization of CsI:Tl at a wide temperature range ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$)», *Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research*, A 707, pp. 73-79, 2013.
3. M. Belousov, M. Gorbunov, O. Ignatyev, A. Krymov, A. Kupchinsky, S. Morozov, A. Pulin, «Perspectives of CsI:Tl Crystals in γ -Spectrometers for Nuclear Plants», *ANRY*, no. 2 (105), pp. 24-40, 2021.
4. Z. Yan, T. Shalapska, E.D. Bourret. «Czochralski growth of the mixed halides BaBrCl and BaBrCl:Eu», *Journal of Crystal Growth*, no. 435, pp. 42-45, 2016.
5. A.I. Rusakov, A.A. Shalaev, R.Yu. Shendrik, A.S. Myasnikova, A.K. Subanakov, «Growth and spectroscopy of BaBrI crystals activated by Eu²⁺ ions», *AIP Conference Proceedings 2069*, 020002, 8 p., 2019.
6. G. Bizarri, E.D. Bourret-Courchesne, Z. Yan, S.E. Derenzo. «Scintillation and Optical Properties of BaBrI:Eu²⁺ and CsBa₂I₅:Eu²⁺», *IEEE Trans. on Nucl. Science*, vol. 58, no. 6, pp. 3403-3410, 2011.
7. U. Shirwadkar, R. Hawrami, J. Glodo, E.V.D. van Loef, K.S. Shah. «Promising Alkaline Earth Halide Scintillators for Gamma-Ray Spectroscopy», *IEEE Tran. on Nucl. Science*, vol. 60, no. 2, pp. 1011-1015, 2013.
8. Z. Yan, G. Gundiah, G.A. Bizarri, E.C. Samulon, S.E. Derenzo, E.D. Bourret-Courchesne, «Eu₂+activated BaCl₂, BaBr₂ and BaI₂ scintillators revisited», *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research*, A 735, pp. 83-87, 2014.
9. E.D. Bourret-Courchesne, G.A. Bizarri, R. Borade, G.Gundiah, E.C. Samulon, Z. Yan, S.E. Derenzo, «Crystal growth and characterization of alkali-earth halide scintillators», *Journal of Crystal Growth*, no. 352, pp. 78-83, 2012.
10. F.G.A. Quaratia, P. Dorenbos, J. van der Biezen et al., «Scintillation and detection characteristics of high-sensitivity CeBr₃ gamma-ray spectrometers», *Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research* A 729, pp. 596-604, 2013.
11. K.S. Shah, J. Glodo, W. Higgins et al., «CeBr₃ scintillators for gamma-ray spectroscopy», *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol. 52, no. 6, pp. 3157-3159, 2006.
12. P. Guss, M.E. Foster, B.M. Wong et al., «Results for aliovalent doping of CeBr₃ with Ca²⁺». *J. Appl. Phys.*, 115, 034908, pp. 1-10, 2014.

Заклучение

Российская атомная отрасль остро нуждается в прецизионных сцинтилляционных γ -спектрометрах. Кристаллы промышленного производства с относительным энергетическим разрешением $ER_{662keV} \leq 5,0\%$ весьма востребованы. С учетом отсутствия опыта промышленного выращивания сцинтилляторов многокомпонентного основного состава представляется перспективным освоение технологии производства двухкомпонентных недопированных (*intrinsic*) кристаллов CeBr₃ и CeCl₃, Cs₂HfCl₆, а также CsI:Tl (табл.4) по методу Бриджмана.

13. E.V.D. van Loef, P. Dorenbos, C.W.E. van Eijk, «Scintillation properties of $\text{LaCl}_3:\text{Ce}^{3+}$ crystals: fast, efficient, and high-energy resolution scintillators», *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol. 48, no. 3, pp. 341-345, 2001.
14. A. Burger, E. Rowe, M. Groza, et al., «Cesium hafnium chloride: A high light yield, non-hygroscopic cubic crystal scintillator for gamma spectroscopy», *Appl. Phys. Lett.*, 107, 143505, pp. 1-3, 2015.
15. J. Glodo, E. van Loef, R. Hawrami, W.M. Higgins, A. Churilov, U. Shirwadkar, K.S. Shah, «Selected properties of $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$, $\text{Cs}_2\text{LiLaCl}_6$, and $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6$ scintillators», *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol. 58, no. 1, pp. 333-338, 2011.
16. U. Shirwadkar, J. Glodo, E.V. van Loef, R. Hawrami, S. Mukhopadhyay, A. Churilov, W.M. Higgins, K.S. Shah, «Scintillation properties of $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6$ (CLLB) crystals with varying Ce^{3+} concentration», *Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research*, A 652, pp. 268-270, 2011.
17. E.C. Samulon, G. Gundiah, M. Gascyn, I.V. Khodyuk, S.E. Derenzo, G.A. Bizarri, E.D. Bourret-Courchesne, «Luminescence and scintillation properties of Ce^{3+} -activated $\text{Cs}_2\text{NaGdCl}_6$, Cs_3GdCl_6 , $\text{Cs}_2\text{NaGdBr}_6$ and Cs_3GdBr_6 », *Journal of Luminescence*, no. 153, pp. 64-72, 2014.
18. G. Gundiah, K. Brennan, Z. Yana, E.C. Samulon, G. Wub, G.A. Bizarri, S.E. Derenzo, E.D. Bourret-Courchesne, «Structure and scintillation properties of Ce^{3+} -activated $\text{Cs}_2\text{NaLaCl}_6$, Cs_3LaCl_6 , $\text{Cs}_2\text{NaLaBr}_6$, Cs_3LaBr_6 , $\text{Cs}_2\text{NaLaI}_6$ and Cs_3LaI_6 », *Journal of Luminescence*, no. 149, pp. 374-384, 2014.
19. E.D. Bourret-Courchesne, G. Bizarri, R. Borade, Z. Yan, S.M. Hanrahan, G. Gundiah, A. Chaudhry, A. Canning, S.E. Derenzo, « Eu^{2+} -doped Ba_2CsI_5 , a new high-performance scintillator», *Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research*, A 612, pp. 138-142, 2009.
20. M.S. Alekhin, D.A. Biner, K.W. Kramer, P. Dorenbos, «Optical and scintillation properties of $\text{CsBaI}_3:\text{Eu}^{2+}$ », *Journal of Luminescence*, no. 145, pp. 723-728, 2014.
21. L. Stand, M. Zhuravleva, B. Chakoumakos, J. Johnson, A. Lindsey, C.L. Melcher, «Scintillation properties of Eu^{2+} -doped KBa_2I_5 and K_2BaI_4 », *Journal of Luminescence*, no. 169, pp. 301-307, 2016.
22. A.C. Lindsey, M. Zhuravleva, L. Stand, Y. Wu, C.L. Melcher, «Crystal growth and characterization of europium doped KCaI_3 , a high light yield scintillator», *Optical Materials*, no. 48, pp. 1-6, 2015.
23. L. Stand, M. Zhuravleva, H. Wei, C.L. Melcher, «Crystal growth and scintillation properties of potassium strontium bromide», *Optical Materials*, no. 46, p. 59-63, 2015.
24. L. Stand, M. Zhuravleva, A. Lindsey, C.L. Melcher, «Potassium Strontium Iodide: A New High Light Yield Scintillator with 2.4% Energy Resolution», *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, 3 p., 2013.
25. J. Glodo, R. Farrell, E.V.D. van Loef, W.M. Higgins, K.S. Shah, « $\text{LaBr}_3:\text{Pr}^{3+}$ – A new red-emitting scintillator», 2005 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, pp. 98-101.
26. E.V.D. van Loef, P. Dorenbos, C.W.E. van Eijk, K.W. Kramer, H.U. Gudel, «Scintillation properties of $\text{LaBr}_3:\text{Ce}^{3+}$ crystals: fast, efficient and high-energy-resolution scintillators», *Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research*, A 486, pp. 254-258, 2002.
27. Brilliance™ Scintillators Performance Summary, 11 p., 2009.
28. P.R. Menge, G. Gautier, A. Iltis, C. Rozsa, V. Solovyev, «Performance of large lanthanum bromide scintillators», *Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research A*, no. 579, p. 6-10, 2007.
29. M.S. Alekhin, J.T.M. de Haas, I.V. Khodyuk, K.W. Kramer, P.R. Menge, V. Ouspenski, P. Dorenbos, «Improvement of c-ray energy resolution of $\text{LaBr}_3:\text{Ce}^{3+}$ scintillation detectors by Sr^{2+} and Ca^{2+} codoping», *Applied Physics Letters*, 102, 161915, 4 p., 2013.
30. High resolution LBC scintillators. URL: <https://www.berkeleyneutronics.com> → datasheets. Сайт Berkeley Neutronics (дата обращения: 25.11.2021).

31. L. Soundara-Pandian, R. Hawrami, J. Glodo, E. Ariesanti, E.V. van Loef, K. Shah, «Lithium Alkaline Halides-Next Generation of Dual Mode Scintillators», *IEEE Tran. on Nucl. Science*, vol. 63, no. 2, pp. 490-496, 2016.
32. M.D. Birowosuto, P. Dorenbos, C.W.E. van Eijk. «High-light-output scintillator for photodiode readout: $\text{LuI}_3:\text{Ce}^{3+}$ », *Journal of Applied Physics*, 99, 123520, 4 p., 2006.
33. I.V. Khodyuk, S.A. Messina, T.J. Hayden, E.D. Bourret, G.A. Bizarri. «Optimization of scintillation performance via a combinatorial multi-element co-doping strategy: Application to NaI:Tl ». *Journal of Applied Physics*, 118, 084901, 6 p., 2015.
34. M.D. Birowosuto, Pieter Dorenbos, Johan T.M. de Haas, Carel W.E. van Eijk, K.W. Krdmer and H.U. Gudel. *IEEE Tran. on Nucl. Science*, vol. 55, no. 3, p. 1152-1155, 2008.
35. P. Dorenbos, J.C. van't Spijker, O.W.V. Frijns, C.W.E. van Eijk, K. Krgmer, H.U. Giidel, A. Ellens. «Scintillation properties of $\text{RbGd}_2\text{Br}_7:\text{Ce}^{3+}$ crystals; fast, efficient, and high density scintillators», *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research*, B 132, pp.728-731, 1997.
36. E. Rowe, P. Bhattacharya, E. Tupitsyn, M. Groza, A. Burger, N.J. Cherepy, S.A. Payne, B.W. Sturm, «A New Lanthanide Activator for Iodide Based Scintillators: Yb^{2+} », *IEEE Tran. on Nucl. Science*, vol. 60, no. 2, pp. 1057-1060, 2013.
37. R. Hawrami, E. Ariesanti, H. Wei, J. Finkelstein, J. Glodo, K.S. Shah, « $\text{Tl}_2\text{LaCl}_5:\text{Ce}$, high performance scintillator for gamma-ray detectors», *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research*, A 869, pp. 107-109, 2017.
38. R. Hawrami, E. Ariesanti, L. Soundara-Pandian, J. Glodo, K.S. Shah. « $\text{Tl}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$: A new elpasolite scintillator», *IEEE Tran. on Nucl. Science*, vol. 63, no. 6, p. 2838-2841, 2016.
39. A. Khan, G. Rooh, H.J. Kim, H. Park, S. Kim. «Intrinsically activated TlCaCl_3 : A new halide scintillator for radiation detection», *Radiation Measurements*, no. 107, pp. 115-118, 2017.
40. H.J. Kim, G. Rooh, A. Khan, H. Park, S. Kim. «Scintillation performance of the TlSr_2I_5 (Eu^{2+}) single crystal», *Optical Materials*, no. 82, p. 7-10, 2018.
41. Шендрик Р.Ю. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Часть 3. Введение в физику сцинтилляторов. Ч. 1. Учебное пособие. Иркутск: изд-во Иркут. гос. ун-та, 2013. 110 с.
42. P.R. Beck, N.J. Cherepy, S.A. Payne et al., «Strontium iodide instrument development for gamma spectroscopy and radioisotope identification», *Proc. of SPIE*, vol. 9213. September, 9 p., 2014.
43. T. Tanaka, K. Hagiwara, E. Gazzola et al., «Gamma ray spectra from thermal neutron capture on gadolinium-155 and natural gadolinium», *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 043D02, 15 p., 2020.
44. R. Hawrami, A. Farsoni, H. Sabet, D. Szydel. Growth and Evaluation of Improved CsI:Tl and NaI:Tl Scintillators. URL: <https://arxiv.org/physics> (дата обращения: 15.12.2021).

Scintillators for Precision γ -Spectrometers

Belousov Maxim, Ignatyev Oleg (Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia)

Abstract. The article analyzes the possibilities of using modern scintillators that provide a relative energy resolution along the γ -line of ^{137}Cs $ER_{662\text{keV}} \leq 5\%$. Precision gamma spectrometers are relevant for use in technological processes of the nuclear industry, at nuclear power plants for monitoring the activity of air, waste water and adjacent areas, etc.

Now 36 scintillation crystals are known that meet the above mentioned requirement. Of these, only 8 are produced by industry. Seven crystals are candidates for development in industrial production. The rest are hardly suitable for practical use due to the low light yield of LY ($\text{Cs}_2\text{NaGdCl}_6:\text{Ce}$, $\text{Tl}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$ and TlCaCl_3 , for example). Eu-activated crystals have a high light output ($LY = 60\div 100$ ph/MeV) and a low light output nonlinearity ($NLY = 7\div 10\%$) in a wide range of electron energies, which is extremely important for the spectrometry of “soft” γ -radiation ($ER_{662\text{keV}} \leq 10\%$). Due to the high self-absorption of light, these scintillators lose their advantages in the energy range $E_\gamma = 200\div 3000$ keV.

The article shows that among the scintillators suitable for the simultaneous detection of gamma and neutron radiation, crystals containing ^6Li are more preferable.

Key words: scintillators, photomultiplier, relative energy resolution, intrinsic resolution, light output, non-linearity of light output, constant emission, self-absorption.

М.П.Белусов (н.с.), О.В.Игнатъев (д.т.н., г.н.с.) – Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург.

Контакты: тел. +7 (343) 375-95-44, e-mail: ignatyev47@gmail.com.