

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫСВЕЧИВАНИЯ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

В. А. Морозов¹, Н. В. Морозова

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Развит автокорреляционный метод определения компонентного состава и времени высвечивания сцинтилляторов. Метод позволяет также изучать пространственное распределение ядерного излучения и осуществлять контроль за количеством введенной примеси в сцинтилляторах. Диапазон измеряемых времен высвечивания простирается от нескольких наносекунд до микросекунд. Установлено увеличение времени высвечивания в пластмассовых сцинтилляторах со сместителем спектра и примеси Gd.

An autocorrelation method is developed for determining the composition and decay time of scintillators. It also allows studying the spatial distribution of nuclear radiation and controlling the amount of the admixture introduced in the scintillators. The decay time is measured in the range from a few nanoseconds to microseconds. It is found that the decay time increases in plastic scintillators with a wave shifter and a Gd admixture.

PACS: 07.20.Fw

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляторы являются преобразователями корпускулярного или электромагнитного излучения достаточной энергии в низкоэнергетическое фотонное излучение в области, совпадающей или близкой к видимой части электромагнитного спектра с энергией 6–2 эВ ($\lambda = 200\text{--}700$ нм). К наиболее важным характеристикам сцинтиллятора относятся: поглощающая способность внешнего и в том числе собственного излучения, длина волны люминесцентного излучения, световой выход и время высвечивания сцинтиллятора. Точное знание времени высвечивания сцинтиллятора τ позволяет добиться наилучшего временного разрешения временного спектрометра, повысить эффективность регистрации совпадений исходя из характеристик фотоприемника и используемой электроники. В прикладных исследованиях знание τ позволяет контролировать технологические процессы изготовления сцинтилляторов. В области физики твердого тела анализ процесса разрядки центров люминесценции дает возможность выявить состав спектров высвечивания и тип разрядки метастабильных состояний. До настоящего времени определение времени высвечивания сцинтилляторов производилось в основном по методу

¹E-mail: vmorozov@nusun.jinr.ru

Боллингера [1] в различных модификациях или при помощи цифрового осциллографа. Данная работа связана с разработкой нового метода определения времени высвечивания сцинтилляторов в области от нескольких наносекунд до микросекунд с использованием автокорреляционного метода задержанных совпадений [2, 4].

1. ПРИНЦИП РЕАЛИЗАЦИИ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА

В основе развитой методики лежит автокорреляционный принцип установления временной корреляции в последовательности событий, регистрируемых одним сцинтилляционным детектором. Своим способом выделения одноэлектронных событий, определя-

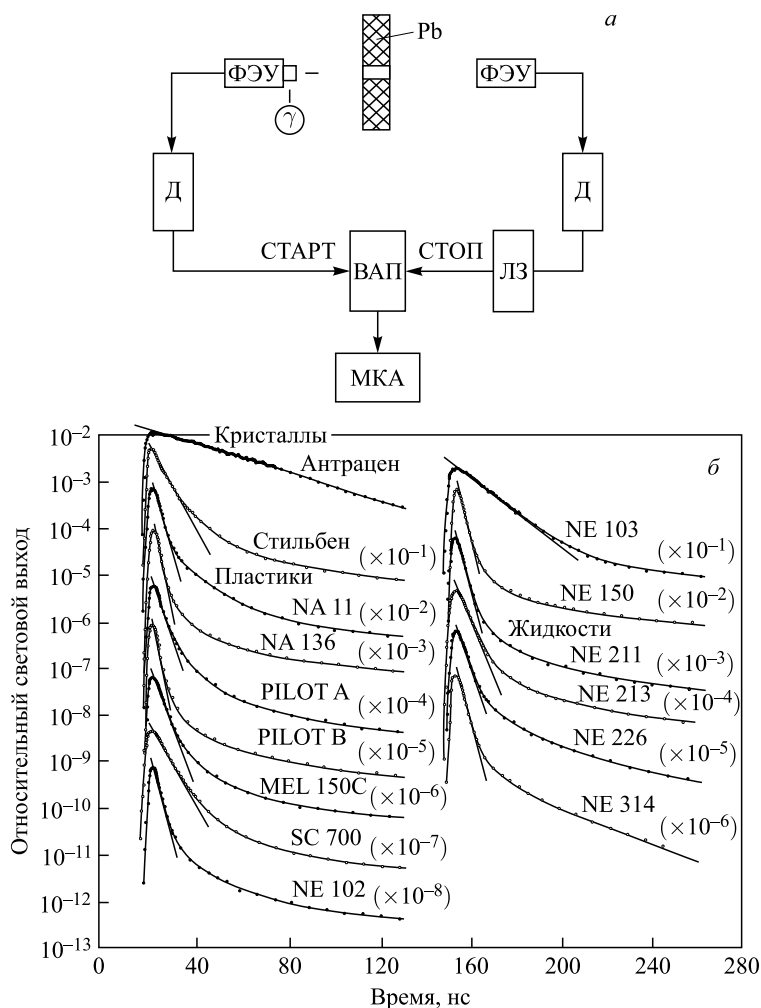


Рис. 1. а) Блок-схема временного спектрометра Боллингера. Д — дискриминатор; ВАП — время-амплитудный преобразователь; ЛЗ — линия задержки; МКА — многоканальный анализатор. б) Пример результатов измерений времен высвечивания сцинтилляторов по методу Боллингера [4]

ющих процесс разрядки центров люминесценции сцинтиллятора, этот подход отличен от метода Боллингера. В методе Боллингера используется тот факт, что пуассоновское распределение вероятности регистрации импульсов во времени обратно пропорционально скорости счета событий, что при очень малой вероятности детектирования фотонов приводит к тому, что вероятность регистрации событий будет определяться временем высвечивания сцинтиллятора. В методе Боллингера применялась схема задержанных совпадений с двумя фотоумножителями и ослабителем фотонного потока посредством диафрагмы перед одним из ФЭУ (рис. 1, а). Один из ФЭУ регистрировал момент начала процесса высвечивания сцинтиллятора — канал СТАРТ, а второй — канал СТОП, регистрируя существенно ослабленный поток фотонов, позволял проследить процесс высвечивания сцинтиллятора. В результате применения этого метода получались одномерные спектры экспоненциальных временных распределений, характеризующих время высвечивания сцинтиллятора $N = N_0 \exp(-t/\tau)$ (рис. 1, б) [3].

Реализация автокорреляционного метода основывается на аналогии разрядки метастабильных состояний сцинтиллятора с радиоактивным распадом и зависимости мертвого времени дискриминатора от амплитуды импульса. Таким образом, помимо инструментального мертвого времени дискриминатора t_d возникает также понятие динамического мертвого времени — t_{dd} , величина которого определяется длительностью импульса на уровне порога дискриминатора. Это время является функцией $t_{dd} = f(\tau, E)$. Суммарное мертвое время дискриминатора будет определяться длительностью одноэлектронного импульса t_{se} , а также t_d и t_{dd} , первые из которых являются постоянной величиной и зависят только от типа ФЭУ и применяемой электроники. От этих двух величин зависит определение минимально возможного значения времени высвечивания сцинтиллятора.

В процессе измерений происходит регистрация временных интервалов, соответствующих определенным энергиям и равных разности времени возбуждения сцинтиллятора и времени регистрации первого одноэлектронного импульса, появляющегося после окончания процесса суммирования одноэлектронных импульсов на выходе ФЭУ. Этот процесс регистрации прямо соотносится с экспоненциальным распадом возбужденных состояний центров люминесценции исследуемых сцинтилляторов. Время высвечивания сцинтилляторов определялось при анализе $(E-t)$ двумерных распределений, получаемых на автокорреляционном спектрометре задержанных совпадений.

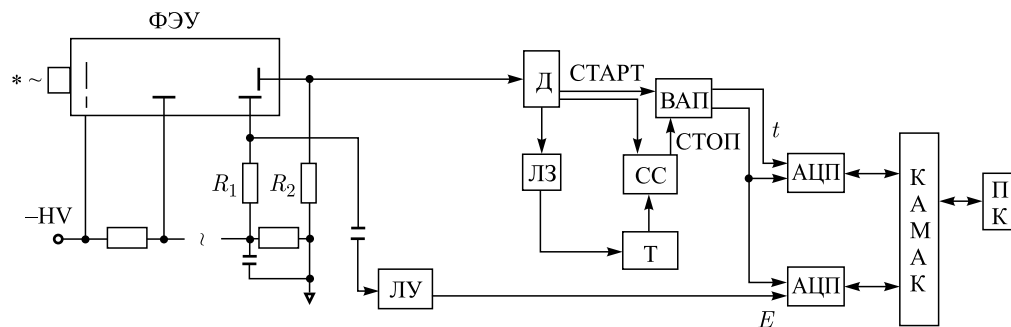


Рис. 2. Блок-схема автокорреляционного спектрометра задержанных совпадений. Д — дискриминатор; ЛЗ — линия задержки; ВАП — время-амплитудный преобразователь; ЛУ — линейный усилитель; СС — схема совпадений; Т — триггер

В автокорреляционном спектрометре использовался один фотоумножитель и стандартный комплект наносекундной электроники (рис. 2). Основные элементы временного спектрометра включали в себя фотоумножитель XP1020 или XP2020 ($R_1 = 50 \text{ Ом}$, $R_2 = 100 \text{ кОм}$), дискриминатор CANBERRA-2126 и время-амплитудный преобразователь ORTEC TRHC-467. На рис. 3 представлена временная диаграмма формирования импульсов СТАРТ и СТОП и $E(t)$ и $A(t)$, характеризующих временной и энергетические спектры. Сцинтилляторы в зависимости от величины их световыхода возбуждались от радиоактивных источников ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{226}Ra или ^{228}Th , активность которых составляла: ^{60}Co — $A = 4,1 \cdot 10^3 \text{ Бк}$, ^{226}Ra — $A = 1,1 \cdot 10^3 \text{ Бк}$, ^{152}Eu — $A = 3 \cdot 10^3 \text{ Бк}$ и ^{228}Th — $A = 2,4 \cdot 10^3 \text{ Бк}$. Источники представляли собой пластмассовые сцинтилляторы типа «сэндвич» с $\varnothing 10 \text{ мм}$ и толщиной 6 мм, окруженные рефлектором из фторопласта толщиной 5 мм.

При регистрации импульсов происходит блокировка дискриминатора на время, равное длительности импульса на уровне порога дискриминатора, которое определяется длительностью процесса наложения одноэлектронных импульсов. Повторное срабатывание дискриминатора от импульсов разрядки центров люминесценции происходит при окончании процесса наложения импульсов и появлении одноэлектронного импульса (рис. 4, а). Импульсы разных амплитуд будут иметь разное время деблокировки, экспоненциально зависящее от времени высвечивания сцинтиллятора τ , т.е. в измерениях будет формироваться не одномерное, а двумерное временное распределение $E(t) = E_i \exp(t/\tau)$, где число центров люминесценции эквивалентно парциальной энергии E_i высвечивания.

На рис. 4, б показано, что экспериментальное распределение имеет экспоненциальный характер — $E(t) = E_0 \exp(t/\tau)$. Это позволяет по функциональной зависимости $E(t)$ определять τ . Так как число возбужденных состояний в сцинтилляторе эквивалентно зарегистрированной энергии излучения, то каждой энергии будет соответствовать свой временной диапазон регистрации событий. Момент регистрации сигнала СТОП будет осуществляться в зависимости от энергии излучения в точках t_1, t_2, t_3 и т.п., что будет соответствовать регистрации событий в двумерном спектре временных распределений в точках 1, 2, 3 и т.д. Временные интервалы $0-t_1, 0-t_2$ и т.п. характеризуют время динамической блокировки дискриминатора вследствие эффекта суммирования одноэлектронных импульсов и мертвого времени дискриминатора. Порог дискриминатора V_d определяет нижний порог регистрируемой энергии E_0 . Повышение порога дискриминатора приводит к уменьшению вычисленной величины τ вследствие увеличения вероят-

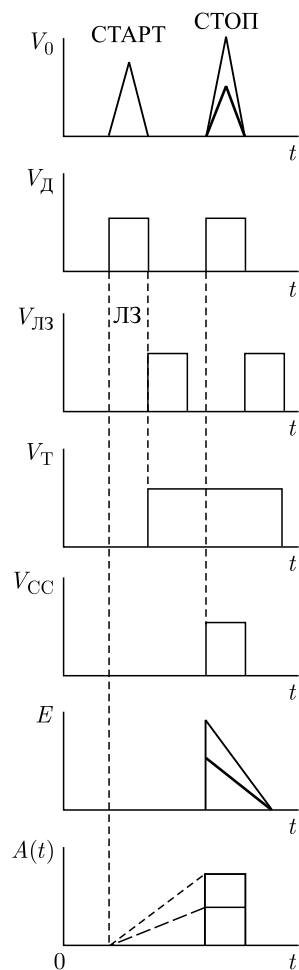


Рис. 3. Временная диаграмма формирования выходных импульсов однокристалльным сцинтилляционным временным спектрометром

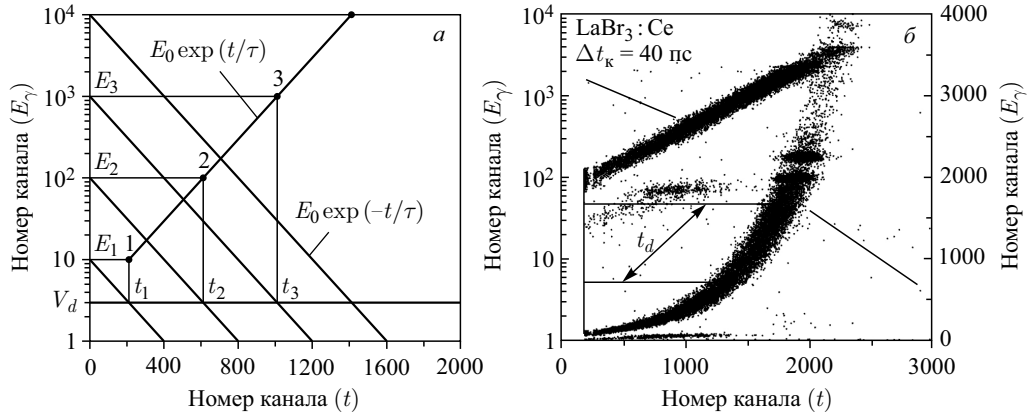


Рис. 4. а) Принцип формирования временного распределения при использовании автокорреляционного метода [3] (t_1 , t_2 и т.п. — время срабатывания дискриминатора от одноэлектронного импульса). б) Спектр времени высвечивания $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, представленный в линейном и логарифмическом масштабе (правая и левая оси соответственно). Величина Δt_k , приведенная на рисунке, определяет цену канала временного анализатора

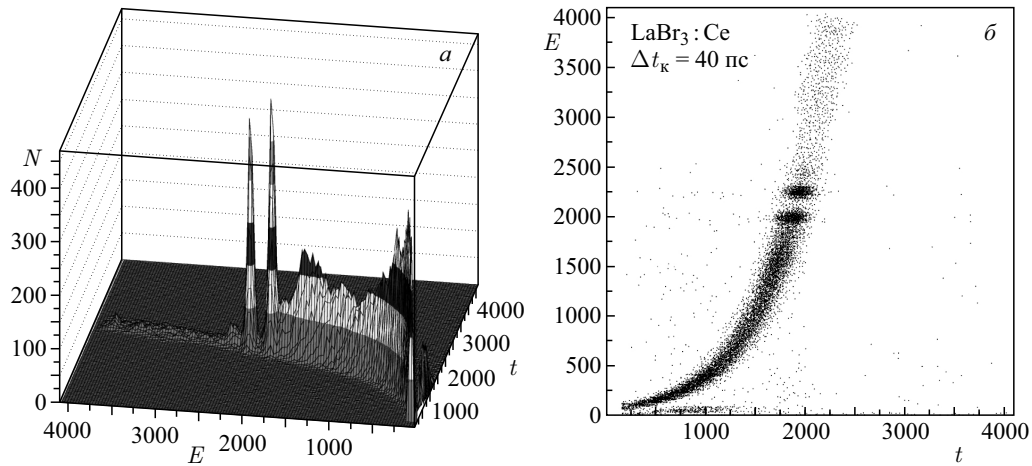


Рис. 5. а) Распределение 3D ($E-t-N$), полученное при определении времени высвечивания сцинтиллятора $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ при его возбуждении источником ^{60}Co . б) Распределение 2D ($E-t$), сформированное из трехмерной матрицы

ности регистрации двух-, трех- и т. д. электронных событий. Так, при повышении порога регистрации дискриминатора с 8 до 100 мВ вычисленное время высвечивания кристалла $\text{NaI}(\text{Tl})$ варьировалось от 230 до 210 нс.

Трехмерные ($E-t-N$) и двумерные ($E-t$) распределения, полученные при измерении τ кристалла $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ фирмы Saint-Gobain, представлены на рис. 5, а и б. Процесс обработки сводился к нахождению центров тяжести временных сечений для

каждого интервала энергий $\Delta E_1-T_{ит1}$, $\Delta E_2-T_{ит2}$, $\Delta E_3-T_{ит3}$ и т.п. и преобразованию распределения $E-t-N$ к распределению $E = T_{ит0} \exp(t/\tau)$, после чего производился расчет τ .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ВЫСВЕЧИВАНИЯ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

В своих исследованиях мы изучали свойства как неорганических, так и органических кристаллов, включая пластмассовые сцинтилляторы. В табл.1 приведены данные относительно размеров исследованных неорганических и органических сцинтилляторов. В табл.2 даны результаты нашей более ранней работы [2] по неорганическим кристаллам, в которой был впервые сформулирован принцип определения τ по новому методу, и данные этой работы. В табл.3 приведены результаты по изучению времен высвечивания органических сцинтилляторов. Световой выход сцинтилляторов со сместителем спектра и допированный Gd определялся по световыходу стильбена, облучаемого источником ^{241}Am . Усредненное значение световыхода стильбена относительно световыхода

Таблица 1. Типы и размеры исследованных сцинтилляторов

Неорганические сцинтилляторы			Органические сцинтилляторы		
Тип	Диаметр, мм	Толщина, мм	Тип	Диаметр, мм	Толщина, мм
BaF ₂	15	15	Нафталин	30	20
BGO	25	25	Стильбен	30	20
CsI(Tl)*	40	20	Толан	30	20
LaBr ₃ :Ce*	38	38	ПС (Gd)	30	10
NaI(Tl)*	40	40	ПС (см)	30	30
YAG:Ce	20	1	ПС(SG)	25	5
YAP:Ce	20	1			

Примечание. В кристаллах, отмеченных *, в качестве рефлектора используется MgO, в остальных случаях используется фторопласт.

Таблица 2. Характеристики неорганических сцинтилляторов

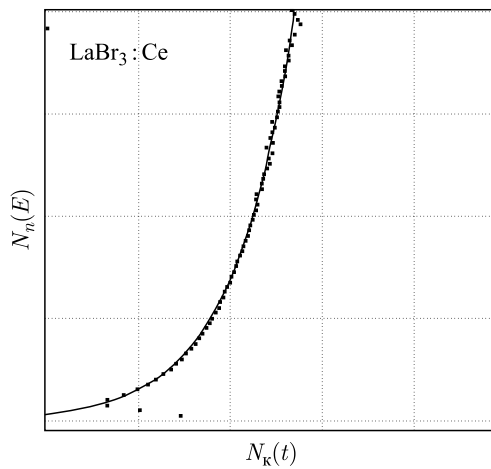
Сцинтиллятор	ρ , г/см ³	Относительный световой выход, %	τ , нс (%) [5]	$\tau_{\text{экс}}$, нс
BaF ₂	4,88	4/20	0,6/620	644(9)
BGO	7,13	15–20	300	299(4)
CsI(Tl)	4,51	45	630–1000	998(15)
LaBr ₃ :Ce	5,30	158	15 (97)–26 (93) [7]	22,5(2)
NaI(Tl)	3,67	100	230	228(3)
YAG:Ce	4,57	15	70	95,4(10)
YAP:Ce	5,37	40	26 (90) 67 (10)	38,9(4)–1 83,0(2)–2

Примечание. Запись 38,9(4)–1, 83,0(2)–2 означает время высвечивания и номер компоненты, приведенный на соответствующих рисунках.

Таблица 3. Характеристики органических сцинтилляторов

Сцинтиллятор	ρ , г/см ³	Относительный световой выход, %	τ , нс	$\tau_{\text{эксп}}$, нс
Нафталин	1,15	0,2 [6]	70–80 [6]	75,0(8)
Стильбен	1,16	0,55 [6]	4–8 [6]	4,2(3)–1 8,2(4)–2 9,1(9)–3
Толан	1,18	0,3–0,5 [6]	2,8 [9]	3,0(7)–1 4,1(5)–4 8,2(18)–2 11,2(16)–3
ПС (Gd)	1,032	0,31	—	4,0(1)–1 7,6(3)–2
ПС (см)	1,032	0,49	—	5,4(2)–1 13,4(5)–2
ПС (SG)	1,032	0,68 [10]	1,8 [10]	2,27(4)

Примечание. Запись 4,2(3)–1 означает время высвечивания и номер компоненты, приведенный на соответствующих рисунках.

Рис. 6. Результаты определения времени высвечивания сцинтиллятора $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ по программе VMRIA

Результаты определения времени высвечивания сцинтиллятора $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ по программе VMRIA

в зависимости от процентного содержания Ce (от 5 до 0,5 %) время высвечивания сцинтиллятора τ меняется от 15 до 26 нс. Результаты расчета были получены по программе VMRIA [8].

2.1.2. *YAP:Ce*. С этим кристаллом были проведены повторные измерения с использованием дискриминатора CANBERRA-2126, мертвое время которого $t_d = 5$ нс было существенно меньше мертвого времени дискриминатора ORTEC-4210 с $t_d = 20$ нс,

антрацена взято из работы [6]. Полученные результаты помимо новых данных хорошо согласуются с известными ранее данными. В отличие от метода Боллингера они не только дают возможность установления компонентного состава временного излучения, но и в случае многокомпонентного распада центров люминесценции позволяют установить параллельный или последовательный тип разрядки метастабильных центров люминесценции сцинтиллятора.

2.1. Неорганические сцинтилляторы.

2.1.1. *LaBr₃:Ce*. На рис. 6 представлен результат определения времени высвечивания сцинтиллятора $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$. Сцинтиллятор имел размеры $\varnothing 38 \times 38$ мм (содержание примеси Ce неизвестно). Полученный результат $\tau = 22,5(2)$ нс не противоречит прежним данным [7]. Известно, что в зависи-

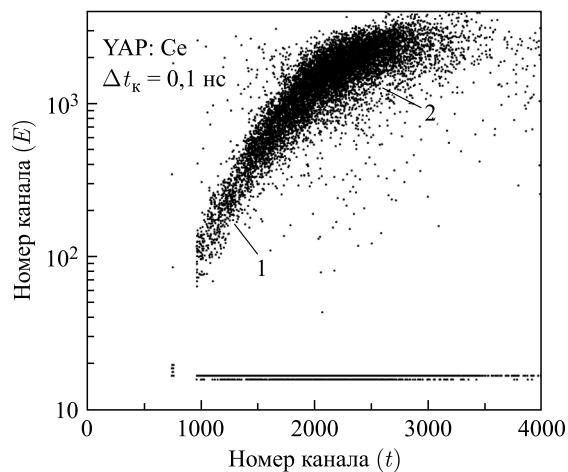


Рис. 7. Спектр высвечивания кристалла YAP:Ce. Использован радиоактивный источник ^{226}Ra

применявшегося ранее [2]. Использование нового дискриминатора позволило уточнить полученные ранее результаты. Отметим, что форма спектра высвечивания кристалла YAP:Ce (рис. 7) отличается по виду от распада, разряжающего параллельно два метастабильных состояния. Поэтому можно заключить, что девозбуждение кристалла YAP:Ce происходит последовательными переходами. Обработка временного спектра включала в себя как начальный участок временного распределения $dN(t) = 1-800$, так и конечный $dN(t) = 2000-4000$, чтобы снизить вклады различных компонент. Наблюдающееся расхождение во времени высвечивания кристалла YAP:Ce по сравнению с известными данными (см. табл. 2) требует знания процентного содержания Ce в исследуемом сцинтилляторе. В нашем случае эти данные не были известны.

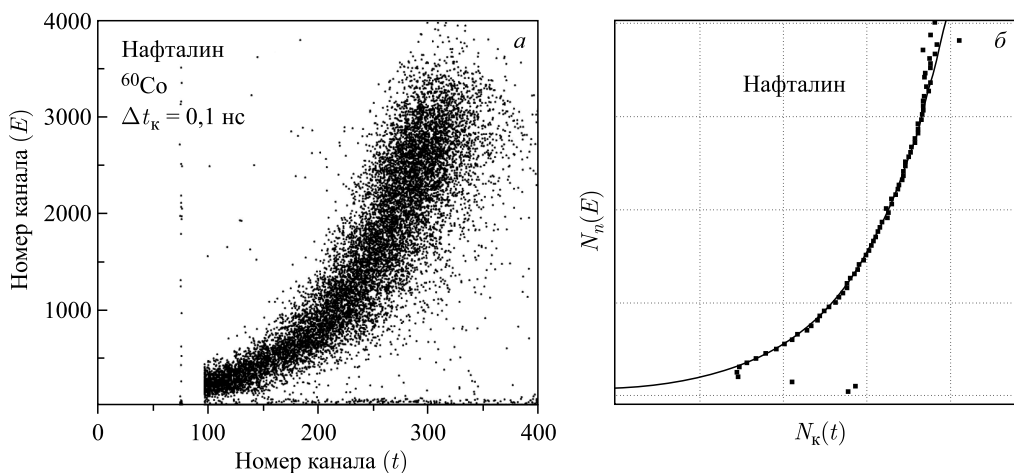


Рис. 8. а) Спектр высвечивания кристалла нафталина. Использован радиоактивный источник ^{226}Ra . б) Результаты определения времени высвечивания кристалла нафталина

2.2. Органические сцинтилляторы (кристаллы). По сравнению с изученными неорганическими кристаллами органические сцинтилляторы в рассматриваемом диапазоне времен высвечивания > 3 нс демонстрируют более широкий компонентный состав спектров высвечивания и виды разрядки центров люминесценции последовательными или параллельными переходами.

2.2.1. Нафталин. Измерения времени высвечивания нафталина, проведенные ранее [6] (рис. 8, *а, б*), показали наличие только одной компоненты высвечивания, что дает возможность использовать этот сцинтиллятор как эталон для сравнительных измерений с другими сцинтилляторами.

2.2.2. Стильбен. Стильбен относится к органическим кристаллам с достаточно большим световым выходом по сравнению с кристаллом антрацена, который считается эталоном по отношению к другим сцинтилляторам. На рис. 9 представлен спектр высвечивания стильбена, на котором видны три четко выраженные компоненты, характерные для параллельного распада. Четвертая компонента, отмеченная звездочкой, скорее всего, связана с последовательной разрядкой двух метастабильных состояний. Отметим, что подобное разложение спектра высвечивания сцинтиллятора на компоненты невозможно получить при измерениях по методу Боллинера (см. рис. 1, *б*).

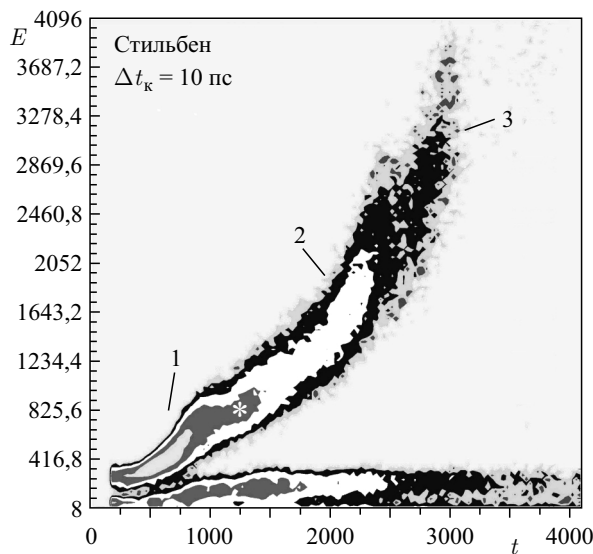


Рис. 9. Спектр высвечивания кристалла стильбена. Масштабы по оси E и t — линейные. Использован радиоактивный источник ^{226}Ra

2.2.3. Толан. Результат измерений времени высвечивания кристалла толана представлен на рис. 10, *а, б*, из которого видно, что его спектр высвечивания имеет не одну, как сообщалось ранее [9], компоненту, а по крайней мере четыре. Компоненты 2 и 3 последовательно связывают два метастабильных состояния. Обращает на себя внимание отсутствие низкоэнергетических переходов для более медленных времен высвечивания кристалла по сравнению с основной компонентой с $\tau = 3,0$ нс. Возможно, это связано с процессом безрадиационных переходов.

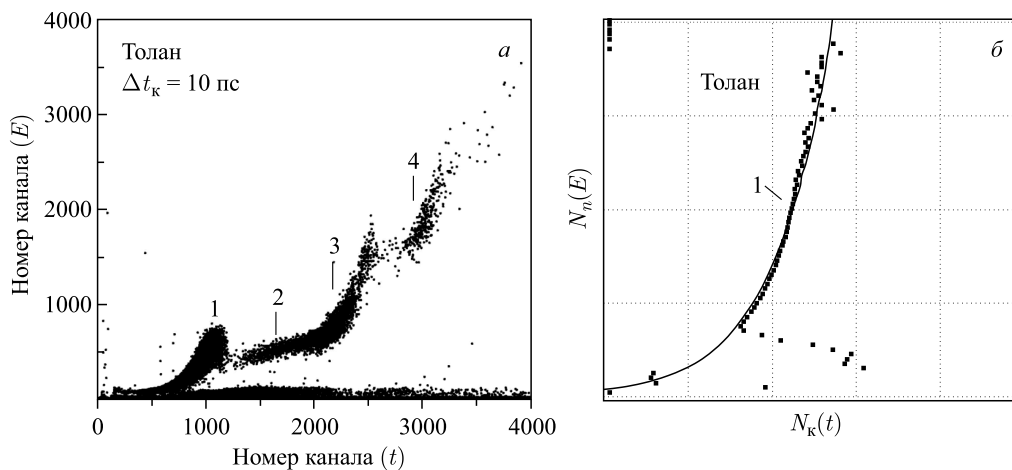


Рис. 10. *а*) Спектр высвечивания кристалла толана. Использованы радиоактивные источники ^{226}Ra и ^{228}Th . *б*) Результат определения самой быстрой и интенсивной компоненты в спектре высвечивания кристалла толана

2.3. Пластмассовые сцинтилляторы. Обнаружение сцинтилляций в твердых растворах ряда веществ в полистироле привело к созданию большого класса пластмассовых сцинтилляторов (ПС), обладающих хорошим временным разрешением и высокой эффективностью регистрации заряженных частиц.

2.3.1. BC-404. Данный сцинтиллятор, изготовленный фирмой Saint-Gobain, ПС (SG), обладает малым временем высвечивания $\tau = 1,8$ нс и большим световым выходом (68 % по сравнению с кристаллом антрацена). Он предназначен для регистрации заряженных частиц и β -излучения. Результаты проведенных измерений представлены на рис. 11, *а*, *б*.

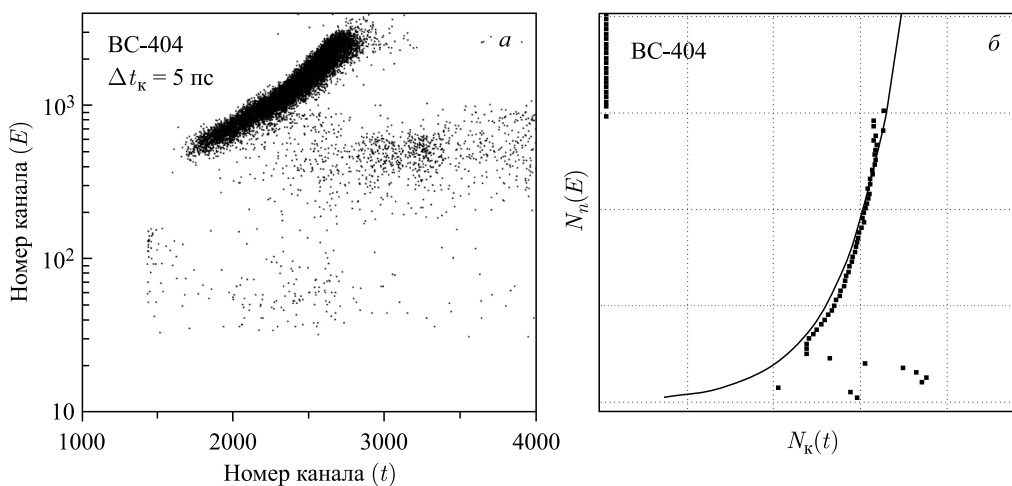


Рис. 11. *а*) Спектр высвечивания сцинтиллятора BC-404. Использованы радиоактивные источники ^{226}Ra и ^{228}Th . *б*) Результаты определения времени высвечивания сцинтиллятора BC-404

Отклонение экспериментального распределения от однокомпонентного экспоненциального свидетельствует, по крайней мере, еще об одной быстрой компоненте в спектре высвечивания ВС-404. Отличие полученного результата (см. табл. 3) от известных данных может означать не только наличие второй компоненты, но и предел разрешающей способности нашей аппаратуры.

2.3.2. *Спектрсмещающий ПС.* Пластмассовые сцинтилляторы подобного типа (ПС (см)) обеспечивают лучшее согласование спектра люминесценции ПС со спектральной характеристикой фотокатода ФЭУ. Подобный сцинтиллятор со смещением спектра люминесценции в желтую область видимого спектра был изготовлен в Лаборатории ядер-

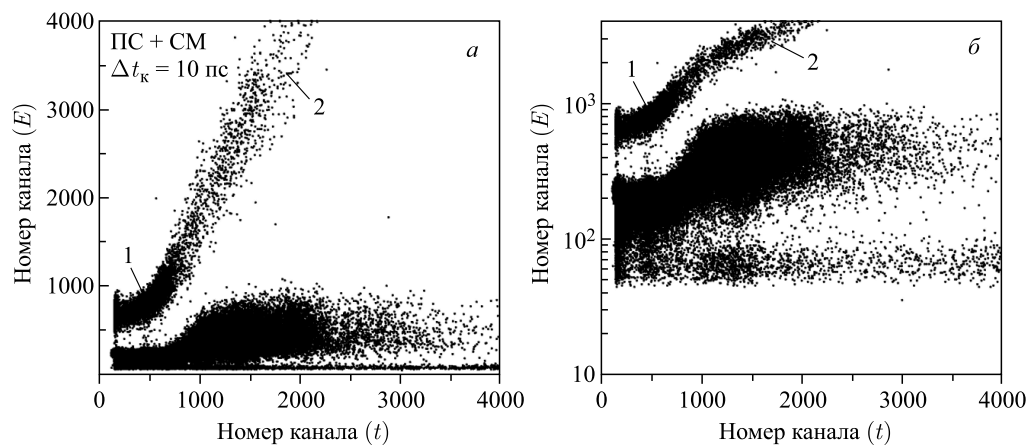


Рис. 12. а) Спектр высвечивания ПС со сместителем спектра. Используются радиоактивные источники ²²⁶Ra и ²²⁸Th. б) Демонстрация многокомпонентности спектра высвечивания ПС со сместителем спектра

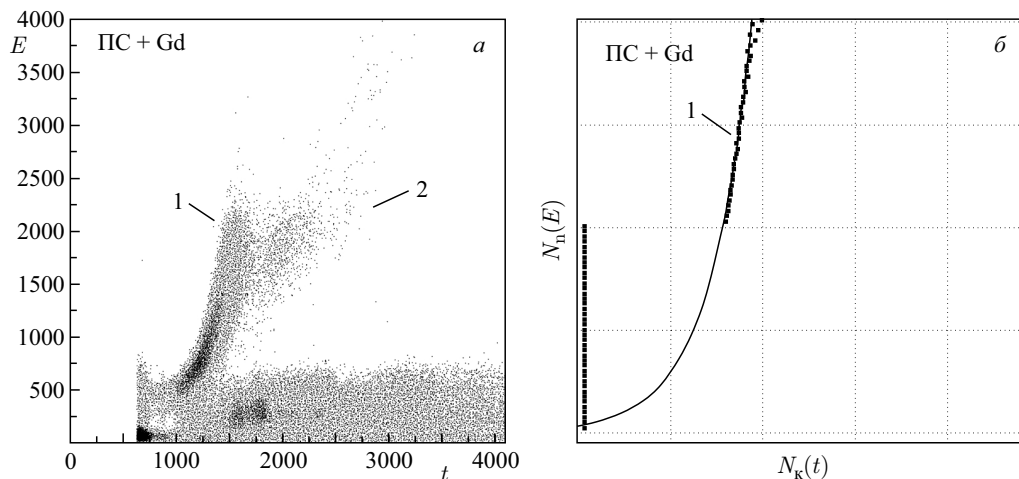


Рис. 13. а) Спектр высвечивания ПС с примесью Gd. Используются радиоактивные источники ²²⁶Ra и ²²⁸Th. б) Результаты определения времени высвечивания самой интенсивной компоненты ПС с примесью Gd

ных проблем ОИЯИ (Дубна). Результаты проведенных измерений представлены в табл. 2 и на рис. 12, *a, б*. В спектре высвечивания ПС наблюдаются две последовательные связанные компоненты. Наблюдается также заметное увеличение времени высвечивания данного ПС $\tau = 5,8(1)$ нс по сравнению со стандартным ПС с добавкой РОРОР, время высвечивания которого составляло $\tau = 3,4(2)$ нс.

2.3.3. ПС, допированный Gd. Сцинтиллятор этого типа был также изготовлен в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Цель создания такого сцинтиллятора заключалась в увеличении эффективности регистрации тепловых нейтронов с энергией менее 0,5 кэВ. Содержание Gd в этом сцинтилляторе составляло 1%. Полученные результаты (рис. 13, *a, б*) показали также увеличение времени высвечивания допированного сцинтиллятора по сравнению с обычным. Очевидно, это связано не только с одночастичными электронными, но и с молекулярными межполосными переходами.

3. КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСИ В СЦИНТИЛЛЯТОРАХ

На рис. 14 представлены спектры времен высвечивания кристаллов $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, отличающиеся содержанием активатора Ce в сцинтилляторе, которое составляло 0,5 и 5%. Заметим, что даже качественное сравнение спектров высвечивания сцинтилляторов позволяет контролировать процесс изготовления сцинтилляторов с заданными свойствами.

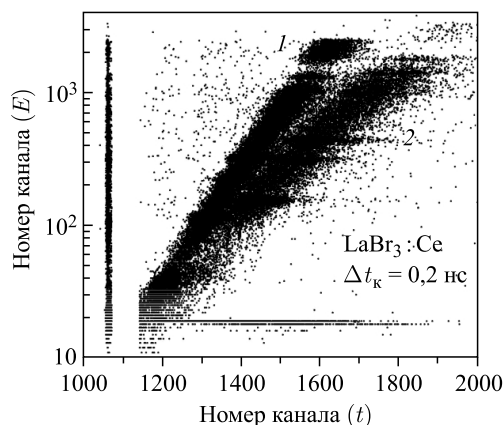


Рис. 14. Спектры высвечивания кристаллов $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, отличающиеся содержанием Ce. 1 — 5% Ce; 2 — 0,5% Ce. Использован радиоактивный источник ^{152}Eu

4. ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВОЙ АНИЗОТРОПИИ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Различие во временах высвечивания различных сцинтилляторов позволяет реализовать изучение угловых корреляций ядерного излучения при помощи однодетекторного спектрометра. Это достигается размещением сцинтилляторов с различными временами высвечивания на фотокатоде ФЭУ. Более полную картину можно будет получить при стыковке ФЭУ посредством световодов — фибр с большим числом сцинтилляторов с

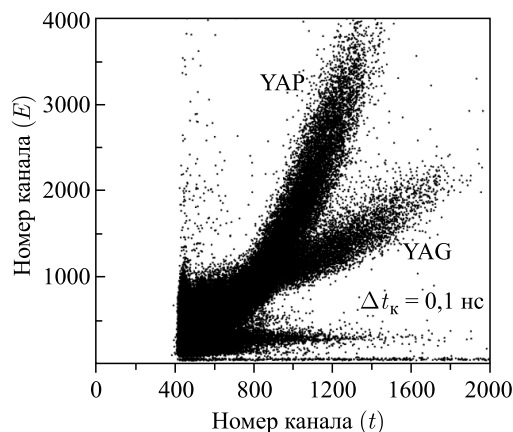


Рис. 15. Результаты одновременного измерения сцинтилляторов YAP и YAG на одном ФЭУ. Используются радиоактивные источники ^{226}Ra и ^{228}Th

разными временами высвечивания. На рис. 15 приведен пример измерений для двух сцинтилляторов, размещенных на фотокатоде. Диаметр каждого сцинтиллятора составлял 20 мм при диаметре фотокатода ФЭУ 44 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный автокорреляционный метод определения времени высвечивания сцинтилляторов является более универсальным по сравнению с другими методами определения времени высвечивания, поскольку он позволяет установить компонентный состав спектров высвечивания, тип девозбуждения метастабильных состояний (параллельная или последовательная разрядка), обеспечивает возможность изучения пространственной корреляции излучения, а также позволяет изучать влияние вводимой примеси в состав сцинтиллятора на его временные свойства и отличается от метода Боллингера способом регистрации процесса высвечивания центров люминесценции сцинтиллятора. Этот способ не требует обязательной регистрации одноэлектронных событий, особенно в тех случаях, когда проводится сравнительный анализ времен высвечивания разных сцинтилляторов. Он может быть применен при определении времен высвечивания сцинтилляторов в диапазоне от наносекунд до нескольких микросекунд. В необходимых случаях при относительном сравнении времен высвечивания сцинтилляторов в качестве эталонных источников, перекрывающих диапазон от десятков наносекунд до микросекунд и обладающих одной компонентой высвечивания, можно использовать сцинтилляторы НАФТАЛИН, YAG:Ce, NaI(Tl) и CsI(Tl). Перспективы определения времен высвечивания < 3 нс возможны при использовании фотодетекторов с длительностью импульсов < 5 нс и дискриминаторов с мертвым временем < 5 нс. Автокорреляционный метод может найти применение в технологических процессах, связанных с разработкой и исследованиями сцинтилляторов новых типов, а также в экспериментах, связанных, например, с изучением пространственной корреляции процесса взаимодействия излучения с мишенью. Использование стандартной электронной аппаратуры упрощает применение этого метода.

Благодарности. Авторы выражают признательность В. Б. Бруданину за постоянную поддержку в работе, Д. И. Выпренцеву и И. Б. Немченку за предоставление образцов сцинтилляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bollinger L. M., Thomes Y. E.* // *Rev. Sci. Instr.* 1961. V. 32. P. 1044.
2. *Morozov V. A., Morozova N. V., Norseev Yu. V.* // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2000. V. 484. P. 225.
3. *Morozov V. A., Morozova N. V., Zloказov V. B.* // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2015. V. 775. P. 148.
4. *Wates E. C., Crandall D. G.* // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1966. V. 13, No. 3. P. 153.
5. *Глобус М. Е., Гринев Б. В.* Неорганические сцинтилляторы. Харьков: Акта, 2000.
6. *Вяземский В. О. и др.* Сцинтилляционный метод в радиометрии. М.: Госатомиздат, 1961.
7. *Shah K. S. et al.* Preprint LBNL 51793. 2002.
8. *Злоказов В. Б., Морозов В. А., Морозова Н. В.* Сообщ. ОИЯИ Р10-2015-63. Дубна, 2015.
9. *Килин С. Ф. и др.* // *ПТЭ.* 1974. № 6. С. 64.
10. <http://www.bicron.com>

Получено 12 декабря 2016 г.