

УДК 53.083.71 + 53.088.23 + 53.088.6

ПОРТАТИВНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР СТАРК-01

**М.П. Белоусов¹, М.А. Горбунов², С.В. Дудин¹, О.В. Игнатьев¹,
С.Г. Морозов², А.А. Пулин²**

¹Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина
620002, ул. Мира, 19, Екатеринбург, РФ
ovi@dpt.ustu.ru

²ООО «НПК «АТОМ Электроникс»
620041, ул. Уральская, 77/120, г. Екатеринбург, РФ

Поступила в редакцию 31 октября 2011 г.

Проанализированы фундаментальные преимущества сцинтилляторов $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$. Проведен сравнительный анализ портативных γ -спектрометров с упомянутым кристаллом, при этом особое внимание уделено применяемым системам стабилизации коэффициента преобразования. Описаны результаты разработки спектрометра СТАРК-01, ориентированного на применение на атомных электростанциях.

Ключевые слова: $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, γ -спектрометр, система стабилизации, быстродействие, энергетическое разрешение.

Белоусов Максим Павлович – научный сотрудник НИЛ электроники рентгеновских приборов (НИЛ ЭРП) при кафедре экспериментальной физики физико-технологического института УрФУ.

Область научных интересов: разработка прецизионных сцинтилляционных γ -спектрометров.

Автор 5 опубликованных работ.

Горбунов Максим Александрович - инженер ООО «НПК «АТОМ Электроникс».

Специалист в области микропроцессоров, контроллеров, цифровой фильтрации детекторных сигналов, трассировки печатных плат.

Автор одной опубликованной работы.

Дудин Сергей Владимирович - научный сотрудник НИЛ ЭРП при кафедре экспериментальной физики физико-технологического института УрФУ.

Специалист в области аналоговых электронных трактов полупроводниковых рентгеновских спектрометров.

Автор 6 опубликованных работ.

Игнатьев Олег Валентинович – кандидат технических наук, научный руководитель НИЛ ЭРП при кафедре экспериментальной физики физико-технологического института УрФУ.

Область научных интересов: исследования и разработки в области электроники для прецизионных спектрометров с различными ионизационными детекторами x -, γ - и n -излучений.

Автор более 70 опубликованных работ, в том числе одной монографии и более 15 изобретений, нашедших практическое применение. Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники. В июне 2011 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Морозов Сергей Геннадьевич - зам. директора ООО «НПК «АТОМ Электроникс».

Специалист в области полупроводниковых и сцинтилляционных блоков детектирования рентгеновского и γ -излучения.

Автор двух опубликованных работ.

Пулин Алексей Александрович - инженер ООО «НПК «АТОМ Электроникс».

Специалист в области разработки программного обеспечения спектрометров.

Автор 17 опубликованных работ

Введение

За время, прошедшее с момента публикации в сентябре 2001 г. первой работы по $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ -сцинтилляторам [1], детекторы на их основе нашли за рубежом самые разнообразные применения, но чаще всего в портативных γ -спектрометрах.

Первое требование к любому спектрометрическому γ -детектору – энергетическое разрешение. $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ благодаря высокому световыходу (LY) по разрешающей способности занимает промежуточное положение между традиционным сцинтиллятором $\text{NaI}(\text{Tl})$ и полупроводниковым HrGe -детектором (рис. 1 [2]). Разрешение по линии ^{137}Cs $\eta_{662 \text{ КэВ}} = 2.5 \div 3.5 \%$. Лучшее разрешение среди неполупроводнико-

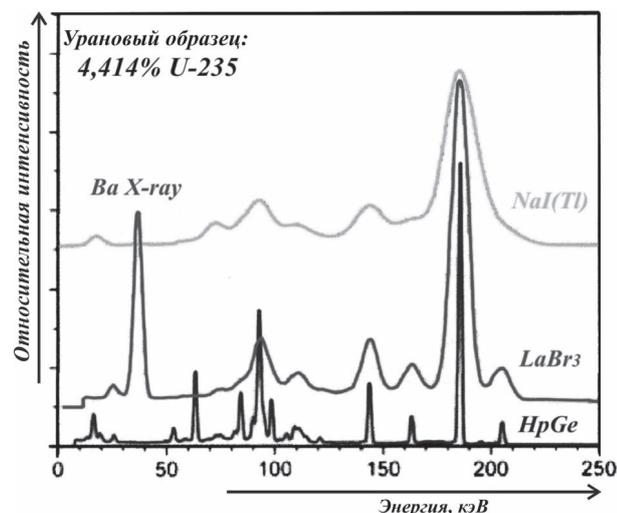


Рис. 1. Спектры излучения уранового образца. Детекторы $\text{NaI}(\text{Tl})$, LaBr_3 и HrGe

вых γ -детекторов демонстрирует только HrXe -детектор (дрейфовый детектор с рабочим веществом ксеноном под давлением $\sim 60 \cdot 10^5$ Па). С HrXe -спектрометром было достигнуто $\eta_{662 \text{ КэВ}} = 2.0 \%$ [3] (статистический предел составляет $\eta_{662 \text{ КэВ}} = 0.56 \%$).

Масштабы практического применения γ -спектрометров определяются, помимо разрешающей способности, еще целым рядом характеристик детектора. К их числу можно отнести следующие:

- эффективность регистрации γ -излучения в функции от его энергии (влияет плотность ρ , г/см^3);
- линейность преобразования энергии поглощенного в сцинтилляторе γ -кванта в амплитуду электрического импульса;
- зависимость от температуры характеристики преобразования G_{conv} ;
- зависимость от температуры энергетического разрешения η ;
- уровень и спектральное распределение собственного фона;
- масса и стоимость конструктивных элементов детектора и вспомогательного оборудования;
- стоимость единицы объема рабочего вещества детектора;
- максимально технически достижимый объем рабочего вещества детектора;
- механическая прочность.

Некоторые из этих характеристик сведены в табл. 1, анализ данных которой позволяет аргументировано выбирать тип детектора.

С LaBr_3 -детектором перечисленные характеристики имеют приемлемые значения, что

Таблица 1

Сравнительные характеристики трех детекторов γ -излучения

Характеристика	Детектор		
	$\text{NaI}(\text{Tl})$	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	HrGe
Плотность ρ , г/см^3	3.67	5.08	5.32
Толщина слоя половинного ослабления излучения $I_{1/2}$ для квантов ^{137}Cs , см	2.5	1.9	1.8
Световыход LY , фотон/МэВ	38 000	63 000	338 000 (электронно-дырочных пар)
Температурный коэффициент световыхода, $\% / ^\circ\text{C}$	-0.3 [1]	0.02 [2, 4]	-
Постоянная высвечивания τ_{LD} , нс	230,250	16 [4]	-
Энергетическое разрешение $\eta_{662 \text{ КэВ}}$ детектора ($\varnothing 1.5'' \times 1.5''$) по линии ^{137}Cs , КэВ	43 [4] (обычно 50)	20 [4]	1.1 \div 1.5 при $Reff = 40 \%$
Максимально достижимый объем рабочего вещества детектора, см^3	4200	Более 1400	750
Стоимость (оценочно), $\$/\text{см}^3$ [2]	2	≈ 65 (монопольная)	150 (собственно кристалл)

Примечания: фотон/МэВ - число высвечиваемых фотонов света на 1 МэВ поглощенной энергии γ -излучения; $Reff$ – эффективность регистрации γ -излучения относительно кристалла $\text{NaI}(\text{Tl})$ размера $\varnothing 3'' \times 3''$

привело к созданию на их основе ряда портативных γ -спектрометров с удовлетворительными метрологическими характеристиками.

Портативные LaBr_3 -спектрометры мировых производителей

Промышленное производство детекторов, освоенное компанией Saint-Gobain, привело к тому, что за последние годы в мире создано свыше десятка моделей портативных γ -спектрометров. В табл. 2 сведены наиболее перспективные из них.

Данные табл. 2 обязывают сделать несколько выводов и комментариев:

Практически все производители портативных LaBr_3 -спектрометров применяют сцинтилляторы от Saint-Gobain (сведений о других промышленных производителях нет).

Нижний предел температурного диапазона во всех случаях не ниже $-20\text{ }^\circ\text{C}$, а диапазон рабочих температур ΔT не превышает $70\text{ }^\circ\text{C}$. Изменения коэффициента преобразования $\Delta G_{\text{conv}}/G_{\text{conv}}$ при этом (независимо от метода стабили-

Таблица 2

Портативные LaBr_3 -спектрометры мировых производителей

Основные характеристики	Марка спектрометра / производитель				
	MChA "InSpector 1000" + Det. unit "IPROL-1" / CANBERRA	MChA "DigiDART-LF" + Det. Units "LABR-1.5'1.5" / ORTEC	"radHUNTER-L" Mono Device / ICx Technology	"identiFINDER" Mono Device / ICx Technology	"SPIRID 1.5 LaBr_3 " Mono Device) / Mirion Technologies
Кристалл	$\varnothing 38 \times 38$ мм (Saint-Gobain)	от $\varnothing 25 \times 25$ мм до $\varnothing 76 \times 76$ мм (Saint-Gobain)	$\varnothing 38 \times 38$ мм (вероятно Saint-Gobain)	$\varnothing 30 \times 30$ мм (вероятно Saint-Gobain)	$\varnothing 38 \times 38$ мм (вероятно Saint-Gobain)
Диапазон энергий	30 КэВ ÷ 3.0 МэВ	25 КэВ ÷ 3.0 МэВ	20 КэВ ÷ 3.0 МэВ	15 КэВ ÷ 3.0 МэВ	25 КэВ ÷ 3.0 МэВ
Разрешение, $\eta_{662 \text{ КэВ}}$	$\leq 3.5\%$	2.8 ÷ 4.0 %	3.5 %	2.7 ÷ 3.5 %	$\approx 3.0\%$
Температурная нестабильность преобразования $\Delta G_{\text{conv}}/G_{\text{conv}}$	$\pm 1\%$ в диапазоне $-20 \div +50\text{ }^\circ\text{C}$	Нет данных	$\pm 1\%$; $\Delta T = -20 \div +50\text{ }^\circ\text{C}$ (при скорости изменения температуры $\Delta T/t \leq 0.5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$)	$\Delta T = -15 \div +55\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = -20 \div +50\text{ }^\circ\text{C}$
Метод стабилизации детектора	LED + PhD + TS (TS - Temperature Sensor)	По пикам фона (^{40}K , ^{138}La)	Таблично стабилизированный LED	Встроенный ^{137}Cs (500 Бк) / табличные стабилизации кристалла и LED	Нет данных
Процессор детекторных импульсов	Цифровой; WF- "Трапеция"	Цифровой; WF- "Трапеция"; $T_{\text{rise}} = 0.8\text{ мкс}$, $T_{\text{top}} = 0.5\text{ мкс}$	Цифровой; WF- вероятно "Трапеция"	Цифровой; WF- вероятно "Трапеция"	Принцип неизвестен
Разрешающее время по наложениям, T_{res}	0.5 мкс	0.5 мкс	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Максимальная статистическая нагрузка по выходу $R_{\text{out_max}}$	-	-	-	Более 100 КГц	-
Метод коррекции просчетов	"Виртуальный генератор"	"Gedcke-Hall-метод"	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Массогабаритные показатели	Нет данных	200'100'75мм, $L_{\text{det}} = 143 \div 194$ мм	95'230'305мм, 2.3 кг	235'93'75 мм, 1.25 кг	205'140'370мм, 3.6 кг

Примечания: LED - светодиод (Light Emitter Diode); PhD - фотодиод (Photo Diode); TS - датчик температуры (Temperature Sensor); WF – функция памяти спектрометра (ее форма определяет достижимую степень подавления шума, а при время-инвариантной и цифровой фильтрации - и быстродействие спектрометра).

зации детектора) декларируются на уровне $\pm 1\%$ в рабочем диапазоне температур ($0.014\% / ^\circ\text{C}$).

Низкий (и положительный) относительный температурный уход световыхода LaBr_3 ($\Delta LY / LY \approx 0.02\% / ^\circ\text{C}$ - см. табл.1) позволяет стабилизировать в блоке детектирования только фотоумножитель, как это реализовано в спектрометре "radHUNTER-L".

Отличия в качестве и "фундаментальных" свойствах портативных сцинтилляционных γ -спектрометров с одинаковыми сцинтилляторами и фотоумножителями определяются свойствами системы стабилизации и процессора спектрометрических импульсов.

Методы стабилизации сцинтилляционных спектрометров

Сцинтилляционные спектрометры подвержены большому числу дестабилизирующих факторов [4]: температура (влияет на кристалл и фотоумножитель - **PMT**); магнитное поле (подвержен **PMT**); статистическая нагрузка (влияет на **PMT**); время (старение **PMT**). При этом влияние трех первых факторов столь велико, что в большинстве приложений сцинтилляционные спектрометры, особенно полевые, требуют стабилизации шкалы преобразования.

Имеется ряд методов стабилизации шкалы портативного¹ сцинтилляционного γ -спектрометра (см. табл. 2). Технически наиболее просто стабилизировать шкалу по пику достаточно активного источника α -излучения ($A_\alpha = 500 \div 1000$ Бк), вмонтированного в упаковку сцинтиллятора (обычно это ^{241}Am). Огромное достоинство метода состоит в том, что петля стабилизирующей обратной связи охватывает и сцинтиллятор, и фотоумножитель; α -пик располагается в конце шкалы и не накладывается на измеряемые γ -линии; в спектре отсутствует непрерывный континуум комптоновского рассеяния от реперного пика. В этом смысле вряд ли можно признать удачным применение в спектрометре «identiFINDER» встроенного источника ^{137}Cs , тем более, что этот изотоп часто и есть предмет поиска.

К сожалению, всеобщая радиофобия и сложные процедуры, сопровождающие изготовление (покупку), содержание и утилизацию такого сцинтиллятора приводят к тому, что на практике стремятся применять "безрадиоактивные" принципы стабилизации. Общая проблема – как учесть температурную зависимость световыхода сцинтиллятора. Для этого применяют т.н. "табличный" метод (с температурным сенсором на кристалле): измеряется зависи-

мость световыхода кристалла от температуры T и составляется соответствующая таблица $LY = f(T)$. По показаниям датчика температуры, укрепленного на кристалле, можно, пользуясь табличными данными, корректировать коэффициент преобразования G_{conv} . Такой принцип использован в "интеллектуальном" детекторе "IPROL-1" (CANBERRA) [5] и «identiFINDER» (ICx Technology). Разновидность метода – прием, применимый к кристаллам NaI(Tl) , для которых характерна зависимость постоянной времени высвечивания (**LD**) τ_{LD} от температуры. Можно привязать величину τ_{LD} к величине световыхода кристалла, как это сделано авторами из ICx Technology [6]. Такая схема применена ими в «identiFINDER» (табл. 2). Судя по полученным результатам и сложности системы, преимущества в сравнении с обычным температурным датчиком достаточно сомнительны.

Что касается стабилизации преобразования фотоумножителя G_{PMT} , то она может быть (см. рис. 2) "безреперной" или "реперной". В первом случае применяются термостатирование (в упомянутых ранее частных случаях) или "табличный" метод, по показаниям температурного сенсора.

Недостаток "безреперных" методик в том, что они пригодны лишь при малых энерговыделениях в кристалле из-за имеющейся зависимости G_{PMT} от статистической нагрузки и энергии γ -излучения и требуют очень тщательного магнитного экранирования **PMT**. Кроме того, эта группа методов никак не учитывает старение **PMT**.

Реперные, т.е. с помощью светодиодного источника, методы стабилизации в значительной степени избавляют от влияний энерговыделения в кристалле сцинтиллятора и магнитного поля на G_{PMT} . К сожалению, приходится считаться с температурной зависимостью световыхода светодиодов (**LED**) $LY_{\text{LED}} (\approx 0.5\% / ^\circ\text{C})$. Зависимость LY_{LED} от температуры можно устранить термостатированием (это позволительно делать нагреванием, т.к. теплоемкость **LED** невелика), либо учесть табличным методом, как это сделано в "radHUNTER-L" (ICx Technology) [7], где температура **LED** определяется по зависимости от температуры отношения двух светодиодных пиков в спектре. Общий недостаток параметрических методов стабилизации световых вспышек – не учитываются влияния магнитного поля на **PMT** и процесса старения **LED**.

Наиболее совершенными методами стабилизации коэффициента стабилизации **PMT** являются те, где во вспомогательной цепи применяются фотодиоды. Используются преимущества [6] чрезвычайно высокой температурной стабильности квантовой эффективности фотодиода (**PhD**) QE_{PhD} (рис. 3) и практически идеальной линейной зависимости индуциро-

¹ Датчики стационарных и каротажных сцинтилляционных спектрометров могут быть термостатированы.

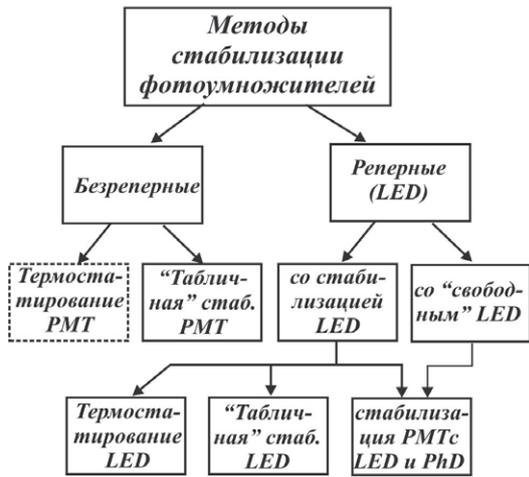


Рис. 2. Основные методы стабилизации PMT, применяемые в γ -спектрометрах

ванного заряда от величины световой вспышки. На рис. 4 показаны сразу два варианта LED-стабилизации фотоумножителя с помощью PhD.

Каждый из вариантов имеет свои сильные и слабые стороны. В основе рисунка – материал патента [7], применяемого компанией CANBERRA в детекторе “IPROL-1» (см. табл. 2).

Классический принцип стабилизации – стабилизация световых вспышек с помощью фотодиода [6, 8], а затем использование стабильных световых вспышек для стабилизации фотоумножителя по реперному светодиодному пику в спектре. Главные проблемы в таком методе стабилизации PMT следующие:

LED-вспышка должна быть близкой по своим параметрам вспышке сцинтиллятора, поскольку обрабатывается вместе со сцинтилляционными;

Формы электрических LED-импульсов на выходах каналов фотодиода и фотоумножителя должны быть идентичными, чтобы имеющие место изменения формы LED-вспышек под воздействием температуры не приводили к рассогласованию коэффициентов преобразования в упомянутых каналах (своего рода баллистический дефицит);

Необходимо обеспечить условия, при которых коэффициент разделения света между PhD и PMT оставался бы постоянным со временем и во всем диапазоне рабочих температур.

К числу достоинств классической схемы стабилизации можно отнести:

- непрерывность действия с возможностью применения высоких частот повторения LED-импульсов (1÷10 КГц) для стабилизации в условиях быстро изменяющейся и пульсирующей загрузки;
- возможность непрерывного наблюдения статуса системы стабилизации и изменения коэффициента преобразования фотоумножителя

G_{PMT}

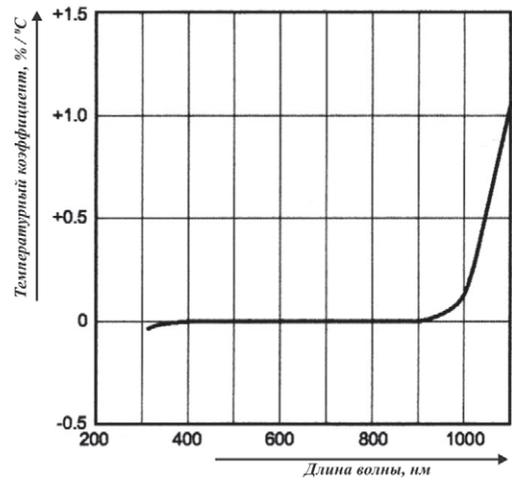


Рис. 3. Типичный температурный коэффициент квантовой эффективности фотодиода

Метод стабилизации со “свободным” LED был изобретен для того, чтобы избавиться от двух первых слабых мест классической схемы. Форма вспышки прямоугольная, а длительность существенно больше, чем длительность вспышки сцинтиллятора. Все связи в обоих каналах (PhD и PMT) гальванические, моменты выборки сигналов и кодирования обоих аналогово-цифровых преобразователей (ADC) жестко привязаны к импульсу LED. Для компенсации дрейфа по постоянному току, действия шумов и совпадения сцинтилляционного и LED-импульсов (в канале PMT) в обоих каналах:

- берут выборки процесса до LED-вспышки – получают код [«фона»];
- затем во время LED-вспышки – получают коды [LED-вспышки + «фон»];
- из кода [LED-вспышки + «фон»] вычитают код [«фона»] и в каждом из каналов получается мгновенный код [LED-вспышки];

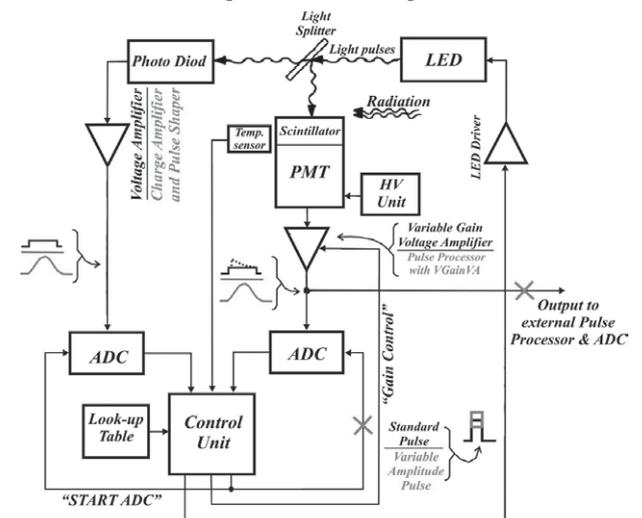


Рис. 4. Структуры систем стабилизации “IPROL-1” и “классическая” (“СТАРК-01”). Серым отмечены отличия классического метода

- производится усреднение разностных кодов в каждом из каналов;
- сравниваются усредненные коды [LED-вспышек] в PhD- и PMT-каналах и их разность управляет усилением в цепи PMT;
- условие окончания регулирования - достижение равенства усредненных амплитуд LED-вспышек.

Избавившись от недостатков классической схемы в части жестких требований к параметрам LED-вспышек², авторы приобрели другие, более серьезные:

- из-за отсутствия фильтрации шумов, а также заведомо большего уровня шума в PhD-канале с усилителем напряжения, процесс усреднения разностных кодов при той же частоте LED-вспышек происходит значительно медленнее, чем в «классике» (где он также присутствует);
- каждое изменение статистической загрузки и вида спектра приводит к ошибкам вычисления амплитуд LED-вспышек в канале фотоумножителя;
- из-за существенного отличия по форме сцинтилляционных и реперных световых вспышек частота LED-вспышек должна быть небольшой, чтобы не нарушить нормальное функционирование внешнего спектрометрического канала.

Все перечисленное резко снижает скорость стабилизации и ограничивает области применения такого метода.

Процессоры спектрометрических импульсов

В общем случае современный процессор спектрометрических импульсов (**PSI**) выполняет следующие функции: линейного усиления; формирования спектрометрических импульсов; стабилизации базовой линии спектрометра (**BLS**); аналого-цифрового преобразования (**ADC**); инспекции наложений (**PUI**); интерфейса с устройством накопления и обработки спектрометрической информации; коррекции «живого»/«мертвого» времени (**LTC/DTC**) и вспомогательные функции. В «аналоговых» PSI каждую из перечисленных функций выполняет одноименный элемент.

Благодаря большому усилению фотоумножителей идеология и схемная реализация PSI мало влияют на разрешающую способность сцинтилляционного γ -спектрометра, особенно с таким кристаллом, как LaBr_3 . Быстродействие же чрезвычайно сильно зависит от принципов и алгоритмов обработки спектрометрических импульсов [9, 10], критическими узлами являются BLS, PUI и LTC .

² Проблема обеспечения постоянства разделения света между PMT и PhD здесь остается актуальной.

В [10] показано, что наименьшие сдвиги и уширения пиков аппаратного спектра в широком диапазоне амплитуд и при статистических нагрузках по входу до $R_i \leq 2/T_w$ (T_w – длительность по основанию сформированных импульсов) обеспечивают т.н. «цифровые» BLS (Digital Base-Line Stabilizer – **DBLS**). «Цифровыми» эти стабилизаторы базовой линии названы по реакции на шумовые и спектрометрические импульсы [11]. Истинно цифровых аналогов такого DBLS пока не создано. Применительно к спектрометрам, приведенным в табл. 2, с DBLS достижима максимальная нагрузка по входу $R_{i,max} \approx 10^6$ 1/с.

Инспектор наложений должен обладать минимальным разрешающим временем T_{res} во всем диапазоне регистрируемых энергий, т.к. от этого зависит эффективность режекции наложенных событий. Ведущие мировые производители ORTEC и CANBERRA указывают $T_{res} = 500$ нс. Это означает, что эффективность инспекции наложений $\varepsilon_{p,u}$ для спектрометра ORTEC не превысит 76 % в «жесткой» области измеряемого спектра γ -излучения. В «мягкой» значение $\varepsilon_{p,u}$ будет еще ниже. Иные принципы таймирования событий и инспекции наложений [10] в тех же условиях обеспечивают достижение $\varepsilon_{p,u} > 95$ %.

В большинстве случаев информацию об истинной интенсивности регистрируемого детектором излучения R_i можно получить только из наблюдаемой скорости накопления спектра, т.е. из R_o . Спектрометр с режектором наложений представляет собой систему с продлевающимся типом «мертвого» времени и связь между R_i и R_o описывается функцией, имеющей экстремум (нижняя кривая на рис. 5). Программно-аппаратные средства, называемые корректорами просчетов или корректорами «живого»(LT)/«мертвого»(DT) времени таким образом модифицируют DT (а соответственно и LT), чтобы получить линейную связь между истинной и вычисленной входной нагрузкой.

Проведенный сравнительный анализ [10] наиболее распространенных методов коррекции просчетов в спектрометрических системах показал, что только в методе «виртуального генератора» G.P. Westphal [12], применяемом в своей аппаратуре компанией CANBERRA, достигается математически строгий учет просчетов. Наиболее близким по точности является метод Gedcke-Hale [13], используемый компанией ORTEC.

Проведенные исследования [10] показали, что LTC/DTC обоих типов (CANBERRA и ORTEC) очень чувствительны к погрешностям определения T_w . Так, например, при $\Delta T_w = \pm 0.05 T_{peak}$ уже при $DF = R_i T_w = 0.5$ относительная погрешность составляет $\delta_{R_i} = \pm 1$ %. Это означает, что для реализации потенциальных возможностей методов коррекции необходимо предпринимать специ-

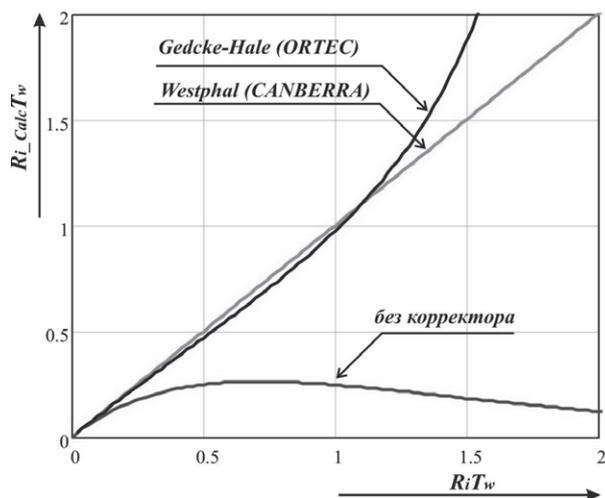


Рис. 5. Вычисляемые нормализованные скорости счета по входу спектрометра R_{i_Calc} в функции от истинной R_i . T_w - длительность по основанию импульсов на входе ADC

альные схемные меры для точного измерения в широком диапазоне амплитуд длительности спектрометрических импульсов, в т.ч. многократно наложенных.

Отечественные разработки $LaBr_3$ -спектрометров УДС- ГЦА – В380

До недавнего времени существовал только один российский производитель спектрометров с $LaBr_3$ -детекторами – НПЦ “Аспект” (г. Дубна). Структура спектрометра УДС- ГЦА – В380 приведена на рис. 6 [14].

Судя по всему, в УДС-ГЦА–В380 предполагается, что кристалл сцинтиллятора и светодиод находятся в термодинамическом равновесии⁴ и по показаниям температурного сенсора

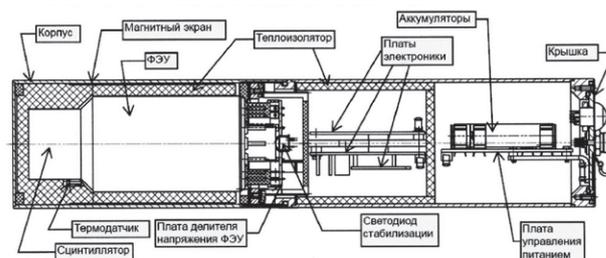


Рис. 6. Структура спектрометра УДС- ГЦА – В380

на сцинтилляторе подстраивается амплитуда LED-вспышек. Вполне вероятно, что на рис. 6 просто не показан фотодиод в системе стабилизации спектрометра и система стабилизации аналогична той, которая приведена на рис. 4.

Характеристики УДС- ГЦА – В380 помещены в табл. 3 [14].

СТАРК-01

К настоящему времени началось опытно-промышленное производство и завершается сертификация портативного $LaBr_3$ -спектрометра СТАРК-01, ориентированного на применение в особо тяжелых условиях как по условиям окружающей среды (температурный диапазон, агрессивная среда), так и по статистической нагрузке. В первую очередь это атомные электростанции (АЭС) и прилегающие к ним территории.

Спектрометр выполнен в виде герметизированного тонкостенного цилиндра из нержавеющей стали (для простоты дезактивации и устойчивости к агрессивным средам). Внутри размещены $LaBr_3$ -кристалл $\varnothing 38 \times 38$ мм (возможны и размеры $\varnothing 51 \times 51$ мм); фотоумножитель с делителем; модуль питания с высоковольтным

Таблица 3

Характеристики портативного $LaBr_3$ -спектрометра УДС- ГЦА – В380

Наименование	Значение, описание
Кристалл	$\varnothing 38 \times 38$ мм (Saint-Gobain)
Диапазон энергий	50 КэВ ÷ 3.0 МэВ
Разрешение $h_{662 \text{ КэВ}}$	$\leq 3.5 \%$
Температурная нестабильность преобразования $\Delta G_{conv} / G_{conv}$	$\leq 0.1 \%$ /°C в диапазоне $DT = +5 \div +40$ °C
Метод стабилизации детектора	LED +TS
Процессор детекторных импульсов	Цифровой; WF-”Трапеция”; $T_{rise} = 0.8$ мкс, $T_{Top} = 0.2$ мкс
Разрешающее время по наложениям T_{res}	нет данных
$R_{in \text{ max}}$	≥ 250 КГц
$R_{out \text{ max}}$	-
$\Delta \eta_{662 \text{ КэВ}} / \eta_{662 \text{ КэВ}}$ при $R_{in} = R_{in \text{ max}}$	$\leq 15\%$
$\Delta E_{662 \text{ КэВ}} / E_{662 \text{ КэВ}}$ при $R_{in} = R_{in \text{ max}}$	$\leq 1\%$
Корректор просчетов	нет данных
Массогабаритные показатели	$\varnothing 79 \times 390$ мм; 1.7 кг

Примечание: TS – температурный сенсор на кристалле.

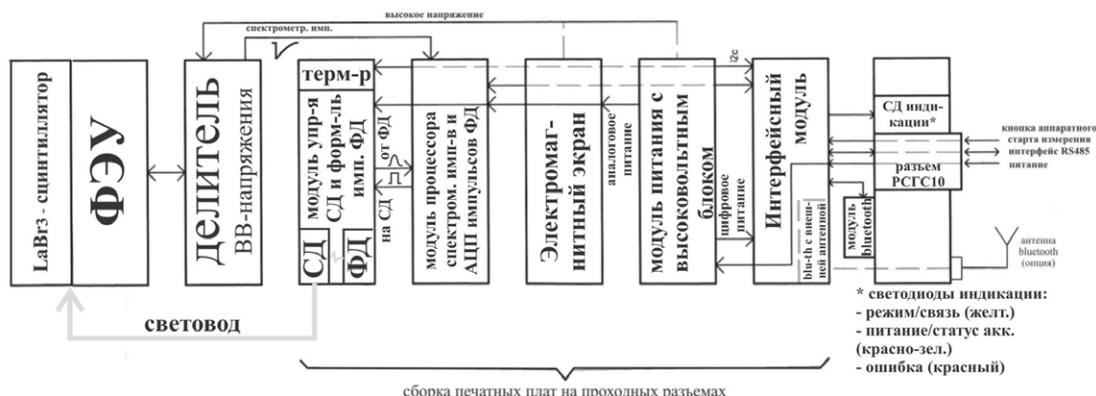


Рис. 7. Структура спектрометра СТАРК-01

блоком; системы стабилизации светодиода и спектрометра в целом и интерфейс (рис. 7). На задней крышке размещены светодиоды индикации и герметичный разъем, через который подключаются аккумулятор (МАКІТА)/конвертор внешнего питания (+9 ÷ +36 В ⇒ 14В) и кнопка аппаратного старта/кабель RS485. Внешний вид “СТАРК-01” в полевом варианте показан на рис. 8. Для работы в удаленном стационарном режиме ручка с аккумулятором снимается, а к разъему на задней стенке корпуса подключается конвертор питания, через который осуществляется связь по RS485.

При разработке СТАРК-01 мы постарались учесть опыт других разработчиков и внедрить свои самые последние разработки.

Схема стабилизации спектрометра выполнена в соответствии с коррективами, приведенными на рис. 4. Нами применен синий светодиод ($\lambda \approx 450$ нм), что в соответствии с графиком на рис. 3 обеспечивает высокую степень стабилизации LED-вспышек с помощью фотодиода. Форма LED-вспышки – прямоугольная с длительностью ≈ 50 нс. Относительно большое время квазигауссова формирования в каналах PhD и PMT ($\tau_{sh} = 120$ нс; $T_{peak} = 600$ нс; $T_w = 1800$

нс) делает сформированные LED-импульсы неотличимыми от “ γ -импульсов» и это позволяет работать при высоких частотах повторения LED-вспышек ($f_{LED} \geq 1$ КГц). Такой режим стабилизации обеспечивает отслеживание достаточно быстро изменяющихся условий, особенно по загрузке.

Для СТАРК-01 специально разработан полнофункциональный процессор спектротрических импульсов с цифровым управлением коэффициентом преобразования. Ранее разработанные нами DBLS, PUI и LTC, входящие в состав PSI, обеспечивают допустимые статистические загрузки по входу свыше 10^6 с⁻¹. Ограничивающим элементом в данном применении выступает фотоумножитель. Так, например, уже при загрузке $R_i \approx 750 \times 10^3$ 1/с, создаваемой источником ¹³⁷Cs, коэффициент преобразования PMT возрастает на 25%. Это отражается в смещении влево пика “PMT Gain Control” (и наглядно представлено на спектрах, приведенных на рис. 9).

Гарантированные на сегодняшний день характеристики СТАРК-01 приведены в табл. 4.

Заключение

Работы по созданию портативного LaBr₃-спектрометра будут продолжены. В основном они коснутся следующих проблем, не нашедших пока своего решения:

1. При условии идеальности элементов, входящих в обе системы стабилизации (LED и PMT) и корректного применения “табличного” метода стабилизации кристалла, все температурные уходы должны быть исчезающе малыми. На практике это не так. Остаются проблемы обеспечения постоянства разделения света между PMT и PhD во всем диапазоне температур. В настоящее время в зависимости от типа LED получаемые значения $\Delta G_{conv} / G_{conv}$ варьируются от 0.075 до 0.02 %/°C (исследованы около десятка типов). Наилучшие результаты достигаются с LED, имеющими широкую диаграмму направленности или диффузное рассеяние света. Кроме того, нами обнаружено, что имеется темпе-



Рис. 8. СТАРК-01 с зарядным устройством

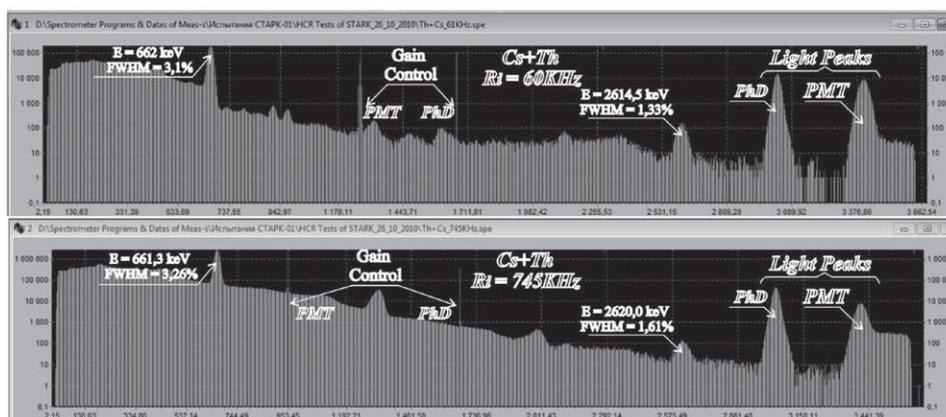


Рис. 9. Исследовательские спектры, снятые со СТАРК-01

Таблица 4

Характеристики портативного LaBr₃- спектрометра СТАРК-01

Наименование	Значение, описание
Кристалл	∅38x38 мм или ∅51x51мм (Saint-Gobain)
Диапазон энергий	50 КэВ ÷ 3.0 МэВ
Разрешение $\eta_{662 \text{ КэВ}}$	$\leq 3.5 \%$
Температурная нестабильность преобразования $\Delta G_{\text{conv}} / G_{\text{conv}}$	$\leq 0.1 \%$ /°C в диапазоне температур $\Delta T = -40 \div +60 \text{ }^\circ\text{C}$
Метод стабилизации детектора	LED +TS
Процессор детекторных импульсов	WF - квазигауссиан; $T_{\text{peak}} = 0.6 \text{ мкс}$, $T_{\text{w}} = 1.8 \text{ мкс}$
Разрешающее время по наложениям T_{res}	50 нс
$R_{\text{in_max}}$	$\geq 500 \text{ КГц}$
$R_{\text{out_max}}$	$\geq 200 \text{ КГц}$
$\Delta \eta_{662 \text{ КэВ}} / \eta_{662 \text{ КэВ}}$ при $R_{\text{in}} = R_{\text{in_max}}$	$\leq 7.5 \%$
$\Delta E_{662 \text{ КэВ}} / E_{662 \text{ КэВ}}$ при $R_{\text{in}} = R_{\text{in_max}}$	$\leq 0.25 \%$
Корректор просчетов	Усовершенствованный "виртуальный генератор"
Массогабаритные показатели	∅70x285 мм (собственно спектрометр); 3 кг с ручкой, аккумулятором и КПК

ратурная зависимость спектра высвечивания LED. Реакции PMT и PhD на изменение спектра высвечивания LED различны и это приводит к ухудшению стабилизации спектрометра.

2. Существует проблема расширения диапазона энергий до необходимых 7÷8 МэВ. Это связано с насыщением тока супербиалкайдного фотокатода, амплитуда которого уже для $E_{\gamma} = 1 \text{ МэВ}$ составляет 220 нА. В публикациях [15,16] сотрудников HAMAMATSU (разработчиков биалкайдных фотокатодов) отмечается, что ток насыщения при комнатной температуре для биалкайдных (R6231-01), супер биалкайдных (R6231-100) и ультра биалкайдных фотокатодов составляет $\approx 300 \text{ нА}$. Это означает, что в спектрометре с кристаллом LaBr₃(Ce) уже при энергиях чуть выше энергий ⁶⁰Co (1.17 и 1.33 МэВ) обязана наблюдаться нелинейность. Выход из положения - разработка системы фотодиодного преобразования сцинтилляционных вспышек в электрические импульсы.

Авторы выражают свою признательность коллегам из компаний РАДИКО и СТАРК, особенно Н.Г. Швалеву, за постановку задачи и конструктивное сотрудничество при проведении разработки и исследований спектрометра, а также Л.И. Подногиной за качественно выполненные радиомонтажные работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Loef van E.V.D., Dorenbos P., Eijk van C.W.E. High-energy-resolution scintillator: Ce³⁺ activated LaBr₃ // Applied Physics Letters. 2001. V. 79, № 10. P. 1573-1575.
2. Uranium Enrichment Assay with a LaBr₃(Ce) Scintillation Detector / Ottmar H. [et al.] // ESSADA BULLETIN. 2008. № 38. P. 32-39.
3. A Portable Gamma-Ray Spectrometer Using Compressed Xenon / Mahler G.J. [et al.] // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1998. V. 45. № 3. P.1029-1033.
4. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement (3-rd Edition): John Wiley & Sons, Inc. 2000. 802 p.

5. Stabilized Scintillation Detector for Radiation Spectroscopy and Method / Jordanov V.T., Kaster M. USA Patent 7,005,646 B1. Filed Jul. 24, 2003. Date of Patent Feb. 28, 2006.
6. Pausch G., Stein J., Teofilov N. Stabilizing Scintillation Detector System by Exploiting the Temperature Dependence of the Light Pulse Decay Time // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2005. V. 52, № 5. P.1849-1855.
7. Stabilizing Scintillation Detector Systems with Pulsed LEDs: A method to Derive the LED Temperature from Pulse Height Spectra / Sauche K. [et al.] // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2005. V. 52, № 6. P.3160-3164.
8. Anghinofi M., Castoldi M. A LED System to Control the Gain Stability of NaI Detectors // Nuovo Cimento. 1985. V. 88A, № 3. P. 257-264.
9. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Ю.К. Акимов и [др]. М.: Энергоатомиздат, 1989. 344 с.
10. Игнатъев О.В. Быстродействующие спектрометры с полупроводниковыми детекторами рентгеновского и гамма-излучений. Дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург. 2010. 212 с.
11. Стабилизатор базовой линии спектрометра / О.В.Игнатъев, С.В.Дудин, А.Д. Пулин / Патент РФ RU 2085967 С1. Оpubл. 27.07.1997, Бюл. № 21.
12. Method of and system for determining a spectrum of radiation characteristics with full counting-loss compensation / Westphal G.P. USA Patent 4,476,384. Filed Aug 31 1981.. Date of Patent Oct. 9, 1984.
13. Jenkins R., R.W., Gedcke D. Quantitative X-Ray Spectrometry. NY:Marcel Dekker, Inc., 1981. 320 p.
14. [Электронный ресурс]: [http://www. aspect.dubna.ru/new/](http://www.aspect.dubna.ru/new/) Сайт НПЦ "Аспект" (дата обращения 20.10.2010).
15. Suyama M., Nakamura K.Recent progress of photocathodes for PMTs // Proceedings of the International Workshop on New Photon Detectors. Japan, June 2009, PoS(PD09)013. [Электронный ресурс]: [http://www. pos.sissa.it/](http://www.pos.sissa.it/). (дата обращения 22.10.2010).
16. Latest bialkali photocathode with ultra high sensitivity / Nakamura K. [et al.] // Nucl. Instrum. and Meth. 2010. V. 623A. P. 276-278.

THE PORTABLE SCINTILLATION GAMMA-SPECTROMETER STARK-01

M.P.Belousov¹, M.A. Gorbunov², S.V. Dudin¹, O.V. Ignatyev¹, S.G. Morozov², A.A. Pulin²

¹*Ural Federal University, 620002, Mira st., 19, Ekaterinburg, RF
ovi@dpt.ustu.ru*

²*"ATOM Electronics" Ltd., 620041, Uralskaya st., 77/120, RF*

The fundamental advantages of $LaBr_3:Ce$ -scintillators are analysed. The comparative analysis of portable γ -spectrometers with the mentioned crystal is carried out, thus the special attention is given applied systems of stabilisation of a conversion coefficient. Results of working out of spectrometer STARK-01 oriented on application on the nuclear power station are presented.

Keywords: $LaBr_3:Ce$, γ -spectrometer, stabilization system, high count rate, the energy resolution.