

РАЗДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯТОРА $CLYC:Ce$ С ПОМОЩЬЮ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ СБОРА ЗАРЯДА

Лагуцкий И.А., Пигаль Р.В., Паскробка Г.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Давыдов М.В. – канд.техн.наук, доцент, первый проректор БГУИР

Аннотация. Рассмотрен метод разделения импульсов нейтронного и гамма-излучения сцинтиллятора $CLYC:Ce$ с помощью оценки скорости сбора заряда. Проведено моделирование рассматриваемого метода с использованием аппроксимированных импульсов с целью оценки возможности применения в устройствах детектирования нейтронного и гамма-излучения.

Ключевые слова: гамма-излучения, нейтронное излучение, разделение импульсов, сбор заряда, сцинтиллятор $CLYC:Ce$

Введение. Современные тенденции развития инструментов радиационного контроля, которыми пользуются различные службы безопасности требуют миниатюризации, повышения автономности и увеличения эффективности работы приборов.

Примером повсеместно используемых устройств радиационного контроля являются персональные радиационные детекторы (ПРД) и спектрометрические персональные радиационные детекторы (СПРД). Используемые в них нейтронные и гамма-каналы должны позволять с высокой точностью определять наличие различных источников ионизирующего излучения. Однако зачастую нейтронный и гамма-каналы выполнены в подобных устройствах отдельно, что приводит к усложнению прибора, увеличению его габаритов, повышению энергопотребления.

Сцинтиллятор $CLYC:Ce$ (Cs_2LiYCl_6 активированный Ce) является перспективным для применения в такого рода детекторах по нескольким причинам [1]:

- достаточная чувствительность к гамма-излучению;
- наличие чувствительности к тепловым нейтронам (благодаря наличию 6Li в составе);
- высокое разрешение в гамма-спектрометрическом канале (до 4,5 % для энергии 662 кэВ), что позволяет значительно ускорить идентификацию в СПРД;
- возможность достаточно четко разделить импульсы от нейтронов и гамма-квантов;
- возможность увеличения чувствительности к нейтронному излучению за счет обогащения 6Li (вплоть до 95%), что повышает чувствительность к нейтронам приблизительно в 4 раза.

Основная часть. Особенностью применения литийсодержащих кристаллов в задачах отдельного детектирования гамма-излучения и нейтронов является то, что сцинтилляции, вызываемые данными частицами, имеют различную форму, а именно отличается скорость нарастания фронта импульса и соотношение экспоненциальных составляющих импульсов [2]. Кристалл $CLYC:Ce$, который имеет в своем составе литий, не является исключением (рисунок 1). Можно заметить, что для нейтронного излучения скорость нарастания фронта значительно меньше и большая часть заряда сосредоточена «хвосте» импульса.

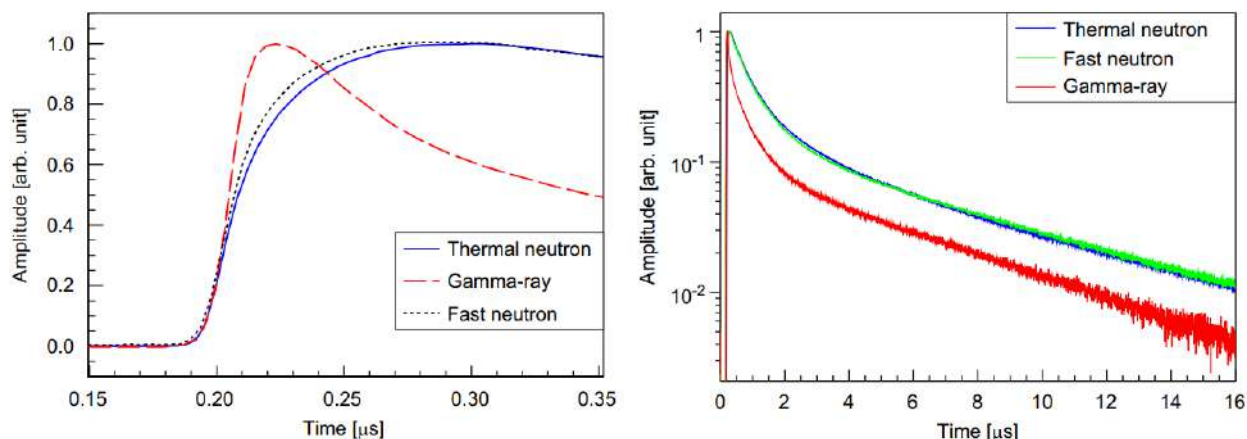


Рисунок 1 – Вид импульсов от нейтронного и гамма-излучения на сцинтилляторе CLYC:Ce

Благодаря столь характерным различиям в форме импульсов имеется возможность качественно определять тип частицы, которая вызвала сцинтилляцию. Разделение импульсов в большинстве случаев производится с использованием метода оценки скорости сбора заряда. Суть метода заключается в том, что собираемый с фотоэлектронного умножителя заряд интегрируется в двух окнах – коротком и длинном. Заряд Q_{prompt} , определяемый в коротком окне, вычисляется с начала импульса. Заряд длинного окна, он же «задержанный» заряд $Q_{delayed}$, вычисляется с момента окончания короткого окна. Зная эти значения, можно рассчитать PSD -фактор (*Pulse-Shape Discrimination*), который в большинстве случаев определяется следующим образом:

$$PSD = \frac{Q_{prompt}}{Q_{delayed}}. \quad (1)$$

Значение PSD будет характеризовать скорость сбора заряда, т.е. форму сцинтилляции, и отличаться для импульсов гамма-излучения и нейтронов. В ходе оптимизации подбираются такие длины окон, чтобы для различных видов излучения разница PSD была максимальной.

Согласно имеющимся данным оптимальными размерами окон являются 104 нс и 680 нс [2]. При этом для работы спектрометра так же необходимо вычислять заряд Q_{total} , который соответствует энергии частицы, которая вызвала сцинтилляцию. Данный заряд вычисляется с момента начала импульса, до его окончания, которое обычно составляет 15 мкс для кристаллов *CLYC:Ce*. Таким образом требуется вычисление трех составляющих в разных окнах, что приводит к увеличению необходимых вычислений и дополнительному расходу памяти в портативных устройствах. При этом исследования показывают, что PSD -фактор чрезвычайно чувствителен к выбору короткого окна, а выбор длинного окна уже в меньшей мере влияет на качество разделения различных видов излучения.

Таким образом с целью оптимизации вычислительных операций в мобильных устройствах удобнее рассчитывать PSD -фактор с использованием только параметров полного заряда и заряда в коротком окне:

$$PSD = \frac{Q_{prompt}}{Q_{total}}. \quad (2)$$

Данный вариант расчета имеет определенные недостатки, так как значение короткого окна содержится как в числителе, так и в знаменателе, что приводит к загромождению результата и снижению контрастности (различий в значениях PSD для гамма-квантов и нейтронов). Дальнейшее моделирование показало, что влияние данных факторов ухудшило возможности по разделению импульсов в области высоких значений заряда, в которой происходит

регистрация нейтронов. Несмотря на свои недостатки, применение формулы 2 дает такое преимущество, как ограничение диапазона значений. При использовании в знаменателе значения полного заряда PSD -фактор всегда находится в пределах от 0 до 1. В случае же вычитания в знаменателе значения короткого окна, значения PSD могут быть значительно больше 1 для сигналов малой амплитуды, когда происходит неполное интегрирование заряда в коротком окне из-за ошибки определения начала импульса.

Основываясь на экспериментальных данных и данных исследований [2-4] была произведена аппроксимация импульсов нейтронного и гамма-излучения для отработки алгоритма разделения импульсов нейтронного и гамма-излучения.

Аппроксимированный сигнал представляет из себя сумму нескольких импульсов с разными постоянными времени и соотношением амплитуд. Для сцинтиллятора CLYC:Ce аппроксимация проводилась по следующей формуле:

$$S(t) = k \cdot \sum_{i=1}^N (A_i \cdot \exp(-t/\tau_i)) \cdot (1 - A_i \cdot \exp(-t/\tau_i)), \quad (3)$$

где k – коэффициент, отвечающий за амплитуду сигнала;

N – количество аппроксимирующих импульсов;

A_i – относительный вклад i -го импульса в сигнал;

τ_i – постоянная времени i -го импульса.

Значения вкладов импульсов и постоянные времени, используемые при аппроксимации представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов аппроксимации

№ импульса	Относительный вклад (A_i)		Постоянная времени (τ_i), нс	
	Гамма-квант	Нейтрон	Гамма-квант	Нейтрон
1	150	0	2	2
2	730	0	30	30
3	85	85	600	570
4	22,8	22,8	4820	4490
5	5,5	5,5	7500	7500

На рисунке 2 представлено сравнение аппроксимированного и реального импульсов гамма-излучения.

С использованием данных аппроксимации было произведено моделирование алгоритма разделения импульсов. С целью имитации реальных импульсов сцинтиллятора, генерируемые импульсы имели случайные вариации в соотношении амплитуд и постоянных времени экспоненциальных составляющих импульсов.

Вычисление PSD -фактора производилось по формуле 2. Результаты, полученные в ходе аппроксимации и вычисления PSD -факторы сопоставимы с результатами исследований [2, 3] с учетом поправки на идеализированную форму импульса. На рисунке 3 представлен полученный двумерный график PSD -фактора, в котором интенсивность точки соответствует количеству зарегистрированных импульсов с данным значением заряда и PSD -фактора.

Как видно из графика, примененный метод расчета PSD -фактора показывают хорошие результаты и можно с высокой достоверностью разделять импульсы от гамма-излучения и нейтронов с помощью двух параметров: выбора окна PSD -фактора и окна энергии (суммарного заряда). Согласно полученным результатам, можно выделить следующие границы:

– нейтронному излучению соответствует область со значениями $PSD < 0,4$ и значением заряда 750-1050;

– Гамма-излучение находится во всем диапазоне значений заряда при $PSD > 0,5$.

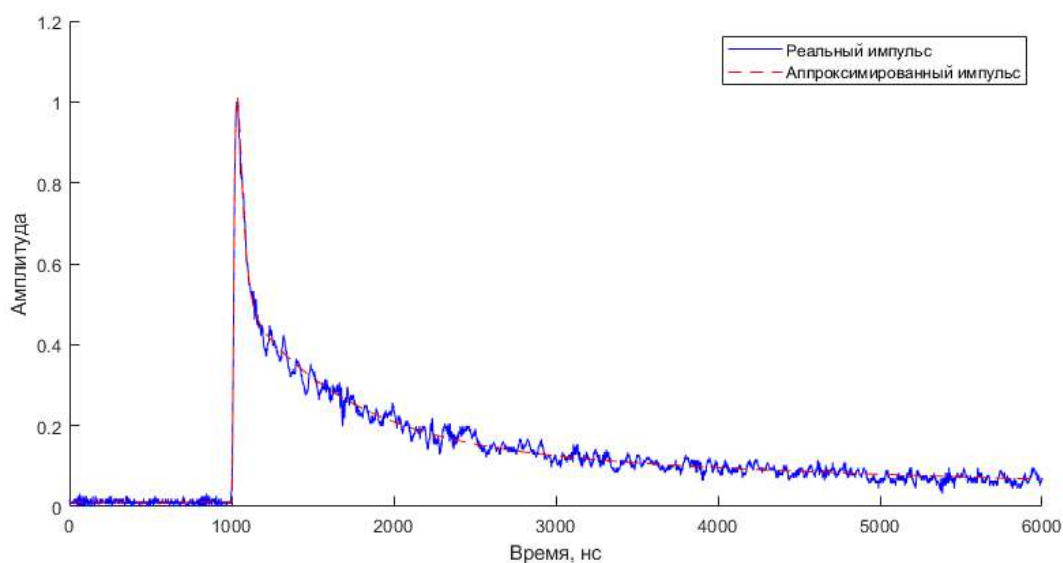


Рисунок 2 – Вид реального и аппроксимированного гамма-импульса сцинтиллятора *CLYC:Ce*

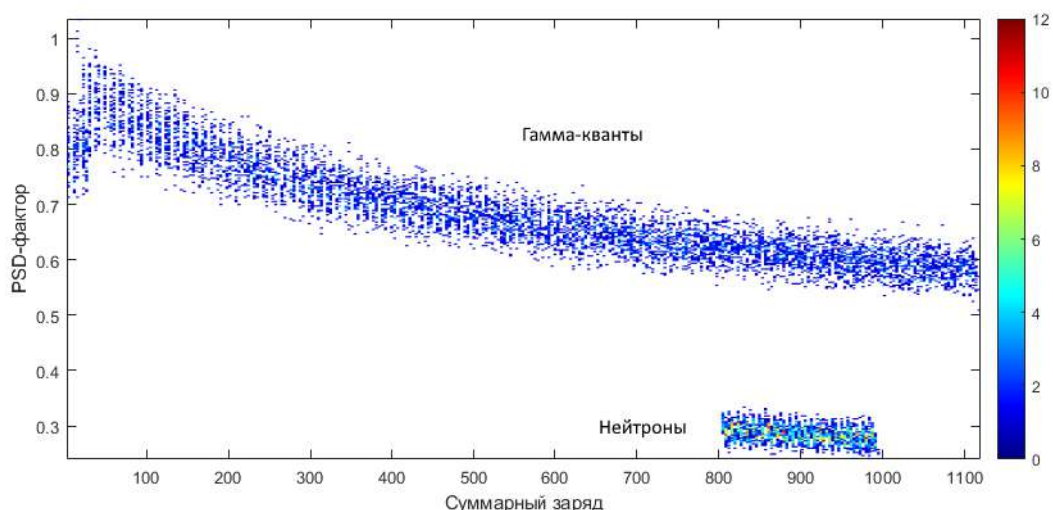


Рисунок 3 – Двумерный график *PSD*-фактора

Совокупность двух факторов необходима для отсеечения искаженных импульсов, которые могут быть распределены в пределах всего графика. Искажения могут возникать из-за случайного наложения импульсов, неправильного определения его начала (слишком высокий/низкий уровень определения), собственного шума устройства и других факторов, которые в данной модели не учитывались.

Заключение. Применение сцинтиллятора *CLYC:Ce* является перспективным для решения задачи отдельного детектирования гамма-излучения и нейтронов. Основной проблемой, которую требуется решить при проектировании устройств радиационного контроля с использованием данного сцинтиллятора, является разделение импульсов от различных видов ионизирующего излучения. В большинстве случаев для разделения импульсов используется метод оценки скорости сбора заряда. Суть метода заключается в анализе заряда, собираемого в двух временных окнах и определении соотношения их.

Одной из особенностей вычисления *PSD*-фактора является то, что для его оценки используются два дополнительных временных окна для его вычисления, что требует проведения дополнительных вычислений. В практических задачах это может привести к

значительному увеличению вычислительных ресурсов. В связи с этим рассмотрена возможность применения упрощенного метода расчета PSD -фактора с использованием только одного окна и значения полного заряда. Оценка эффективности производилась с использованием аппроксимированной модели импульса сцинтиллятора. Полученные результаты сопоставимы с проанализированными теоретическими данными, что говорит о возможности применения данных моделей импульсов и метода расчета при дальнейшем проектировании блоков детектирования и разработке алгоритма обработки сигналов.

Список литературы

1. Лагуцкий, И. А. Применение кристаллов $CLYC:Ce$ для совместного детектирования нейтронного и гамма-излучения / И. А. Лагуцкий, Р. В. Пигаль // Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень : матеріали II Міжнародної студентської наукової конференції, Кременчук, 8 жовтня 2021 р. : в 2 т. / Молодіжна наукова ліга. – Вінниця, 2021. – Т. 2. – С. 106–107.
2. Pulse-shape analysis of $CLYC$ for thermal neutrons, fast neutrons, and gamma-rays / N. D'Olympia [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2013. – Vol. 714. – P. 121-127. DOI: 10.1016/j.nima.2013.02.043
3. Pulse shape discrimination of $CLYC$ scintillator coupled with a large $SiPM$ array / N. Dinar [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. – Vol. 935. – P. 35-39. DOI: 10.1016/j.nima.2019.04.099
4. Лагуцкий, И. А. Метод разделения импульсов нейтронного и гамма-излучения при использовании сцинтиллятора $CLYC(Ce)$ / Лагуцкий И. А., Антонов В. И., Комар Д. И. // Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС = Instrumentation and control systems for NPP and TPP : материалы II Международной научно-технической конференции, Минск, 27-28 апреля 2021 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2021. – С. 132–135.

UDC 539.16.08

SEPARATION OF NEUTRON AND GAMMA RADIATION PULSES OF THE $CLYC:CE$ SCINTILLATOR BY MEANS OF CHARGE COLLECTION RATE ESTIMATION

Lagutskiy I.A., Pigal R.V., Paskrobka G.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Davydov M.V. – PhD, assistant professor, first vice-rector of BSUIR

Annotation. The method of separation of neutron and gamma radiation pulses of scintillator $CLYC:Ce$ with the help of charge collection rate estimation is considered. Simulation of the considered method using approximated pulses is conducted to assess the possibility of application in neutron and gamma radiation detection devices.

Keywords: gamma-radiation, neutron radiation, pulse separation, charge collection, $CLYC:Ce$ scintillator