

УДК 539.1.075.3

ЛИНЕЙНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ ДЕТЕКТОРА  
НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 

© 2013 г. Ю. А. Трофимов, Е. Э. Лупарь, В. Н. Юров

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 13.04.2012 г.

Представлены результаты исследования линейности шкалы детектора на основе  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  в диапазоне энергий 0.6–11 МэВ при использовании различных схем делителей напряжения ф.э.у. Для уменьшения нелинейности предложена клиновидная схема делителя напряжения.

DOI: 10.7868/S0032816213010357

## ВВЕДЕНИЕ

Неорганический сцинтиллятор на основе кристалла бромида лантана ( $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ) имеет ряд преимуществ перед широко применяющимися сцинтилляционными кристаллами, такими как  $\text{NaI}(\text{Tl})$  и  $\text{CsI}(\text{Tl})$ . Достоинствами данного сцинтиллятора являются высокий световыход (63 фотон/кэВ), хорошее энергетическое разрешение (~3% на линии 662 кэВ), малое время высвечивания (16 нс) [1] и слабая температурная зависимость (<0.01%/градус) [2], а также достаточно высокие плотность (5 г/см<sup>3</sup>), эффективный атомный номер ( $Z = 48$ ) и радиационная стойкость [3, 4]. К недостаткам  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  можно отнести высокую собственную активность (из-за присутствия радиоактивных изотопов <sup>138</sup>La и <sup>227</sup>Ac) [5, 6], гигроскопичность и высокую стоимость.

Однако на практике при регистрации частиц с энерговыделением в кристалле, превышающим несколько мегаэлектронвольт, большой световыход  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  в сочетании с малым временем высвечивания приводит к образованию очень интенсивной сцинтилляционной вспышки, которая в свою очередь может вызвать насыщение фотоприемника и, как следствие, нелинейность энергетической шкалы детектора. Это может быть обусловлено следующими причинами.

Во-первых, из-за очень большого светового потока может происходить насыщение фотокатода: из-за конечного сопротивления фотокатода положительный заряд, образующийся на нем в результате вылета фотоэлектронов, не успевает стекать, искажая электрическое поле и приводя к уменьшению эффективности собирания фотоэлектронов на первый динод ф.э.у. [7].

Во-вторых, слишком большой ток через ф.э.у. может приводить к перераспределению потенциалов на его делителе напряжения и, как следствие, к изменению разностей потенциалов меж-

ду динодами, а также последним динодом и анодом. Считается, что максимальный ток через ф.э.у. не должен превышать 10% от тока через делитель напряжения ф.э.у. [7].

В-третьих, при протекании через ф.э.у. импульсного тока большой амплитуды между последними динодами, а также последним динодом и анодом ф.э.у. возникают объемные заряды, которые препятствуют ускорению электронов и снижают коэффициент вторичной эмиссии и эффективность сбора электронов на диноды и анод. Это также приводит к уменьшению амплитуды токовых импульсов на выходе ф.э.у. [7, 8].

Проблема нелинейности энергетической шкалы чаще всего устраняется двумя способами: снижением напряжения питания ф.э.у. или использованием нестандартных схем делителей напряжения питания ф.э.у. (далее – делителей). Снижение напряжения питания приводит к уменьшению коэффициента усиления ф.э.у. и, как следствие, снижению анодного импульсного тока, что расширяет диапазон линейности энергетической шкалы в область больших энергий.

Также используются различные модификации схем делителей ф.э.у. Так, в работе [9] для детектора на основе  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и ФЭУ-184 использовался делитель с системой емкостей, обеспечивающих постоянство разностей потенциалов на динодах в момент формирования импульса тока на выходе ф.э.у. В работах [7, 10] коэффициент усиления ф.э.у. уменьшили, снимая сигнал не с анода, а с одного из динодов, при этом для лучшего сбора заряда все последующие диноды находились под таким же потенциалом, что и динод, предшествующий сигнальному.

Еще одним методом является использование схемы делителя с увеличенными разностями потенциалов между последними динодами и анодом (так называемая клиновидная (tapered) схема),

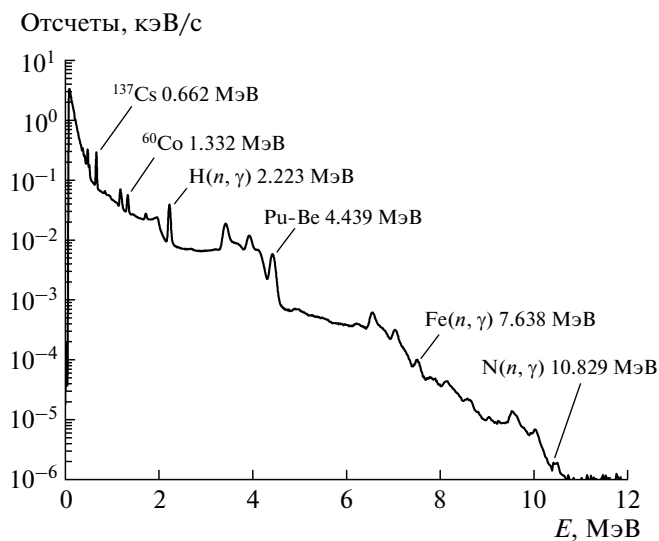


Рис. 1. Спектр излучения, генерируемого установкой.

что приводит к возрастанию скорости рассасывания объемных зарядов, образующихся в ф.э.у. при протекании сильных импульсных токов. В то же время клиновидная схема делителя дает меньший коэффициент усиления ф.э.у. по сравнению со схемой с равномерным распределением потенциалов при одинаковом напряжении питания. Клиновидная схема позволяет существенно расширить линейный диапазон детектора [8].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В данной работе для измерений использовалась детекторная сборка из кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  цилиндрической формы  $\varnothing 25 \times 25$  мм, выращенного в Институте физики твердого тела (ИФТТ) РАН, и ф.э.у. R6233-100 с SBA-фотокатодом фирмы Hamamatsu. Достоинством такого фотокатода является повышенная квантовая эффективность ( $\sim 34.5\%$ ) на длине волны 380 нм [11], соответствующей максимуму интенсивности в спектре сцинтилляции  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ . Анодный выход ф.э.у. непосредственно соединялся с процессором импульсных сигналов SBS-77 производства компании “Грин Стар” [12]. Процессор выполнял функции

усилителя-формирователя и амплитудно-цифрового преобразователя.

Для исследования характеристик детектора использовался ряд  $\gamma$ -линий в диапазоне 0.6–11 МэВ, полученных как от радионуклидных источников, так и методом нейтронной активации. При захвате тепловых нейтронов ядра атомов, снимая возбуждение, излучают  $\gamma$ -кванты. При этом возникает линейчатое излучение, энергия линий которого зависит от химического состава облучаемого вещества [13, 14].

В качестве источника нейтронов в установке использовался (Pu–Be)-источник, дающий поток  $\sim 10^6$  нейтронов/с. Для замедления нейтронов до тепловых энергий (Pu–Be)-источник был окружен парафиновыми блоками. Для защиты персонала от нейтронного излучения вся сборка была окружена полиэтиленовыми защитными блоками NEUTROSTOP с 5%-ным содержанием бора.

Спектр излучения установки содержал следующие линии: активационные  $\gamma$ -линии с энергиями 7.6 и 10.8 МэВ, возникающие при взаимодействии нейтронов соответственно с ядрами атомов железа и азота, входящего в состав карбамида  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  (массовая доля азота 46%); линию 2.2 МэВ, образующуюся при захвате тепловых нейтронов ядрами водорода, содержащегося в парафине и полиэтилене; углеродную линию 4.4 МэВ (собственная  $\gamma$ -линия (Pu–Be)-источника). Для калибровки детектора в области низких энергий использовались радионуклидные источники  $^{137}\text{Cs}$  (линия 0.662 МэВ) и  $^{60}\text{Co}$  (линии 1.17 и 1.33 МэВ) из набора ОСГИ. На рис. 1 приведен спектр излучения установки, измеренный с помощью описываемого детектора.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследовались три делителя напряжения ф.э.у.: стандартный, рекомендуемый производителем ф.э.у. [11], и два клиновидных – тип А с увеличенными по сравнению со стандартной схемой номиналами двух последних резисторов в цепи делителя и тип Б с увеличенными номиналами шести последних резисторов. Принципиальная схема делителей показана на рис. 2. В таблице

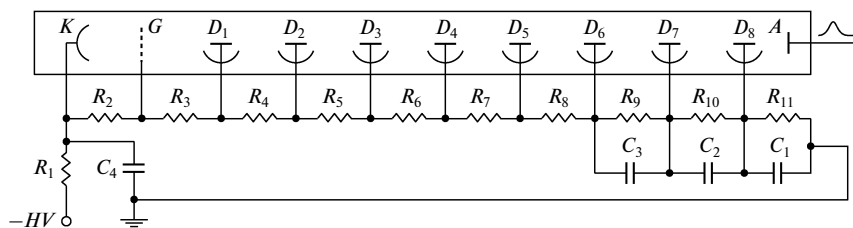


Рис. 2. Принципиальная схема исследованных делителей напряжения питания ф.э.у.  $D$  – диоды;  $K$  – катод;  $A$  – анод;  $G$  – фокусирующий электрод.

Соотношения номиналов резисторов исследовавшихся делителей

	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$	$R_{11}$
Стандартный делитель	2.1	2.1	1	1	1	1	1	1	1	1
Клиновидный делитель:										
тип А	2.1	2.1	1	1	1	1	1	1	1.5	2
тип Б	2.1	2.1	1	1	1.2	1.4	1.4	1.5	2.1	1.9

приведены соотношения номиналов резисторов всех трех схем, за единицу взято сопротивление, равное 330 кОм.

Проведенные измерения показали, что коэффициент усиления ф.э.у. R6233-100 с делителем типа А ниже по сравнению со стандартным делителем на  $45 \pm 5\%$ , а по сравнению с делителем типа Б – на  $10 \pm 2\%$  при одинаковом напряжении питания.

Согласно [8], коэффициент усиления ф.э.у. пропорционален произведению коэффициентов размножения электронов  $\delta$  на каждом из диодов, которые в свою очередь зависят от ускоряющей электроны междинодной разности потенциалов как

$$\delta \sim U^k, \quad (1)$$

где  $k \approx 0.7-0.8$  и определяется структурой и материалом диода.

Нами была получена эмпирическая зависимость коэффициента усиления  $\mu$  ф.э.у. R6233-100 от разностей потенциалов между диодами:

$$\mu \approx (U_2 + U_3)^{0.8}(U_4 U_5 \dots U_{10})^{0.7}U_{11}^{-0.12}, \quad (2)$$

где  $U_2-U_{11}$  – падения напряжения на соответствующих резисторах (см. рис. 2).

Так как на фокусирующем электроде  $G$  не происходит размножения электронов, то первый множитель формулы (2) представляет собой сумму падений напряжений. Второй множитель содержит междинодные падения напряжения, что полностью соответствует данным работы [8]. Третий множитель, отвечающий за промежуток между последним диодом и анодом (так называемая анодная характеристика), справедлив в диапазоне напряжений 80–140 В. Проведенные измерения показали, что анодная характеристика имеет максимум при разности потенциалов  $\sim 50$  В и последующее незначительное снижение с ростом напряжения. Возможно, данное явление вызвано перехватом электронов с предпоследнего диода при повышенном напряжении [15].

Рассчитанные по формуле (2) соотношения коэффициентов усиления ф.э.у. с описываемыми делителями согласуются с приведенными выше результатами измерений. Согласно полученным соотношениям, изменение распределения потенциалов делителя может привести к значительному изменению коэффициента усиления ф.э.у.

На рис. 3 приведены зависимости энергетического разрешения детектора на линии 0.662 МэВ от напряжения питания ф.э.у. для делителей разного типа: 1 – стандартный делитель; 2 – клиновидный делитель типа А; 3 – клиновидный делитель типа Б.

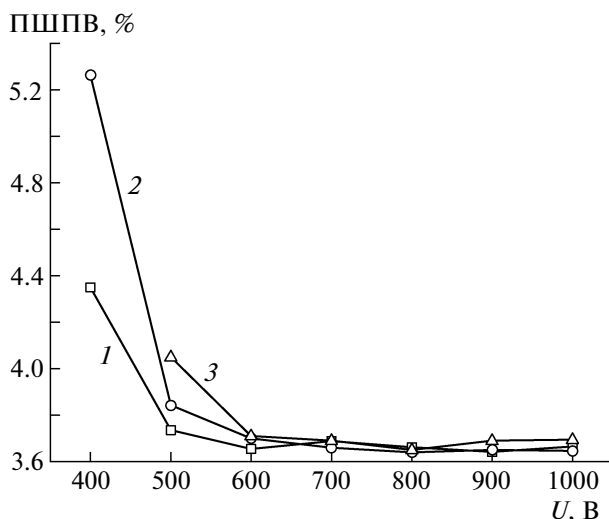


Рис. 3. Зависимости энергетического разрешения детектора на линии 0.662 МэВ от напряжения питания ф.э.у. для делителей разного типа: 1 – стандартный делитель; 2 – клиновидный делитель типа А; 3 – клиновидный делитель типа Б.

Для исследования пропорциональности энергетической шкалы детектора в области высоких энергий при различных напряжениях питания ф.э.у. с делителями разного типа использовались энергетические спектры, полученные с помощью описанной выше установки. Калибровка энергетической шкалы выполнялась по трем относительно малоэнергичным линиям: 0.662, 1.332 и 2.223 МэВ – линейной аппроксимацией, так как в этом диапазоне энергий благодаря малой амплитуде импульсов не наблюдалось нелинейности. Линии более высоких энергий в зависимости от типа делителя и напряжения питания ф.э.у.

могли находиться в нелинейной области шкалы, и по их положению вычислялось отклонение  $\Delta$  от линейности энергетической шкалы:

$$\Delta = \frac{E_{\text{кал}} - E_{\text{таб}}}{E_{\text{таб}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $E_{\text{кал}}$  — энергия линии в полученном спектре, вычисленная по линейной калибровочной зависимости;  $E_{\text{таб}}$  — табличное значение энергии линии, взятое из [13].

На рис. 4 показано отклонение  $\Delta$  от линейности шкалы детектора в зависимости от напряжения питания ф.э.у. для трех линий: 4.4, 7.6 и 10.8 МэВ. С ростом напряжения питания ф.э.у. нелинейность шкалы возрастает для всех трех делителей. Нелинейность возрастает и при увеличении энергии линии. Оба эффекта, очевидно, обусловлены ростом амплитуды токовых импульсов в фотоэлектронном умножителе и наиболее сильно проявляются при использовании стандартного делителя.

Делители типа А и Б демонстрируют схожее поведение во всем диапазоне напряжений. На линии 4.4 МэВ для обоих делителей наблюдается незначительное отклонение от линейности ( $\leq 1\%$ ). На линии 7.6 МэВ для делителя типа А отклонение от линейности примерно в полтора раза больше, чем у делителя типа Б, а на линии 10.8 МэВ — уже почти в два раза. Стандартный делитель при напряжениях до 700 В демонстрирует схожее с делителем типа А отклонение от линейности, однако с увеличением напряжения нелинейность шкалы при его использовании нарастает значительно быстрее, чем у клиновидных делителей. В целом, наименьшую нелинейность в исследуемых диапазонах энергий и напряжений питания ф.э.у. показал делитель типа Б: на линии 10.8 МэВ при напряжении питания 600 В отклонение от линейности составило всего 2.5%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что нелинейность энергетической шкалы детектора не может быть объяснена насыщением фотокаатода ф.э.у., как это сделано, например, в работе [7], поскольку в этом случае изменение распределения потенциалов между динодами ф.э.у. (кроме промежутка между фотокаатодом и первым динодом) не могло повлиять на отклонение от линейности шкалы. У исследованных в работе делителей разности потенциалов на промежутке “фотокаатод—первый динод” несколько различались: у стандартного делителя она максимальна, а у делителя типа Б минимальна. Это означает, что стандартный делитель должен обеспечивать максимальную эффективность сбора электронов на первый динод, а следовательно, обладать наименьшей нелинейностью среди исследованных делителей. Однако результаты из-

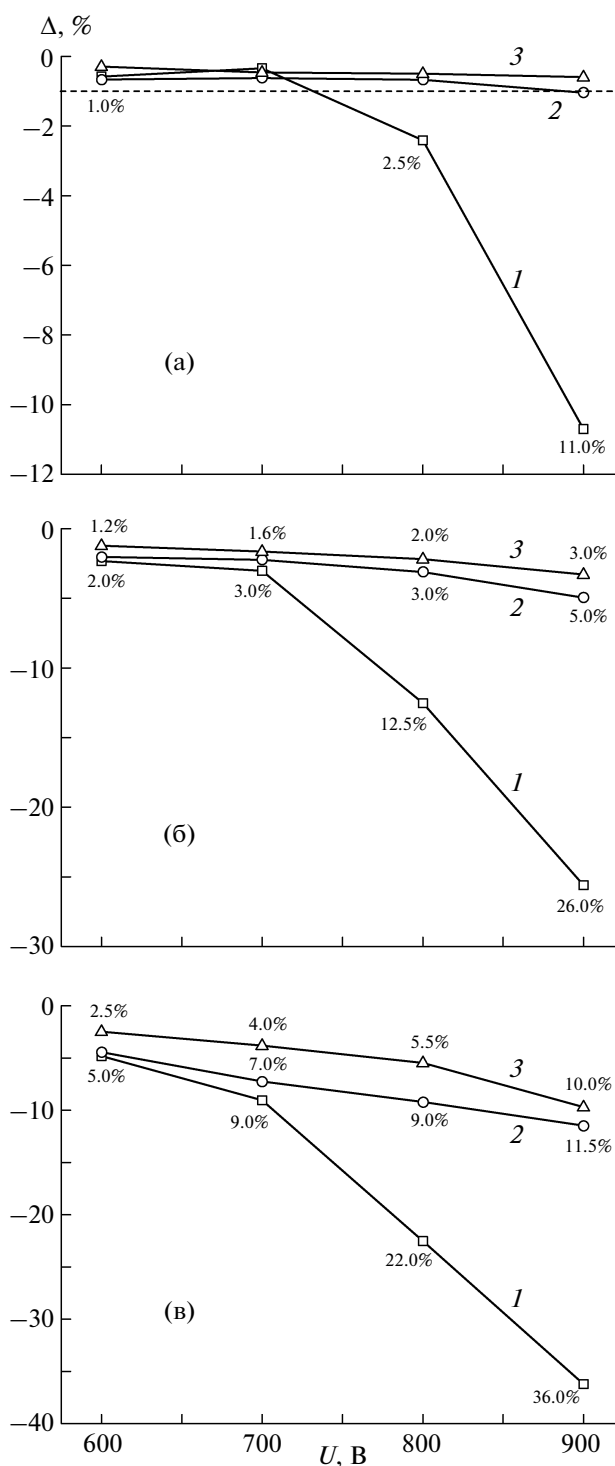


Рис. 4. Отклонение от линейности энергетической шкалы детектора в зависимости от напряжения питания ф.э.у. с делителями разного типа: 1 — стандартный делитель; 2 — клиновидный делитель типа А; 3 — клиновидный делитель типа Б — для линий: а — 4.4, б — 7.6, в — 10.8 МэВ.

мерений показали обратную картину. Несмотря на то что коэффициент усиления ф.э.у. R6233-100 с клиновидным делителем типа А в 1.5 раза мень-

ше, чем у того же ф.э.у. с делителем типа Б (а значит, ток ф.э.у. для делителя типа А меньше, чем для делителя типа Б), последний показал меньшее отклонение от линейности в исследуемом диапазоне энергий при всех напряжениях питания. Если бы наблюдавшаяся нелинейность шкалы детектора была вызвана перераспределением потенциалов делителя из-за слишком большого тока ф.э.у., то использование делителя с меньшим коэффициентом усиления (т.е. делитель типа А) приводило бы к меньшему отклонению от линейности энергетической шкалы. Также нужно заметить, что делитель типа А имеет более слабую “клиновидность”: номиналы резисторов, а следовательно, падения напряжений между диодами увеличены только на двух последних диодных промежутках вместо шести, как у делителя типа Б.

Таким образом, можно сделать вывод, что нелинейность энергетической шкалы вызвана, прежде всего, образованием между последними диодами, а также между последним диодом и анодом ф.э.у. объемных зарядов, которые возникают при протекании через ф.э.у. импульсов тока большой амплитуды. Увеличение разности потенциалов между диодами способствует рассасыванию объемных зарядов, что уменьшает нелинейность энергетической шкалы детектора.

Для быстрого сцинтиллятора с большим световыходом (в нашем случае  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ) использование в качестве фотоприемника ф.э.у. с клиновидной схемой делителя напряжения позволяет более эффективно уменьшить нелинейность энергетической шкалы детектора в области больших энергий по сравнению, например, с часто применяющимся снижением напряжения питания ф.э.у.

Авторы хотели бы выразить благодарность А.В. Кочемасову, И.В. Рубцову, Ю.Э. Артемову, принимавшим участие в создании эксперимен-

тальной установки, использовавшейся в данной работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BriLanCe™ Scintillators Performance Summary. Saint-Gobain, 2009; <http://www.detectors.saint-gobain.com>
2. *Moszynski M., Nassalski A., Syntfeld-Kazuch A. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2006. V. A568. P. 739.
3. *Owens A., Bos A.J.J., Brandenburg S. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2007. V. A572. P. 785.
4. *Normand S., Iltis A., Bernard F. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2007. V. A572. P. 754.
5. *Июдин А.Ф., Богомолов В.В., Свертилов С.И. и др.* // ПТЭ. 2009. № 6. С. 16.
6. *Nicolini R., Camera F., Blasi N. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2007. V. A582. P. 554.
7. *Quarati F.G.A., Owens A., Dorenbos P. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2011. V. A629. P. 157.
8. Photomultiplier tubes, basics and applications / Third edition. Hamamatsu Photonics K.K., 2006.
9. *Игнатов С.М., Потанов В.Н.* // ПТЭ. 2011. № 2. С. 25.
10. *Dorenbos P., Haas J.T.M., Eijk C.W.E.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. V. 51. № 3. P. 1289.
11. UBA (Ultra BialKali). SBA (Super BialKali) Photomultiplier Tube Series. Hamamatsu Photonics K.K.; <http://www.jp.hamamatsu.com>
12. *Дорин А.Б., Ельцин В.Ф.* Техническое и методическое обеспечение спектрометрических комплексов СКС, используемых в системах радиационного контроля АЭС; <http://www.greenstar.ru>
13. *Seabury E.H., Wharton J.C., Caffrey A.J.* Preprint Idaho National Laboratory INL/CON-06-11300, 2006.
14. *Rogers J.G., Andreaco M.S., Moisan C.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. A413. P. 249.
15. *Анисимова И.И., Глуховской Б.М.* Фотоэлектронные умножители. М.: Советское радио, 1974. С. 23.