

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ КАДМИЙ–ЦИНК–ТЕЛЛУР

© 2018 г. В. Б. Бруданин<sup>а</sup>, Ю. Б. Гуров<sup>а, б</sup>, С. В. Розов<sup>а, \*</sup>,  
В. Г. Сандуковский<sup>а</sup>, Е. А. Якушев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>б</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”  
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

\*e-mail: rozovs@jinr.ru

Поступила в редакцию 27.03.2017 г.

Представлены результаты исследования параметров детекторов на основе кристаллов CdZnTe с рабочим объемом  $\sim 1500$  мм<sup>3</sup>. Показано, что эти детекторы при комнатной температуре обладают сравнительно хорошими спектрометрическими характеристиками для регистрации  $\gamma$ -излучения от источников <sup>241</sup>Am, <sup>57</sup>Co, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co.

DOI: 10.7868/S0032816218010160

### ВВЕДЕНИЕ

Для регистрации рентгеновского и  $\gamma$ -излучений наиболее широко используются полупроводниковые детекторы (п.п.д) из сверхчистого германия (HPGe) и приборы на основе неорганических сцинтилляторов. HPGe-п.п.д. обеспечивают наилучшее энергетическое разрешение ( $\Delta E/E \sim \sim 0.1\%$ ) и высокую эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов в диапазоне энергий 1–1000 кэВ. Однако для обеспечения работоспособности этих детекторов требуется их охлаждение до температуры жидкого азота, что для ряда экспериментальных исследований не всегда приемлемо.

Сцинтилляционные счетчики наиболее просты в эксплуатации, но их разрешение на порядок хуже, чем HPGe-детекторов. Поэтому длительное время ведутся исследования по использованию для  $\gamma$ -спектрометрии полупроводников с широкой запрещенной областью на основе материалов: кадмий–теллур CdTe, кадмий–цинк–теллур CdZnTe (CZT), дийодид ртути (HgI<sub>2</sub>), арсенид галлия (GaAs). К основным свойствам указанных материалов [1, 2] относятся: высокий эффективный атомный номер ( $Z \approx 32-70$ ), большая ширина запрещенной зоны ( $\Delta E_g \approx 1.4-2.3$  эВ), низкая энергия образования электрон-дырочной пары ( $\epsilon \sim 4.5$  эВ) и достаточно высокая подвижность носителей заряда. Это означает, что детекторы, изготовленные на их основе, способны работать при комнатной температуре. Они имеют лучшее энергетическое разрешение по сравнению со сцинтилляционными счетчиками, обладают сравнимой

или более высокой эффективностью регистрации  $\gamma$ -излучения.

Из указанных материалов наибольшее внимание привлекает CdZnTe (или CZT). Детекторы на основе этого материала в настоящее время обладают наилучшими спектрометрическими характеристиками [3, 4] по сравнению с приборами на основе других широкозонных полупроводников. Так, например, кристаллы CZT по сравнению с CdTe имеют на порядок большее омическое сопротивление ( $\sim 10^{10}$  Ом · см), следовательно, объ-

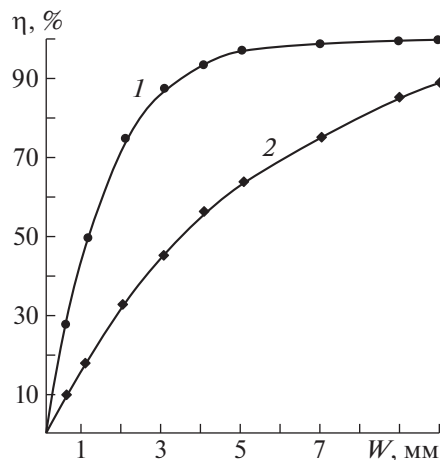


Рис. 1. Эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов с энергией 100 кэВ детекторами на основе CZT (1) и HPGe (2) в зависимости от их толщины  $W$ .

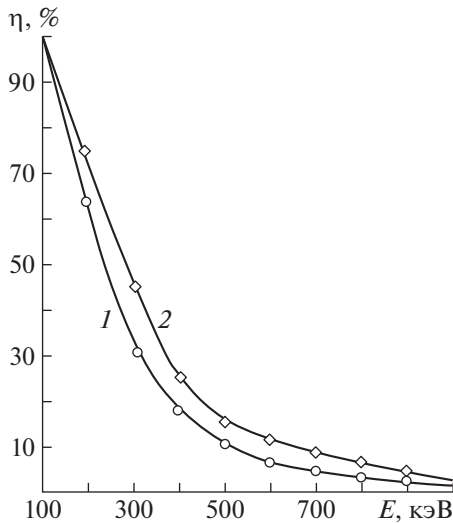


Рис. 2. Расчетные зависимости эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов различных энергий CZT-детекторами разной толщины  $W$ : 1 – 7.5, 2 – 10 мм.

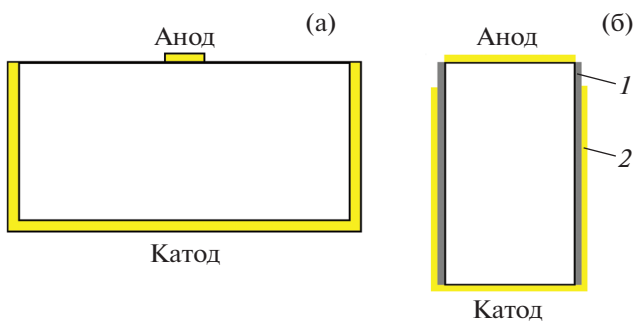


Рис. 3. Структура детекторов: а – № 1; б – № 2 (1 – изолирующий слой; 2 – медная фольга – проводящий слой).

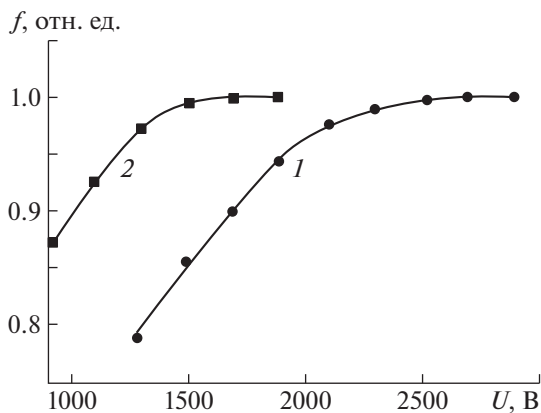


Рис. 4. Зависимости скорости счета от напряжения смещения, измеренные с помощью источника  $^{137}\text{Cs}$ : 1 – п.п.д. № 1; 2 – п.п.д. № 2.

емный ток CZT-детекторов существенно меньше. Кроме того, при использовании CdTe-п.п.д. обнаружено изменение амплитуды сигнала и эффективности регистрации со временем [5], что обусловлено явлением поляризации.

Несмотря на ряд достоинств CZT-детекторов [6], их использование сдерживается технологическими трудностями получения монокристаллов большого объема с необходимыми электрофизическими параметрами.

В данной работе исследованы характеристики детекторов большого объема,  $\sim 1500 \text{ мм}^3$ , изготовленных на основе однородных кристаллов кадмий–цинк–теллур и используемых для регистрации  $\gamma$ -излучения.

### СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ

Для сравнения эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов приборами, изготовленными на основе HfGe и CZT, было выполнено моделирование для детекторов различной толщины с площадью  $15 \times 15 \text{ мм}^2$ . На рис. 1 приведены расчетные эффективности регистрации HfGe- и CZT-детекторами  $\gamma$ -квантов с энергией 100 кэВ в зависимости от толщины детекторов. При толщине 5 мм эффективность детектора, изготовленного на основе CZT, достигает предельного значения,  $\eta = 100\%$ , что в 1.5 раза больше, чем для п.п.д. из HfGe ( $\eta = 62\%$ ). На рис. 2 представлены расчетные зависимости эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов с различными энергиями CZT-детекторами толщиной 7.5 и 10 мм. Видно, что для энергии  $E_\gamma = 500 \text{ кэВ}$  эффективность составляет 10% и 15% для п.п.д. с толщиной  $W = 7.5$  и 10 мм соответственно. При этом для HfGe-детектора с  $W = 10 \text{ мм}$  аналогичный параметр при  $E_\gamma = 500 \text{ кэВ}$  составляет всего  $\eta = 3\%$ .

Для исследований использовалось два детектора. Первый, изготовленный фирмой BSI (Латвия) [7, 8] детектор имел псевдосферическую геометрию [9] (рис. 3а), его размер составлял  $15 \times 15 \times 7.5 \text{ мм}$ . Второй детектор (рис. 3б) был изготовлен по методике [10], в которой используется емкостный экран (аналог сетки Фриша в ионизационной камере). На торцы этого образца, имеющего прямоугольную форму ( $9 \times 9 \times 15 \text{ мм}$ ), были нанесены электроды – анод и катод – из золота. Боковая поверхность детектора плотно обтягивалась тонкостенным тефлоновым экраном и обматывалась медной фольгой, которая затем соединялась с катодом.

Основными эксплуатационными характеристиками CZT-п.п.д. являются: диапазон рабочих напряжений, оптимальное значение постоянной времени формирования, энергетическое разрешение ( $\Delta E = FWHM$ ) и линейность отклика при

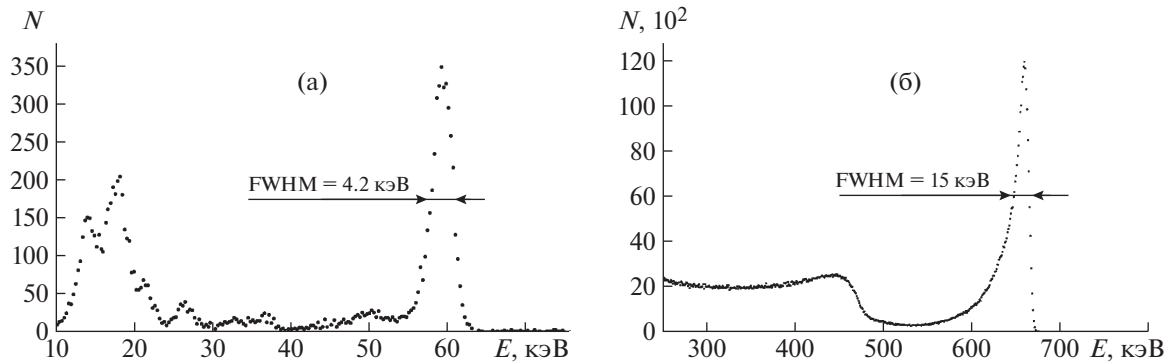


Рис. 5. Спектры, измеренные с помощью п.п.д. № 1 при  $\tau = 1$  мкс: **а** – от источника  $^{241}\text{Am}$ ; **б** – от источника  $^{137}\text{Cs}$ .  $U_{\text{см}} = 2500$  В.

регистрации  $\gamma$ -квантов в широком диапазоне энергий. Эти параметры определялись при облучении детекторов с помощью  $\gamma$ -источников:  $^{241}\text{Am}$  ( $E_\gamma = 59.5$  кэВ),  $^{57}\text{Co}$  ( $E_\gamma = 122.1$  кэВ),  $^{137}\text{Cs}$  ( $E_\gamma = 661.7$  кэВ) и  $^{60}\text{Co}$  ( $E_\gamma = 1773.2, 1332.5$  кэВ). Измерения проводились при комнатной температуре  $T \approx 300$  К.

На рис. 4 для исследуемых п.п.д. представлены зависимости скорости счета  $f$  (число отсчетов под пиком полного поглощения) от напряжения смещения. Видно, что зависимости  $f(U)$  (измерения выполнены с помощью источника  $^{137}\text{Cs}$ ) выходят на плато насыщения при напряжении 2500 и 1500 В соответственно для детекторов № 1 и № 2. Необходимо отметить при этих рабочих напряжениях значения “темновых” токов не превышали  $10^{-9}$  А.

Для CZT-детекторов, работающих при комнатной температуре, важным является выбор оптимального значения постоянной времени формирования  $\tau$  спектрометрического тракта. На практике при выборе фильтра основным требованием является получение наилучшего энергетического разрешения. Для исследуемых детекторов было измерено FWHM для нескольких значений постоянных времени формирования: 1, 3, 6, 10 мкс. Для примера на рис. 5 показаны спектры источников  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , измеренные с помощью п.п.д. № 1 при  $\tau = 1$  мкс.

На рис. 6 приведены зависимости разрешения п.п.д. № 1 от постоянной времени формирования при регистрации  $\gamma$ -излучения от различных источников. Видно, что для этого образца кривые приближаются к минимальному значению при  $\tau = 1$  мкс ( $U_{\text{см}} = 2500$  В). Аналогичные измерения, выполненные для п.п.д. № 2, также показали, что временем оптимального формирования является  $\tau = 1$  мкс при выбранном напряжении  $U_{\text{см}} = 1500$  В.

В таблице для сравнения представлены оптимальные значения разрешения двух детекторов для разных энергий  $\gamma$ -квантов. Видно, что при

энергиях  $E_\gamma \sim 650$  кэВ разрешение детектора № 2 практически в 1.5 раза хуже, чем у п.п.д. № 1. По-видимому, это обусловлено неоптимальным соотношением геометрических размеров детектора № 2, что приводит к замедлению сбора электронов. Как показано в работе [11], оптимальное соотношение не должно превышать 0.5, а в нашем случае оно составляет  $9/15 = 0.6$ .

С помощью указанных источников также была исследована линейность отклика детекторов при регистрации  $\gamma$ -квантов различных энергий. Обработка экспериментальных данных, соответствующих положению пиков полного поглощения, показала, что все точки лежат на прямых линиях. При этом коэффициент корреляции Пирсона для обеих зависимостей составляет  $r = 0.9997$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерены параметры детекторов с чувствительным объемом  $\sim 1500$  мм<sup>3</sup>, изготовленных на основе кристаллов CdZnTe. Согласно полученным данным, детекторы обладают хорошим раз-

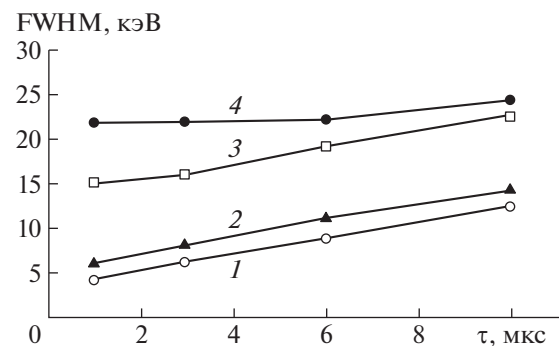


Рис. 6. Зависимости разрешения п.п.д. № 1 от постоянной  $\tau$  при регистрации  $\gamma$ -излучения от источников: 1 –  $^{241}\text{Am}$ , 2 –  $^{57}\text{Co}$ , 3 –  $^{137}\text{Cs}$ , 4 –  $^{60}\text{Co}$ .  $U_{\text{см}} = 2500$  В.

Энергетическое разрешение п.п.д. № 1 и № 2 при  $\tau = 1$  мкс.

№ п.п.д.	FWHM, кэВ, для $E_\gamma$ , кэВ			
	59.5	122.1	661.7	1332.5
1	4.2	5.2	15	22
2	4.4	5.7	21	35

решением и высокой степенью линейности при регистрации  $\gamma$ -излучения в широком энергетическом диапазоне. Такие детекторы могут быть использованы при комнатной температуре в качестве основных регистрирующих элементов при создании установок большой площади, предназначенных для выполнения экспериментов в низкофоновых подземных лабораториях и на космических аппаратах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bavdaz M., Peacock A., Owens A.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 2001. V. A458. P. 123. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)01033-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)01033-0)
2. *Devanathan R., Corrales L.R., Gao F., Weber W.J.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 2006. V. A 565. P. 637. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.05.085>
3. *Owens A., Bavdaz M., Andersson H., Gagliardi T., Krumrey M., Nenonen S., Peacock A., Taylor I., Tröger L.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 2002. V. A484. P. 242. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01956-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01956-8)
4. *Shorohov M., Tsirkunova I., Loupilov A., V., Budtz-Jorgensen C., Kuvvetli I.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 2007. V. A576. P. 80. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.01.124>
5. *Niraula M., Nakamura A., Aokia T., Tomitab Y., Hatanakaa Y.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. 2002. V. A491. P. 168. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01175-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01175-0)
6. *Sordo S.D., Abbene L., Caroli E., Mancini A.M., Zappettini A., Ubertini P.* // Sensors. 2009. V. 9. P. 3491. doi 10.3390/s90503491
7. *Dorogov P., Ivanov V., Loutchanski A., Grigorjeva L., Milles D.* // IEEE Trans. on Nuclear Science. 2012. V. 59. № 5. P. 2375. doi 10.1109/TNS.2012.2212460
8. <http://bsi.lv/en/products/czt-cdte-detectors-and-associate/>
9. *Sowinska S.M., Hennard G., Feder D., Hage-Ali M., Koebel J.M., Zumbiehl A., Ayoub M., Siffert P.* // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2002. V. 49. № 6. P. 3306. doi 10.1109/TNS.2002.806239
10. *Bolotnikov E., Abdul-Jabbar N.M., Babalola S., Camarda G.S., Cui Y., Hossain A., Jackson E., Jackson H., James J.R., Luryi A.L., James R. B.* // Proc. of the SPIE. 2007. P. 670603.
11. *Bolotnikov A.E., Camarda G.C., Carini G.A., Fiederle M., Li L., McGregor D.S., McNeil W., Wright G.W., James R.B.* // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2006. V. 53. № 2. P. 607. doi 10.1109/TNS.2006.871509