

А. А. ЗАХАРЧЕНКО, Д. В. НАКОНЕЧНЫЙ, И. Н. ШЛЯХОВ,
к. ф.-м. н. А. В. РЫБКА, к. т. н. В. Е. КУТНИЙ,
д. т. н. М. А. ХАЖМУРАДОВ

Украина, ННЦ "Харьковский Физико-технический институт"
E-mail: rybka@kipt.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
07.09 2006 г.

Оппонент д. т. н. В. К. КОМАРЬ
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ CdTe (CdZnTe) ДЕТЕКТОРОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе разработанной модели исследованы способы коррекции зависимости чувствительности CdTe (CdZnTe) детекторов от энергии γ -излучения в диапазоне 50...2000 кэВ.

Детекторы γ -излучения на основе полупроводниковых соединений CdTe и CdZnTe отличаются высокой эффективностью регистрации излучения и хорошим соотношением сигнал/шум при комнатной температуре. Большой диапазон измеряемой мощности дозы γ -излучения [1, 2] делает перспективным использование CdTe (CdZnTe) детекторов в системах дозиметрического контроля.

Однако разработка дозиметрических приборов на базе полупроводников с высоким средним атомным номером затруднена из-за сильной зависимости чувствительности детекторов от энергии γ -излучения. Отклик детектора (скорость счета в импульсном режиме и величина собранного заряда в токовом режиме) определяется не только мощностью дозы, но и, в значительной степени, энергией регистрируемых γ -квантов. В результате помимо основной погрешности измерений Δ , связанной со статистическим разбросом параметров источников излучения, неполнотой сбора заряда, собственными шумами детектора и шумами измерительной аппаратуры, возникает дополнительная ошибка Δ_E , величина которой зависит от энергии γ -излучения и может значительно превышать основную погрешность Δ [3].

Для CdTe (CdZnTe) детекторов чувствительность в диапазоне энергии γ -излучения 50...2000 кэВ изменяется в десятки раз, поэтому при использовании таких детекторов в приборах дозиметрического контроля необходима коррекция их энергетической характеристики для уменьшения дополнительной ошибки Δ_E . Такую коррекцию можно выполнить с помощью металлических фильтров либо аппаратно-программным способом [4—7].

Статистический характер процессов взаимодействия γ -излучения с веществом и необходимость учета влияния материалов корпуса прибора и фильтров на чувствительность детектора не позволяют провести расчет параметров коррекции в аналитическом виде.

Цель данной работы состоит в разработке математической модели расчета и коррекции энергетической зависимости чувствительности регистрации CdTe (CdZnTe) детекторов γ -излучения.

Методология и техника эксперимента

Моделирование чувствительности регистрации энергии γ -излучения в диапазоне 50...2000 кэВ проведено для однородных планарных детекторов на основе CdTe и CdZnTe, работающих в импульсном режиме. Результаты моделирования сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными на детекторах дозиметрического качества, которые изготовлены в ННЦ "ХФТИ" [1]. Исследованные образцы из CdTe и CdZnTe имели p -тип проводимости. Размеры кристаллов — 5×5×2 мм. На детекторах методом химического осаждения из раствора были нанесены омические контакты из Au.

Облучение детекторов проводили со стороны отрицательного контакта с помощью образцовых спектрометрических источников γ -излучения из набора ОСГИ — ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co , аттестованных по мощности экспозиционной дозы с точностью $\pm 3\%$. Порог дискриминации составлял 60 кэВ. Рабочее напряжение для детектора из CdTe — 130 В, для детектора из CdZnTe — 300 В.

Отклик полупроводникового детектора пропорционален количеству собранных на его электродах неравновесных носителей заряда — электронов (e) и дырок (h), образующихся в результате ионизации вещества детектора под воздействием γ -излучения. Во время перемещения под действием приложенного электрического поля к контактам детектора носители заряда рекомбинируют и захватываются дефектами ловушками, что приводит к неполному сбору созданного неравновесного заряда. Эффективность сбора заряда определяется как отношение количества носителей заряда, достигших контактов детектора, к полному количеству неравновесных носителей. В случае однородного распределения электрического поля внутри детектора эффективность сбора заряда $\eta(z)$ рассчитывается по уравнению Хехта [8]:

$$\eta(z) = \frac{\mu_e \tau_e V}{d^2} \left(1 - e^{-\frac{(d-z)d}{\mu_e \tau_e V}} \right) + \frac{\mu_h \tau_h V}{d^2} \left(1 - e^{-\frac{zd}{\mu_h \tau_h V}} \right), \quad (1)$$

где z — расстояние от отрицательного контакта до точки образования неравновесного заряда;

$\mu_{e,h}$ — подвижность электронов (дырок);

$\tau_{e,h}$ — время жизни электронов (дырок);

V — напряжение смещения детектора;

d — толщина детектора.

Взаимодействие γ -квантов с CdTe (CdZnTe) рассчитано нами с помощью программы моделирования транспорта фотонов и электронов методом Монте-Карло EGSnrc, представляющей собой дальнейшее развитие кода EGS4 [9]. В процессе моделирования предполагалось, что параллельный пучок моноэнергетических γ -квантов падал на поверхность однородного планарного детектора со стороны отрицательного контакта, перед которым могли размещаться корректирующие фильтры из металла. Гамма-кванты равномерно распределены по всей площади детектора (фильтра).

Программа EGSnrc прослеживает траекторию каждого фотона с заданной энергией E_γ от точки входа в детектор (фильтр) до точки выхода из детектора или поглощения в веществе. Для каждого кванта определены потери энергии, которые пошли на образование электронно-дырочных пар в детекторе. Разработанный нами пользовательский код, встраиваемый в EGSnrc, рассчитывает величину созданного заряда и по уравнению (1) определяет количество собранного заряда. В случае, когда величина собранного заряда превышает заданный порог дискриминации, фиксируется импульс.

Доза излучения D , создаваемая параллельным пучком моноэнергетических γ -квантов за время облучения t , равна [10, с. 15]

$$D = \mu_{en} n E_\gamma t, \quad (2)$$

где μ_{en} — массовый коэффициент передачи энергии (истинный коэффициент поглощения);

n — плотность потока γ -квантов;

E_γ — энергия γ -квантов.

Соответственно, чувствительность детектора δ при облучении его γ -квантами с энергией E_γ рассчитывается как

$$\delta = \frac{N_T}{D}, \quad (3)$$

где N_T — количество импульсов детектора, амплитуда которых превышает заданный порог дискриминации.

Расчет чувствительности детекторов и сравнение с экспериментом

Для моделирования энергетической зависимости чувствительности детекторов необходимо определить параметры переноса заряда — произведение подвижности на время жизни электронов $\mu_e \tau_e$ и дырок $\mu_h \tau_h$. Обычно используемый для этого метод спектрометрии α -частиц оказывается непригодным для CdTe (CdZnTe) детекторов дозиметрического качества. Получаемые фотопики вырождены либо сильно искажены, и рассчитать $\mu_h \tau_h$ по зависимости положения фотопика от напряжения смещения невозможно.

В данной работе $\mu_e \tau_e$ и $\mu_h \tau_h$ определены из моделирования зависимости чувствительности детекторов от напряжения смещения при облучении монохроматическим источником γ -излучения. На рис. 1 представлены расчетные зависимости и экспериментальные данные, полученные при облучении детекторов γ -квантами с энергией 662 кэВ (^{137}Cs). Порог дис-

криминации соответствует энергии 60 кэВ при максимальном для каждого детектора напряжении смещения.

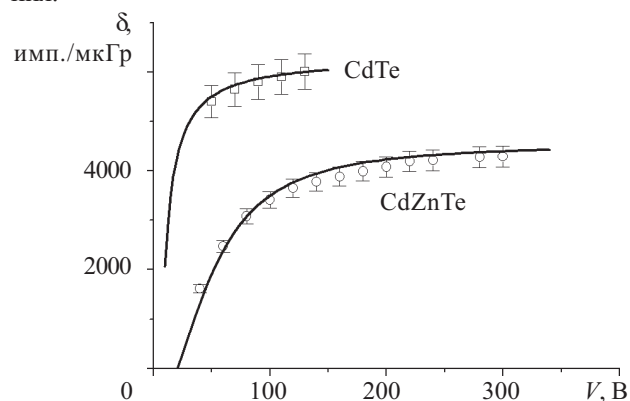


Рис. 1. Зависимость чувствительности детекторов от напряжения смещения

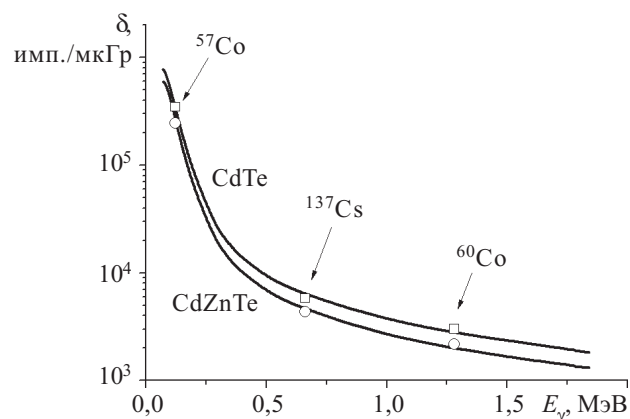


Рис. 2. Зависимость чувствительности детекторов от энергии γ -излучения

Точность расчетных значений $\mu\tau$ проверена сравнением расчетной зависимости чувствительности детекторов от энергии и измеренной экспериментально с помощью источников из набора ОСГИ при максимальном рабочем напряжении детектора (рис. 2). Полученное соответствие расчетных и экспериментальных данных позволяет применить рассмотренный подход для анализа методов устранения энергетической зависимости чувствительности CdTe (CdZnTe) детекторов.

Коррекция энергетической зависимости чувствительности детекторов при помощи составных фильтров

Использование металлических фильтров для коррекции энергетической характеристики CdTe-детекторов в широком диапазоне энергий впервые экспериментально рассмотрено в [4]. Суть коррекции заключалась в выравнивании отклика детекторов в области энергий γ -квантов 60...1250 кэВ, что достигалось ослаблением потока регистрируемого γ -излучения в области низких энергий с помощью металлического фильтра. Фильтр состоял из перфорированного вольфрама толщиной 1 мм и слоя молибдена (0,1 мм). Вольфрамовый слой поглощает практически все γ -кванты в области энергий ниже 150 кэВ. Пер-

форация обеспечивает пропускание необходимой доли γ -излучения в области низких энергий. Однако, как будет показано ниже, полученные в [4] экспериментальные данные не позволяют определить все особенности применения фильтров для коррекции энергетической характеристики детекторов. Для корректного решения данной задачи требуется большее количество источников γ -излучения, особенно в области энергий ниже 300 кэВ.

На рис. 3 представлена рассчитанная нами чувствительность регистрации γ -излучения для CdTe-детектора относительно энергии 662 кэВ. Конструкция, параметры детектора и составного фильтра соответствуют детекторам, исследовавшимся в [4]: $1,3 \text{ см}^2 \times 0,28 \text{ см}$, $(\mu\tau)_e = 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В}$, $(\mu\tau)_h = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В}$, $V = 500 \dots 600 \text{ В}$, перфорированный W-Mo-фильтр. Прямые линии ограничивают область изменения чувствительности $\pm 60\%$. В области энергий 50...150 кэВ наблюдается резкая зависимость от площади перфорации вольфрама и толщины молибденового слоя, что налагает повышенные требования на точность расчета и изготовления фильтра. Локальный минимум характеристики обусловлен К-краем поглощения вольфрама (69,5 кэВ).

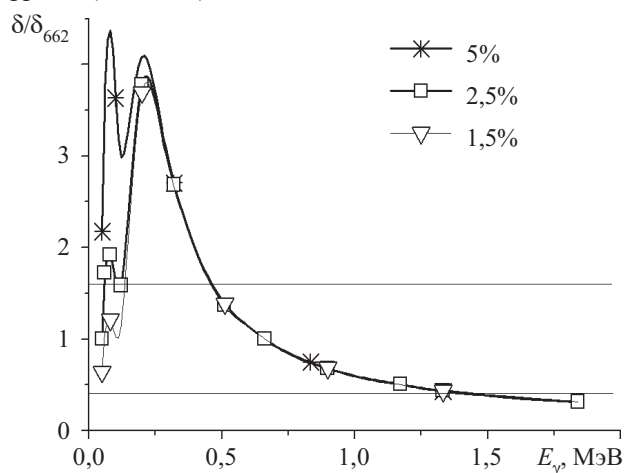


Рис. 3. Чувствительность CdTe-детектора для различных значений степени перфорации (%) вольфрамового фильтра относительно энергии 662 кэВ

В импульсном режиме при заданных параметрах фильтра различие чувствительности для энергий 662 кэВ (δ_{662}) и 1250 кэВ (δ_{1250}) составляет $\approx 60\%$. Однако в области 150...450 кэВ изменение чувствительности относительно энергии 662 кэВ оказывается существенно большим, достигая максимума ($\approx 400\%$) при энергии ≈ 210 кэВ. Для выравнивания чувствительности в области энергий 150...450 кэВ требуется увеличение толщины вольфрама до $\approx 3,5$ мм, что в сочетании с перфорацией резко увеличивает анизотропию детектора для $E_\gamma < 150$ кэВ.

Таким образом, в диапазоне энергии γ -излучения 50...2000 кэВ с помощью составного металлического фильтра невозможно обеспечить выравнивание энергетической зависимости чувствительности при использовании в конструкции дозиметра только одного CdTe (CdZnTe) детектора.

Обработка амплитудного распределения CdTe (CdZnTe) детекторов для измерения дозы

Описанный в литературе метод аппаратно-программной коррекции энергетической зависимости чувствительности CdTe (CdZnTe) детекторов γ -излучения также заключается в выравнивании отклика в требуемой области энергии γ -квантов. Для этого на выходе блока детектирования, работающего в импульсном режиме, корректируется частота импульсов в зависимости от энергии зарегистрированного излучения [4, 7].

Для повышения точности измерений требуется дополнительная обработка сигнала детектора. Одним из вариантов является метод определения поглощенной дозы по измерению средней амплитуды импульсов, возникающих в CdTe (CdZnTe) детекторе при облучении γ -квантами [5]. Для реализации этого метода необходим многоканальный анализатор импульсов, в состав которого входит аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), однокристалльная ЭВМ с устройством отображения информации и спектрометрический тракт для приема сигнала детектора.

Определим среднюю амплитуду импульсов детектора Q_{ph} как отношение всего собранного заряда Q к полному количеству импульсов N_0 , выработанных детектором. Соответственно, энергетический эквивалент средней амплитуды импульсов E_{ph} равен

$$E_{ph} = \frac{W_{det}}{2e} Q_{ph}, \quad (4)$$

где e — заряд электрона;

W_{det} — энергия образования пары "электрон—дырка" в полупроводнике.

Экспериментально установлено [5], что отношение мощности поглощенной дозы к скорости счета детектора линейно зависит от средней амплитуды импульсов E_{ph} в области энергии γ -излучения более 100 кэВ. Средняя амплитуда импульсов определяется из амплитудного спектра, набираемого на протяжении заданного отрезка времени:

$$E_{ph} = \frac{\sum_k kN(k)}{N_T} E_{adc}, \quad (5)$$

где k — номер канала АЦП;

$N(k)$ — количество счетов в канале k ;

E_{adc} — энергетическая ширина канала (цена канала) АЦП.

В разработанной нами модели E_{ph} рассчитывается по формуле

$$E_{ph} = \frac{E_{N_T}}{N_T}, \quad (6)$$

где E_{N_T} — энергетический эквивалент суммы амплитуд импульсов, превышающих заданный порог дискриминации.

Согласно соотношению (3), доза излучения $D = N_T/\delta$. Тогда, в предположении линейной зависимости между дозой и скоростью счета детекторов, получаем уравнение для расчета дозы излучения:

$$D = N_T \frac{1}{\delta} = N_T (ME_{ph} + C), \quad (7)$$

где M и C — константы, определяемые при калибровке детектора.

В эксперименте доза может быть рассчитана из амплитудного спектра с учетом соотношения (5)

$$D = M[E_{adc} \sum_k kN(k)] + N_T C. \quad (8)$$

На рис. 4 приведены экспериментальные данные и результаты моделирования зависимости обратной чувствительности CdTe и CdZnTe детекторов от средней амплитуды импульсов.

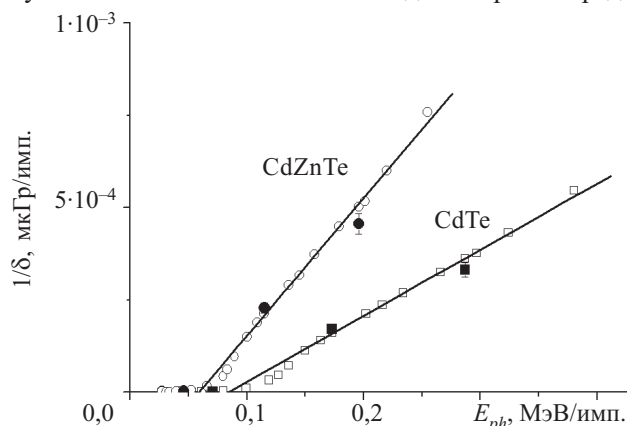


Рис. 4. Зависимость обратной чувствительности от средней амплитуды импульсов детекторов:

□, ○ — расчет по EGSnrc; ■, ● — эксперимент

ней амплитуды импульсов. Экспериментальные значения получены обработкой по формулам (5), (8) спектров детекторов, исследованных при облучении γ-квантами от источников ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co .

Параметры расчета дозы излучения

Детектор	$M, 10^{-3} \text{ мкГр}/(\text{МэВ} \times \text{имп.})$	
	EGSnrc (7)	Эксперимент (8)
CdTe	$1,79 \pm 0,05$	$1,8 \pm 0,1$
CdZnTe	$3,77 \pm 0,09$	$3,9 \pm 0,1$

Линейная зависимость дозы излучения от средней амплитуды импульсов наблюдается в исследованных детекторах в области энергий γ-квантов выше 100 кэВ. Параметры подгонки дозы излучения (7) и сравнение их с приведенными в таблице экспериментальными данными по (8) показывают, что калибровку детектора можно провести с хорошей точностью по трем энергиям (^{57}Co — 122 кэВ, ^{137}Cs — 662 кэВ, ^{60}Co — 1250 кэВ).

Выводы

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что характеристики CdTe (CdZnTe) детекторов дозиметрического качества и приборов, создаваемых на их основе, могут быть определены с хорошей точностью в широком диапазоне энергии γ-излучения на основе рассмотренной модели.

Использование пассивных составных металлических фильтров не обеспечивает приемлемую ошибку измерений дозы излучения CdTe (CdZnTe) детекторами в диапазоне энергии γ-квантов от 60 кэВ до 2 МэВ.

Обоснованы пределы применимости метода измерения дозы γ-излучения, использующего линейность зависимости дозы излучения от средней амплитуды импульсов CdTe (CdZnTe) детекторов. Рассмотренный метод может применяться для измерения дозы в широком диапазоне энергии γ-квантов, начиная с энергии порядка 100 кэВ. Для надежной калибровки таких дозиметров достаточно трех источников γ-излучения (^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rybka A. V., Davydov L. N., Shlyakhov I. N. et al. Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors // Nucl. Instr. & Meth. A.— 2004.— Vol. 531.— P. 147—156.
2. Рыбка А. В., Захарченко А. А., Давыдов Л. Н. и др. Сенсоры на основе CdZnTe для измерений рентгеновского излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006.— № 2.— С. 23—26.
3. Франк М., Штольц В. Твердотельная дозиметрия ионизирующего излучения.— М.: Атомиздат, 1973.
4. Горев В. С., Кожемякин В. А., Матвеев О. А. и др. Применение детекторов на основе теллурида кадмия в дозиметрии гамма-излучения // ПТЭ.— 1981.— № 1.— С. 60—64.
5. Nagarkar V., Squillante M., Entine G. et al. CdTe detector in nuclear radiation dosimetry // Nucl. Instr. & Meth. A.— 1992.— Vol. 322.— P. 623—627.
6. Rasolonjatovo D. A. H., Shiomi T., Nakamura T. et al. Development of gamma-ray monitor using CdZnTe semiconductor detector // IEEE Trans. Nucl. Sci.— 2001.— Vol. 48, N 4.— P. 1570—1576.
7. Мокрицкий В. А., Маслов О. В., Николаенко Ю. Е., Максимов М. В. Блок детектирования гамма-излучения на основе CdZnTe для систем радиационного контроля // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 3.— С. 15—17.
8. Hecht K. Zum mechanismus des lichtelektrischen primästromes in isolierenden kristallen // Zeits. Phys.— 1932.— Bd 77.— S. 235—245.
9. Kawrakow I. Accurate condensed history Monte Carlo simulation of electron transport. I. EGSnrc, the new EGS4 version // Med. Phys.— 2000.— Vol. 27(4).— P. 485—498.
10. Лукьянов В. Б., Бердоносос С. С., Богатырев И. О. и др. Радиоактивные индикаторы в химии.— М.: Высшая школа, 1977.

НОВЫЕ КНИГИ

Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики.— М.: Техносфера, 2006.— 632 с.

В книге приведены конструкции и методы расчета пьезоэлектрических преобразователей для измерения различных физических величин.

Книга предназначена для научных работников, студентов, специалистов в области разработки приборов, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.