

- с дробным показателем степени // Электронное моделирование. – 2002. – Т. 24, № 3. – С. 101–106.
6. Гулин С. П. Анализ спектра отклика нелинейности, представленной аналитической трансцендентной функцией, на многочастотное воздействие большой нормы // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2004. – № 1. – С. 21–28.
  7. Гулин С. П. Условия применимости модели динамического насыщения в задачах анализа спектра отклика нелинейных устройств // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – Запоріжжя, ЗНТУ, 2005. – № 2(14). – С. 21–28.
  8. Данилов Л. В., Матханов П. Н., Филиппов Е. С. Теория нелинейных электрических цепей. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.: ил.
  9. Люк Ю. Специальные математические функции и их аппроксимации. Перевод с англ. – М.: Мир, 1980. – 608 с.
  10. Справочник по специальным функциям. Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. – М.: Наука, 1979. – 832 с.: ил.
  11. Сачков В. Н. Комбинаторные методы дискретной математики. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
  12. Эндриус Г. Теория разбиений. Перевод с англ. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
  13. Гулин С. П. Определение параметров адаптивной модели нелинейных компонентов, представленной аналитической трансцендентной функцией, на основе

экспериментальных характеристик // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2005. – № 2(13). – С. 25–32.

Надійшла 4.04.07  
Після доробки 15.05.07

*Запропоновано метод аналізу усталеного відгуку нелінійності, що представлена аналітичною трансцендентною функцією, при багаточастотному впливі на основі гіпергеометричної функції Гауса. Отримані результати дозволяють моделювати поведінку широкого класу електронних пристроїв в режимах малого та великого сигналів з довільним спектром.*

*The method of analysis of spectrum of the set response of nonlinearity is offered, by the represented analytical transcendent function, at multifrequency influence on the basis of hypergeometrical function of Gausse. The got results allow to design the conduct of wide class of electronic devices and components in the modes of small and large signals with an arbitrary spectrum.*

УДК 539.1.074

А. А. Захарченко, В. Е. Кутний, И. М. Прохорец,  
А. В. Рыбка, М. А. Хажмурадов

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В CdTe ДЕТЕКТОРАХ $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Предложен метод быстрого определения параметров переноса заряда с использованием дозиметрических характеристики детектора и с применением математического моделирования.*

### ВВЕДЕНИЕ

Характеристики полупроводниковых детекторов, используемых для регистрации  $\gamma$ -излучения, существенно зависят от свойств переноса заряда: подвижности  $\mu$  и времени жизни  $\tau$  носителей заряда – электронов ( $e$ ) и дырок ( $h$ ). Качество детекторов характеризуется уровнем сбора неравновесного заряда, образующегося в полупроводнике под воздействием  $\gamma$ -излучения. Для количественного описания процесса сбора заряда обычно используется произведение  $\mu\tau$  [1].

У получивших в последние годы широкое распространение детекторов на базе CdTe  $(\mu\tau)_e$  обычно на порядок и более превышает  $(\mu\tau)_h$  [1]. Такое различие параметров переноса приводит к неполному сбору за-

ряда, что сильно влияет на спектрометрические и дозиметрические характеристики детекторов [2, 3]. Для расчета параметров коррекции необходимо определить произведение  $\mu\tau$ .

Прямые измерения параметров переноса заряда [4] в CdTe затруднены из-за высокого сопротивления образцов, что приводит к ошибкам измерения сравнимым по величине со значениями определяемых параметров. Часто используемые методики, основанные на анализе отклика детекторов при облучении  $\alpha$ -частицами [1] и низкоэнергетичным  $\gamma$ -излучением [5], применимы только для детекторов спектрометрического качества, у которых  $(\mu\tau)_e$  превышает  $1 \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В}$ .

В последние годы разработан ряд методик определения  $(\mu\tau)_{e,h}$  в CdTe детекторах  $\gamma$ -излучения спектрометрического качества с помощью методов математического моделирования [6, 7]. Для детекторов дозиметрического качества эта задача остается нерешенной.

Цель данной работы заключается в разработке и верификации модели расчета параметров переноса заряда в CdTe детекторах на основе их дозиметрических характеристик (чувствительности). Актуальность рассматриваемой задачи обусловлена необходимостью развития новой элементной базы систем радиационного контроля в атомной энергетике, медицине и экологии.

### 1 АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ $\mu\tau$ В CdTe ДЕТЕКТОРАХ

В работе [8] нами обоснована модель расчета амплитудных спектров и чувствительности планарных CdTe (CdZnTe) детекторов  $\gamma$ -излучения с использованием программы EGSnrc.

EGSnrc – это классический код Монте Карло, позволяющий изучение отдельных взаимодействий фотонов в объеме детектора. Разработанный нами программный код, встраиваемый в EGSnrc, позволяет проводить для каждого отдельного взаимодействия модификацию сбора заряда распределением носителей случайным гауссианом, чтобы воспроизводить эффекты генерации и уширения шумом электроники.

Для расчета параметров переноса заряда используется следующий алгоритм:

1. Экспериментально измеряются спектры при облучении CdTe детектора  $\gamma$ -квантами от источников  $^{241}\text{Am}$  (60 кэВ) и  $^{137}\text{Cs}$  (662 кэВ) с известной мощностью экспозиционной дозы (МЭД) излучения.

2. По спектру  $^{241}\text{Am}$  рассчитывается положение фотопика, соответствующее линии 60 кэВ.

3. По спектру  $^{137}\text{Cs}$  рассчитывается скорость счета детектора  $N_{\text{сч}}$  с порогом дискриминации, соответствующем энергии 60 кэВ.

4. Рассчитывается чувствительность детектора как  $N_{\text{сч}}/\text{МЭД}$ .

5. С помощью программы моделирования рассчитываются положение фотопика 60 кэВ и чувствительность детектора при энергии излучения 662 кэВ на сетке значений  $(\mu\tau)_{e,h}$ .

6. В координатах  $(\mu\tau)_h - (\mu\tau)_e$  строятся линии равных значений (изолинии) положения фотопика 60 кэВ и чувствительности детектора при энергии излучения 662 кэВ.

7. На построенной диаграмме точка пересечения линий, соответствующих экспериментально полученному положению фотопика 60 кэВ и чувствительности на линии 662 кэВ, определяет величины  $(\mu\tau)_e$  и  $(\mu\tau)_h$ .

Расчеты показывают, что при уровнях эквивалентного шумового заряда (ENC) менее 4,5 кэВ положение фотопика 60 кэВ ( $^{241}\text{Am}$ ) изменяется не более чем на 1 %. Чувствительность детектора на линии 662 кэВ ( $^{137}\text{Cs}$ ) изменяется в диапазоне 1–2 %. Таким образом, влиянием шума до величины ENC ~4,5 кэВ можно пре-

небречь, что существенно уменьшает время моделирования.

### 2 РАСЧЕТ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Верификация алгоритма расчета проведена сопоставлением параметров  $(\mu\tau)_{e,h}$ , полученных при измерении с помощью  $\alpha$ -источника и из результатов моделирования. Исследовался CdTe детектор дозиметрического качества с размерами  $4 \times 4 \times 1,5$  мм. Напряжение смещения – 130 В. Измеренное положение фотопика 60 кэВ соответствует энергии 38,5 кэВ, чувствительность детектора на линии 662 кэВ равна 24,3 импульс/мкР. На рис. 1 показана диаграмма расчета  $(\mu\tau)_{e,h}$ . Сплошные кривые – изолинии положения фотопика 60 кэВ. Штрихпунктирные линии – изолинии чувствительности детекторов при энергии  $\gamma$ -излучения 662 кэВ.

В табл. 1 приведены для сравнения рассчитанные значения  $(\mu\tau)_{e,h}$  и полученные при измерении с помощью  $\alpha$ -источника. Расхождение между ними согласуется с результатами [7], из которых следует, что значения  $(\mu\tau)_{e,h}$ , рассчитанные при подгонке  $\alpha$ -спектров, обычно занижены от 1,3 до 3 раз по сравнению с данными, получаемыми при моделировании спектров. Причиной этого является то, что при определении эффективности сбора заряда в детекторах с помощью  $\alpha$ -источника существенную роль играют поверхностные уровни-ловушки. Использование при измерениях и в расчетах  $\gamma$ -квантов высокой энергии (662 кэВ), равномерно проникающих на всю глубину детектора, позволяет минимизировать влияние поверхности.

Из полученного результата следует, что рассмотренный алгоритм может применяться для определения параметров переноса заряда в CdTe детекторах  $\gamma$ -излучения с хорошей точностью.

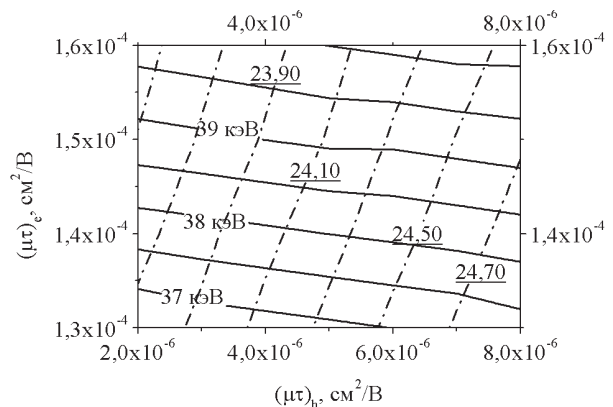


Рисунок 1 – Диаграмма расчета  $(\mu\tau)_{e,h}$  для CdTe детектора размерами  $4 \times 4 \times 1,5$  мм

Таблица 1 – Значения  $(\mu\tau)_{e,h}$  для CdTe детектора размерами  $4 \times 4 \times 1,5$  мм, полученные при моделировании и при измерении с помощью  $\alpha$ -источника

Образец, размеры, мм	Моделирование		$\alpha$ -источник	
	$(\mu\tau)_e, \text{см}^2/\text{В}$	$(\mu\tau)_h, \text{см}^2/\text{В}$	$(\mu\tau)_e, \text{см}^2/\text{В}$	$(\mu\tau)_h, \text{см}^2/\text{В}$
$4 \times 4 \times 1,5$	$(1,45-1,5) \times 10^{-4}$	$(4,8-6) \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-6}$

Таблица 2 – Результаты расчета  $(\mu\tau)_{e,h}$  для группы CdTe детекторов размерами  $2 \times 2 \times 2$  мм

№ образца	Положение пика 60 кэВ, кэВ	Чувствительность на линии 662 кэВ, импульс/мкР	$(\mu\tau)_e, \text{см}^2/\text{В}$	$(\mu\tau)_h, \text{см}^2/\text{В}$
6	44,0	7,5	$(7,25-7,4) \times 10^{-4}$	$(4-6) \times 10^{-5}$
7	46,0	7,7	$(7,0-7,25) \times 10^{-4}$	$(5,5-8) \times 10^{-5}$
15	46,7	7,5	$(9,2-9,5) \times 10^{-4}$	$(4,8-6,5) \times 10^{-5}$
16	43,0	7,7	$(6,6-6,8) \times 10^{-4}$	$(5,5-7,8) \times 10^{-5}$

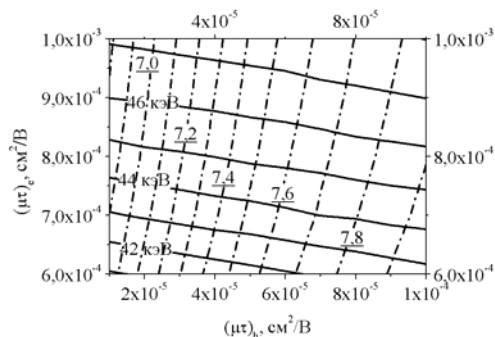


Рисунок 2 – Диаграмма расчета  $(\mu\tau)_{e,h}$  для группы CdTe детекторов размерами  $2 \times 2 \times 2$  мм

Дальнейшие исследования выполнены для группы CdTe детекторов размерами  $2 \times 2 \times 2$  мм, изготовленных из одного слитка. Напряжение смещения – 90 В. На рис. 2 приведена диаграмма расчета  $(\mu\tau)_{e,h}$ , а в табл. 2 – полученные значения  $(\mu\tau)_{e,h}$ .

Как видно из таблицы, CdTe детекторы, изготовленные из одного слитка достаточно однородны, что согласуется с экспериментальными данными [1].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена задача расчета параметров переноса заряда в планарных CdTe детекторах  $\gamma$ -излучения с использованием их дозиметрических характеристик.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложен надежный метод расчета параметров переноса заряда в дозиметрических детекторах  $\gamma$ -излучения на основе высокоомных полупроводниковых соединений (на примере CdTe). В дальнейшем рассмотренный метод может быть распространен на детекторы разной геометрии (полусферические, цилиндрические и т. д.).

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанный метод позволяет определять параметры

переноса заряда с хорошей точностью, что имеет существенное значение для калибровки детекторов. Метод может использоваться также для контроля параметров блоков детектирования в процессе их эксплуатации.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

- Schlesinger T. E., Toney J. E., Yoon H. et al. Cadmium zinc telluride and its use as a nuclear radiation detector material // Materials Science and Engineering. – 2001. – 32. – P. 103–189.
- Eisen Y., Horovitz Y. Correction of incomplete charge collection in CdTe detectors // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A. – 1994. – 353. – P. 60–66.
- Rybka A. V., Davydov L. N., Shlyakhov I. N. et al. Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A. – 2004. – 531. – P. 147–156.
- Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа. – 1987. – 239 с.
- Ruzin A., Nemirovsky Y. Methodology for evaluation of mobility-lifetime product by spectroscopy measurements in CdZnTe spectrometers // Journal of Applied Physics – 1999. – 82 (9). – P. 4166–4171.
- Miyajima S., Sakuragi H., Matsumoto M. Extraction of mean free path of charge carriers in CdZnTe crystals from measured full-energy peaks // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A. – 2002. – 485. – P. 533–538.
- Sato G., Parsons A., Hullinger D. et al. Development of a spectral model based on charge transport for the Swift/BAT 32K CdZnTe detector array // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A. – 2005. – 541. – P. 372–384.
- Захарченко А. А., Кутний В. Е., Рыбка А. В., Хажмурадов М. А. Моделирование дозиметрических характеристик CdTe (CdZnTe) детекторов  $\gamma$ -излучения // Радиоэлектроника и информатика. 2006. – 2. – С. 28–33.

Надійшла 2.03.07

Запропоновано метод швидкого визначення параметрів переносу заряду з використанням дозиметричних характеристик детектора і з використанням математичного моделювання.

A method of fast determination of the detector charge transportation (collection) parameters with the use of the detector dosimetric characteristics and by means of mathematical simulation is proposed.