

А. А. ЗАХАРЧЕНКО, к. ф.-м. н. И. М. ПРОХОРЕЦ,
к. т. н. В. Е. КУТНИЙ, к. ф.-м. н. А. В. РЫБКА,
д. т. н. М. А. ХАЖМУРАДОВ

Украина, г. Харьков, Национальный научный центр
«Харьковский физико-технический институт»
E-mail: rybka@kipt.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
18.12 2007 г.

Оппоненты д. ф.-м. н. В. И. СТАФЕЕВ
(НПО «Орион», г. Москва),
д. ф.-м. н. Д. В. КОРБУТЯК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

РАСЧЕТ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ ДЕТЕКТОРОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУИЗОЛИРУЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Рассмотрен метод определения параметров переноса заряда в детекторах гамма-излучения на основе полуизолирующих полупроводников с использованием численного расчета эффективности сбора заряда и чувствительности детекторов.

Качество полупроводниковых детекторов, применяемых для регистрации γ -излучения, характеризуется уровнем сбора неравновесного заряда, который образуется под воздействием γ -квантов. Для количественного описания процесса сбора заряда обычно используется величина, равная произведению подвижности (μ) на время жизни (τ) носителей заряда, т. е. $\mu\tau$ [1, 2], которая определяет длину свободного пробега носителей. Параметры переноса заряда необходимы для расчета функции отклика в зависимости от энергии и угла падения γ -квантов, являющейся основной характеристикой детектора.

Значения $(\mu\tau)_e$ для электронов у детекторов на базе высокоомных полупроводниковых соединений (CdTe, CdZnTe, HgI₂ и др.) обычно более чем на порядок превышают дырочные — $(\mu\tau)_h$ [1—3]. Такое различие параметров переноса приводит к неполному сбору заряда, что в значительной мере влияет на спектротрические характеристики детекторов: положение и форму пика полного поглощения, отношение пик/долина и разрешение по энергии [4]. В детекторах, предназначенных для дозиметрии гамма-излучения, сбор заряда определяет отношение сигнал/шум, устанавливая нижний порог энергий регистрируемого γ -излучения. При использовании высокоомных полупроводников в дозиметрии требуется коррекция чувствительности детекторов к энергии γ -излучения [5—7]. Для расчета параметров этой коррекции также необходимо определять произведение $\mu\tau$ для электронов и дырок [8].

Прямые измерения параметров переноса заряда [9], основанные на эффекте Холла, в высокоомных детекторах затруднены из-за низкой концентрации носителей, относительно больших поверхностных токов утечки и малых размеров образцов. Влияние этих факторов приводит к тому, что ошибки измерения оказываются сопоставимыми со значениями определяемых параметров [10]. Во многих случаях подвиж-

ность и время жизни можно измерить только для электронов [11—13].

Наиболее часто для изучения транспортных свойств высокоомных детекторов используется анализ их отклика на облучение α -частицами [1, 14, 15] и γ -квантами низких энергий [16]. Проведенный нами анализ [17] показал, что на практике эти методы применимы только для детекторов γ -излучения спектротрического качества. Согласно классификации eV PRODUCTS к ним относятся детекторы с разрешающей способностью более 3% на линии 662 кэВ. Для детекторов-спектрометров $(\mu\tau)_e > 1 \cdot 10^{-3}$ см²/В. В последние годы для соединений CdTe (CdZnTe) предложен ряд методик определения величин $(\mu\tau)_{e,h}$, основанных на сравнении экспериментальных и расчетных γ -спектров, полученных методом математического моделирования [18—20]. Методы моделирования позволяют определить параметры переноса для обоих типов носителей. Однако, так как форма регистрируемых спектров чувствительна к уровню шумов, наличию рассеивающих сред и вариациям электрического поля внутри детекторов, подбор согласующихся с экспериментом значений параметров требует большого времени вычислений. Расчетные величины $(\mu\tau)_{e,h}$ могут существенно отличаться от экспериментальных значений, полученных различными методами. Так, сопоставление с данными расчета $(\mu\tau)_{e,h}$ по спектрам α -частиц показало, что подгонка зависимости положения α -пиков от напряжения смещения приводит к значениям $(\mu\tau)_e$ в 1,3 раза меньшим, а для $(\mu\tau)_h$ — в 3 раза меньшим, чем в случае моделирования фотопиков γ -излучения [21].

Разработка и совершенствование методики определения транспортных параметров высокоомных полупроводниковых детекторов для дозиметрии γ -излучения остается достаточно актуальной, так же как и задача контроля параметров переноса заряда в детекторах, находящихся в сильных радиационных полях. Особенности конструкции и условия использования таких детекторов требуют применения численных методов расчета их транспортных характеристик.

Цель данной работы состоит в разработке и верификации метода определения параметров переноса заряда в высокоомных полупроводниковых детекторах γ -излучения на основе их дозиметрических характеристик с применением методов имитационного моделирования.

Моделирование чувствительности детекторов γ -излучения

Рассмотренные в работах [11—20] методы определения параметров переноса носителей заряда дают хорошие результаты для высокоомных детекторов спектрометрического качества. Детекторы, предназначенные для дозиметрии γ -излучения, обычно имеют худшие параметры переноса и значительно более высокие уровни шумов по сравнению с детекторами-спектрометрами. В результате в таких детекторах фотопики при значениях энергии γ -квантов выше 150 кэВ вырождаются, а при более низкой энергии — искажаются. Для α -частиц пики поглощения при облучении со стороны положительного контакта также вырождаются. Это не позволяет применять рассмотренные методы для определения параметров $(\mu\tau)_{e,h}$ дозиметрических детекторов.

Представляет также интерес контроль параметров детекторов в процессе эксплуатации в мощных радиационных полях. Конструкция дозиметрических приборов не обеспечивает возможности использования для этого α -частиц и γ -квантов с низкой энергией, поскольку они будут полностью поглощены корпусом детектора и материалами, применяемыми для его герметизации.

В работах [8, 22] нами рассмотрена модель расчета дозиметрических характеристик CdTe (CdZnTe)-детекторов γ -излучения методом Монте-Карло с использованием программы моделирования транспортирования фотонов и электронов EGSnrc. EGSnrc — это классический код Монте-Карло, позволяющий моделировать взаимодействие фотонов в средах различного состава и геометрии [23]. Разработанный нами программный код, встраиваемый в EGSnrc, дает возможность моделировать отклик детектора для каждого одиночного γ -кванта с учетом статистических эффектов генерации пар в объеме детектора и изменения амплитуды импульса под влиянием шумов элементов электроники. В данной работе кроме CdTe (CdZnTe) исследованы также характеристики детекторов из HgI₂.

На первом шаге программа запоминает соответствующее заданной энергии γ -кванта E_γ значение энергии ионизации E_p , поглощенной внутри полупроводника на заданной глубине (ионизация обусловлена вторичными частицами: каскадными электронами, возникающими при фотоэффекте, комптоновскими электронами и электрон-позитронными парами). На втором шаге код вычисляет высоту импульса для каждого взаимодействующего фотона с учетом эффективности сбора заряда и вклада шумов. Выделенная энергия преобразуется в заряд с учетом энергии образования пары неравновесных носителей w .

Эффективность сбора заряда $\eta(z)$ для плоскопараллельных детекторов определяется уравнением Хехта [24]

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

где V — напряжение смещения;
 d — толщина детектора;
 z — расстояние от отрицательного контакта до точки образования неравновесного заряда.

Вариация числа пар образовавшихся носителей и вклад в регистрируемый сигнал шумов детектора и элементов электроники описывается гауссовым распределением со средним значением E_i/w и дисперсией [25]

$$\sigma^2 = F \frac{E_i}{w} + \sigma_{enc}^2, \quad (2)$$

где F — фактор Фано [26];

E_i — энергия γ -кванта, потраченная на ионизацию материала детектора;

σ_{enc} — эквивалентный шумовой заряд (ENC), учитывающий вклад собственных шумов детектора и шумов элементов электроники [27].

Величина фактора Фано F для различных полупроводников в последние годы многократно уточнялась и по последним данным для CdTe равна 0,06, для CdZnTe — 0,1, для HgI₂ — 0,12 [26].

Разработанная нами программа может моделировать функцию отклика и амплитудные спектры детекторов излучения как монохроматического, так и смешанного от разных источников, что позволяет рассчитать чувствительность регистрации γ -квантов заданной энергии (количество импульсов, вырабатываемых детектором, на единицу дозы при определенном пороге дискриминации) при работе в импульсном режиме.

Расчет параметров переноса заряда высокоомных детекторов на основе дозиметрических характеристик

Для детекторов на основе полуизолирующих полупроводников характерен неполный сбор заряда, что приводит к смещению влево фотопиков в амплитудных спектрах. Эффективность сбора заряда может быть определена из отношения положений максимума фотопика в спектрах для тестируемого детектора и детектора с полным сбором заряда [28], при этом в обоих случаях должен использоваться один и тот же измерительный тракт (предусилитель, усилитель, АЦП). Изменение положения фотопика наиболее удобно определять по линии 59,54 кэВ (²⁴¹Am).

В соответствии с (1), эффективность сбора заряда зависит от двух параметров — $(\mu\tau)_e$ и $(\mu\tau)_h$. При расчете видимого положения максимума фотопика вкладом дырок обычно пренебрегают [20]. Как видно из **рис. 1**, для заданного положения максимума фотопика 59,54 кэВ при изменении $(\mu\tau)_h$ в 3—4 раза значение $(\mu\tau)_e$ сдвигается менее чем на 5%. Таким образом, положение фотопика в высокоомных детекторах определяется параметрами переноса электронов.

Параметры переноса дырок могут быть определены по форме «уширения» левого края фотопика («дырочный хвост»). Проведенный нами анализ [25] показал, что с увеличением уровня шумов асимметрия фотопика 59,54 кэВ быстро исчезает (**рис. 2**), и при значениях ENC > 300 e⁻ форма фотопика 59,54 кэВ для CdTe (CdZnTe)-детекторов уже практически не зависит от $(\mu\tau)_h$. Шумы высокоомных детекторов и эле-

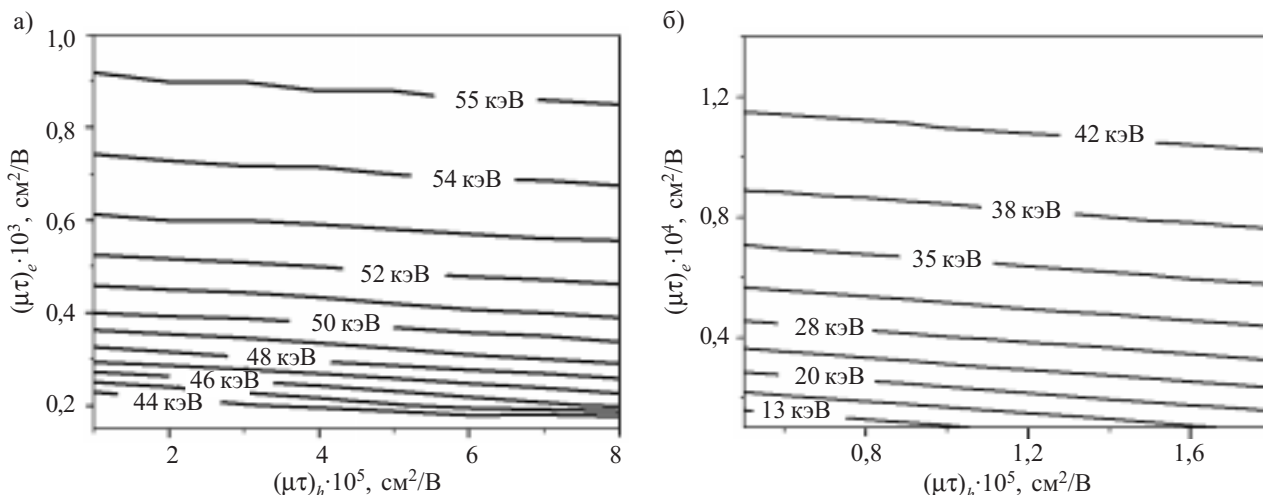


Рис. 1. Расчетное положение максимума регистрируемого фотопика 59,54 кэВ (^{241}Am) в зависимости от параметров $(\mu\tau)_e$ и $(\mu\tau)_h$:
 а — CdTe-детектор (толщина — 1,5 мм, напряжение смещения — 130 В); б — HgI₂-детектор (толщина — 1 мм, напряжение смещения — 400 В)

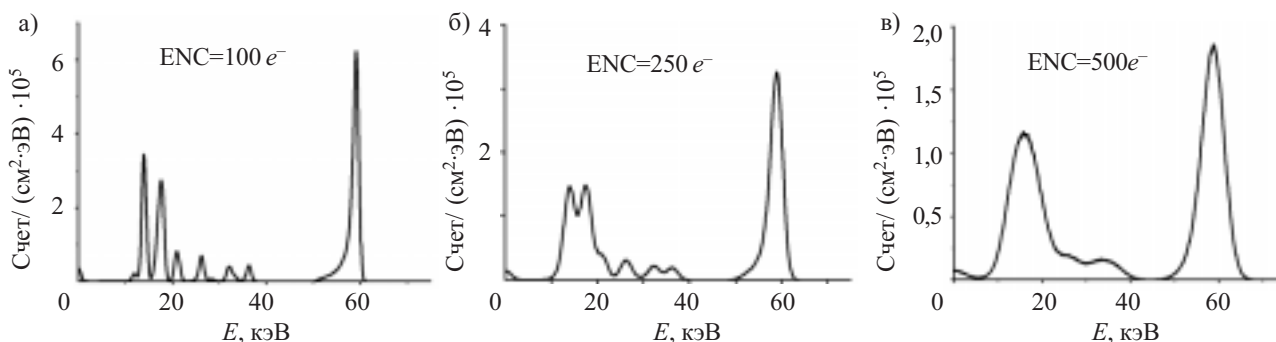


Рис. 2. Расчетные спектры ^{241}Am для CdZnTe-детектора при различных уровнях шумов



Рис. 3. Алгоритм расчета $(\mu\tau)_{e,h}$

Результаты расчета и измерения $(\mu\tau)_{e,h}$ по данным α -спектроскопии

Материал детектора	Размеры детектора, мм	Эффективность сбора заряда	Чувствительность детектора на линии 661,67 кэВ, имп./МКР	Величина $(\mu\tau)_{e,h}$, см ² /В			
				Расчет		Эксперимент	
				$(\mu\tau)_e$	$(\mu\tau)_h$	$(\mu\tau)_e$	$(\mu\tau)_h$
CdTe	4×4×1,5	0,65	24,3	$1,4 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-6}$

ментов электроники нередко превышают указанный предельный уровень в несколько раз [29], поэтому определение $(\mu\tau)_h$ методом подгонки формы спектров в условиях значительных шумов кристалла и элементов электроники оказывается невозможным.

Дальнейшее исследование характеристик CdTe (CdZnTe)-детекторов показало, что для одновременного определения $(\mu\tau)_e$ и $(\mu\tau)_h$ у плоскопараллельных детекторов, для которых справедливо уравнение (1), можно использовать данные о видимом положении максимума фотопика 59,54 кэВ (эффективности сбора заряда) и чувствительности детектора к γ -квантам с энергией 661,67 кэВ (¹³⁷Cs). Алгоритм расчета $(\mu\tau)_{e,h}$ приведен на рис. 3.

Как нами было показано ранее [25], положение фотопиков и чувствительность для энергии γ -квантов 661,67 кэВ при порогах дискриминации выше 60 кэВ не зависят от уровня шумов, что позволяет значительно сократить время и увеличить точность расчетов.

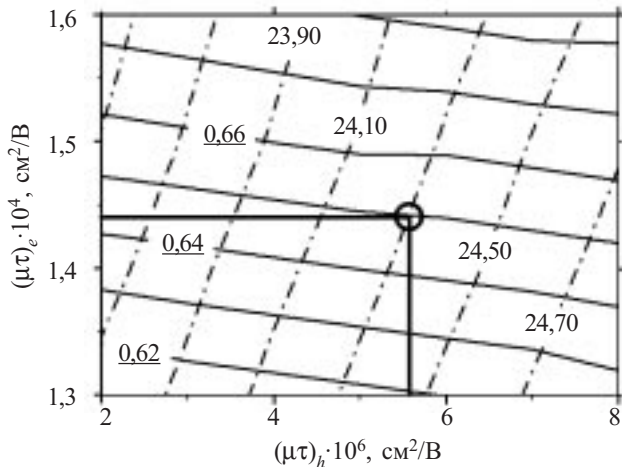


Рис. 4. Диаграмма для расчета $(\mu\tau)_{e,h}$ для CdTe-детектора при напряжении смещения 130 В

На рис. 4 представлена диаграмма эффективности сбора заряда для фотопика 59,54 кэВ и чувствительности на линии 661,67 кэВ в координатах $(\mu\tau)_e$ – $(\mu\tau)_h$ для CdTe-детектора, характеристики которого приведены в таблице. Сплошные линии соответствуют эффективности сбора заряда, а прерывистые — чувствительности. Приведенные в таблице данные показывают, что результаты моделирования хорошо согласуются с данными определения параметров переноса методом α -спектроскопии. Полученное отличие также не выходит за пределы расхождения результатов моделирования спектров γ -излучения и экспериментальных данных в [21].

Как видно из рис. 4, точность определения чувствительности детектора на линии 661,67 кэВ гораздо сильнее влияет на погрешность определения $(\mu\tau)_h$,

чем на $(\mu\tau)_e$. Основной вклад вносят погрешность расчета мощности дозы, создаваемой источником γ -излучения в точке, где размещается детектор, и ошибка измерения скорости счета детектора при заданном пороге дискриминации. Паспортная погрешность определения активности образцовых источников γ -излучения составляет $\pm 3\%$. Точность измерения скорости счета зависит от точности установки порога дискриминации, которая определяется шириной канала АЦП. Для устранения влияния ширины канала АЦП на точность определения $(\mu\tau)_h$ требуется измерение скорости счета γ -квантов с энергией 661,67 кэВ при нескольких напряжениях смещения детектора, поскольку скорость счета планарных CdTe (CdZnTe)-детекторов при регистрации γ -квантов с энергией 661,67 кэВ и пороге дискриминации 59,54 кэВ не зависит от напряжения смещения в широком диапазоне напряжений [17, 28].

Результаты моделирования показывают, что для планарных HgI₂-детекторов скорость счета на линии 661,67 кэВ с порогом дискриминации 59,54 кэВ также остается постоянной в широком диапазоне напряжения смещения. На рис. 5 приведена диаграмма для расчета параметров переноса $(\mu\tau)_{e,h}$ для HgI₂-детектора размерами 4×4×1 мм, находящегося под напряжением смещения 500 В. Сплошные линии обозначают величину эффективности сбора заряда для энергии γ -квантов 59,54 кэВ, а прерывистые — чувствительность на линии 661,67 кэВ. Расчетные данные показывают, что ход зависимостей эффективности сбора заряда и чувствительности для HgI₂-детекторов аналогичен CdTe (CdZnTe)-детекторам, что подтверждает применимость рассмотренного метода для детекторов из иодида ртути.

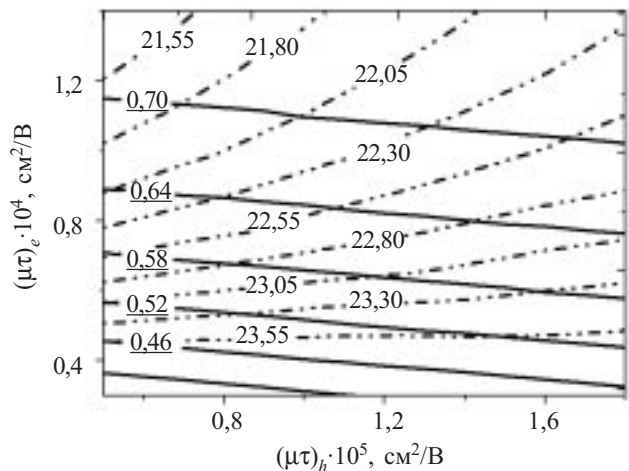


Рис. 5. Диаграмма для расчета $(\mu\tau)_{e,h}$ для HgI₂-детектора при напряжении смещения 500 В

Выводы

Разработанный метод позволяет определять ($\mu\tau$)_{e,h} с использованием экспериментальных данных об эффективности сбора заряда в области низких энергий и о чувствительности детекторов в высокоэнергетической области спектра, а также данных численного моделирования γ -спектров. Выполненное для CdTe-детекторов сопоставление расчетных и экспериментальных данных, полученных методом α -спектрометрии, показывает, что предложенный метод может использоваться для расчета параметров переноса CdTe (CdZnTe)-детекторов, предназначенных как для спектрометрии, так и для дозиметрии γ -излучения.

Исследованный метод нечувствителен к уровню шумов и может использоваться для первичного отбора детекторов, а также для контроля их параметров в процессе эксплуатации в сильных радиационных полях.

Данные имитационного моделирования подтверждают, что с помощью предложенного метода можно определять параметры переноса заряда в детекторах на основе иодида ртути.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. 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.— Vol. 32.— P. 103—189.
2. Корбутяк Д. В., Мельничук С. В., Корбут С. В., Борисюк М.М. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості.— Київ: Іван Федорів, 2000.
3. Owens A., Peacock A. Compound semiconductor radiation detectors // *Nucl. Instr. & Meth. A*.— 2004.— Vol. 531.— P. 18—37.
4. Eisen Y., Horovitz Y. Correction of incomplete charge collection in CdTe detectors // *Nucl. Instr. & Meth. A*.— 1994.— Vol. 353.— P. 60—66.
5. 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.
6. 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.
7. Залетин В. М., Кривоzubов О. В., Торлин М. А., Фомин В. И. Радиометрические и дозиметрические характеристики HgI2 детекторов // *Атомная энергия*.— 1987.— Т. 63, вып. 4.— С. 274—277.
8. Захарченко А. А., Наконечный Д. В., Шляхов И. Н. и др. Моделирование энергетической зависимости чувствительности CdTe (CdZnTe) детекторов гамма-излучения // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2007.— № 1.— С. 28—31.
9. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов.— М.: Высшая школа, 1987.
10. Prokesch M., Szeles C. Accurate measurement of electrical bulk resistivity and surface leakage of CdZnTe radiation detector crystals // *J. Appl. Phys.*— 2006.— Vol. 100.— P. 014503-1—014503-8.
11. He Z., Knoll G. F., Wehe D. K. Direct measurement of electron drift parameters of wide band gap semiconductors // *Nucl. Instr. & Meth. A*.— 1998.— Vol. 411.— P. 114—120.
12. Mengesha W., Aalseth C. E., Barnett D. S. et al. Pulse shape analysis for electron mobility study in cadmium zinc telluride gamma-

- ray detectors // *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*— 2004.— Vol. 51.— P. 1166—1171.
13. Baciak J. E., He Z., Devito R. P. Electron trapping variations in single-crystal pixelated HgI2 gamma-ray spectrometers // *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*— 2002.— Vol. 49.— P. 1264—1269.
14. Zanio K., Akutagawa W., Mayer W. Transport properties of semi-insulating CdTe using nuclear particles // *App. Phys. Lett.*— 1967.— Vol. 11, № 1.— P. 5—7.
15. Alexiev D., Dytlewski N., Reinhard M. I., Mo L. Characterisation of single-crystal mercuric iodide // *Nucl. Instr. & Meth. A*.— 2004.— Vol. 517.— P. 226—229.
16. Ruzin A., Nemirovsky Y. Methodology for evaluation of mobility-lifetime product by spectroscopy measurements in CdZnTe spectrometers // *J. Appl. Phys.*— 1999.— Vol. 82, N 9.— P. 4166—4171.
17. Захарченко А. А., Кутний В. Е., Наконечный Д. В. и др. Методы определения параметров переноса заряда в CdTe (CdZnTe) детекторах гамма-излучения // *Вісник Харківського національного університету. Сер. фізична «Ядра, частинки, поля»*.— 2007.— № 784, вып. 4 (36).— С. 85—92.
18. Jung M., Morel J., Fougères P. et al. A new method for evaluation of transport properties in CdTe and CZT detectors // *Nucl. Instr. & Meth. A*.— 1999.— Vol. 428.— P. 45—57.
19. Miyajima S., Sakuragi H., Matsumoto M. Extraction of mean free path of charge carriers in CdZnTe crystals from measured full-energy peaks // *Nucl. Instr. & Meth. A*.— 2002.— Vol. 485.— P. 533—538.
20. 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 // *Nucl. Instr. & Meth. A*.— 2005.— Vol. 541.— P. 372—384.
21. Sato G., Takahashi T., Sugihro M. et al. Characterization of CdTe/CdZnTe detectors // *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*— 2001.— Vol. 49.— P. 1258—1263.
22. Захарченко А. А., Кутний В. Е., Рыбка А. В., Хажмурадов М. А. Моделирование дозиметрических характеристик CdTe (CdZnTe) детекторов g-излучения // *Радиоэлектроника и информатика*.— 2006.— № 2.— С. 28—33.
23. Kawrakow I. Accurate condensed history Monte Carlo simulation of electron transport. I. EGSnrc, the new EGS4 version // *Med. Phys.*— 2000.— Vol. 27, N 4.— P. 485—498.
24. Akutagawa W., Zanio K. Gamma response of semi-insulating material in the presence of trapping and detrapping // *J. Appl. Phys.*— 1969.— 40 (9).— P. 3838—3854.
25. Захарченко А. А., Кутний В. Е., Прохорец И. М. и др. Моделирование влияния шумов на характеристики CdZnTe детекторов гамма-излучения // *Радиоэлектроника и информатика*.— 2007.— № 1.— С. 13—16.
26. Devanathan R., Corrales L. R., Gao F., Weber W. J. Signal variance in gamma-ray detectors —A review // *Nucl. Instr. & Meth. A*.— 2006.— Vol. 565.— P. 637—649.
27. Radeka V. Low-noise techniques in detectors // *Annual Review of Nuclear and Particle Science*.— 1988.— Vol. 38.— P. 217—277.
28. Matz R., Weidner M. Charge collection efficiency and space charge formation in CdTe gamma and X-ray detectors // *Nucl. Instr. & Meth. A*.— 1998.— Vol. 406.— P. 287—298.
29. Budtz-Jorgensen C., Kuvvetli I., Westergaard N. J. et al. The X-ray imager on AXO // *Nucl. Instr. & Meth. A*.— 2001.— Vol. 458.— P. 132—139.