

УДК 539.1.074

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР Me-CdZnTe-Me

Д.В. Кутний*, В.Е. Кутний*, А.В. Рыбка*, И.Н. Шляхов*, А.А. Захарченко*,
К.В. Кутний*, А.А. Веревкин**

* Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1

** Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4

E-mail: d_kutniy@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 23 марта 2007 г.

В работе рассмотрены особенности формирования барьерных контактов на высокоомном полупроводниковом соединении CdZnTe *p*-типа для создания детекторов рентгеновского и гамма-излучения. Предложена эквивалентная электрическая схема структуры металл-полупроводник-металл, позволяющая моделировать различные типы и варианты контактов. На основе структур Au-CdZnTe-In созданы детекторы для регистрации низкоэнергетического гамма-излучения, характеризующиеся малыми токами утечки ~ 1,5 нА при напряжении смещения 100 В.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: CdZnTe, детектор, гамма-излучение, вольтамперная характеристика, контакт, структура металл-полупроводник-металл

Несмотря на то, что методика формирования контактов на полупроводниковом полуизолирующем материале CdZnTe нигде не выделяется в качестве самостоятельного аспекта технологии изготовления детектора γ -излучения, ясно, что зачастую именно контакты определяют электрофизические и детектирующие свойства полупроводникового детектора. Особенности создания контактов Me-CdZnTe(CdTe) рассмотрены в работах [1-6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Общая проблема, наблюдаемая при детектировании γ -излучения при помощи высокоомных полупроводниковых материалов (CdZnTe, CdTe, HgI₂) – низкая подвижность и малое время жизни дырок, а также их склонность к захвату глубокими центрами, расположенными в запрещенной зоне полупроводника. Для достижения высокого энергетического разрешения полупроводникового детектора необходим полный сбор фотогенерированных электронов и дырок, поэтому низкая дырочная подвижность приводит к увеличению времени сбора заряда, а их захват на ловушках – к неполному сбору заряда, а следовательно, к снижению энергетического разрешения детектора.

В работе [7] показано, что при создании омического контакта Me-CdZnTe низкая подвижность дырок практически не влияет на детектирующие характеристики такой структуры. Данное утверждение базируется на том, что дырки, образовавшиеся в результате облучения детектора γ -квантами идвигающиеся при приложении напряжения смещения к отрицательному контакту, будут рекомбинировать с электронами, выходящими из этого контакта. Вследствие того, что подвижность электронов почти на порядок превосходит подвижность дырок, вклад последних в результирующий сигнал детектора будет ничтожно малым. На самом деле такая модель может быть реализована только в условиях идеального бездефектного монокристаллического материала и идеального омического контакта.

С другой стороны, наилучшим разрешением по энергии γ -квантов обладают детекторы с барьерными контактами [8, 9], однако толщина активного слоя, обедненного носителями заряда, в такой структуре не превышает несколько сотен микрометров. Кроме того, на сегодняшний день так и не решена проблема, связанная с так называемым эффектом «поляризации», возникающим в структурах Me-CdZnTe(CdTe) с барьерными контактами [10, 11]. Данный эффект проявляется в деградации спектрометрических характеристик детектора после 30...60 мин. непрерывной работы при относительно низком напряжении смещения (~ 400 В).

Наряду с энергетическим разрешением важной характеристикой детектора является эффективность регистрации им излучения. Ослабление потока γ -квантов N_0 на пути L описывается простым экспоненциальным законом:

$$N = N_0 \exp(-\mu L), \quad (1)$$

где μ – коэффициент линейного поглощения [12].

Тогда доля фотонов, поглотившихся в детекторе толщиной L

$$N / N_0 = 1 - \exp(-\mu L). \quad (2)$$

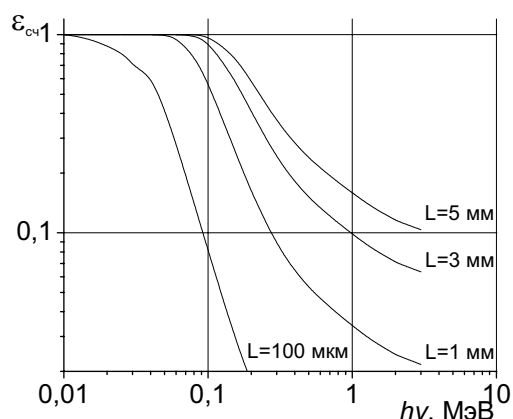


Рис. 1. Эффективность поглощения $\epsilon_{сч}$ как функция энергии фотона для детекторов CdZnTe толщиной L .

материала, используемого в качестве контакта [14, 15]. Данное обстоятельство может быть объяснено тем, что между металлом и полупроводником существует слой диэлектрика в виде химического соединения полупроводника, обычно оксида. В случае тонкого оксидного слоя (2...10 нм) считается, что такой оксид не препятствует прохождению тока из-за туннелирования электронов и высота барьера определяется разностью работ выхода заряда из полупроводника и металла, нанесенного на оксид, и заряженными поверхностными ловушками. При толстом оксидном слое (> 10 нм) вольтамперная характеристика структуры металл-полупроводник начинает зависеть от омического сопротивления оксидного слоя.

Действительно, результаты исследований химического состава поверхности кристаллов CdZnTe(CdTe) показывают, что травление в полирующих спиртовых растворах Br_2 приводит к образованию на ней обогащенного теллуридом слоя, который затем быстро окисляется на воздухе [16, 17]. Толщина слоя не превышает 2 нм и не зависит от времени травления [18]. Окисление обогащенного теллуридом слоя приводит к образованию оксидной пленки TeO_2 толщиной 15...20 нм, которая обнаруживается уже через 5 мин. выдержки кристалла на воздухе [19].

Вольтамперная характеристика (ВАХ) перехода металл-полупроводник определяется высотой электрического барьера, созданного на границе раздела. Металлы с высоким значением работы выхода (например, Au) обычно используются для создания барьерного контакта на полупроводниковом материале n -типа и омического контакта на материале p -типа. Для металлов с низким значением работы выхода (например, In) – справедливо обратное утверждение. Ниже приведены значения работы выхода для наиболее используемых в качестве контактов металлов: $\phi_{\text{Au}} = 5,3$ эВ, $\phi_{\text{Al}} = 4,25$ эВ, $\phi_{\text{In}} = 3,8$ эВ [20].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения структур Me-CdZnTe-Me использовались кристаллы на основе тройного полупроводникового соединения $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ p -типа проводимости, выращенные методом НРВ (high pressure Bridgman). Некоторые характеристики кристаллов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики кристаллов НРВ CdZnTe

Химическая формула	$\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$
Температура плавления	1115°C
Плотность	5,8 г/см ³
Плотность дислокаций	$10^4 - 10^5$ см ⁻²
Ширина запрещенной зоны	1,56 эВ
Электросопротивление	не менее $3 \cdot 10^{10}$ Ом·см
Произведение подвижности на время жизни: для электронов ($\mu_e \tau_e$) для дырок ($\mu_h \tau_h$)	не менее $1 \cdot 10^{-3}$ см ² /В не менее $5 \cdot 10^{-5}$ см ² /В

Из слитка вырезались параллелепипеды размерами $5 \times 5 \times 1$ мм³. Заготовки проходили стандартную механическую и химическую обработку (химическую отмывку, шлифовку, полировку, травление). Для

формирования контактов методом химического осаждения золота использовалась золотохлористоводородная кислота (массовая доля золота не менее 48%), ТУ 2612-025-00205067-2003. Для создания контактов методом ионно-плазменного напыления применялись алюминий марки АД1 (содержание Al не менее 99,3%). Для создания контактов методом термического испарения использовался индий марки ИН-00 (содержание In не менее 99,999%).

Нанесение In на кристаллы CdZnTe методом термического испарения с помощью резистивного испарителя проводилось в вакуумном универсальном посту ВУП-5М, предназначенном для получения пленок из различных металлов. Устройство для термического испарения состоит из резистивного испарителя (типа корзиночки), клемм для установки испарителя, трансформатора накального для питания испарителя. Для создания контакта формировалась заготовка шаровидной формы $\varnothing 1$ мм, которая помещалась в резистивный испаритель корзиночного типа. На образец кристалла помещалась маска, которая крепилась на высоте 20 мм над испарителем. Испарение проводилось в вакууме $3 \cdot 10^{-3}$ Па, температура на поверхности образца контролировалась термопарой хромель-алюмель, и не превышала 60°C . Диаметр полученного индиевого контакта составлял 3,2 мм, а его толщина, вычисленная по разности масс кристалла до и после нанесения In, не превышала 600 Å.

Создание контактов из Al методом ионно-плазменного напыления проводилось в вакуумной электродуговой установке. Для нанесения контакта на образец помещалась маска, которая крепилась в вакуумной камере установки, отверстие в маске закрывалось заслонкой. Установка откачивалась на высокий вакуум до 10^{-4} Па и напускался Ag до давления 10^{-2} Па. Заслонка, блокирующая отверстие в маске, открывалась, включался разряд, загоралась плазма и проводилась очистка контактной площадки образца в течение 3 мин., после чего заслонка закрывалась. Далее включалась дуга и проводилось обезгаживание катода (около 1 мин.), затем открывалась заслонка и напылялся металл. Длительность процесса напыления металла не превышала 1,5 мин. Ток дуги в процессе напыления – 90...100 А. Диаметр полученного контакта составлял ~ 3 мм, а его толщина, вычисленная по разности масс кристалла до и после нанесения металла, не превышала 800 Å. Методики измерения электрофизических и детектирующих характеристик структур Me-CdZnTe-Me описаны в работе [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате эксперимента были изготовлены структуры Au-CdZnTe-In и Au-CdZnTe-Al, ВАХ которых приведены на рис. 2, 3.

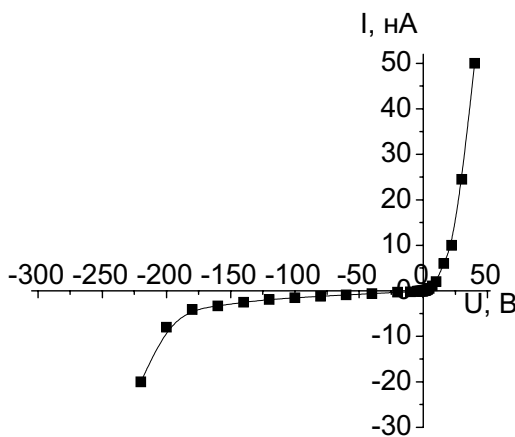


Рис. 2. ВАХ структуры Au-CdZnTe-In

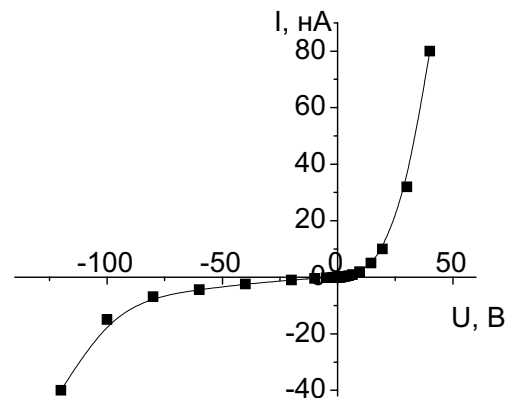


Рис. 3. ВАХ структуры Au-CdZnTe-Al

Следует отметить, что ВАХ имеют характерный «диодный» вид, с прямой ветвью характеристики когда «+» прикладывается к золотому контакту, и с обратной – когда «+» прикладывался к контакту из Al или In.

В работе [22] для описания ВАХ алмазного детектора с омическими контактами предложена эквивалентная электрическая схема структуры металл-алмаз-металл. Предложенная схема может быть использована для описания вольтамперных характеристик структур металл-полупроводник-металл (МПП) с совершенно одинаковыми омическими контактами, однако она не позволяет моделировать такие варианты, как два омических контакта с различной степенью омичности и, тем более, вариант, где один из контактов омический, а второй – барьерный.

Нами была предложена универсальная эквивалентная электрическая схема структуры МПП, позволяющая моделировать любые типы и варианты контактов (рис. 4), в которой, элементы $R1$, $D1$ и $R2$, $D2$ определяют характеристики контактов, $R3$ – объемное сопротивление полупроводника. Использование в предложенной схеме диодов $D1$, $D2$ обусловлено необходимостью моделировать ВАХ вплоть до электрического пробоя

перехода металл-полупроводник. Данное условие достигается путем подбора соответствующего обратного напряжения пробоя диода $U_{проб.}$.

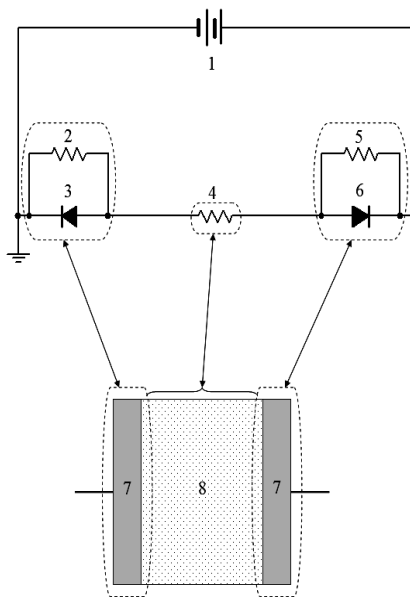


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема структуры МПМ

- 1 – источник постоянного напряжения;
- 2 – R_1 (резистивная составляющая первого контакта);
- 3 – D_1 (диодная составляющая первого контакта);
- 4 – R_3 (объемное сопротивление полупроводника);
- 5 – R_2 (резистивная составляющая второго контакта);
- 6 – D_2 (диодная составляющая второго контакта);
- 7 – металлические контакты;
- 8 – полупроводниковый кристалл.

$R_{конт.} \gg R_{полупровод.}$

На рис. 5 и рис. 6 приведено сравнение экспериментальных ВАХ структур Au-CdZnTe-In и Au-CdZnTe-Al (см. рис. 2, 3), с результатами моделирования с помощью предложенной эквивалентной электрической схемы.

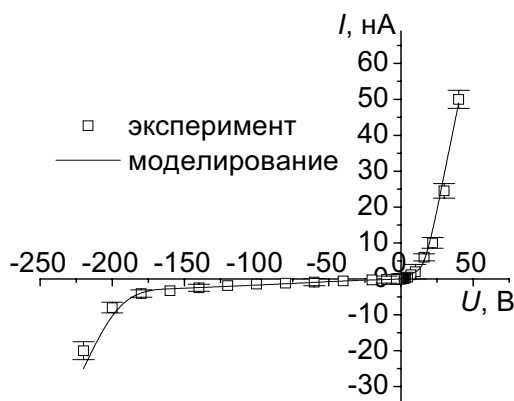


Рис. 5. ВАХ и результаты моделирования структуры Au-CdZnTe-In.

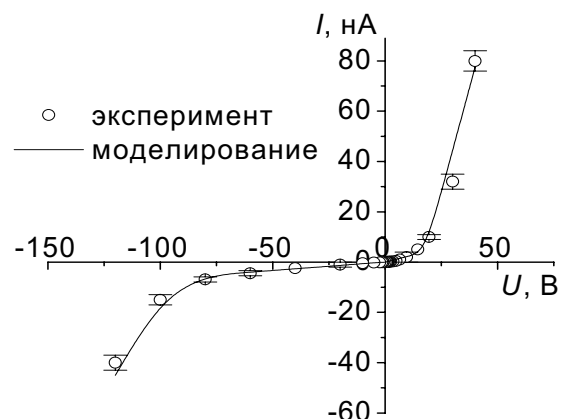


Рис. 6. ВАХ и результаты моделирования структуры Au-CdZnTe-Al.

Результаты моделирования показывают, что предложенная эквивалентная электрическая схема позволяет с хорошей точностью описывать ВАХ структур Me-CdZnTe-Me. Параметры эквивалентной электрической схемы для структур Au-CdZnTe-In и Au-CdZnTe-Al приведены в таблице 2.

Применение в процессе изготовления структур МПМ метода пассивации боковой поверхности позволяет пренебречь резистивной составляющей тока через нее.

Предложенная схема дает возможность описать два основных варианта контактов в структуре металл-полупроводник-металл. Первый, когда в МПМ структуре оба контакта одинаково омические и второй, когда один из контактов омический, а второй – барьерный. Тогда различная степень омичности контактов будет представлять собой частный случай этих двух вариантов.

Для моделирования использовали пакет программ Electronic Workbench, предназначенный для проектирования и расчета электрических схем.

Параметры диодов D_1 , D_2 в случае структуры с омическими контактами можно не учитывать, так как при достаточно малых R_1 , R_2 ток через диод, находящийся в закрытом состоянии, протекать не будет, и вольт-амперная характеристика определяется объемным сопротивлением полупроводника R_3 . Это утверждение справедливо и для диода D_1 .

Таким образом, ток в реальном контакте металл-полупроводник может быть описан двумя составляющими: резистивной (R_1 , R_2) и диодной (D_1 , D_2).

Тогда можем сформулировать следующее требование, касающееся создания омических и барьерных контактов. Для создания качественного омического контакта необходимо, чтобы ток через контакт был максимальным, т.е. $R_{конт.} \rightarrow 0$, а для создания барьерного контакта – минимальным или

Итак, использование разработанной эквивалентной электрической схемы структур МПМ позволяет сделать следующее заключение, что требование, касающееся создания качественного барьерного контакта, $R_{\text{конт.}} \gg R_{\text{полупровод.}}$, наиболее удачно реализовано в структуре Au-CdZnTe-In.

Таблица 2. Параметры эквивалентной электрической схемы, полученные в результате моделирования ВАХ структур Au-CdZnTe-In и Au-CdZnTe-Al

Структура	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	D1	D2
				$U_{\text{проб.}}, \text{В}$	$U_{\text{проб.}}, \text{В}$
Au-CdZnTe-In	270	6×10^{10}	$0,5 \times 10^9$	15	195,2
Au-CdZnTe-Al	350	$1,5 \times 10^{10}$	$0,3 \times 10^9$	16	94,9

Низкий ток утечки на обратной ветви ВАХ структуры Au-CdZnTe-In (1,5 нА при напряжении смещения 100 В) позволяет эффективно использовать ее для регистрации γ -излучения низкой энергии (^{241}Am , $E_\gamma = 59,9$ кэВ). На рис. 7 приведен амплитудный спектр радионуклида ^{241}Am , полученный на детекторе со структурой Au-CdZnTe-In.

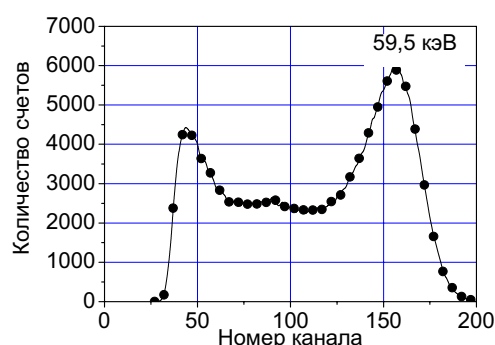


Рис. 7. Амплитудный спектр радионуклида ^{241}Am , полученный структурой Au-CdZnTe-In при напряжении смещения 100 В

Пик $E_\gamma = 59,5$ кэВ является пиком полного поглощения (фотопик), в нем объединены импульсы, возникающие в результате фотоэлектрических взаимодействий γ -квантов с полной потерей энергии в материале полупроводника. Некоторые счета возникают также в результате единичных или многократных событий комптоновского рассеяния. Центроида пика соответствует энергии фотона в кэВ или амплитуде импульса в каналах АЦП. Полное число событий в пике (площадь пика) соответствует интенсивности пика.

Таким образом, на основе структур Au-CdZnTe-(In, Al) возможно создание детекторов для регистрации рентгеновского и γ -излучения низкой энергии. Вольтамперные характеристики структур могут быть описаны с хорошей точностью при помощи эквивалентной электрической схемы, применение которой позволяет понять особенности формирования электрического барьера на границе раздела Me-CdZnTe.

ВЫВОДЫ

В работе изложены результаты экспериментальных исследований электрофизических и детектирующих характеристик барьерных структур Me-CdZnTe-Me, предназначенных для регистрации рентгеновского и γ -излучения.

Проведен расчет эффективности регистрации γ -излучения кристаллами CdZnTe различной толщины (0,1...5 мм). Показано, что создание структур Me-CdZnTe-Me с барьерными контактами, толщина обедненного слоя в которых ~ 100 мкм, позволяет эффективно регистрировать γ -излучение с энергией, не превышающей 100 кэВ.

Предложена универсальная эквивалентная электрическая схема структуры МПМ, позволяющая моделировать различные типы и варианты контактов, проведено моделирование вольтамперных характеристик полученных структур.

На основе структуры Au-CdZnTe-In созданы детекторы для регистрации γ -излучения, характеризующиеся малым током утечки (1,5 нА при напряжении смещения 100 В) и удовлетворительными детектирующими характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nemirovsky Y., Ruzin A., Asa G., Gorelik J. Study of the charge collection efficiency of CdZnTe radiation detectors // J. Electron. Mater. - 1996. - Vol. 25, № 8. - P. 1221-1231.
2. Musa A., Ponpon J.P., Grob J.J., Hage-Ali M., Stuck R., Siffert P. Properties of electroless gold contacts on p-type cadmium telluride // J. Appl. Phys. - 1983. - Vol. 54. - P. 3260-3268.
3. George M.A., Collins W.E., Chen K.T., Hu Z., Egariyev S.U., Zheng Y., Burger A. Study of electroless Au film deposition on ZnCdTe crystal surfaces // J. Appl. Phys. - 1995. - Vol. 77, № 7. - P. 3134-3137.
4. Rabinal M.K., Lyubomirsky I., Pekarskaya E., Lyakhovitskaya V., Cahen D. Low resistance contacts to p-CuInSe₂ and p-CdTe crystals // J. Electron. Mater. - 1997. - Vol. 26. - P. 893-897.

5. Niles D.W., Li X., Sheldon P. A photoemission determination of the band diagram of the Te/CdTe interface // *J. Appl. Phys.* - 1995. - Vol. 77, № 9. - P. 4489-4493.
6. Акобиров А.Т., Матвеев О.А., Рывкин С.М., Хусаинов А.Х. Структура металл-полупроводник-металл (М-П-М) на основе CdTe как спектрометрический детектор ядерного излучения // *Физика и техника полупроводников.* - 1976. - Т. 10. - Вып. 11. - С. 2127-2132.
7. Lachish U. CdTe and CdZnTe semiconductor gamma detectors equipped with ohmic contacts // *Nucl. Instr. and Meth. A.* - 1999. - Vol. 436. - P. 146-149.
8. Takahashi T., Mitani T., Kobayashi Y., Kouda M., Sato G., Watanabe S., Nakazawa K., Okada Y., Funaki M., Ohno R., Mori K. High resolution Schottky CdTe diode detector // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* - 2002. - Vol. 49, № 3. - P. 1297-1303.
9. Matsumoto C., Takahashi T., Takizawa K., Ohno R., Ozaki T., Mori K. Performance of a new Schottky CdTe detector for hard X-ray spectroscopy // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* - 1998. - Vol. 45. - P. 428-432.
10. Malm H.L., Martini M. Polarization phenomena in CdTe radiation detectors // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* - 1974. - Vol. 21. - P. 322-330.
11. Siffert P., Berger J., Scharager C., Cornet A., Stuck R., Bell R.O., Serreze H.B., Wald F.V. Polarization in cadmium telluride nuclear radiation detectors // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* - 1976. - Vol. 23, № 1. - P. 159-169.
12. Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 344 с.
13. Berger M.J., Hubbell J.H. XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer, NBSIR 87-3597. - 1987 (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>).
14. Abay B., Cankaya G., Guder H.S., Efeoglu H., Yogurtcu Y.K. Barrier characteristics of Cd/p-GaTe Schottky diodes based on I-V-T measurements // *Semicond. Sci. Technol.* - 2003. - Vol. 18. - P. 75-81.
15. Венгер Е.Ф., Миленин В.В., Ермолович И.Б., Конакова Р.В., Иванов В.Н., Войцеховский Д.И. Особенности формирования и термическая стабильность контактов, образованных боридами и нитридами титана с арсенидом галлия // *Физика и техника полупроводников.* - 1999. - Т. 33. - Вып. 8. - С. 948-953.
16. Werthen J.G., Haring J.-P., Fahrenbruch A.L., Bube R.H. Effects of surface preparation on the properties of metal/CdTe junction // *J. Appl. Phys.* - 1983. - Vol. 54, № 10. - P. 5982-5989.
17. Hirsch L.S., Ziemer K.S., Richards-Babb M.R., Stinespring C.D., Myers T.H., Colin T. The use of atomic hydrogen for low temperature oxide removal from HgCdTe // *J. Electron. Mater.* - 1998. - Vol. 27, № 6. - P. 651-656.
18. Feldman R.D., Opila R.L., Bridenbaugh P.M. Auger electron spectroscopic study of the etching of cadmium telluride and cadmium manganese telluride // *J. Vac. Sci. Technol. A.* - 1985. - Vol. 3, № 5. - P. 1988-1991.
19. Rouse A.A., Szeles C., Ndad J.-O., Soldner S.A., Parnham K.B., Gaspar D.J., Engelhard M.H., Lea S.V., Shutthanandan S.V., Thevuthasan T.S., Baer D.R. Interfacial chemistry and the performance of bromine-etched CdZnTe radiation detector devices // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* - 2002. - Vol. 49, № 4. - P. 2005-2009.
20. Свойства элементов. - Справочник, часть I: Физические свойства элементов / Под ред. чл.-корр. АН УССР Г.В. Самсонова. - М.: «Металлургия», 1976. - 537 с.
21. Кутний В.Е., Кутний Д.В., Рыбка А.В., Шляхов И.Н., Тихоновский М.А., Кисляк И.Ф. Модификация электрофизических свойств структуры Me-CZT-Me методами термической обработки для детекторов гамма-излучения // *Контрольно-измерительные приборы и автоматика.* - 2004. - № 12. - С. 36-41.
22. Meier D. CVD Diamond Sensors for Particle Detection and Tracking: PhD Dissertation. - CERN, Geneva, 1999. - 242 p.

**SIMULATION OF VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTIC
OF X- AND GAMMA-RAY DETECTORS BASED ON Me-CdZnTe-Me STRUCTURE**
**D.V. Kutniy*, V.E. Kutniy*, A.V. Rybka*, I.N. Shlyahov*, A.A. Zakharchenko*, K.V. Kutniy*,
A.A. Veryovkin****

*National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", Akademichna St.1, 61108 Kharkiv, Ukraine

** Karazin Kharkov National University, 61077, sq. Svobody, 4

E-mail: d_kutniy@kipt.kharkov.ua

The features of barrier contact forming on high-resistance semiconductor compound CdZnTe *p-type* for making detectors X- and gamma-irradiations were reviewed. Efficiencies of gamma-irradiation registration in a wide power range by CdZnTe crystals of different thickness were estimated. The equivalent circuitry of a MSM structure is offered, allowing to simulate various types and variants of electrodes. On the basis of Au-CdZnTe-In structure was created detectors for detecting low-energy gamma-irradiation, characterized by small leakage current 1,5 nA at a bias voltage 100 V.

KEY WORDS: CdZnTe, detector, gamma-irradiation, voltage-current characteristic, contact, metal-semiconductor-metal structure