

**Характеристики детекторов рентгеновского и гамма излучения  
на основе поликристаллических пленок CdTe и CdZnTe**

*Ш. Б. Утамурадова, С. А. Музафарова, А. М. Абдугафуров, К. М. Файзуллаев,  
Э. М. Наурзалиева, Д. А. Рахманов*

*На основе детекторов CdTe, CdZnTe был создан ряд перспективных приборов, которые нашли применение в металлургии, в решении задач таможенного контроля и задач контроля ядерных материалов, а также созданы матричные детекторы для изготовления медицинских приборов и приборов для исследования космического пространства. Созданные детекторы на основе поликристаллических полупроводниковых пленок CdTe и CdZnTe со столбчатой структурой на молибденовой подложке с толщиной  $d = 30 \div 150$  мкм имели удельное сопротивление  $\rho > 10^5 \div 10^8 \Omega \cdot \text{см}$ . Энергетическое разрешение CdTe и CdZnTe детекторов при комнатной температуре достигает величины  $\sim 5$  кэВ на линии  $59,6$  кэВ  $^{241}\text{Am}$ .*

*Ключевые слова:* облучение, радиация, структура, плёнка, детектор промежуточный слой, твёрдый раствор, темновой ток, подвижность, энергетическое разрешение.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-4-81-86

**Введение**

Последние годы по-прежнему привлекают к себе внимание детекторы рентгеновского и  $\gamma$ -излучения на основе полупроводниковых материалов. Значительный прогресс в этом направлении был достигнут при исполь-

зовании соединений CdTe и CdZnTe [1, 2]. Наилучшие значения получены при существенном охлаждении ( $-40$  °C  $\div$   $0$  °C), необходимым для снижения шума детектора и увеличения подвижности носителей заряда [3–5]. Для комнатных температур энергетическое разрешение приближается к величинам порядка нескольких процентов.

В последнее десятилетие были разработаны и усовершенствованы ряд методов собирания зарядов только одного знака (электронов) [6, 7]. В настоящее время структура полупроводниковых материалов и их применение в области микроэлектроники изучаются несколькими учеными [8–11]. Эти методы открывают широкие возможности для применения полупроводниковых детекторов в области контроля и наблюдения за распространением ядерного оружия [8, 9], в промышленности [12] и медицине [13].

Для улучшения энергетического разрешения CdTe и CdZnTe-детекторов предложен ряд технологических [15] и электронных [16] методов. Выбор полупроводникового соединения, наиболее пригодного для спектро-

**Утамурадова Шарифа Бекмурадовна**, директор,  
д.ф.-м.н., профессор.

E-mail: sh-utamuradova@yandex.ru

**Музафарова Султанпошша Анваровна**, нач. отдела,  
к.ф.-м.н.

**Абдугафуров Абдулла Маннапович**, докторант.

**Файзуллаев Кахрамон Махмуджанович**, докторант.

E-mail: qahramon\_fayz@mail.ru

**Наурзалиева Эльмира Махамбетяровна**,  
докторантка.

**Рахманов Дилмурод Абдужаббор угли**, докторант.

Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана.

Узбекистан, 100057, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, 20.

E-mail: samusu@rambler.ru

*Статья поступила в редакцию 11 мая 2021 г.*

© Утамурадова Ш. Б., Музафарова С. А.,  
Абдугафуров А. М., Файзуллаев К. М., Наурзалиева Э. М.,  
Рахманов Д. А., 2021

метрии и дозиметрии  $\gamma$ -излучения, обусловлен критическими параметрами материала.

Целью данной работы является исследование характеристик детекторов рентгеновского и гамма излучения на основе поликристаллических пленок CdTe и CdZnTe.

### Постановка работы

Значение ширины запрещенной зоны  $E_g$  является определяющим фактором работы детектора, влияющего на значения подвижности носителей заряда  $\mu$ , которая, как правило, изменяется обратно пропорционально ширине запрещенной зоны  $E_g$ , и на удельное сопротивление  $\rho$ , которое увеличивается с ростом  $E_g$ . Темновые токи и шумы соответственно уменьшаются с ростом значения  $E_g$  полупроводникового соединения. Эффективность сбора заряда в детекторе существенно зависит от подвижности  $\mu$  и времени жизни  $\tau$  носителей заряда. Атомный номер  $Z$  является важным параметром, который нужно максимизировать, чтобы сократить глубину поглощения  $\gamma$ -излучения и увеличить эффективность детектирования, или при той же самой эффективности сократить толщину детектора, или при постоянстве обеих этих величин увеличить максимальную разрешаемую энергию  $\gamma$ -излучения.

Важный параметр – удельное сопротивление  $\rho$ , которое должно выбираться как можно с большим значением в полупроводнико-

вой структуре. Большое  $\rho$  позволяет увеличить напряженность поля и снизить время сбора заряда или уменьшить темновой ток.

Размеры спектрометрических детекторов и их энергетические разрешения для излучения с энергией 662 кэВ представлены на рис. 1.

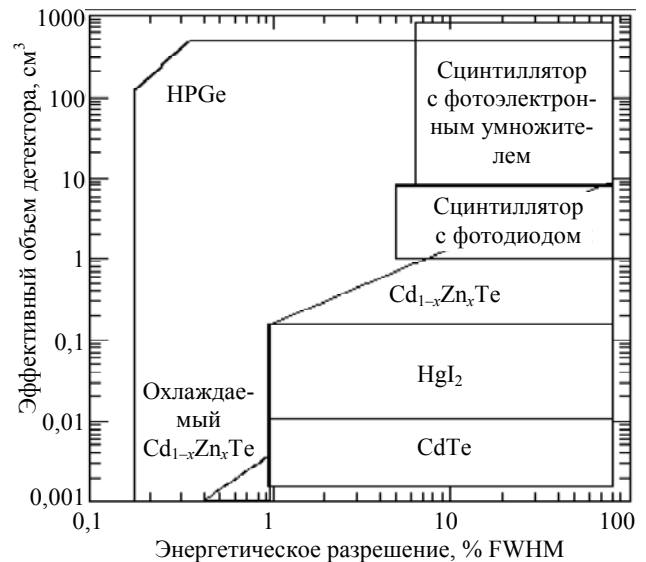


Рис. 1. Размеры спектрометрических детекторов и их энергетические разрешения для излучения с энергией 662 кэВ.

Кроме того, при выборе основных параметров полупроводника для изготовления детектора ионизирующего излучения необходимо учесть возможность и практического получения материала, включая процесс роста соединений. Соединения с большим значением элементов атомного номера  $Z$  соединений CdTe, ZnTe приведены в таблице.

Таблица

Основные параметры пленок CdTe, ZnTe и TP составом  $Cd_{0,7}Zn_{0,3}Te$ , выращенные газотранспортным методом в потоке водорода

Соединение	$d$ , плотность, г/см <sup>3</sup>	$Z$ , атомный номер	Ширина запрещенной зоны, $E_g$ , эВ	Удельное сопротивление, $\rho$ , Ом×см	Подвижность электронов, $\mu$ , см <sup>2</sup> /(в с)	$T$ , температура плавления, °С
ZnTe	5,63	52	2,26	$10^7$	350	1290
$Cd_{0,7}Zn_{0,3}Te$	6,62	52	2,0	$1,5 \cdot 10^9$	1100	1120
CdTe	6,28	48; 52	1,44	$10^8$	1100	1092

Сплавы бинарных соединений, например, твердый раствор (ТР)  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ,  $CdS_{1-x}Se_x$ ,  $Zn_{1-x}Cd_xSe$ , в которых элементы из одной и той же группы смешиваются в произвольных концентрациях, заслуживают особое

внимания. В них при изменении концентрации элементов плавно меняются физические свойства, например, ширина запрещенной зоны  $E_g$ . Важно найти такое оптимальное значение концентрации, когда улучшение одного из па-

раметров например, рост удельного сопротивления  $\rho$  в ТР  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  с увеличением значения  $x$  еще не привело к существенной деградации.

Как видно из таблицы, соединения  $\text{CdTe}$  и  $\text{CdZnTe}$  обладают одним из лучших наборов характеристик для создания детекторных структур. Это связано с большим значением атомного номера  $Z$ , сравнительно высокой подвижностью носителей заряда  $\mu$  и относительно отработанной технологией роста соединений. Как видно из выше изложенного анализа литературных данных, авторами созданы детекторы на основе крупноблочных поликристаллических соединений  $\text{CdTe}$  и  $\text{CdZnTe}$ .

### Экспериментальная часть

По усовершенствованной технологии были созданы детекторные пленочные  $\text{CdTe}/\text{CdO}$  и  $\text{CdZnTe}/\text{ITO}$  структуры на основе крупноблочного поликристалла  $\text{CdTe}$  и  $\text{CdZnTe}$ . Базовым материалом служил поликристаллические пленки  $p\text{-CdTe}$  со столбчатой структурой, образованные сублимацией в потоке водорода на молибденовых подложках ( $\text{Mo}$ ). Толщина пленок  $d = 30 \div 150$  мкм. Методом травления ямок было установлено, что пленки  $p\text{-CdTe}$  и  $\text{CdZnTe}$  состоят из блоков монокристаллов (зерен) размером  $L = 30 \div 150$  мкм, ориентированных в направлении роста (перпендикулярно к плоскости  $\text{Mo}$ -подложки). Размер зерен в диаметре  $d = 50 \div 100$  мкм, и зерна имели удельное сопротивление  $\rho = (10^3 \div 10^7)$  Ом см и площадь  $S = 0,25 \div 4$  см<sup>2</sup>. Время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau = 50 \div 70$  мкс. Такую пленку  $p\text{-CdTe}$  и  $\text{CdZnTe}$  (в направлении, перпендикулярном поверхности  $\text{Mo}$ -подложки) можно считать состоящей из монокристаллов, разделенных высокоомными прослойками. Поэтому свойства полупроводниковых приборов, работающих на основе процессов переноса носителей заряда, будут в основном определяться свойствами монокристаллов  $p\text{-CdTe}$ , а не границ раздела между кристаллитами пленок.

Параметры рекомбинационных постоянных в пленочных  $\text{CdTe}$ -структурах исследовались в работе [17], где было установлено, что

поликристаллические слои  $\text{CdTe}$  и  $\text{CdZnTe}$  не уступают по транспортным свойствам высококачественным  $\text{CdTe}$ -монокристаллам, так как в  $\text{CdTe}$ -пленках со столбчатой структурой прослойки между зернами могут быть эффективными стоками различного типа дефектов [18]. Исследования показывают, что в процессе синтеза крупноблочных поликристаллических  $\text{CdTe}$ -пленок из-за реиспарения легколетучего компонента  $\text{Cd}$  образуются свободные атомы теллура  $\text{Te}$ , которые, взаимодействуя с остаточным кислородом в реакторе, образуют тонкие высокоомные слои  $\text{TeO}_2$ . Слои  $\text{TeO}_2$  пассивируют поверхностные состояния в межзерновых границах [19], что приводит к снижению поверхностной рекомбинации и значительному росту времени жизни неравновесных носителей заряда до нескольких десятков микросекунд [20]. Рентгенофазовый анализ выявил в ряде  $p\text{-CdTe}$ -пленок наличие вблизи границы раздела слоя  $p\text{-CdTe}$  с  $\text{Mo}$ -подложкой включений состава  $\text{CdTe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mo}_3\text{Te}_4$ ,  $\text{MoO}_3$ , а в толщине пленок –  $\text{CdTe}_2\text{O}_3$ . Магнетронным распылением атомы  $\text{Cd}$  затем были нанесены в кислородосодержащей среде на поверхности  $p\text{-CdTe}$  и  $\text{CdZnTe}$ -пленок. При этом в едином технологическом цикле формировалась структура  $p\text{-CdTe}-n\text{-CdTe}-n\text{-CdO}$  и  $\text{CdZnTe}-n\text{-ITO}$ .

Для создания поверхностно-барьерного перехода была разработана специальная методика химической обработки поверхности  $n\text{-CdTe}$ -слоев изготовленного  $\text{Mo}-p\text{-CdTe}-n\text{-CdTe}-n\text{-CdO}$  и  $\text{CdZnTe}-n\text{-ITO}$  для полупроводниковых структур. Этот процесс является одной из основных в технологии создания структур и определяет толщину чувствительной области и «мертвого слоя» детекторов. Первым этапом операции является удаление  $\text{CdO}$ -слоя в структуре  $\text{CdTe}/\text{CdO}$  и  $\text{ITO}$  в структуре  $\text{CdZnTe}/\text{ITO}$  путем химического травления. Методика и выбранный режим химического травления на следующем этапе обеспечили высокую однородность слоев по площади рабочей поверхности детекторов.

Конструкция пленочного  $\text{CdTe}$  и  $\text{CdZnTe}$ -детектора приведена на рис. 2. Электрические контакты и охранные электроды наносились на входное окно детектора методом термического напыления индия  $\text{In}$  и золота  $\text{Au}$  в вакууме через специальные маски. Толщина металла индия  $\text{In}$  и золота  $\text{Au}$  составляла  $30 \div 50$  Å.

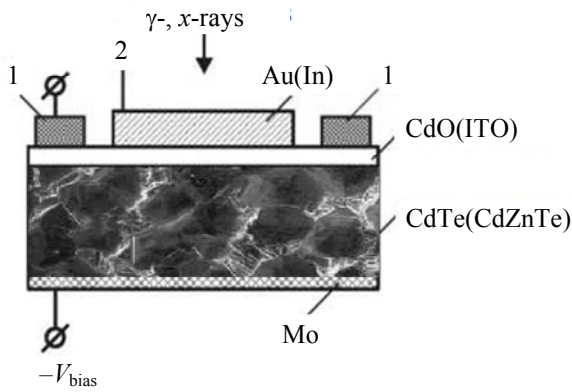


Рис. 2. Конструкция пленочного CdTe(CdZnTe)/CdO(ITO) детектора.

### Результаты и их обсуждение

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики пленочного детектора последовательно может быть разделена на три участка (рис. 3, 1 участок): первый участок вольт-амперной характеристики характеризуется сублинейной зависимостью  $I \sim V_b^a$  ( $V_b$  – напряжение смещения), где  $a \geq 0,52$ ; второй участок – насыщение тока ( $I = \text{const}$ ), что свидетельствует о наличии неинжектирующего базового контакта с низким переходным сопротивлением.

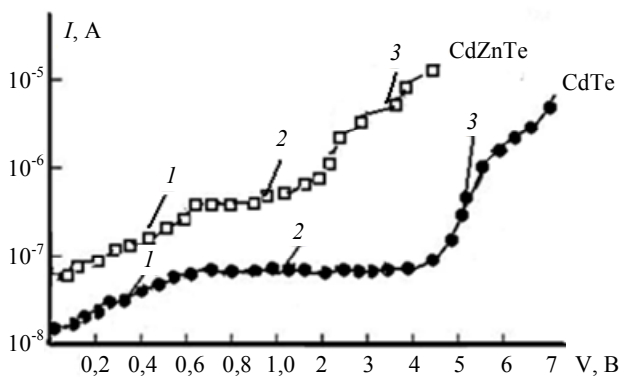


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики пленочных CdTe и CdZnTe детекторов при  $T = 293$  К:  $d = 150$  мкм,  $S = 0,4$  см<sup>2</sup>.

Это означает, что пленочный CdTe и CdZnTe-детектор работает в режиме полного обеднения в данном интервале  $V_b$  и поле  $n$ - $p$ -перехода достигает Mo-контакта. В случае выпрямляющего базового контакта наблюдается значительное увеличение обрат-

ного тока и шумов детекторов (рис. 3); третий участок, где зависимость  $I(V_b)$  имеет вид  $I \sim V_b^{a>2}$ , также показан на рисунке. Исследования показали, что температурная зависимость тока для пленочных CdTe-детекторов с сублинейной зависимостью  $I \sim V_b^{0,5}$  при фиксированном  $V_b < 0,32$  В носит активационный характер с энергией активации  $\Delta E = 0,72$  эВ  $\pm \pm 0,04$  эВ. Значение  $\Delta E$  вполне согласуется с величиной полуширины запрещенной зоны CdTe и CdZnTe, т. е. ток ограничен генерацией в слое объемного заряда [21].

Разрешающая способность детекторов на основе структур CdTe/CdO и CdZnTe/ITO определена с помощью импульсной электронной системы ORTEC и анализатора АИ-1024-95 с электромагнитным излучением источника <sup>241</sup>Am 0,5 см (рис. 4; рис. 5). Пленочные CdTe и CdZnTe-детекторы имели напряжение полного обеднения от 0,7 до 6 В. Значение обратного тока составило величину порядка  $10^{-8} \div 10^{-6}$  А. Энергетическая разрешающая способность в области энергий при  $E = 5 \div 60$  кэВ составляет  $R = 5 \div 10$  кэВ. Зависимость амплитуды сигналов от  $V_b$  для пленочных детекторов CdTe и CdZnTe указывали на высокую однородность и совершенство чувствительных областей детекторов [22]. Детекторы на основе CdTe/CdO и CdZnTe/ITO после хранения в обычных условиях через 6 месяцев показали стабильность в сохранении рабочих параметров.

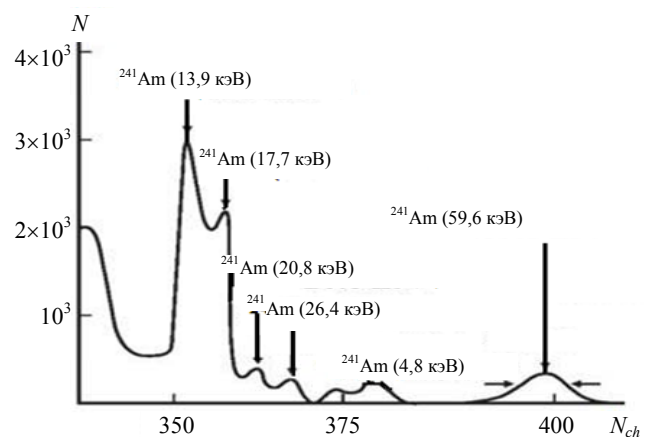


Рис. 4. Амплитудный спектр источника <sup>241</sup>Am, измеренный CdTe при  $T = 293$  К. Напряжение смещения  $V_b = 4,3$  В.  $N_{ch}$  – номер канала.

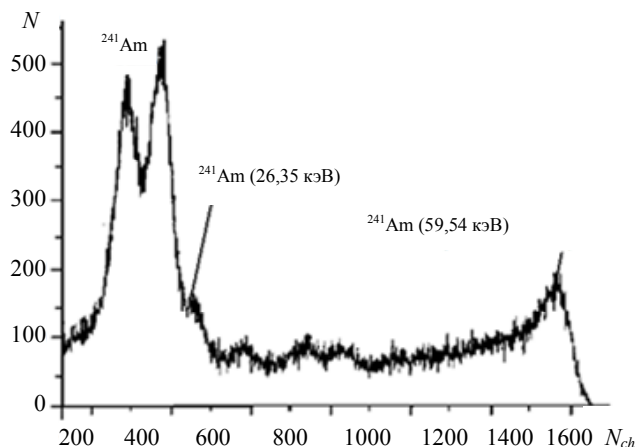


Рис. 5. Спектр гамма-излучения  $^{241}\text{Am}$ , полученные с детектором на основе плёнок  $\text{CdZnTe}$  при  $T = 293 \text{ K}$ . Напряжение смещения  $V_b = 4,8 \text{ В}$ .  $N_{ch}$  – номер канала.

### Заключение

Разработанные  $\text{CdTe/CdO}$  и  $\text{CdZnTe/ITO}$ -детекторы гамма и рентгеновского излучения обладают энергетическим разрешением, близким к детекторам из  $\text{Ge}$  и  $\text{Si}$ . Детекторы  $\text{CdTe/CdO}$  и  $\text{CdZnTe/ITO}$  имеют разрешение в области энергий при  $E = 5 \div 60 \text{ кэВ}$   $R = (5 \div 10) \text{ кэВ}$ , что сравнимо с кремниевыми и германиевыми детекторами. Энергетическое разрешение  $R$  пленочных детекторов приближается к значениям  $R$  монокристаллических детекторов. Повышение качества тыльного контакта  $\text{CdTe/CdO}$  и  $\text{CdZnTe/ITO}$  обеспечивает долгосрочный срок службы прибора. Дальнейшее изучение протекающих процессов в созданных детекторных структурах  $\text{CdTe/CdO}$  и  $\text{CdZnTe/ITO}$ , обладающих высокой чувствительностью к рентгеновскому и  $\gamma$ -излучению, представляют большой научный и практический интерес.

Созданные детекторы гамма и рентгеновского излучения  $\text{CdTe/CdO}$  и  $\text{CdZnTe/ITO}$  и их внедрение в практику предполагают разработку портативных спектрометрических приборов и портативных рентгенофлюоресцентных анализаторов. Данные приборы могут иметь более широкий спектр функциональных возможностей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Iwanczyk J. S., Patt B. E., Wang Y. J., Khusainov A. Kh. // Nucl. Instr. and Meth. A. 1996. Vol. 380. P. 186.
2. Гуменюк-Сычевская Ж. В., Мележик Е. А. // Прикладная физика. 2012. № 1. С. 101.
3. Niemela A., Sipila H., Ivanov V. I. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. Vol. NS-43. № 3. P. 1476.
4. Laviates A. D., McQuaid J. H., Paulus T. J. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1996. Vol. 380. P. 406.
5. Галочкин А. В. // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 65.
6. Eisen Y. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1996. Vol. 380. P. 431.
7. Eisen Y. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1992. Vol. 322. P. 596.
8. Утамурадова Ш. Б., Далиев Х. С., Далиев Ш. Х., Файзуллаев К. М. // Прикладная физика. 2019. № 6. С. 90.
9. Utamuradova Sh. B., Daliev Sh. Kh., Ravshanov Y. R., Fayzullaev K. M. // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2020. № 8(9). P. 5506.
10. Zainabidinov S. Z., Daliev Kh. S., Abdurakhmanov K. P., Utamuradova Sh. B., Khomidjonov I. Kh., Mirzamurodov I. A. // Modern Physics Letters B. 1997. Vol. 11. № 20. P. 909.
11. Muzafarova S. A., Mirsagatov S. A., Dzhamalov F. N. // Semiconductors. 2009. Vol. 43. № 2. P. 175.
12. Scheiber C. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 2000. Vol. 448. № 3. P. 513.
13. Scheiber C., Chambron J. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1992. Vol. 322. P. 604.
14. Азимов С. А., Мирсагатов Ш. А., Музафарова С. А. // Гелиотехника. 1982. № 4. С. 7.
15. Sizov F. et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. 2021. Vol. 124. № 15. P. 105577.
16. Кристоффель Н. Н. Теория примесных центров малых радиусов в ионных кристаллах. – М.: Наука, 1974.
17. Elina A., Asano A., Takahashi T. J. // Phys. Rev. B. 1980. Vol. 22. № 4. P. 1991.
18. Гориков А. В., Заитов Ф. А., Мирсагатов Ш. А. и др. // Доклады АН Азерб. ССР. 1981. Т. 37. № 11. С. 31.
19. Redus B. // Application Note ANCZT-2. 2003. Rev. 2. P. 12.
20. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Сов. радио, 1980.
21. Калмыков Р. М., Кармоков А. М., Шомахов З. В., Кармокова Р. Ю. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 52.
22. Tomal A. et al. // Applied Radiation and Isotopes. 2015. Vol. 100. P. 32.

## Characteristics of X-ray and gamma radiation detectors based on polycrystalline CdTe and CdZnTe films

Sh. B. Utamuradova, S. A. Muzafarova, A. M. Abdugafurov, K. M. Fayzullaev,  
E. M. Naurzalieva, and D. A. Rakhmanov

Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan  
20 Yangi Almazar st., Tashkent, 100057, Uzbekistan  
E-mail: sh-utamuradova@yandex.ru

Received May 11, 2021

*Based on CdTe and CdZnTe detectors a number of promising devices were created, which found their application in metallurgy, in solving the problems of customs control and control of nuclear materials, as well as matrix detectors created for the manufacture of medical devices and devices for space research. Detectors, created on the basis of polycrystalline semiconductor CdTe and CdZnTe films with a columnar structure on a molybdenum substrate with a thickness  $d = 30 \div 150 \mu\text{m}$ , had a specific resistance  $\rho > 10^5 \div 10^8 \Omega\text{-cm}$ . The energy resolution of the CdTe and CdZnTe detectors at room temperature reached  $\sim 5 \text{ keV}$  on the  $59.6 \text{ keV}^{241}\text{Am}$  line.*

*Keywords:* irradiation, radiation, structure, film, detector intermediate layer, solid solution, dark current, mobility, energy resolution.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-4-81-86

### REFERENCES

1. J. S. Iwanczyk, B. E. Patt, Y. J. Wang, and A. Kh. Khusainov, Nucl. Instr. and Meth. A **380**, 186 (1996).
2. Zh. V. Gumenyuk-Sychevskaya and E. A. Melezhik, Applied Physics, No. 1, 101 (2012) [in Russian].
3. A. Niemela, H. Sipila, and V. I. Ivanov, IEEE Trans. Nucl. Sci. **43**, 1476 (1996).
4. A. D. Lavietes, J. H. McQuaid, and T. J. Paulus, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A **380**, 406 (1996).
5. A. V. Galochkin, Applied Physics, No. 3, 65 (2017) [in Russian].
6. Y. Eisen, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A **380**, 431 (1996).
7. Y. Eisen, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A **322**, 596 (1992).
8. Sh. B. Utamuradova, Kh. S. Daliev, Sh. Kh. Daliev, and K. M. Fayzullaev, Applied Physics, No. 6, 90 (2019) [in Russian].
9. Sh. B. Utamuradova, Sh. Kh. Daliev, Y. R. Ravshanov, and K. M. Fayzullaev, International Journal of Emerging Trends in Engineering Research **9**, 5506 (2020).
10. S. Z. Zainabidinov, Kh. S. Daliev, K. P. Abdurakhmanov, Sh. B. Utamuradova, I. Kh. Khomidjonov, and I. A. Mirzamurodov, Modern Physics Letters B. **11**, 909 (1997).
11. S. A. Muzafarova, S. A. Mirsagatov, and F. N. Dzhamalov, Semiconductors **43**, 175 (2009).
12. C. Scheiber, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A **448**, 513 (2000).
13. C. Scheiber and J. Chambron, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. **322**, 604 (1992).
14. S. A. Azimov, Sh. A. Mirsagatov, and S. A. Muzafarova, Applied Solar Energy **4**, 7 (1982).
15. F. Sizov et al., Materials Science in Semiconductor Processing **124**, 105577 (2021).
16. N. N. Kristoffel', *Theory of small-radius impurity centers in ionic crystals* (Nauka, Moscow, 1974) [in Russian].
17. A. Elina, A. Asano, and T. J. Takahashi, Phys. Rev. B. **22**, 1991 (1980).
18. A. V. Gorshkov, F. A. Zaitov, Sh. A. Mirsagatov et al., Doklady AN Azerb. SSR. **37**, 31 (1981).
19. B. Redus, Application Note ANCZT-2 **2**, 12 (2003).
20. I. M. Vikulin and V. I. Stafeev, *Physics of semiconductor devices* (Sov. Rad., Moscow, 1980) [in Russian].
21. R. M. Kalmykov, A. M. Karmokov, Z. V. Shomakhov, and R. Yu. Karmokova, Applied Physics, No. 3, 52 (2020) [in Russian].
22. A. Tomal et al., Applied Radiation and Isotopes **100**, 32 (2015).