

02;06.2

Пленочные детекторы ядерных излучений из теллурида кадмия

© Б.Н. Заверюхин, Ш.А. Мирсагатов, Н.Н. Заверюхина,
В.В. Володарский, Е.Б. Заверюхина

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, Ташкент
E-mail: oybtm@physic.uzsci.net
ЗАО «ПСП», Калужская область
Национальный университет Узбекистана, Ташкент

Поступило в Редакцию 17 марта 2003 г.
В окончательной редакции 11 июня 2003 г.

Для регистрации рентгеновского и гамма-излучений созданы CdTe-*p-n*-детекторы на основе тонких полупроводниковых пленок, имеющих столбчатую структуру. Детекторы изготовлены на молибденовых подложках путем сублимирования CdTe и магнетронного распыления атомов кадмия. Толщина *p*-CdTe-пленок $d = 30\text{--}150\ \mu\text{m}$, удельное сопротивление $\rho \geq 10^3\text{--}10^7\ \Omega \cdot \text{cm}$. Монокристаллы (зерно) пленок имеют поперечный размер $50\text{--}100\ \mu\text{m}$ и ориентированы перпендикулярно к Мо-подложке. В сравнении с детекторными CdTe-монокристаллами пленочные CdTe-монокристаллы имеют более совершенную структуру, так как прослойки между ними являются эффективными стоками дефектов. Энергетическое разрешение CdTe-детекторов нового поколения достигает величины $\sim 5\ \text{keV}$ на линии $59.6\ \text{keV}$ ^{241}Am при комнатной температуре.

В настоящее время возник интерес к детекторам ядерных излучений на основе тонких полупроводниковых слоев (ТПС), сформированных на поверхности монокристаллических полупроводников [1–3]. В качестве базового материала используются GaAs и SiC. GaAs имеет эффективный атомный номер Z , близкий к атомному номеру германия ($Z_{\text{GaAs}} \sim 31$), и поэтому не может обеспечить высокую эффективность фотопоглощения, а SiC-детектор в принципе не пригоден для регистрации рентгеновского (X) и гамма (γ)-излучений. Полупроводниковые соединения A^2B^6 являются наиболее перспективными для изготовления неохлаждаемых полупроводниковых детекторов X -, γ - и других видов ядерных излучений. Монокристаллические CdTe-детекторы ($Z_{\text{CdTe}} \sim 48$) и $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ -детекторы доказали свои преимущества перед Si- и GaAs-

детекторами и могут с успехом использоваться для спектрометрии X- и γ -излучений в широком интервале энергий E ионизирующего излучения. Энергетическое разрешение R монокристаллических CdTe-детекторов при комнатной температуре достигает значений: для спектральной линии $E = 59.6 \text{ keV}$ источника ^{241}Am $R \cong 0.83 \text{ keV}$ и $R \cong 1.2 \text{ keV}$ для линии $E = 662 \text{ keV}$ источника ^{137}Cs [4–6]. Единственный и основной недостаток детекторных монокристаллов на основе A^2B^6 , получаемых различными способами, это — наличие в них значительного количества дефектов различной природы, которые ухудшают характеристики детекторов [7].

Анализ литературных данных показывает, что CdTe-детекторы на основе ТПС не создавались. Целью настоящей работы является разработка методики изготовления и исследования основных функциональных характеристик CdTe-детекторов на базе тонких полупроводниковых слоев. За основу методики изготовления пленочного CdTe-детектора (CdTe-ПД) была взята разработанная одним из авторов технологии производства эффективных тонкопленочных фотопреобразователей (ФП) на базе поликристаллического CdTe со столбчатой структурой [8,9]. Такие ФП были созданы и исследованы [10,11]. Технология изготовления CdTe-ПД, в отличие от производства CdTe-ФП, имеет ряд особенностей, обусловленных требованиями, предъявляемыми к приборам такого типа и полупроводниковому материалу для них. В частности, требуются низкие шумы при напряжении полного обеднения, отсутствие „мертвого слоя“, высокое время жизни неравновесных носителей заряда τ .

Нами по усовершенствованной технологии были созданы детекторные пленочные $p\text{-CdTe-n-CdTe}$ -структуры. Базовым материалом служили поликристаллические пленки $p\text{-CdTe}$ со столбчатой структурой, образованные сублимацией в потоке водорода на молибденовых подложках (Mo). Толщина пленок $d = (30\text{--}150) \mu\text{m}$. Методом ямок травления было установлено, что пленки $p\text{-CdTe}$ состоят из блоков монокристаллов (зерен) размером $L = (30\text{--}150) \mu\text{m}$, ориентированных в направлении роста (перпендикулярно к плоскости Mo-подложки). Размер зерен в диаметре $k = (50\text{--}100) \mu\text{m}$ и с расстоянием между последними $l = (50\text{--}70) \text{ \AA}$. Прямоугольные $p\text{-CdTe}$ -пленки имели удельное сопротивление $\rho = (10^3\text{--}10^7) \Omega \cdot \text{cm}$ и площадь $S = (0.25\text{--}4) \text{ cm}^2$. Время жизни неравновесных носителей заряда $\tau \cong (50\text{--}70) \mu\text{s}$. Такую пленку $p\text{-CdTe}$ в направлении, перпендикулярном поверхности Mo-подложки, можно считать состоящей из монокристаллов, разделенных высокоом-

ными прослойками. Поэтому свойства полупроводниковых приборов, работающих на основе процессов переноса носителей заряда, будут в основном определяться свойствами монокристаллов p -CdTe, а не границ раздела между ними. Рекомбинационные постоянные в CdTe-пленочных структурах исследовались в работе [12], и было установлено [13], что поликристаллические слои CdTe не уступают по транспортным свойствам высококачественным CdTe-монокристаллам, так как в CdTe-пленках со столбчатой структурой прослойки между зернами могут быть эффективными стоками различного типа дефектов [14]. Исследования показывают, что в процессе синтеза крупноблочных поликристаллических CdTe-пленок из-за реиспарения легколетучего компонента Cd образуются свободные атомы теллура, которые, взаимодействуя с остаточным кислородом в реакторе, образуют тонкие высокоомные слои TeO₂. Слои TeO₂ пассивируют поверхностные состояния в межзерновых границах [15–17], что приводит к снижению поверхности рекомбинации и значительному росту времени жизни неравновесных носителей заряда до нескольких десятков микросекунд [18]. Рентгенофазовый анализ выявил в ряде p -CdTe-пленок наличие вблизи границы раздела слоя p -CdTe с Mo-подложкой включений состава CdTe₂O₃, Mo₃Te₄, MoO₂, а в толщине пленок — CdTe₂O₃. Магнетронным распылением атомы Cd были затем нанесены в кислородосодержащей среде на поверхность p -CdTe-пленок. При этом в едином технологическом цикле формировалась структура p -CdTe- n -CdTe- n -CdO.

Геометрические и физические характеристики получаемых по данной технологии слоев n -CdTe исследовались [8,9]. Нами по результатам исследований вольт-амперных, вольт-емкостных, фотоэлектрических характеристик, а также измерениями потенциала и термо-ЭДС на косом шлифе в структуре CdTe-CdO было установлено, что: а) толщина n -CdTe-слоев $l_k = (0.2-1) \mu\text{m}$, концентрация равновесных электронов $n_0 \cong 10^{12} \text{ cm}^{-3}$; б) характеристики CdO-слоев следующие: ширина запрещенной зоны $E_g \cong 2.7 \text{ eV}$, удельное сопротивление $\rho \cong 4 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, подвижность электронов $\mu_n \cong (100-120) \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, концентрация мелких донорных центров $N_D \cong 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Для создания поверхностно-барьерного перехода была разработана специальная методика химической обработки поверхности n -CdTe-слоев изготовленных Mo- p -CdTe- n -CdTe- n -CdO-полупроводниковых структур. Данная операция является одной из основных в технологическом процессе и определяет толщину чувствительной области и „мерт-

вого слоя“ детекторов. Первым этапом операции является удаление CdO-слоя путем химического травления. Методика и выбранный режим химического травления на следующем этапе обеспечили высокую однородность *n*-CdTe-слоев по площади рабочей поверхности детекторов. При этом химическая полировка и последующая ультразвуковая обработка *n*-CdTe-слоев позволили получить высокую степень однородности *n*-CdTe-слоев с однородным распределением потенциала на поверхности.¹ Следует отметить, что Mo-*p*-CdTe-*n*-CdTe-структуры, не прошедшие ряд последовательных операций по обработке ультразвуком при разных интенсивностях и частотах мегагерцового диапазона, имели в дальнейшем невысокие функциональные и электрофизические характеристики. Улучшение характеристик Mo-*p*-CdTe-*n*-CdTe-структур ультразвуком, по всей видимости, связано с процессами пассивации поверхности ультразвуковой волной, что исследовалось на примере фотопреобразователей из поликристаллического кремния [19].

Конструкция пленочного CdTe-детектора приведена на рис. 1, *a*. Электрические контакты и охранные электроды наносились на входное окно детектора, роль которого выполняли *n*-CdTe-слои, методом термического напыления индия In и золота Au в вакууме через специальные маски. Поверхностная плотность напыленного металла составляла 30–50 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. Результаты экспериментальных исследований для одного из пленочных CdTe-детекторов приведены и рассмотрены ниже.

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики CdTe-пленочного детектора № 05 последовательно может быть разделена на 3 участка (рис. 1, *b*, кривая *I*): первый участок вольт-амперной характеристики характеризуется сублинейной зависимостью $I \sim V_b^\alpha$ (V_b — напряжение смещения), где $\alpha \geq 0.5$; второй участок — насыщение тока ($I = \text{const}$), свидетельствует о наличии неинжектирующего базового контакта с низким переходным сопротивлением. Это означает, что пленочный CdTe-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

¹ Акустостимулированные явления в тонких полупроводниковых Si- и GaAs-слоях исследовались, и было обнаружено, что ультразвук изменяет характеристики слоев [19]. В рамки данной работы не входят описание и анализ экспериментов по влиянию ультразвука на характеристики CdTe-слоев. Результаты этих исследований готовятся к публикации.

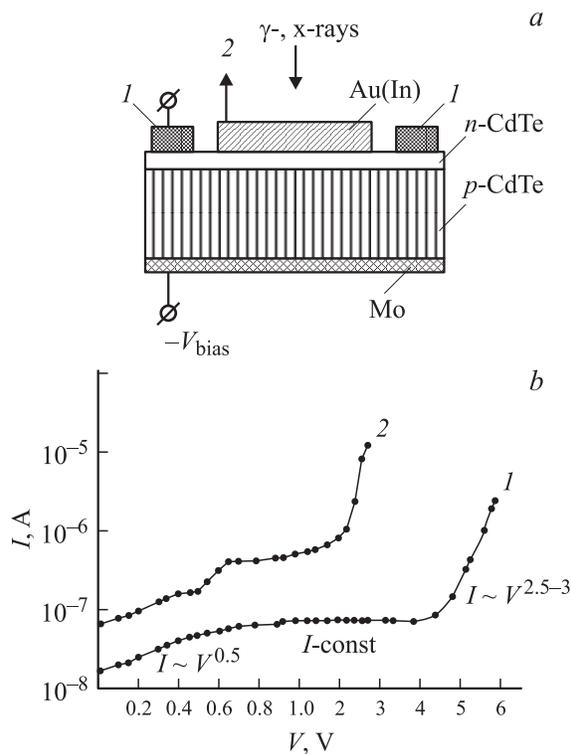


Рис. 1. *a)* — конструкция пленочного CdTe-детектора: 1 — охранные электроды, 2 — к импульсной электронной системе. *b)* — вольт-амперные характеристики пленочных CdTe-детекторов при $T = 293$ К: 1 — CdTe-ПД № 05 ($d = 150 \mu\text{m}$, $S = 0.36 \text{ cm}^2$); 2 — CdTe-ПД № 04 ($d = 150 \mu\text{m}$, $S = 0.36 \text{ cm}^2$).

увеличение обратного тока и шумов детекторов (рис. 1, *b*, кривая 2, CdTe-ПД, № 4); третий участок, где зависимость $I(V_b)$ имеет вид $I \sim V_b^{\alpha > 2}$. Исследования показали, что температурная зависимость тока для пленочных CdTe-детекторов с сублинейной зависимостью $I \sim V_b^{0.5}$ при фиксированном $V_b \leq 0.3$ В носит активационный характер с энергией активации $\Delta E \cong 0.73 \text{ eV} \pm 0.02 \text{ eV}$. Значение ΔE вполне согласуется с величиной полуширины запрещенной зоны CdTe, т.е. ток ограничен генерацией в слое объемного заряда [20].

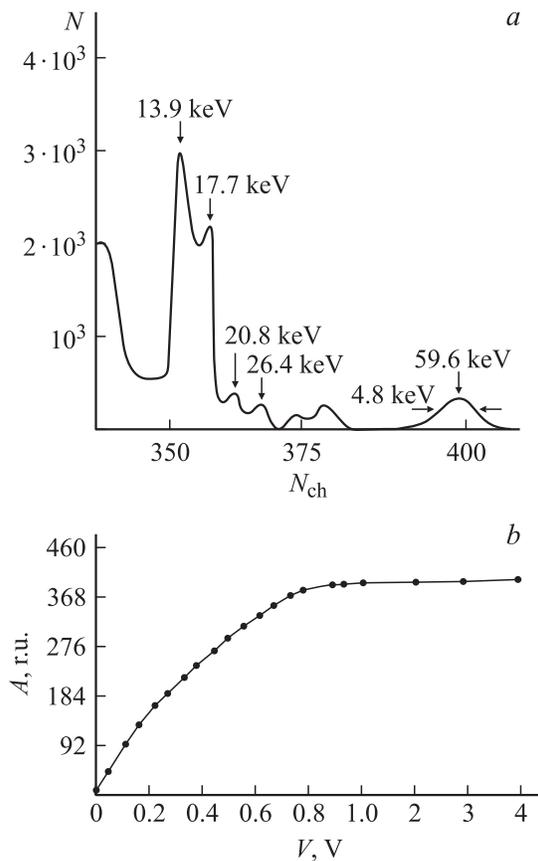


Рис. 2. *a)* — амплитудный спектр источника ^{241}Am , измеренный CdTe-ПД № 05, $T = 293\text{ K}$. Напряжение смещения $V_b = 4.3\text{ V}$. N_{ch} — номер канала. *b)* — зависимость амплитуды сигнала CdTe-ПД № 05 от напряжения смещения, $T = 293\text{ K}$.

Измерение энергетической разрешающей способности R CdTe-детекторов производилось импульсной электронной системой „ORTEC“ и анализатором АИ-1024-95. Диаметр пучка электромагнитного излучения источника ^{241}Am составлял 0.5 см. Пленочные CdTe-детекторы имеют следующие характеристики: а) напряжение полного обеднения

изменяется от 0.7 до 6 V; б) обратные токи детекторов составляют $5 \cdot 10^{-8}$ – 10^{-6} А при рабочих напряжениях смещения; в) энергетическая разрешающая способность при измерении X- и γ -излучения в области энергий $E \cong 5$ –60 keV составляет от $R \cong 5$ keV до $R \cong 10$ keV (рис. 2, а). Вид зависимостей амплитуды (рис. 2, б) сигналов от V_b пленочных CdTe-детекторов и аппроксимация их в начало координат указывали на высокую однородность и совершенство чувствительных областей детекторов, образованных набором независимых параллельных монокристаллов [21]. В противном случае зависимости $A(V_b)$ и температурные $A(T)$ зависимости имеют аномальные участки [22,23]. Все CdTe-ПД показали стабильность параметров через 2 месяца после хранения в обычных условиях при температуре $T = 293$ К.

Заключение. Изготовлены CdTe-детекторы рентгеновского и γ -излучений на основе тонких полупроводниковых пленок со столбчатой структурой. Энергетическое разрешение R лучших пленочных CdTe-детекторов приближается к значениям R монокристаллических детекторов. Улучшение структуры CdTe-ПД, например повышение качества тыльного контакта путем устранения вблизи границы раздела слоя p -CdTe с Mo-подложкой различных включений, позволит дополнительно уменьшить полученное значение R . Подобные структуры, с учетом их высокой чувствительности к рентгеновскому и γ -излучению и перспективностью, должны представлять интерес с практической точки зрения.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Черникову (Москва) за стимулирование исследований.

Список литературы

- [1] Ботнарюк В.М., Жиляев Ю.В., Иванов А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 7. С. 8–15.
- [2] Иванов А.М., Строкан Н.Б., Давыдов Д.В. и др. // ФТП. 2001. Т. 35. В. 4. С. 495–498.
- [3] Строкан Н.Б., Иванов А.М., Савкина Н.С. и др. // ФТП. 2002. Т. 36. В. 3. С. 375–378.
- [4] Takahashi T., Paul B., Hirose K., Matsumoto S., Ohni R. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1999. V. A436. P. 111–119.
- [5] Matsumoto S., Takahashi T., Tikizawa K., Ohno R., Ozaki T., Mori K. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1998. V. 45. P. 428–432.

- [6] *Takahashi T., Horise K., Matsumoto S., Tikizawa K., Ohno R.* et al. Proc. SPIE. 1998. V. 34–46. P. 29–37.
- [7] *Hernon H., Shieber M., James R.B.* et al. // Journal of Electronic Materials. 1999. V. 28. P. 688–702.
- [8] *Мирсагатов Ш.А., Расулов Д.Т.* // Доклады АН УзССР. 1977. № 7. С. 28–30.
- [9] *Азимов С.А., Мирсагатов Ш.А., Музафарова С.А.* // Гелиотехника. 1982. № 4. С. 7–11.
- [10] *Burkmiere R.W.* et al. // 18th IEEE Photovoltaic Spec. Conf. New York, 1985. P. 1413–1416.
- [11] *Nakasawa T., Takomirawa K.* // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 5. N 5. P. 279–280.
- [12] *Мирсагатов Ш.А., Сабиров К., Музафарова С.А.* // ФТП. 1987. Т. 21. В. 4. С. 733–736.
- [13] *Гяргядиев Г., Любченко А.В., Сырко С.А.* // Фотоэлектрические явления в полупроводниках, АН СССР. Научный совет по проблеме „Физика и химия полупроводников“. Тезисы докладов 2^й научной конференции. Ашхабад, 23–25 октября, 1991. Ашхабад: Ылым, 1991. С. 41–42.
- [14] *Кристоффель Н.Н.* Теория примесных центров малых радиусов в ионных кристаллах. М.: Наука, 1974. 220 с.
- [15] *Мирсагатов Ш.А.* Электронные процессы в SiC и CdTe-структурах. Докт. дис. Баку, 1988.
- [16] *Бойко Б.Т., Копач В.Р.* и др. // Гелиотехника. 1983. № 6. С. 7–10.
- [17] *Elina A., Asano A., Takahashi T.J.* // Phys. Rev. B. 1980. V. 22. N 4. P. 1980–1991.
- [18] *Горшков А.В., Заитов Ф.А., Мирсагатов Ш.А.* и др. // Доклады АН Азерб. ССР. 1981. Т. 37. № 11. С. 31–32.
- [19] *Заверюхин Б.Н., Заверюхина Н.Н., Турсункулов О.М.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 18. С. 1–12.
- [20] *Викулин И.М., Стафеев В.И.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Сов. радио, 1980. 296 с.
- [21] *Еремин В.К.* Исследование влияния объемного заряда на свойства полупроводниковых детекторов ядерных излучений. Канд. дис. Л., 1978.
- [22] *Еремин В.К., Строкан Н.Б., Заверюхин Б.Н.* и др. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 12. С. 2407–2410.
- [23] *Заверюхин Б.Н., Кревчик В.Д., Муминов Р.А.* и др. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 3. С. 525–528.