

К. т. н. В. Е. КУТНИЙ, Д. В. КУТНИЙ, к. ф.-м. н. А. В. РЫБКА,  
к. ф.-м. н. А. С. АБЫЗОВ, к. ф.-м. н. Л. Н. ДАВЫДОВ,  
Д. В. НАКОНЕЧНЫЙ, И. Н. ШЛЯХОВ

Украина, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»  
E-mail: kutny@kipt.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию  
28.10.2004 г.

Оппонент д. т. н. В. К. КОМАРЬ  
(Институт монокристаллов, г. Харьков)

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА CdZnTe-ДЕТЕКТОРОВ $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ

*Рассмотрено влияние термообработки (ТО) на вольт-амперные и спектротметрические характеристики детекторов  $\gamma$ -излучения из соединения  $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$   $p$ -типа. Определен оптимальный режим ТО.*

Хотя нанесение контактов на полупроводниковые полуизолирующие материалы, как правило, не выделяется в качестве отдельного аспекта технологии изготовления детектора  $\gamma$ -излучения, ясно, что контакты во многом определяют электрофизические свойства полупроводникового детектора.

Наиболее используемым материалом для нанесения контактов на поверхность детекторов из CdTe и CdZnTe является золото (Au). При этом контакты, нанесенные методом вакуумного напыления, обладают хорошими адгезионными свойствами, в то время как химическое осаждение золота дает контакты с худшей адгезией, но с меньшими токами утечки, что, соответственно, увеличивает электросопротивление детектора.

Свойства контактов также существенным образом зависят от термообработки (ТО), проводимой после процесса их нанесения, которая влияет как на морфологию поверхности, так и на ее химический состав [1], однако физический механизм этого явления еще недостаточно изучен.

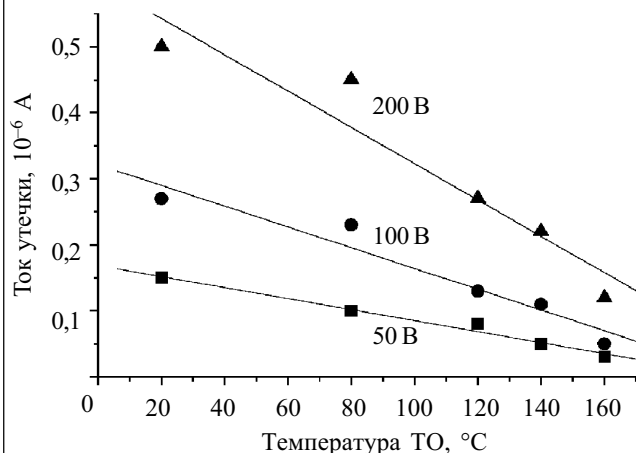


Рис. 1. Зависимость тока утечки от температуры ТО на воздухе при напряжениях смещения 50, 100 и 200 В [3]

Работа выполнена при поддержке Научно-технического центра Украины, проект № 1787.

В работе [2] исследуется влияние различных режимов ТО на свойства барьерных Au-контактов, нанесенных на CdZnTe-материал  $n$ -типа. После нанесения контактов проводилась их термообработка в вакууме и на воздухе при температуре 300°C в течение 1 ч. Показано, что значение тока утечки образцов, термообработанных на воздухе, на два порядка больше, чем у детекторов, прошедших аналогичную ТО в вакууме.

В работе [3] исследовалось влияние температуры ТО (на воздухе и в вакууме) на электрические и спектротметрические свойства CdTe-детекторов  $p$ -типа. На рис. 1 приведена зависимость тока утечки от температуры ТО на воздухе. Уменьшение тока утечки авторы [3] объясняют увеличением высоты электрического барьера на границе раздела "металл—полупроводник" вследствие качественной модификации подконтактной области и увеличением толщины оксидного слоя TeO<sub>2</sub>. При исследовании влияния температуры ТО на воздухе на спектротметрические характеристики детекторов было замечено, что в интервале температур 120—140°C происходит улучшение (примерно в 5 раз) энергетического разрешения детектора. Кроме того, вплоть до 150°C наблюдается увеличение амплитуды импульса, но эффективность сбора заряда резко падает после 120°C.

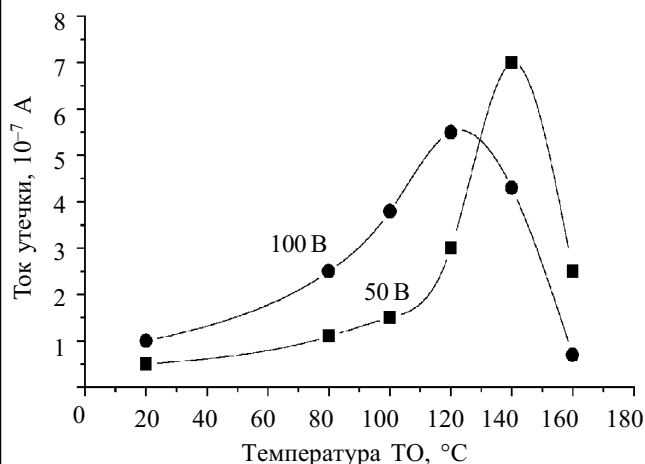


Рис. 2. Зависимость тока утечки от температуры ТО в вакууме при напряжениях смещения 50 и 100 В [3]

На рис. 2 приведена зависимость тока утечки от температуры ТО в вакууме. Ток утечки достигает мак-

симума в районе 140°C, т. е. высота барьера снижается. Однако при температуре выше 140°C ток утечки начинает падать. Тем не менее спектрометрические характеристики детекторов (амплитуда импульса, эффективность сбора заряда), термообработанных в вакууме, ухудшаются во всем интервале температур ТО.

В работе [4] рассматривалась температурная зависимость сопротивления детекторов из CdTe и CdZnTe. Показано, что после термообработки происходит увеличение сопротивления детектора в интервале температур от -40 до +80°C. Увеличение сопротивления, по-видимому, связано с эффектами, протекающими на боковых поверхностях и на границе раздела "металл(Au)—полупроводник".

Из приведенных выше данных видно, что термообработка влияет на изменение электрофизических и спектрометрических характеристик детекторов на основе CdTe и CdZnTe. Однако эти изменения зависят от вида материала (*p*- или *n*-типа), типа контактов. При этом сложно сказать, какой вид ТО (в вакууме или на воздухе) и какая температура являются оптимальными для получения максимально высоких эксплуатационных свойств детектора. Кроме того, в результате ТО, наряду с модификацией границы раздела "металл—полупроводник", может происходить изменение свойств боковой поверхности детектора. Поэтому не ясно, какой из этих двух факторов в большей степени влияет на изменение электрофизических свойств детектора после ТО.

Цель данной работы заключается во введении операции ТО после нанесения золотых контактов в технологию изготовления CdZnTe-детекторов  $\gamma$ -излучения, исследовании влияния термообработки на электрофизические свойства детекторов и оптимизации режимов этой обработки для получения омических контактов со стабильными характеристиками, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства датчиков  $\gamma$ -излучения.

#### Методика эксперимента

Монокристалл Cd<sub>0,9</sub>Zn<sub>0,1</sub>Te *p*-типа выращивался методом Бриджмена под высоким давлением инертного газа. Из слитка вырезались параллелепипеды размерами 5×5×2 мм, заготовки проходили стандартную механическую и химическую обработку (химическую отмывку, шлифовку, полировку, травление). Контакты наносились химическим осаждением Au из тетрахлорауриновой кислоты (HAuCl<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O).

После нанесения контактов проводилась их термообработка на воздухе в интервале температур от 80 до 170°C; время ТО — от 1 до 5 ч.

Для измерений ВАХ использовался универсальный вольтметр типа В7-21 с ценой деления 20 пА и источник питания с регулируемым выходом. Относительная погрешность измерения не превышала ±10%. Амплитудные спектры были получены при помощи стандартного спектрометрического тракта с зарядочувствительным предусилителем, в качестве источника  $\gamma$ -излучения использовался радионуклид <sup>241</sup>Am.

Для определения влияния ТО на свойства подконтактного слоя и боковой поверхности детектора на один из образцов методом фотолитографии были нанесены золотые электроды с «охранным» кольцом. Ширина «охранного» кольца составляла 0,5 мм.

#### Экспериментальные результаты

На рис. 3 и 4 показано изменение электросопротивления детектора и тока утечки от температуры ТО. Видно, что с ростом температуры наблюдается рост электросопротивления и падение токов (аналогичная тенденция наблюдается и для ТО на воздухе детекторов из CdTe [3], см. рис. 1). Максимальное значение электросопротивления детекторов и минимум тока утечки достигаются после термообработки при 140—160°C. При дальнейшем повышении температуры (выше 160°C) происходит ухудшение электрических параметров детектора, что, по-видимому, связано с ухудшением свойств боковой поверхности детектора после ТО при более высоких температурах.

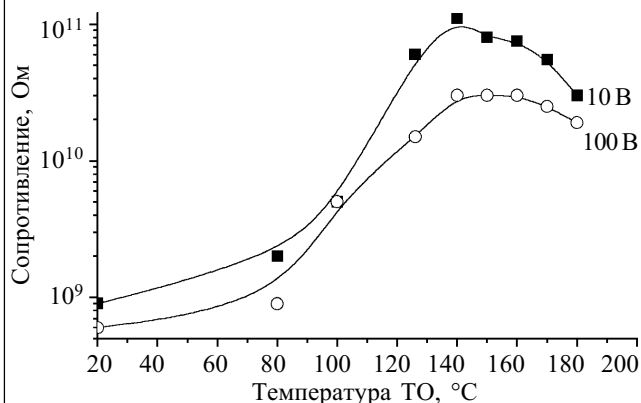


Рис. 3. Зависимость электросопротивления CdZnTe-детектора от температуры ТО при напряжениях смещения 10 и 100 В

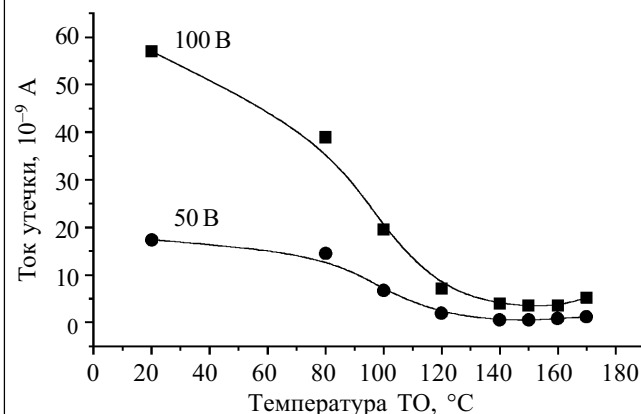


Рис. 4. Зависимость тока утечки CdZnTe-детектора от температуры ТО при напряжениях смещения 50 и 100 В

Чтобы сравнить, каким образом термообработка влияет на свойства боковой поверхности и границы раздела, была проведена ТО детектора с «охранным» кольцом. На рис. 5 представлены ВАХ такого детектора до и после ТО. Отметим, что в результате ТО ток через центральный электрод (который определяется объемом кристалла) уменьшился в значительно большей степени, чем ток через охранное кольцо, в который основной вклад дает ток утечки через боковую поверхность кристалла. Отсюда можно заключить, что изменение электрофизических характеристик детектора после ТО в большей степени связано с модификацией границы раздела "металл—полупроводник", чем боковой поверхности.

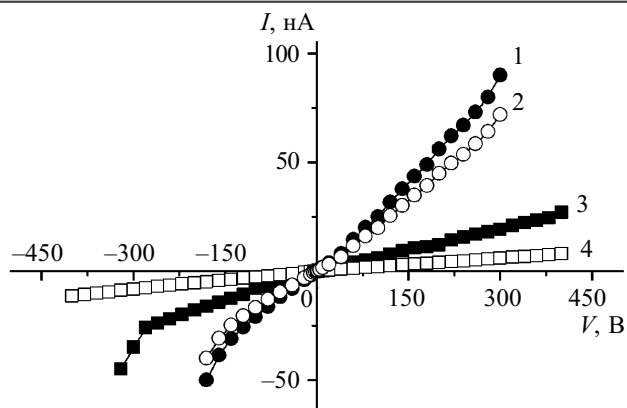


Рис. 5. Изменение ВАХ детектора с «охранным» кольцом в результате ТО: ток по боковой поверхности до ТО (1) и после ТО (2); ток через объем кристалла до ТО (3) и после ТО (4)

Исследовалось влияние времени термообработки на электрофизические свойства CdZnTe-детекторов. Был проведен ряд термообработок при фиксированной температуре продолжительностью от 1 до 5 ч. Результаты исследований приведены на рис. 6, откуда видно, что модификация границы раздела и свойств Au-контактов происходит уже после первого часа термообработки. Дальнейшее увеличение времени ТО при фиксированной температуре не приводит к заметным

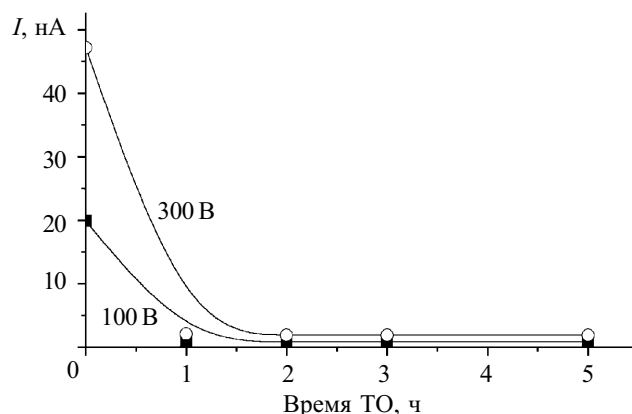


Рис. 6. Изменение тока утечки CdZnTe-детектора после проведения ТО при 140°C (1, 2, 3 и 5 ч) и напряжениях смещения 100 и 300 В

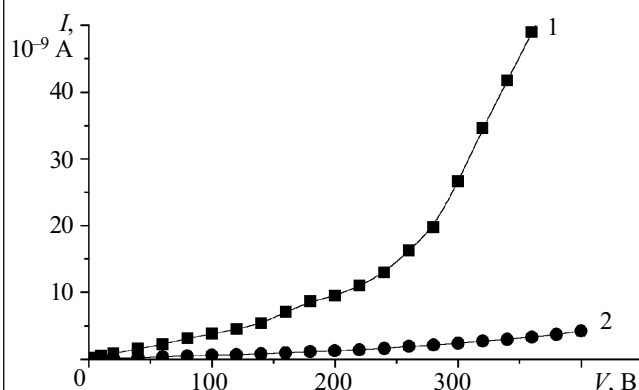


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики планарного CdZnTe-детектора: 1 — до ТО; 2 — после ТО (140°C, 1 ч)

изменениям свойств детектора. Характерные вольт-амперные характеристики планарного CdZnTe-детектора до и после проведения термообработки по оптимальному режиму (140°C, 1 ч) приведены на рис. 7.

Исследовалось влияние термообработки на спектрометрические свойства CdZnTe-детекторов. На рис. 8 представлены амплитудные спектры радионуклида <sup>241</sup>Am, полученные детектором CdZnTe до ТО при напряжении смещения  $U_{см} = 100$  В и после ТО ( $U_{см} = 100$  В,  $U_{см} = 200$  В). Следует отметить, что до ТО невозможно было измерить амплитудные спектры при напряжении смещения выше 100 В из-за значительных токов утечки детектора и, соответственно, высокого уровня шумов. Из рис. 8 видно, что хотя после термообработки спектр изменяется слабо при напряжении смещения 100 В, ТО позволяет повысить рабочее напряжение детектора до 200 В, после чего, помимо пика 59,9 кэВ, начинают появляться пики 13 и 17 кэВ, что говорит об улучшении спектрометрических характеристик детектора.

Использование омических контактов обеспечивает достаточно однородное электрическое поле внутри полупроводникового кристалла, т. к. приложенное напряжение смещения распространяется равномерно на весь объем детектора. Кроме того, преимущество омического контакта заключается в уменьшении влияния захвата дырок на формирование сигнала в детекторе и уменьшении влияния пространственного заряда (явление поляризации) в детекторе. Омический контакт всегда обеспечивает термодинамически равновесную плотность как основных, так и неосновных носителей заряда, в результате на границе раздела не происходит накопления или истощения зарядов. В структуре "металл—полупроводник—металл" с омическими контактами наблюдается линейная и симметричная ВАХ.

Чтобы определить омичность контактов до и после термообработки, использовалась аппроксимация вольт-амперной характеристики функцией  $J(V) = aV^b$ , где  $a$  и  $b$  — подгоночные параметры. Параметр  $b$  часто называют коэффициентом омичности, поскольку при  $b=1$  контакт дает линейную (омическую) ВАХ.

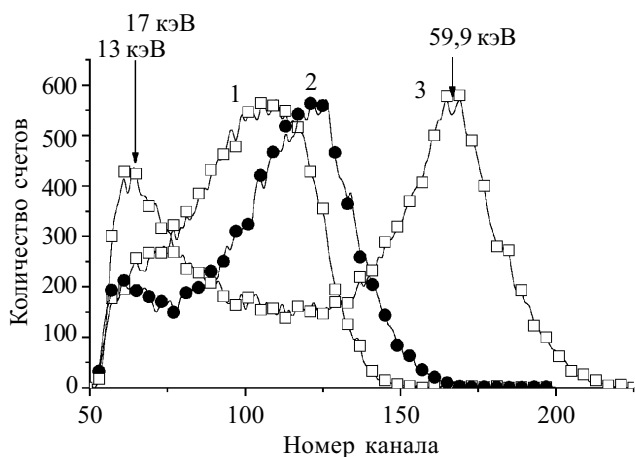


Рис. 8. Амплитудные спектры радионуклида <sup>241</sup>Am, полученные детектором CdZnTe: 1 — до проведения ТО,  $U_{см} = 100$  В; 2 — после проведения ТО,  $U_{см} = 100$  В; 3 — после проведения ТО,  $U_{см} = 200$  В

Для исследованных образцов до проведения ТО коэффициент омичности составлял 1,0097, после ТО — 1,0041. Таким образом, термообработка улучшает омические свойства контактов.

**Выводы**

Из приведенных выше экспериментальных данных видно, что термообработка на воздухе после химического осаждения золотых контактов приводит к значительному изменению электрофизических характеристик детекторов  $\gamma$ -излучения на основе CdZnTe *p*-типа. Показано, что эти изменения обусловлены в большей степени модификацией границы раздела "металл—полупроводник", чем изменением свойств боковой поверхности детектора.

Изменение электрофизических свойств детекторов зависит от режимов термообработки. Оптимальным режимом ТО для получения наилучших электрофизических характеристик детекторов является температура 140°C, время обработки 1 ч; дальнейшее увеличение времени термообработки (до 5 ч) уже не влияет на изменение электрофизических характеристик детектора. Оптимальный режим ТО позволяет повысить рабочее напряжение детектора, в результате чего

происходит улучшение спектрометрических характеристик детекторов.

Полученные результаты демонстрируют высокую температурную стойкость CdZnTe-детекторов: нагрев до 160°C не приводит к необратимому изменению электрофизических характеристик, что позволяет детектору нормально функционировать после восстановления рабочей температуры.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Rouse A. A., Csaba Szeles, Ndap J. O. Interfacial chemistry and performance of bromine-etched CdZnTe radiation detector devices // IEEE Transaction on Nuclear Science.— 2002.— Vol. 49, N 4.— P. 2005—2009.
2. George M. A., Collins W. E., Chen K. T. et al. Study of electroless Au film deposition on ZnCdTe crystal surfaces // J. Appl. Phys.— 1995.— Vol. 77(7).— P. 3134—3137.
3. Mergui S., Hage-Ali M., Koebel J. M., Siffert P. Thermal annealing of gold deposited contacts on high resistivity p-type CdTe nuclear detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.— 1992.— Vol. A 322.— P. 375—380.
4. Белецкий Н. И., Полянский Н. Е., Кутный В. Е. и др. Температурная зависимость сопротивления детекторов из CdTe и CdZnTe // Вісник Харківського національного університету. Сер. Радіофізика та електроніка.— 2002.— № 544.— С. 155—158.

*Д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ, О. В. МАСЛОВ,  
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, д. т. н. М. В. МАКСИМОВ*

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: olegmaslov@farlep.net

Дата поступления в редакцию  
27.09 2004 г.—12.04 2005 г.

Оппонент к. ф.-м. н. А. В. РЫБКА  
(ННЦ "ХФТИ", г. Харьков)

## БЛОК ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ CdZnTe ДЛЯ СИСТЕМ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

*Пропорциональный импульсный режим работы CdZnTe-детектора позволяет существенно повысить качество измерений, компенсировать энергетическую зависимость чувствительности.*

Блоки детектирования, предназначенные для измерения мощности дозы гамма-излучения в воздухе, входят в состав аппаратуры контроля радиационной безопасности (АКРБ) атомных электростанций. Находящиеся в настоящее время в эксплуатации блоки детектирования системы АКРБ-03 выработали свой ресурс, а сама система, разработанная более 20 лет назад, морально устарела. Очевидно, что новые блоки детектирования должны обладать более высокими метрологическими и эксплуатационными показателями, чем подлежащие замене. Существенный прорыв в улучшении метрологических и эксплуатационных характеристик детекторов может быть получен только на основе применения новых материалов, в частности, широкозонных полупроводников, таких как CdZnTe [1].

В большинстве случаев использование CdZnTe-детекторов является более предпочтительным по сравнению с традиционными газоразрядными детектора-

ми и новыми полупроводниковыми кремниевыми детекторами. Например, применение CdZnTe позволяет (без применения какого-либо дополнительного охлаждения) регистрировать  $\gamma$ -излучение энергии около 10 кэВ — в отличие от детекторов на основе Si, обеспечивающих измерение мощности дозы для энергий выше 50—60 кэВ. Другим преимуществом CdZnTe-детекторов по сравнению с указанными является существенно более высокая эффективность регистрации гамма-излучения, обусловленная высоким атомным номером.

Применение CdZnTe для измерения мощности дозы ограничивается тем, что чувствительность детектора в диапазоне энергий  $\gamma$ -излучения 10 кэВ—3 МэВ изменяется более чем в 10 раз. Для снижения погрешности, обусловленной зависимостью чувствительности CdZnTe-детектора от энергии  $\gamma$ -излучения, предлагается использовать цифровую коррекцию выходного сигнала [2, 3].

В статье рассматривается один из вариантов практического решения задачи создания современного блока детектирования с использованием новых детекторных материалов за счет применения цифровой коррекции выходного сигнала.