

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА СВОЙСТВА ДАТЧИКОВ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ CdZnTe

*В.Е. Кутний, Д.В. Кутний, А.В. Рыбка, Д.В. Наконечный,
М.А. Тихоновский, А.В. Бабун, Г.Г. Бобылев*

*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий Национального
научного центра «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина
kutny@kipt.kharkov.ua, факс: (0572) 35-17-39, тел.: (0572) 35-66-37*

Исследовалось влияние обработки всесторонним гидростатическим давлением на свойства датчиков ядерного излучения на основе полупроводникового соединения CdZnTe состава (Cd – 50, Zn – 2, Te – 48 мас.%) размерами 5x5x2 мм. Рассматривались различные режимы обработки гидростатическим давлением: однократное воздействие давлением величиной 100 МПа, повторное воздействие давлением величиной 100 и 200 МПа. Определено влияние обработки давлением на электросопротивление, вольт – амперные и спектральные характеристики детекторов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Среди множества полупроводниковых материалов, таких как Si, Ge, GaAs, HgJ₂, PbJ₂ и CdTe, соединение CdZnTe является наиболее пригодным для применения в детекторах ядерных излучений. Это обусловлено его способностью работать при комнатных температурах с разрешением энергии γ -квантов на уровне $\approx 1\%$ при энергии 662 кэВ. Этот материал обладает лучшими характеристиками по сравнению с вышеперечисленными вследствие большого значения атомного номера Z и сравнительно высокой подвижности носителей заряда. Кроме того, технология роста монокристаллов CdZnTe уже достаточно отработана. Благотворная роль Zn связана с разумным уширением запрещенной зоны, увеличением более чем на порядок электросопротивления и улучшением стабильности спектральных характеристик [1].

При изготовлении детекторов из полупроводниковых материалов их качество (эффективность регистрации, разрешающая способность и т.п.) находится в прямой зависимости от качества самого материала (дефектность структуры, чистота материала) и технологии изготовления детектора (пoreзка слитка, шлифовка кристалла, нанесение контактов). Например, при уменьшении плотности ростовых дислокаций на 4 порядка величина удельного электросопротивления увеличивается на 7 порядков.

Известно, что практически невозможно вырастить бездефектный монокристалл и чрезвычайно трудно нанести абсолютно омичные контакты. Поэтому модификация свойств полупроводниковых датчиков различными методами является актуальной задачей.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Хотя в данной статье не ставится задача подробного обзора всех работ по влиянию гидростатического давления на свойства полупроводников, в этом разделе мы кратко остановимся на некоторых исследованиях других веществ, помимо CdZnTe. Особый интерес для нас представляли работы, в которых исследовалось влияние гидростатического давления на электрофизические свойства полупроводниковых материалов, такие как подвижность носителей заряда, электросопротивление, напряжение пробоя, токи утечки.

В работах [2, 6] исследовались барические зависимости электросопротивления в интервале давлений до 1 ГПа при температуре 77...300 К кристаллов HgTe_{1-x}S_x и Cd_{3-x}Zn_xAs₂. Установлено, что образцы с $x \leq 0.20$ имеют убывающую зависимость $\rho(T)$, свойственную бесщелевым полупроводникам, а с $x \geq 0.27$ – типичную для полуметаллов. Поведение электросопротивления коррелирует с данными термоЭДС, снятыми при квазигидростатическом давлении до 3 ГПа.

Барические зависимости ρ при комнатной температуре были приблизительно одинаковы для полупроводниковых и полуметаллических образцов, наблюдался слабый рост ρ от P до 1...1,2 ГПа.

В работах [3, 4] проведены исследования электропроводности и термоЭДС ZnTe и CdTe. Подтверждено наличие у данных соединений фазы с положительным температурным коэффициентом сопротивления в интервале давлений 20...30 ГПа и температур 77...340 К.

Следует отметить наличие максимума сопротивления у CdTe при температуре около 110 К. При давлении выше 30 ГПа проводимость ZnTe во всем

исследуемом интервале температур имеет активационную природу. При давлениях порядка 30 и 48 ГПа зависимость сопротивления от температуры в ZnTe отсутствует.

При циклировании давления от 0 до 50 ГПа (рис.1) зафиксирован барический гистерезис электросопротивления и термоЭДС CdTe и ZnTe, причем с увеличением числа циклов нагружения барические зависимости сопротивления, измеренные при увеличении и уменьшении давления, сближаются, но никогда не совпадают. Уменьшение ширины гистерезиса связано, вероятно, с тем, что в первых циклах нагружения происходит формирование в результате пластичности и трения оптимальной формы образца. При дальнейшем циклировании нагрузки барические и температурные зависимости сопротивления воспроизводятся.

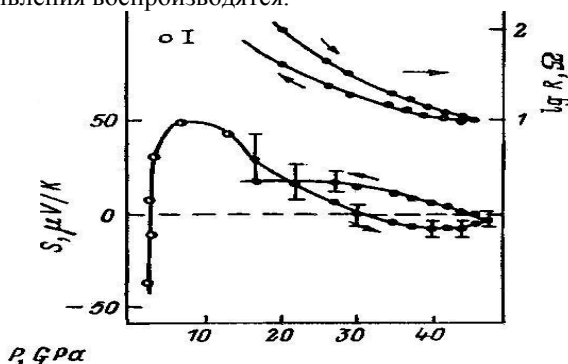


Рис. 1. Барические зависимости термоЭДС и сопротивления при $T = 300 \text{ K}$ для CdTe

Отметим, что в большинстве публикаций [5, 6, 7] изменение свойств полупроводников наблюдалось непосредственно при приложении давления. Описанные выше эксперименты и приведенные на рис. 1 результаты показывают, что имеются остаточные эффекты изменения электрофизических свойств полупроводникового материала после снятия внешнего гидростатического давления. Это позволяет надеяться на модификацию свойств детекторов CdZnTe путем обработки гидростатическим давлением.

О качестве детектора можно судить только после его изготовления. Технология изготовления полупроводниковых детекторов является достаточно тонким и трудоемким процессом. Так, при нанесении на поверхность детектора контактов большое значение имеет не только состав травителя и чистота золота, но и в очень большой степени температура и влажность окружающей среды. Резкое изменение одного из вышеуказанных факторов на стадии изготовления детекторов приводит к снижению качества датчика. Не всегда снижение качества датчика является фатальным, иногда удается восстановить свойства детектора путем отжига, обработки давлением либо облучением. Эти способы модификации свойств датчика являются достаточно экспрессными и не требуют заново проходить все стадии технологии изготовления датчика (шлифовка, полировка, нанесение контактов).

Цель данной работы заключается в исследовании влияния обработки всесторонним гидростатическим

давлением на электрофизические свойства (электросопротивление, напряжение пробоя, токи утечки, вольт-амперные характеристики) детекторов на основе полупроводникового соединения CdZnTe и оптимизации режимов этой обработки для повышения характеристик CdZnTe-датчиков ядерных излучений.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для эксперимента были взяты образцы CdZnTe – детекторов состава Cd – 50%, Zn – 2%, Te – 48% (по массе) размером 5x5x2 мм. Контакты были нанесены химическим осаждением Au из тетрахлорауриновой кислоты ($\text{HAuCl}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Обработка гидростатическим давлением осуществлялась в гидростате высокого давления, предназначенном для холодного гидростатического прессования различных материалов. Гидростат высокого давления, принципиальная схема которого приведена на рис. 2, состоит из рабочей камеры 1, гидравлического насоса УНГР-2000 2, трубопроводов высокого давления 3, манометра для измерения давления в рабочей камере 4, запорных вентилей 5, 6, 7 и манометра 8, измеряющего давление гидравлического насоса.

Рабочая камера представляет собой однослойный силовой цилиндр, рассчитанный на заданное давление (материал цилиндра – сталь 35ХГСА). С двух сторон цилиндр запирается двумя obtюраторами, изготовленными из стали 40ХН2МА (твердость HRC 35...38). Один из obtюраторов служит для подачи сжатого масла в рабочую камеру, а второй – для запираения и удерживания давления в камере.

Ориентировка рабочей камеры – вертикальная. Поворотное устройство, на котором установлена камера гидростата, позволяет располагать камеру и в горизонтальном положении в случае демонтажа obtюраторов. Основные технические характеристики гидростата приведены в табл.1.

Измерение спектрометрических характеристик детекторов осуществлялось на установке – стенде для измерения детектирующих характеристик полупроводниковых датчиков. Измерительная установка состоит из держателя образцов, зарядочувствительного преусилителя, спектрометрического усилителя-формирователя импульсов, преобразователя амплитуда-код, встроенного в персональный компьютер IBM-PC 486, источника питания датчика. В качестве источника γ -излучения использовался ^{137}Cs с активностью 1,82 мКи.

Таблица 1

Основные технические характеристики гидростата высокого давления

| Характеристика | Номинальное значение |
|--------------------------------|----------------------|
| Давление в рабочей камере, МПа | 200±50 |
| Внутренний диаметр камеры, мм | 85±0,5 |
| Размеры образца: диаметр, мм | 80±0,5 |
| длина, мм | 700±1 |
| Габаритные размеры, мм | 500x795x1600 |
| Масса, кг | 550 |

Измерение электросопротивления и вольт-амперных характеристик детекторов осуществлялось на специально изготовленной установке - термостате. Установка содержит: форвакуумный насос (НРВ 1.25.ДУХЛ-4), маслоулавливатель, вакуумметр модели 1227, вакуумную камеру, регулятор температуры, тераомметр (Е6-13А). Установка обеспечивает измерение электросопротивления кристаллов в диапазоне от 10 до 10^{14} Ом и снятия спектров в температурном интервале от -40 до $+70^{\circ}\text{C}$.

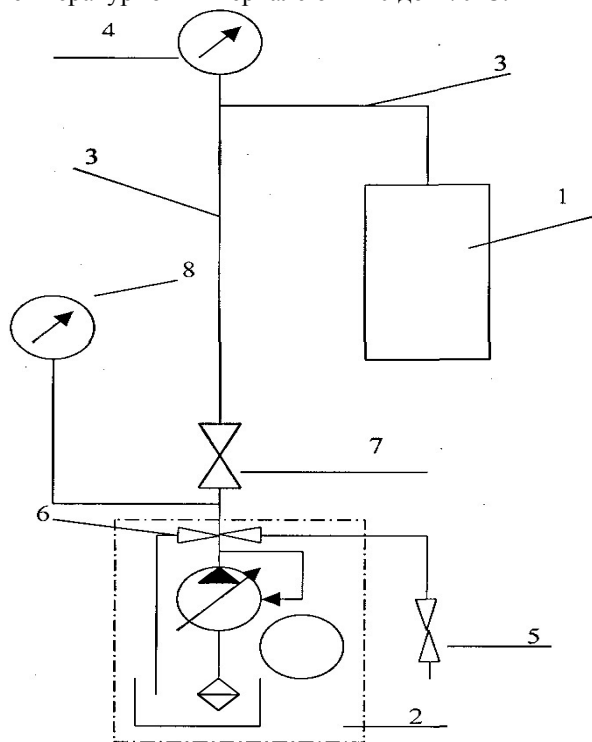


Рис. 2. Принципиальная схема установки:
1 – камера рабочая, 2 – гидропривод, 3 – трубопроводы давления, 4 – манометр, 5, 6, 7 – вентили, 8 – манометр

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для эксперимента было взято 25 образцов детекторов CdZnTe, которые условно можно разделить на 3 категории:

- спектрометрические образцы – 9 шт.;
- дозиметрические образцы – 9 шт.;
- образцы, отбракованные по низкому электросопротивлению ($10^6 \dots 10^8$ Ом);
- Образцы CdZnTe – детекторов подвергались воздействию гидростатическим давлением по следующим режимам:
- одноразовое воздействие гидростатическим давлением величиной 100 МПа;
- повторное воздействие гидростатическим давлением величиной 100 МПа;
- повторное воздействие гидростатическим давлением величиной 200 МПа;

Одноразовому воздействию гидростатическим давлением подверглись все 25 образцов. Результаты

обработки приведены в табл.2 (в % по отношению к общему количеству обработанных образцов).

Таблица 2
Изменение электрофизических параметров образцов после одноразовой обработки давлением 100 МПа

| Результат | Спектрометры | Дозиметры | Бракованные |
|---|--------------|-----------|-------------|
| Повышение электросопротивления, либо без изменения, % | 89 | 67 | 86 |
| Повышение напряжения пробы, либо без изменения, % | 55 | 44 | 100 |

Характерные величины изменения электросопротивления после разовой обработки гидростатическим давлением величиной 100 МПа приведены в табл.3. Измерение электросопротивления проводилось в двух направлениях (при прямом и обратном включении детектора в цепь), поэтому в таблице приведены два значения электросопротивления соответственно.

Повторному воздействию гидростатическим давлением величиной 100 МПа подверглись 2 спектрометрических образца. Результаты обработки приведены в табл.4. Характерные величины изменения электросопротивления после повторной обработки гидростатическим давлением величиной 100 МПа приведены в табл.5. Повторному воздействию гидростатическим давлением величиной 200 МПа подверглись 5 образцов. Результаты обработки приведены в табл.6.

Характерные величины изменения электросопротивления после повторной обработки гидростатическим давлением величиной 200 МПа приведены в табл.7.

Таблица 3
Характерные величины изменения электросопротивления после разовой обработки гидростатическим давлением величиной 100 МПа

| Образец | Электросопротивление, до обработки, Ом | Электросопротивление, после обработки, Ом |
|---------------|--|---|
| Спектрометр 1 | $4 \cdot 10^9, 4 \cdot 10^9$ | $1.2 \cdot 10^{10}, 1.1 \cdot 10^{10}$ |
| Спектрометр 2 | $7.5 \cdot 10^8, 7.5 \cdot 10^8$ | $1.1 \cdot 10^9, 1.1 \cdot 10^9$ |
| Брак 1 | $8 \cdot 10^8, 8 \cdot 10^8$ | $2.5 \cdot 10^9, 2.5 \cdot 10^9$ |
| Брак 2 | $1.5 \cdot 10^6, 1.5 \cdot 10^6$ | $6.5 \cdot 10^6, 6.5 \cdot 10^6$ |

Таблица 4
Изменение электрофизических параметров образцов после повторной обработки давлением 100 МПа

| Результат | Спектрометры |
|---|--------------|
| Повышение электросопротивления, либо без изменения, % | 100 |
| Повышение напряжения пробоя либо без изменения, % | 100 |

Таблица 5
Характерные величины изменения электросопротивления после повторной обработки гидростатическим давлением величиной 100 МПа

| Образец | Электросопротивление, до обработки, Ом | Электросопротивление, после обработки, Ом |
|---------------|--|---|
| Спектрометр 2 | $1.1 \cdot 10^9, 1.1 \cdot 10^9$ | $1.1 \cdot 10^{10}, 1.1 \cdot 10^{10}$ |
| Спектрометр 3 | $5 \cdot 10^{10}, 5 \cdot 10^{10}$ | $7 \cdot 10^{10}, 6 \cdot 10^{10}$ |

Таблица 6
Изменение электрофизических параметров образцов после повторной обработки давлением 200 МПа

| Результат | Спектрометры | Дозиметры |
|-------------------------------------|--------------|-----------|
| Электросопротивление уменьшилось, % | 75 | 100 |
| Напряжение пробоя уменьшилось, % | 50 | 0 |

Таблица 7
Характерные величины изменения электросопротивления после повторной обработки гидростатическим давлением величиной 200 МПа

| Образец | Электросопротивление, до обработки, Ом | Электросопротивление, после обработки, Ом |
|---------------|--|---|
| Спектрометр 4 | $4 \cdot 10^8, 3.2 \cdot 10^8$ | $1.3 \cdot 10^8, 1.5 \cdot 10^8$ |
| Дозиметр 1 | $7 \cdot 10^9, 7.5 \cdot 10^9$ | $6 \cdot 10^9, 6.3 \cdot 10^9$ |

Ниже (рис. 3 и 4) приводятся вольт-амперные характеристики двух образцов (спектрометр 1, спектрометр 3) до и после обработки гидростатическим давлением при температуре 20°C.

На рис.5 приведены спектрометрические характеристики образца (спектрометр 1) до и после однократной обработки гидростатическим давлением величиной 100 МПа.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных выше результатов эксперимента видно, что остаточные эффекты после снятия внешнего гидростатического давления существуют.

После однократной обработки гидростатическим давлением величиной 100 МПа на большинстве образцов наблюдается повышение электросопротивления и напряжения пробоя. На рис.3 заметно значительное снижение токов утечки и повышение рабочего напряжения детектора. Ток утечки или, как его еще называют, темновой ток является одной из основных характеристик качества полупроводникового детектора. Он определяет как качество нанесенных контактов, так и качество самого полупроводникового материала. Чем меньше ток утечки, тем больше может быть приложенное напряжение смещения к датчику и тем более эффективен сбор заряда. Соответственно повышается эффективность регистрации самого детектора. Таким образом, уменьшение тока утечки на рис.3 свидетельствует об улучшении регистрирующих характеристик спектрометра 1 после обработки гидростатическим давлением.

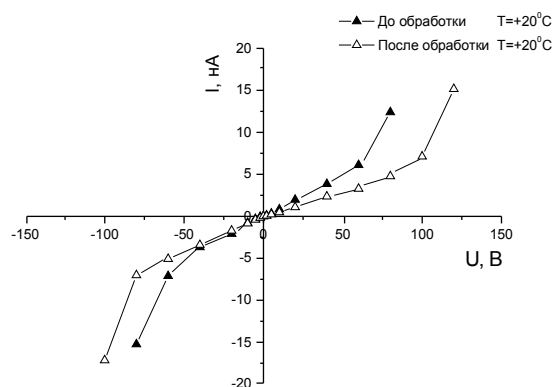


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика образца (спектрометр 1) при температуре 20°C до и после однократной обработки давлением величиной 100 МПа

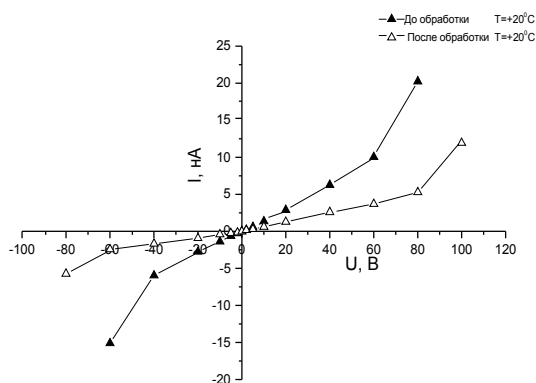
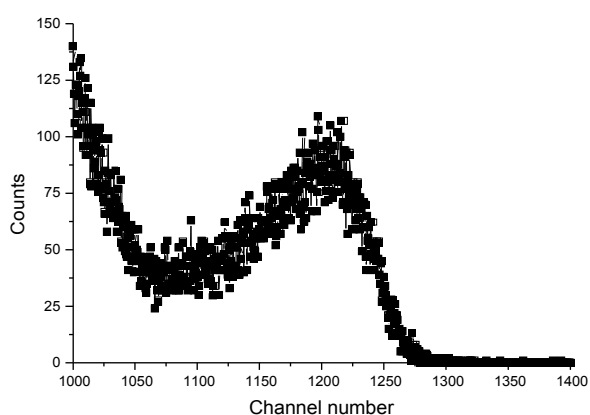


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика образца (спектрометр 3) при температуре 20°C до и после повторной обработки давлением величиной 100 МПа

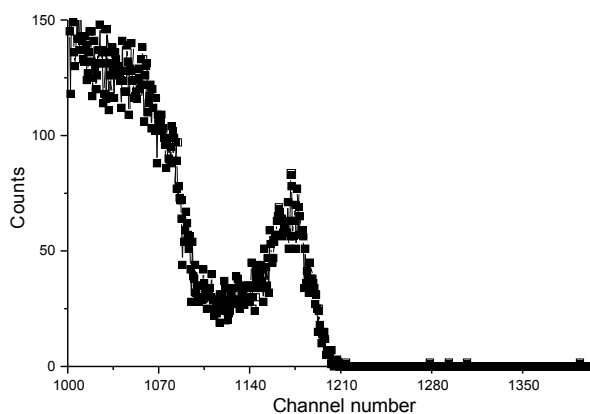
После повторной обработки гидростатическим давлением 100 МПа у обоих образцов повысились как электросопротивление, так и напряжение пробы. По вольт–амперной характеристике, приведенной на рис.4, можно говорить об уменьшении токов утечки более чем в два раза и увеличении рабочего напряжения на 20%.

После повторной обработки давлением 200 МПа, наблюдалось в основном ухудшение электрофизических характеристик всех обработанных детекторов.

Анализируя спектры, приведенные на рис.5, рассчитывали разрешающую способность детектора. Разрешающая способность детектора рассчитывалась как полная ширина амплитудного распределения на половине максимальной высоты. Для приведенных спектров наблюдается улучшение разрешающей способности детектора после обработки давлением с 13 до 9%.



a



б

Рис. 5. Спектрометрическая характеристика спектрометра до (а) и после (б) разовой обработки гидростатическим давлением величиной 100 МПа (источник ^{137}Cs)

В настоящее время ведутся металлографические и рентгеноструктурные исследования образцов, обработанных гидростатическим давлением, для определения влияния давления на структуру полупроводникового соединения CdZnTe и состояние кон-

тактов Au/CdZnTe. Но уже сейчас можно говорить о положительном влиянии обработки гидростатическим давлением на электрофизические свойства детекторов. Вероятно, не только изменение в структуре соединения приводит к улучшению параметров детекторов. Качество контактов, как упоминалось ранее, также играет важную роль в определении характеристик детектора, и улучшение адгезии контактов, которое может происходить при обработке давлением, является положительным моментом при производстве полупроводниковых детекторов.

ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Электрофизические свойства датчиков γ -излучения на основе полупроводникового соединения CdZnTe после обработки гидростатическим давлением могут существенно изменяться.
2. Изменение электрофизических свойств детекторов зависит от режимов обработки и количества циклов воздействия.
3. При однократном и повторном воздействии гидростатическим давлением величиной 100 МПа происходит улучшение электрофизических и спектральных характеристик CdZnTe-детекторов.
4. При повторном воздействии гидростатическим давлением величиной 200 МПа в основном наблюдается ухудшение электрофизических характеристик CdZnTe – детекторов.
5. Необходимо провести металлографические и рентгеноструктурные исследования для получения более полной картины изменений свойств полупроводникового материала CdZnTe, при контактных слоях и самих контактов, а также опробовать другие режимы обработки, в частности, воздействие давлением при повышенных температурах и сочетание барической и термической обработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Пол, Д. Варшауэр. *Твердые тела под высоким давлением*. М.: «Мир», 1966, с. 205-283.
2. В.В. Щенников, А.Е. Карькин, Н.П. Галавашенко, В.М. Фрасуня. Влияние давления и анионного замещения на электрические свойства кристаллов HgTeS // *Физика твердого тела*. 2000, т. 42, вып. 2, с. 210-217.
3. О.А. Игнатченко, А.Н. Бабушкин. Влияние давления до 50 ГПа на электрофизические характеристики теллуридов цинка и кадмия // *Физика твердого тела*. 1994, т. 36, № 12, с. 3596-3600.
4. J. Bardeen. Pressure change of resistance of tellurium. // *Phys. Rev.* 1959, v.75, p. 1777-1778.

5. И.Г. Кулеев, Г.Л. Штрапенин. Влияние всестороннего давления на подвижность электронов и корреляционные свойства системы примесей железа со смешанной валентностью в кристаллах HgSe:Fe // *Физика и техника полупроводников*. 1997, т. 31, № 6, с. 680-685.
6. А.В. Лашкул, Ян Цисовски, Э.К. Арушанов, А.Ф. Князев. Влияние гидростатического давления на концентрацию и подвижность электронов в $Cd_{3-x}Zn_xAs_2$ // *Физика и техника полупроводников*. 1989, т. 23, вып. 8, с. 1406-1410.
7. М.И. Даунов, И.К. Камилов, С.Ф. Габиров. Электронный спектр и электрофизические свойства германия с двухзарядной примесью золота по обе стороны разностороннего перехода при всестороннем сжатии до 7 ГПа // *Физика и техника полупроводников*. 2001, т. 35, вып. 1, с. 58-64.

ВПЛИВ ОБРОБКИ ГІДРОСТАТИЧНИМ ТИСКОМ НА ВЛАСТИВОСТІ ДАТЧИКІВ ЯДЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ СПОЛУКИ CdZnTe

*В.Є. Кутній, Д.В. Кутній, А.В. Рибка, Д.В. Наконечний,
М.А. Тихоновський, А.В. Бабун, Г.Г. Бобилєв*

*Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків, Україна
kutny@kipt.kharkov.ua, факс: (0572) 35-17-39, тел.: (0572) 35-66-37*

Досліджувався вплив обробки всебічним гідростатичним тиском на властивості датчиків ядерного випромінювання на основі напівпровідникової сполуки CdZnTe (Cd – 50, Zn – 2, Te – 48 мас.%) розміром 5x5x2 мм. Розглядалися різні режими обробки гідростатичним тиском: одноразова дія тиском 100 МПа, повторна дія тиском 100 або 200 МПа. Визначено вплив обробки тиском на електроопір, вольт-амперні та спектрометричні характеристики детекторів.

INFLUENCE OF HYDROSTATIC PRESSURE ON NUCLEAR RADIATION DETECTORS' PROPERTIES BASED ON SEMICONDUCTOR ALLOY CdZnTe

*V.E. Kutnij, D.V. Kutnij, A.V. Rybka, D.V. Nakonechny,
M.A. Tikhonovsky, A.V. Babun, G.G. Bobylev*

*Institute of solid state physics, material science and technologies NSC KIPT,
Kharkov, Ukraine, kutny@kipt.kharkov.ua, факс: (0572) 35-17-39, тел.: (0572) 35-66-37*

The influence of hydrostatic pressure on properties of CdZnTe semiconductor detectors (Cd – 50, Zn – 2, Te – 48 mas.%, 5x5x2 mm) was investigated. Were considered different types of hydrostatic treatment at 100 MPa, second hydrostatic treatment at 100 MPa and 200 MPa. Hydrostatic pressure influence on detectors electric resistance, J-V characteristics and spectrometric parameters was determined.