

Ш.А. МИРСАГАТОВ,<sup>1</sup> Б.Н. ЗАВЕРЮХИН,<sup>1</sup> О.К. АТАБОЕВ,<sup>2</sup> Н.Н. ЗАВЕРЮХИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт, Научно-производственное объединение “Физика-Солнце”  
Академии наук Узбекистана

(Ул. Бодомзор, 26, Ташкент 100084, Узбекистан; e-mail: mirsagatov@uzsci.net)

<sup>2</sup> Каракалпакский Госуниверситет им. Бердаха

(Ул. Ч. Абдилов, 1, Нукус 230113, Республика Каракалпакстан; e-mail: otonboy12@uzsci.net)

## КАСКАДНЫЙ ИНЖЕКЦИОННЫЙ ФОТОПРИЕМНИК НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $A^2B^6$ -СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА $\lambda = 500\text{--}650$ НМ

УДК 539

*Созданы и исследованы пленочные инжекционные фотоприемники (ПИФП) на основе твердых растворов  $A^2B^6$ -соединений для спектрального диапазона  $\lambda \approx 0,5\text{--}0,65$  мкм. Чувствительная область ПИФП сформирована в виде сэндвича из пленок переменного состава и с разными ширинами запрещенных зон. Механизм работы ПИФП основан на селективном поглощении спектра излучения пленками и преобразовании его в электрический сигнал. ПИФП имеют внутреннее усиление фототока и эффективно регистрируют слабые оптические сигналы при освещенности  $E \leq 1$  лк и  $T = 300$  К. Интегральная чувствительность ПИФП  $S_{\text{int}} \approx 75$  А/лм ( $\sim 8 \cdot 10^3$  А/Вт).*

*Ключевые слова:* инжекционные фотоприемники, фототок, барьер Шоттки.

### 1. Введение

Полупроводниковые фотоприемники с инжекционным усилением первичного фототока из различных материалов являются новым классом фотоприемников. Они созданы и исследованы достаточно хорошо в экспериментальном и теоретических аспектах. Физика работы этих фотоприемников изложена в последней обзорной работе по инжекционным фотоприемникам [1]. Исследования проводились на инжекционных фотоприемниках (ИФП) из монокристаллов Ge, Si. Их наибольшая чувствительность лежит в инфракрасном диапазоне.

Разработаны и исследованы также ИФП на основе широкозонных  $A^3B^5$ -соединений с высокими эксплуатационными параметрами для области

спектра  $\lambda \approx 0,3\text{--}0,8$  мкм [1]. Их токовая чувствительность достигает максимума  $S = 500$  А/Вт при длинах волн  $\lambda \approx 0,8$  мкм. Все упомянутые выше ИФП имеют общий существенный недостаток, заключающийся в том, что они эффективно работают при азотных температурах.

В работе [1] отмечается, что ИФП на основе  $A^2B^6$ -соединений (монокристаллы ZnS и CdS) весьма перспективны для регистрации и анализа излучений ультрафиолетового и видимого диапазона спектра. Такие ИФП имеют интегральную токовую чувствительность 0,2–1,5 А/Вт при  $\lambda = 0,3$  мкм. Преимуществом монокристаллических ИФП из  $A^2B^6$ -соединений перед ИФП из других материалов является то, что они имеют наилучшие параметры при комнатной температуре.

Из работ по ИФП известна, по крайней мере, только одна работа об ИФП с внутренним усилением на основе  $p\text{-CdTe}$ -пленки [2]. Этот пленочный ИФП эффективно работает в узком спектральном

© Ш.А. МИРСАГАТОВ, Б.Н. ЗАВЕРЮХИН,  
О.К. АТАБОЕВ, Н.Н. ЗАВЕРЮХИНА, 2013

диапазоне длин волн. Токовая чувствительность CdTe-ИФП составляет  $S \approx 2,6$  А/Вт для  $\lambda \approx 0,625$  мкм при температуре  $T = 300$  К, что примерно в 5–6 раз больше, чем у идеального фотоприемника для той же длины волны  $\lambda$  [3]. Под идеальным фотоприемником понимается такой фотоприемник, у которого все падающие кванты электромагнитного излучения поглощаются и все генерированные электронно-дырочные пары разделяются барьером без потерь и вносят вклад в формирование фототока. При этом величина токовой чувствительности при данной длине волны вычисляется по формуле  $S = e\lambda/hc$  (где  $e$  – заряд электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света и  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения) и не зависит от типа материала.

Пленочный  $p$ -CdTe-ИФП представляет собой металл–полупроводник–металл (МППМ)-структуру с барьером Шоттки, инжектирующим неосновные носители вглубь базы. Данный ИФП эффективно работает при прямом напряжении смещения и температуре  $T = 300$  К.

Чувствительной областью ИФП является  $p$ -CdTe-пленка. Однако он имеет узкий спектральный диапазон эффективно регистрируемого электромагнитного излучения в видимой области спектра  $\lambda \approx 0,620$ – $0,65$  мкм.

Следует отметить, что диапазон высокой чувствительности слабого оптического освещения 0,05–1,0 лк ограничен областью собственной фоточувствительности материала (CdTe), из которого изготовлен  $p$ -CdTe-ИФП. Отсюда следует, что для обнаружения предельно слабых оптических сигналов в более широкой области видимого спектра (от ультрафиолетовой до инфракрасной) требуется использовать набор полупроводниковых материалов с разными ширинами запрещенных зон.

Таким образом, из сказанного выше очевидно, что существует проблема в создании ИФП, высокочувствительных к слабым оптическим освещением в широком видимом спектральном диапазоне и работающих при комнатной температуре.

Для решения этой проблемы авторы статьи поставили перед собой задачу – создать каскадный инжекционный фотоприемник (КИФП) с внутренним усилением на основе пленок из  $A^2B^6$ -соединений. Структура этого ИФП должна иметь вид “сэндвича”, т. е. состоять из слоев различных  $A^2B^6$ -соединений. Такой КИФП- $A^2B^6$  должен эф-

фективно регистрировать при  $T = 300$  К слабые оптические сигналы (освещенность  $E \geq 0,5$  лк) в более широком диапазоне длин волн  $\lambda \approx 0,5$ – $0,65$  мкм по сравнению с монокристаллическими и пленочными ИФП из  $A^2B^6$ -соединений.

## 2. Каскадный инжекционный фотоприемник на основе $A^2B^6$ -соединений

Недостаточные сведения об инжекционных фотоприемниках на основе  $A^2B^6$ -соединений обусловлены трудностью получения  $p$ -типа проводимости в таких полупроводниковых материалах, кроме теллурида кадмия и теллурида цинка, а также малым значением длины диффузионного смещения неосновных носителей. Для создания эффективных инжекционных фотодиодов на основе полупроводниковых  $A^2B^6$ -соединений необходимо синтезировать такие материалы с улучшенными свойствами, как в [2], либо синтезировать слои твердых растворов с различными составами. В данной работе избран второй путь – выращивание твердых растворов с различным составом. Такие твердые растворы как  $n$ -CdS<sub>*x*</sub>Te<sub>*1-x*</sub> с высокими удельными сопротивлениями и  $p$ -Cd<sub>*x*</sub>Zn<sub>*1-x*</sub>Te нами были выбраны для создания инжекционного фотоприемника имеющего повышенную фоточувствительность в спектральном диапазоне длин волн  $\lambda = 500$ – $670$  нм. Такие фотоприемники необходимы для использования в качестве детекторов электромагнитного излучения в оптических спектроанализаторах. Например, для анализа химических элементов в металлических сплавах, излучающих электромагнитные волны в указанном диапазоне [3].

Инжекционный фотоприемник нами был создан следующим образом. На поверхности молибденовой пластинки (Mo) толщиной  $d = 300$  мкм, играющей роль подложки и электрического тылового контакта (катод), методом сублимации в потоке водорода выращивалась поликристаллическая крупноблочная  $p$ -CdTe-пленка (слой). Пленка имела удельное сопротивление  $\rho = 10^2$ – $10^3$  Ω·см и толщину  $d = 2,8$  мкм. Далее, на поверхности  $p$ -CdTe-пленки методом газотранспортной эпитаксии в потоке водорода выращивались последовательно: а) поликристаллические крупноблочные твердые растворы:  $p$ -Cd<sub>*x*</sub>Zn<sub>*1-x*</sub>Te-пленка (слой) с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^3$ – $10^4$  Ω·см и

$d = 20$  мкм, ( $0,516 < x < 0,693$ ); б)  $i$ - $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ -пленка (слой) почти  $i$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^8\text{--}10^9$   $\Omega\cdot\text{см}$  и  $d = 2,5$  мкм, ( $0,77 < x < 0,93$ ); далее, на поверхности  $i$ - $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ -пленки путем напыления сульфида кадмия (CdS) в вакууме ( $P \approx 10^{-5}$  Тор) формировалась  $n$ -CdS-пленка (слой) с удельным сопротивлением  $\rho \approx 1,0$   $\Omega\cdot\text{см}$  и  $d = 1\text{--}2$  мкм. На поверхность  $n$ -CdS-пленки наносился методом вакуумного испарения индия (In) П-образный электрический контакт (анод) толщиной  $d = 550$  Å. Входным окном для регистрируемого электромагнитного излучения являлась  $n$ -CdS-пленка.

Таким образом, была создана фоточувствительная  $\text{In-}n\text{-CdS-}i\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te-}p\text{-CdTe-Mo}$ -структура с активной площадью входного окна  $S = 0,5$  см<sup>2</sup>. В общей сложности были изготовлены и исследованы 25 фотоприемников, имевших схожие электрофизические и спектральные характеристики.

Инжекционный фотоприемник, изготовленный на основе этой структуры, имеет чувствительную область из полупроводниковых пленок с металлическими контактами на верхней и на нижней пленках. Все пленки являются фоточувствительными в разной степени к электромагнитным излучениям (дальнего ультрафиолета, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов). От существующих фотоприемников этот ИФП отличается тем, что его чувствительная область выполнена из полупроводника  $\text{A}^2\text{B}^6$  (CdS) электронного типа проводимости ( $n$ ), из полупроводникового твердого раствора  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$  собственного типа проводимости ( $i$ ), из полупроводникового твердого раствора  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$  дырочного типа проводимости ( $p$ ) и из полупроводника  $\text{A}^2\text{B}^6$  (CdTe) дырочного типа проводимости. Этот инжекционный фотоприемник имеет также существенные особенности в конструкции:

а) чувствительная область состоит из четырех полупроводниковых пленок (слоев) с разным удельным сопротивлением (CdS,  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ,  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ , CdTe), расположенных одна на другой в виде “сэндвича”, т. е. представляет собой каскадную структуру;

б) верхняя пленка представляет собой слой CdS, а нижняя пленка представляет собой слой  $p$ -CdTe;

в) между верхней  $n$ -CdS-пленкой и нижней  $p$ -CdTe-пленкой расположена пленка  $i$ - $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ,

являющаяся базой ИФП. Там же находится и пленка  $p$ - $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ , представляющая собой переходной базовый элемент (для оптимального понижения потенциального барьера – почти “без барьерного перехода” носителей) между базой и  $p$ -CdTe-пленкой. База имеет собственный тип проводимости ( $i$ ) и наибольшее удельное сопротивление, по сравнению со всеми полупроводниковыми пленками;

г) на верхней полупроводниковой пленке ( $n$ -CdS) расположен фронтальный электрический контакт, а на нижней полупроводниковой пленке из  $p$ -CdTe расположен тыльный электрический контакт;

д) входным окном для регистрируемого электромагнитного излучения является  $n$ -CdS-пленка. Таким образом, чувствительная область каскадного инжекционного фотоприемника (КИФП) представляет собой  $n-i-p$ -структуру с  $i-p$ -базой.

### 3. Электрофизические и фотоэлектрические характеристики каскадного инжекционного фотоприемника на основе $\text{A}^2\text{B}^6$ -соединений

#### 3.1. Вольтамперная характеристика каскадного инжекционного фотоприемника

Созданная  $n-i-p$ -структура обладает выпрямляющим свойством, как видно из ее вольтамперной характеристики (ВАХ), см. рис. 1. При этом коэффициент выпрямления ( $K$ ), определяемый как отношение прямого и обратного тока при фиксированном напряжении  $K = I_{\text{forward}}/I_{\text{reverse}}$  ( $V = 5$  В), составляет более трех порядков.

Прямым направлением тока в структуре считается, если к Мо-контакту прикладывается положительный потенциал “+” и обратным – отрицательный потенциал “-” напряжения смещения ( $V_b$ ) на этом контакте.

#### 3.2. Спектральное распределение фото-эдс каскадного инжекционного фотоприемника

На рис. 2, а, б приведено спектральное распределение фотоэлектродвижущей силы (ЭДС,  $V_{\text{emf}}$ )  $\text{In-}n\text{-CdS-}i\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te-}p\text{-CdTe-Mo}$ -структуры в относительных единицах при

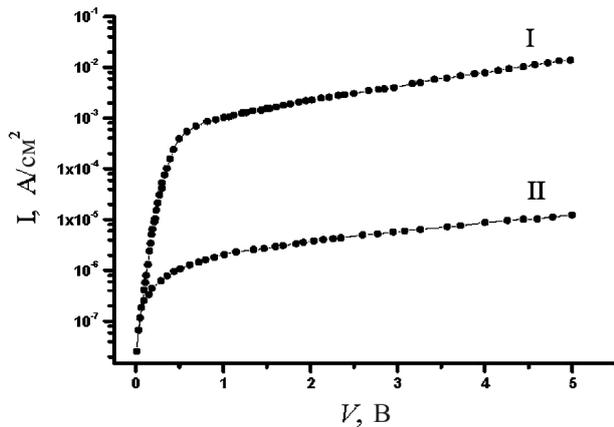


Рис. 1. Прямая (I) и обратная (II) ветвь темновой ВАХ типичной  $\text{In-n-CdS-i-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-p-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te-p-CdTe}$ -Мо-структуры при комнатной температуре

$V_b = 0$  В. Из этого рисунка видно, что кривая спектрального распределения фоточувствительности состоит из двух участков.

На первом участке длин волн  $\lambda \approx 500\text{--}640$  нм (см. рис. 2, а) кривая зависимости  $V_{\text{emf}}/V_{\text{emf,max}} = f(\lambda)$  возрастает и достигает своего максимального значения на втором участке при  $\lambda \approx 630$  нм. После чего она резко уменьшается и при  $\lambda \approx 660$  нм достигает самого минимального значения. Следует отметить, что в поведении этой кривой наблюдаются особенности ее роста (в виде наличия изгибов А, В, С и полков D) в определенных волновых интервалах.

Для интерпретации этих экспериментальных данных на кривой этой зависимости  $V_{\text{emf}}/V_{\text{emf,max}} = f(\lambda)$  можно выделить несколько интервалов длин волн, где эта зависимость проявляет особенности своего поведения. Это спектральное распределение фото-эдс каскадного инжекционного фотоприемника получено при напряжении смещения  $V_b = 0$  В. Приведенные экспериментальные данные особенностей роста фоточувствительности КИФП в разных волновых интервалах спектрального диапазона можно объяснить исходя из теории оптических свойств полупроводников [4].

Феноменологический и теоретический анализы показывают, что эффективность поглощения квантов электромагнитного излучения полупроводниками зависит от энергии квантов, зонной стру-

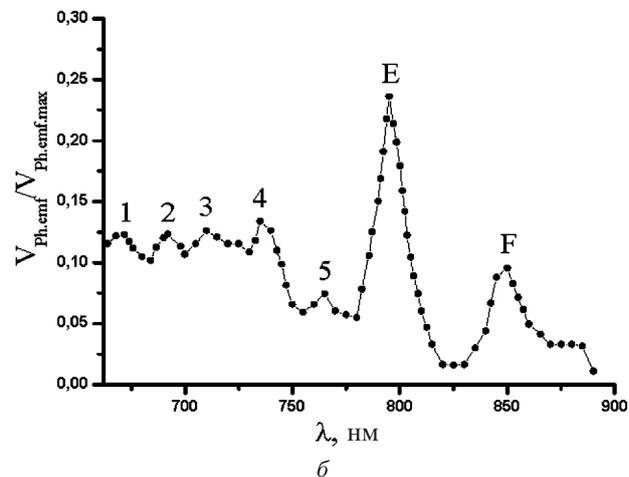
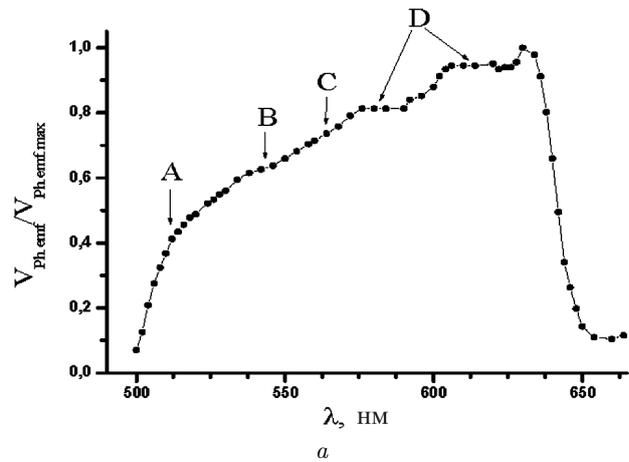


Рис. 2. Первая область спектрального распределения фоточувствительности типичной  $\text{In-n-CdS-i-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-p-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te-p-CdTe}$ -Мо-структуры при комнатной температуре,  $V_b = 0$  В (а); вторая область спектрального распределения фоточувствительности типичной  $\text{In-n-CdS-i-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-p-Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te-p-CdTe}$ -Мо-структуры при комнатной температуре,  $V_b = 0$  В (б)

ктур полупроводников, а также и воздействия внешних физических полей [4, 5].

Выделив и проанализировав волновые интервалы, мы оценили ширины запрещенных зон  $E_g$  слоев  $\text{A}^2\text{B}^6$ -соединений в структуре фотоприемника и границы их локализации в энергетическом диапазоне. Была также уточнена природа этих слоев. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что ответственными за особенности поведения зависимости  $V_{\text{emf}}/V_{\text{emf,max}} = f(\lambda)$  являются:

а) в 1-м волновом интервале – слой  $n$ -CdS, имеющий энергетическую полосу шириной для его запрещенной зоны  $E_{1g} \approx 2,48$ – $2,43$  эВ (разность  $E_{1g} = 0,05$  эВ);

б) для последующих интервалов ответственным является слой твердого раствора  $i$ -CdS $_x$ Te $_{1-x}$ , имеющий энергетическую полосу шириной для его запрещенной зоны  $E_{2g} \approx 2,43$ – $1,968$  эВ ( $\Delta E_{2g} = 0,462$  эВ). Данная энергетическая полоса обусловлена наличием внутри CdS $_x$ Te $_{1-x}$ -слоя подслоев с различным содержанием “ $x$ ” и, соответственно, имеющим разные ширины запрещенных зон. Эти подслои проявляются в виде полоч на кривой спектрального распределения fotocувствительности в этих интервалах.

Изгибы А, В, С (рис. 2, а) на зависимости  $V_{emf}/V_{emf,max} = f(\lambda)$  показывают, что имеются плавные переходы А<sup>2</sup>В<sup>6</sup>-слоев одного слоя в другой. Изгиб А соответствует переходу CdS-слоя в CdS $_x$ Te $_{1-x}$ -слой, а изгибы В, С соответствуют плавному переходу от одного подслоя к другому подслою. Все эти подслои имеют разные ширины запрещенных зон и состав. Плавность изгибов свидетельствует о том, что между слоями и подслоями не имеется резкой границы и постоянные решеток подслоев и слоев являются почти идентичными. Две полки D, наоборот, соответствуют резким переходам подслоев один в другой. Быстрый спад фотопроводимости в 8-м интервале на участке  $\lambda \approx 630$ – $660$  нм показывает существование слабо фотоактивного подслоя между CdS $_x$ Te $_{1-x}$ -слоем и слоем твердого раствора Cd $_x$ Zn $_{1-x}$ Te. Этот спад, может быть, связан с эффектом оптического гашения фотопроводимости при  $\lambda \approx 630$ – $660$  нм, который возникает из-за оптической перезарядки локальных центров, находящихся в подслое [6] или модуляции сопротивления этого подслоя, которая является незначительной по сравнению с модуляцией сопротивления базы.

В 8-м волновом интервале на участке  $\lambda \approx 660$ – $780$  нм ответственным за особенности поведения кривой зависимости  $V_{emf}/V_{emf,max} = f(\lambda)$  является твердый раствор Cd $_x$ Zn $_{1-x}$ Te. Эти особенности четко выделяются (см. рис. 2, б) в виде пяти пиков при длинах волн  $\lambda = 672$  нм (1),  $\lambda = 692$  нм (2),  $\lambda = 710$  нм (3),  $\lambda = 735$  нм (4) и  $\lambda = 765$  нм (5). Можно утверждать, что это связано с существованием пяти слабо фотоактивных подслоев, находящихся внутри твердого раствора Cd $_x$ Zn $_{1-x}$ Te и

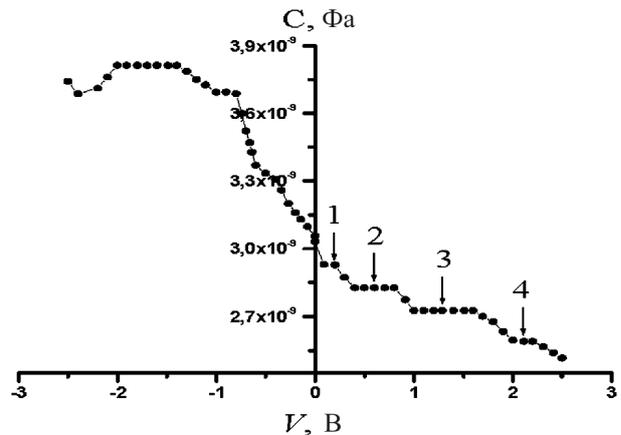


Рис. 3. Вольт-фарадная характеристика типичной In- $n$ -CdS- $i$ -CdS $_x$ Te $_{1-x}$ - $p$ -Cd $_x$ Zn $_{1-x}$ Te- $p$ -CdTe-Mo-структуры измеренная на частоте  $f = 5$  кГц при комнатной температуре

прилегающих к поверхности  $p$ -CdTe-слоя. В этих подслоях твердого раствора Cd $_x$ Zn $_{1-x}$ Te происходят: а) слабые модуляции их сопротивлений и б) оптическая генерация неравновесных носителей квантами, энергия которых  $E_f$  лежит в диапазоне  $E_f = 1,845$ – $1,589$  эВ.

В 9-м волновом интервале ( $\lambda \approx 780$ – $884$  нм) имеются два пика  $E$  и  $F$ , относящихся к гексагональной и кубической модификациям теллурида кадмия, имеющим ширины запрещенных зон  $E_g(\text{CdTe}^1) \approx 1,53$  эВ и  $E_g(\text{CdTe}^2) \approx 1,43$  эВ, соответственно, при  $T = 300$  К [7]. Об этом свидетельствуют близкие величины запрещенных зон  $E_g(\text{CdTe}^1) \approx 1,503$  эВ и  $E_g(\text{CdTe}^2) \approx 1,415$  эВ для слоя  $p$ -CdTe, определенные нами по экстраполяции длинноволновой области пиков  $E$  и  $F$  на ось  $\lambda$ .

### 3.3. Вольт-фарадная характеристика каскадного инжекционного фотоприемника

На вольт-фарадной характеристике  $C(V)$  КИФП в области обратных напряжений смещений, при которых происходит расширение толщины слоя объемного заряда, четко проявляются четыре ступеньки (1, 2, 3 и 4) (рис. 3).

Это свидетельствует о том, что базовая область структуры является неоднородной, так как содержит подслои твердого раствора CdS $_x$ Te $_{1-x}$ , что показано в разделе 3.2. Кроме того, характеристи-

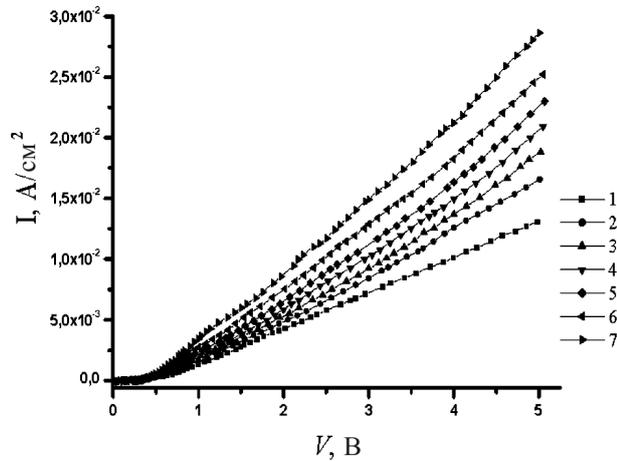


Рис. 4. Темновая и световая вольтамперные характеристики типичной  $In-n-CdS-i-CdS_xTe_{1-x}-p-Cd_xZn_{1-x}Te-p-CdTe-Mo$ -структуры для разных уровней освещенности при комнатной температуре: 1 – темновая, 2 – 0,5 лк, 3 – 2,5 лк, 4 – 7,5 лк, 5 – 15 лк, 6 – 30 лк, 7 – 50 лк

ка  $C(V)$  показывает, что в исследуемой структуре фотоприемника имеется тонкий (менее одного микрона) слой неоднородного диэлектрика (окислов), что доказывается наличием изломов и полок на зависимости  $C(V)$  в интервале отрицательных напряжений  $V_b = -0,5 \dots -2,5$  В (см. рис. 3) [8]. Это обусловлено образованием окислов цинка, теллура и кадмия в процессе напыления пленки CdS на поверхность пленки твердого раствора  $Cd_xZn_{1-x}Te$ .

**Интегральная чувствительность  $In-n-CdS-i-CdS_xTe_{1-x}-p-Cd_xZn_{1-x}Te-p-CdTe-Mo$ -структуры в прямом направлении тока при разных малых уровнях освещенности и напряжении смещения  $V_b = 5$  В, ( $T = 300$  К).** В таблице приняты следующие обозначения:  $V_b$  – напряжение смещения,  $E$  – освещенность,  $I_{dark}$  – темновой ток,  $I_{photo}$  – фототок и  $S_{int}$  – интегральная чувствительность при прямом направлении тока

$V_b$ , В	$E$ , лк	$I_{dark}$ , мА	$I_{photo}$ , мА	$S_{int}$ , А/лм		
5,0	0,0	6,535	8,25	73		
	0,5					
	2,5				9,4	23
	7,5				10,3	10,12
	15				11,5	6,35
	30				12,6	4,05
	50				14,3	3,12

### 3.4. О механизме инжекционного усиления фототока каскадного инжекционного фотоприемника

Проведенные эксперименты показали, что  $In-n-CdS-i-CdS_xTe_{1-x}-p-Cd_xZn_{1-x}Te-p-CdTe-Mo$ -структура эффективно проявляет себя как инжекционный фотодиод при малом уровне освещенности, о чем свидетельствуют вольтамперные характеристики, измеренные в темноте и на свету  $E = 0,5-50$  лк (см. рис. 4 и таблицу) при температуре  $T = 300$  К.

При облучении структуры светом была использована лампа накаливания, мощностью  $P = 100$  Вт. Как известно, в одном люмене энергия электромагнитного излучения в видимой области спектра равна  $9,1 \cdot 10^{-3}$  Вт [9]. Согласно данным таблицы, самая высокая интегральная чувствительность  $S_{int} = 75$  А/лм ( $\sim 8 \cdot 10^3$  А/Вт) достигается при освещенности  $E = 0,5$  лк, которая уменьшается с увеличением  $E$  и при  $E = 50$  лк она становится равной 3 А/лм ( $\sim 3,4 \cdot 10^2$  А/Вт).

В работе [1] обсуждены механизмы инжекционного усиления фототока. Созданный нами инжекционный фотоприемник работает на основе дрейфового переноса носителей заряда. В связи с этим проводимость его базы определяется инжектированными носителями и генерированными электромагнитным излучением неравновесными носителями. Поэтому инжекционное усиление непосредственно связано с модуляцией проводимости базы и остальных слоев структуры фотоприемника. Таким образом, механизмом усиления фототока является положительная обратная связь, что обеспечивает рост фотопроводимости и столь высокую интегральную чувствительность разработанного КИФП при комнатной температуре.

В целях определения вклада слоев CdTe гексагональной и кубической модификаций в сопротивление базы структуры исследовалась вольтамперная характеристика структуры при облучении лазером с  $\lambda = 0,625$  мкм и мощностью  $P = 12,5$  мВт. При этом было обнаружено, что спектральная чувствительность структуры имеет величину  $S_\lambda = 0,64$  А/Вт, которая сопоставима с величиной спектральной чувствительности идеального фотоприемника, изготовленного на основе гексагонального ( $\sim 0,65$  А/Вт,  $\lambda = 0,82$  мкм) и кубического ( $\sim 0,7$  А/Вт,  $\lambda = 0,87$  мкм) теллурида ка-

дмия [10]. Из анализа экспериментальных данных следует, что сопротивления слоев CdTe модулируются под воздействием лазерного облучения, но их вклад в общее сопротивление базы структуры является незначительным. Также следует, что вклад сопротивления пяти подслоев твердого раствора  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$  с вариациями величины ширины запрещенной зоны  $E_g \approx 1,89\text{--}1,587$  эВ в общее сопротивление базы является несущественным. Об этом свидетельствуют значения величин  $S_{\text{int}}$ , полученные при освещенностях  $E = 0,5$  лк,  $S_{\text{int}} = 75$  А/лм ( $\sim 8 \cdot 10^3$  А/Вт) и при действии лазерного облучения  $S_{\text{int}} \approx 0,64$  А/Вт, которые отличаются друг от друга более чем на четыре порядка.

Таким образом, следует отметить, что для создания образцов пленочных КИФП с расширенным (в ближнюю инфракрасную область) спектральным диапазоном ( $\lambda \approx 0,5\text{--}0,825$  мкм) необходимо повысить фоточувствительность слоя CdTe и подслоев  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$  твердого раствора, прилегающих к нему. Реализацию инжекционного усиления в этих слоях можно достичь путем их компенсации примесями для получения большого сопротивления, которое вызовет дополнительно сильную модуляцию общего сопротивления всей структуры.

#### 4. Выводы

1. Созданный каскадный  $\text{A}^2\text{B}^6$ -инжекционный фотоприемник эффективно работает в широком спектральном диапазоне, включая дальний ультрафиолет и видимый ( $\lambda \approx 0,5\text{--}0,65$  мкм). Он обеспечивает на несколько порядков ( $10^2\text{--}10^3$ ) более высокую токовую интегральную фоточувствительность во всем указанном диапазоне, по сравнению с монокристаллическими  $\text{A}^2\text{B}^6$ -инжекционными фотоприемниками (ZnS-ИФП), работающими эффективно в узком ультрафиолетовом диапазоне ( $\lambda \approx 0,3$  мкм).

2. Инжекционное усиление фототока в пленочном КИФП возникает при затягивании генерированных излучением носителей вглубь базы внешним электрическим полем и возникновении при этом сильной модуляции ее сопротивления. Большой коэффициент повышения фоточувствительности и инжекционного усиления в исследованном спектральном диапазоне является следствием особенности структуры КИФП, где используются пленочные  $\text{A}^2\text{B}^6$ -полупроводники, а также плен-

ки их твердых растворов с переменным составом. Наличие в структуре фотоприемника слоев с различными составами, удельным сопротивлением и шириной запрещенных зон (т.е. имеется их градиент порядка  $\Delta E = 2,48\text{--}1,45$  эВ  $\approx 1,03$  эВ) приводит к возникновению встроенного электрического поля  $E_v$ . Поле  $E_v$  способствует дополнительному затягиванию в базу тех носителей, которые могли быть захвачены ловушками. Обстоятельства, указанные в этом пункте, позволяют эффективно осуществлять модуляцию сопротивления базы структуры и создавать на ее основе КИФП с высокой интегральной чувствительностью  $S_{\text{int}} = 75$  А/лм ( $\sim 8 \cdot 10^3$  А/Вт).

3. Расширение спектрального диапазона фоточувствительности, и это важно, реализовано за счет создания градиента запрещенных зон ( $\text{grad } \Delta E_g$ ) в структуре фотоприемника. Этот градиент позволяет эффективно поглощать кванты разных энергий в определенных местах чувствительной области КИФП и осуществлять модуляцию их сопротивления.

4. Важным преимуществом созданного КИФП является то, что он работает в пропускном направлении и способен эффективно регистрировать и усиливать слабые оптические сигналы при уровне освещенности  $E = 0,5\text{--}50$  лк и более в указанном выше спектральном диапазоне при комнатных температурах.

Эксплуатационные параметры (широкий спектральный диапазон, низкая величина  $V_b$ , высокая интегральная чувствительность, рабочая температура  $T = 300$  К, по сравнению с другими твердотельными фотоприемниками), показывают, что фотоприемник данного типа найдет практическое применение в различных устройствах регистрации и анализа оптических сигналов в видимом диапазоне спектра.

1. И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, В.И. Стафеев, ФТП **42**, 113 (2008).
2. Ш.А. Мирсагатов, А.К. Утениязов, Письма в ЖТФ **38**, № 1, 70 (2012).
3. Н.В. Пароль, С.А. Кайдалов, *Фоточувствительные приборы и их применение* (Радио и связь, Москва, 1991).
4. *Оптические свойства полупроводников  $\text{A}^2\text{B}^6$* , под ред. Р. Уиллардсона и А. Бира (Мир, Москва, 1970).
5. Н.Н. Заверюхина, Е.Б. Заверюхина, Б.Н. Заверюхин, Письма в ЖТФ **33**, №9, 1 (2007).

6. Ш.А. Алимов, В.В. Лосев, Б.М. Орлов, В.И. Стафеев, ФТП **10**, 1830 (1976).
7. K. Zanio, *Semiconductors and Semimetals* (Acad. Press, New York, 1978).
8. С. Зи, *Физика полупроводниковых приборов* (Мир, Москва, 1984).
9. Э. Фриш, *Оптические методы измерений. Часть I* (Издательство Ленинградского Университета, Ленинград, 1976).
10. А. Амброзьяк, *Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов* (Сов. радио, Москва, 1970).

Получено 12.06.12

Ш.А. Мирсагатов, Б.Н. Заверюхин,  
О.К. Атабоев, М.М. Заверюхина

#### КАСКАДНИЙ ІНЖЕКЦІЙНИЙ ФОТОПРИЙМАЧ НА ОСНОВІ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ $A^2B^6$ -СПОЛУК ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДІАПАЗОНУ $\lambda = 500\text{--}650$ нм

#### Резюме

Створено та досліджено плівкові інжекційні фотоприймачі (ПФП) на основі твердих розчинів  $A^2B^6$ -сполук для спектрального діапазону  $\lambda \approx 0,5\text{--}0,65$  мкм. Чутлива область ПФП сформована у вигляді сендвіча з плівок змінного складу і з різними ширинами заборонених зон. Механізм

роботи ПФП заснований на селективному поглинанні спектра випромінювання плівками і перетворенні його в електричний сигнал. ПФП мають внутрішнє підсилення фотоструму і ефективно реєструють слабкі оптичні сигнали при освітленості  $E \leq 1$  лк і  $T = 300$  К. Інтегральна чутливість ПФП  $S_{\text{int}} \approx 75$  А/лм ( $\sim 8 \cdot 10^3$  А/Вт).

Sh.A. Mirsagatov, B.N. Zaveryukhin,  
O.K. Ataboev, N.N. Zaveryukhina

#### CASCADE INJECTION PHOTODETECTOR FOR THE 500–650-nm SPECTRAL RANGE ON THE BASIS OF SOLID SOLUTIONS OF $A^2B^6$ COMPOUNDS

#### S u m m a r y

The parameters of film injection photodetectors (FIPDs) created on the basis of solid solutions of  $A^2B^6$  compounds for a spectral range of 500–650 nm have been studied. The sensitive region of FIPDs is formed as a sandwich from films with different composition contents and different energy gap widths. The mechanism of FIPD functioning is based on the selective absorption of radiation by films and its conversion into an electric signal. FIPDs are characterized by an internal enhancement of a photocurrent and can efficiently register weak optical signals at illuminances  $E \leq 1$  lux and the temperature  $T = 300$  K. The integral sensitivity of FIPDs is  $S_{\text{int}} \approx 75$  A/lm ( $\approx 8 \times 10^3$  A/W).