

# Фотоэлектрические свойства инжекционного фотоприемника на основе твердых растворов соединений $A^{II}B^{VI}$

© Ш.А. Мирсагатов<sup>¶</sup>, О.К. Атабоев<sup>†¶</sup>, Б.Н. Заверюхин, Ж.Т. Назаров\*

Физико-технический институт, Научно-производственное объединение „Физика-Солнце“ Академии наук Узбекистана, 100084 Ташкент, Узбекистан

<sup>†</sup> Каракалпакский государственный университет им. Бердаха, 230113 Нукус, Республика Каракалпакстан

\* Навоийский государственный горный институт, 706800 Навои, Узбекистан

(Получена 19 февраля 2013 г. Принята к печати 4 марта 2013 г.)

На основе твердых растворов соединений  $A^{II}B^{VI}$   $n$ - $CdS_xTe_{1-x}$ ,  $p$ - $Zn_yCd_{1-y}Te$  создана фоточувствительная структура, обладающая высокой интегральной чувствительностью  $S_{int} \approx 700$  А/лм (14 500 А/Вт) при комнатной температуре. Исследованы ее фотоэлектрические свойства при разных уровнях освещенности и напряжениях смещения. Обнаружено, что при малых уровнях освещенности и прямых напряжениях смещения в такой структуре диффузионные и дрейфовые потоки неравновесных носителей направлены противоположно друг другу. Такой эффект приводит к появлению инверсии знака фототока, что позволяет на ее основе создавать селективные фотоприемники с инжекционными свойствами.

## 1. Введение

В настоящее время актуальной задачей является разработка эффективных селективных помехостойких фотоприемников с внутренним усилением, чувствительных в широкой области электромагнитного излучения. Известно, что оптические сигналы в большинстве случаев регистрируются в определенном диапазоне спектра. Поэтому нужен селективный фотоприемник с инверсией знака фототока, позволяющий обеспечивать регистрацию определенной длины волны [1]. Для создания такого фотоприемника наиболее подходящими материалами являются соединения  $A^{II}B^{VI}$ . Спектральная чувствительность таких соединений полностью охватывает ближний ультрафиолетовый и видимый диапазоны спектра электромагнитного излучения. В соединениях  $A^{II}B^{VI}$  существуют прямые оптические переходы, что позволяет получать высокую эффективность генерации электронно-дырочных пар. Однако соединения  $A^{II}B^{VI}$  имеют некоторые недостатки, такие как низкие значения подвижности электронов и дырок, времен жизни носителей заряда, и они имеют только электронную проводимость. Из этих соединений только  $CdTe$  и  $ZnTe$  имеют  $p$ -тип проводимости. Отсюда следует: чтобы создать на основе соединений  $A^{II}B^{VI}$  эффективные фотоприемники с внутренним усилением, необходимо иметь материалы с улучшенными параметрами. Эта задача весьма сложная, она требует больших технологических усилий и материальных затрат. Тем не менее в последние годы в этом направлении достигнуты определенные успехи, а именно получены крупноблочные пленки соединений  $A^{II}B^{VI}$  со столбчатой структурой зерен (кристаллитов). В частности, выращены пленки теллурида кадмия, в которых сочетаются свойства моно- и поликристаллов [2]. В этих пленках межзеренные границы являются стоками

для дефектов, в результате чего время жизни в кристаллитах возрастает. Кристаллиты полностью пронизывают толщину пленки и проявляют себя как монокристаллы в направлении роста. Межзеренные границы сильно компенсированы и имеют очень высокие сопротивления. На основе таких пленок можно создать универсальный пленочный фотоприемник с внутренним усилением. При разработке фотоприемников с перестраиваемым спектром фоточувствительности важным моментом является обеспечение противоположности направлений диффузионных и дрейфовых потоков неравновесных носителей. Другой отличительной чертой пленочного универсального фотоприемника является то, что он способен работать при комнатной температуре из-за применения широкозонных материалов в его конструкции. В настоящее время существующие фотоприемники с внутренним усилением (инжекционные фотоприемники) работают при низких температурах. Для создания фотоприемников с внутренним усилением в качестве базы желательнее использовать сэндвич из слоев твердых растворов соединений  $A^{II}B^{VI}$ . В этом сэндвиче каждый слой имеет определенный состав и соответственно свою ширину запрещенной зоны. При облучении белым светом или пакетом длин волн  $\Delta\lambda$  сопротивление базы такого фотоприемника эффективно модулируется.

## 2. Образцы и методики измерения

Для проведения исследований были изготовлены инжекционные фотоприемники на основе структур  $In/n^+-CdS-n-CdS_xTe_{1-x}-p-Zn_yCd_{1-y}Te/Mo$ . Твердый раствор  $n-CdS_xTe_{1-x}$  получался при напылении сульфида кадмия в вакууме (остаточное давление  $\sim 10^{-5}$  Торр) на поверхность пленок твердого раствора  $Zn_yCd_{1-y}Te$   $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^3$  Ом·см и толщиной 30–40 мкм,

<sup>¶</sup> E-mail: mirsagatov@uzsci.net

<sup>¶¶</sup> E-mail: omonboy12@rambler.ru

как в работе [3]. Фотоэлектрическим методом [4] было обнаружено, что твердый раствор  $n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}$  состоит из четырех слоев различного состава с разными ширинами запрещенных зон ( $\sim 2.3$ ,  $\sim 2.15$ ,  $\sim 2.06$ ,  $\sim 1.96$  эВ). Многослойность твердых растворов  $n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ,  $p\text{-Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}$  позволяет эффективно модулировать сопротивление базы структуры. На поверхность сульфида кадмия наносились П-образные омические контакты из индия методом вакуумного напыления. При этом часть атомов In диффундировала в слой CdS и формировался слой  $n^+\text{-CdS}$  толщиной  $\sim 50$  Å. Таким путем изготовленная структура имела активную площадь  $4\text{ мм}^2$ . Поликристаллические крупноблочные пленки  $\text{Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}$  выращивались методом газотранспортной эпитаксии в потоке водорода путем испарения из двух источников, CdTe и ZnTe, температура которых стабильно поддерживалась на уровне 980 и 1175°C соответственно. Тильный контакт изготавливался из молибдена.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных структур измерялись при прямом и обратном направлениях тока, в темноте и с подсветкой при освещенности  $E = 0.04\text{--}264.7$  лк. Подсветка осуществлялась белым светом и лазером ЛГ-75 при комнатной температуре. Лазерное излучение имело длину волны  $0.625$  мкм и различную мощность. Воздействие белым светом осуществлялось от лампы накаливания, которая по своим параметрам соответствует эталонной лампе. Для этой лампы 1 лм электромагнитного излучения в видимой области спектра соответствует  $9.1 \cdot 10^{-3}$  Вт [5]. Вольт-фарадные характеристики структуры были измерены на частоте 15 кГц, и также было установлено, что они в области частот 400 Гц–200 кГц по форме были идентичны.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены в двойном логарифмическом масштабе прямая (кривая *a*) и обратная (кривая *b*) ветви ВАХ  $I(V)$ , типичной для структуры  $\text{In}/n^+\text{-CdS}-n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p\text{-Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}/\text{Mo}$ . Такую структуру можно представить как  $p-n-n^+$ -структуру, где  $n^+$ -слоем является  $n^+\text{-CdS}$ , высокоомный  $n$ -слой —  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ,  $p$ -слой —  $\text{Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}$ . Прямым считалось направление тока в структуре, когда к In-контакту прикладывался отрицательный потенциал, а обратным — положительный. Анализ ВАХ показывает, что структуры обладают выпрямляющими свойствами и их коэффициенты выпрямления, определяемые как отношение прямого и обратного токов  $K = I_f/I_r$  при фиксированном напряжении ( $V = 5$  В), составляют более трех порядков. Из прямой ветви ВАХ в темноте, представленной в двойном логарифмическом масштабе, видно, что она состоит из четырех участков (1–4 на рис. 1):  $I \propto V$ ,  $I \propto V^3$ ,  $I \propto V$ ,  $I \propto V^2$ . Такая последовательность участков ВАХ объясняется тем, что, во-первых, исследуемый

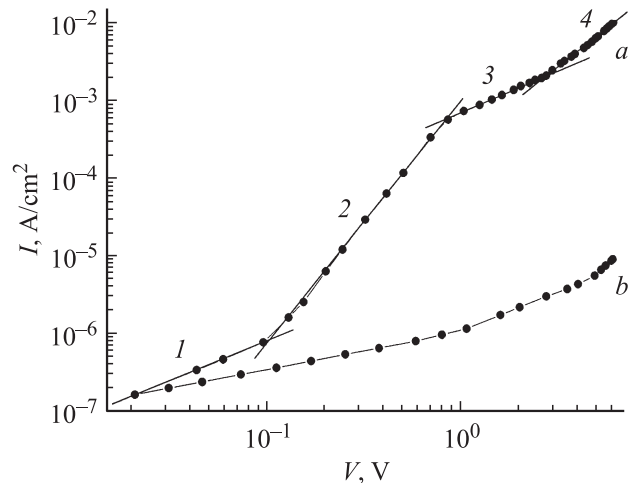


Рис. 1. Темновые вольт-амперные характеристики структуры  $\text{In}/n^+\text{-CdS}-n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p\text{-Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}/\text{Mo}$  при прямом (*a*) и обратном (*b*) направлениях тока и при 300 К: 1 —  $I \propto V$ ; 2 —  $I \propto V^3$ ; 3 —  $I \propto V$ ; 4 —  $I \propto V^2$ .

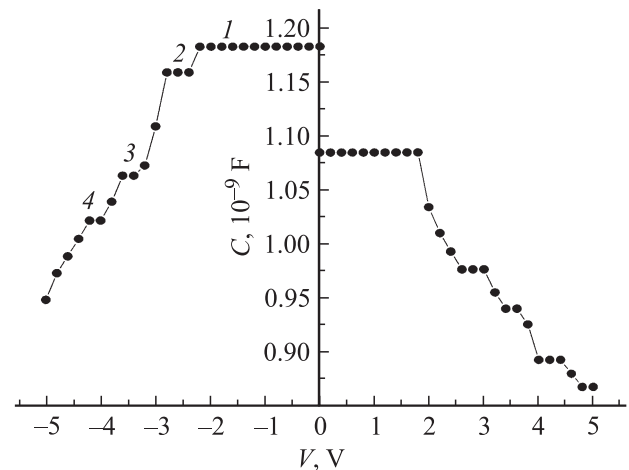
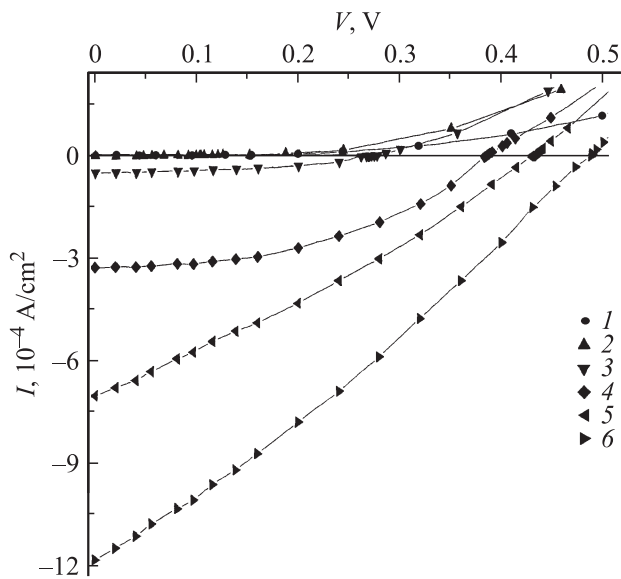


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика структуры  $\text{In}/n^+\text{-CdS}-n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p\text{-Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}/\text{Mo}$  при частоте  $f = 15$  кГц,  $T = 300$  К.

образец является длинным диодом, в котором доминирует дрейфовый механизм переноса тока, и, во-вторых, база структуры состоит из нескольких слоев, которые проявляют себя при различных плотностях тока. Приведенная на рис. 2 вольт-фарадная характеристика  $C(V)$  показывает, что исследуемый образец является структурой типа металл-диэлектрик-полупроводник, в которой диэлектрик (твердый раствор  $n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ) состоит из четырех слоев. Толщины этих слоев  $d$ , вычисленные по формуле для плоского конденсатора  $C = \epsilon S/d$  ( $S$  — площадь,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость), оказались соответственно равными  $0.3$  (1),  $0.306$  (2),  $0.333$  (3) и  $0.347$  мкм (4). Представляет интерес исследование такой структуры при воздействии белым и монохроматическим светом. На рис. 3 показаны ВАХ структуры в темноте и при воздействии белым светом для различных уровней освещенности  $E = 0.044, 1.1, 13.23, 83.8, 264.7$  лк. Из ри-

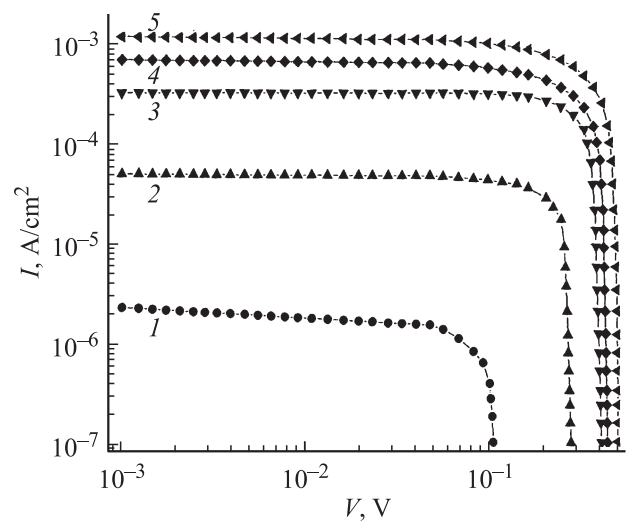


**Рис. 3.** Прямые ВАХ структуры  $\text{In}/n^+\text{-CdS}-n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p\text{-Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}/\text{Mo}$ , темновая (1) и при воздействии белым светом с  $E = 0.044$  (2), 1.1 (3), 13.23 (4), 83.8 (5), 264.7 лк (6).  $T = 300 \text{ K}$ .

сунка следует, что световые характеристики состоят из двух частей — первая часть имеет отрицательное значение фототока, а вторая положительное. Точка инверсии знака фототока с ростом величины уровня освещенности сдвигается в сторону больших напряжений смещения (рис. 3); например, при изменении уровня освещенности от 0.044 до 264.7 лк напряжение смещения, при котором происходит инверсия знака фототока, изменяется от 0.12 до 0.49 В. Эти участки световой ВАХ наблюдаются при тех напряжениях смещения, при которых темновая ВАХ подчиняется закономерности  $I \propto V^3$  и определяется диэлектрической релаксацией [6].

Первая часть световой ВАХ, построенная в двойном логарифмическом масштабе, приведена на рис. 4. Заметим, что в данном случае величина фототока приведена в положительных значениях для удобства анализа экспериментальных данных. В интервале напряжений смещения 0.12–0.49 В абсолютная величина фототока значительно превышает величину темнового тока для всех уровней освещенности (ср. рис. 1 и 4). Разница между ними тем больше, чем больше уровень освещенности. Отличительной чертой этих световых ВАХ является наличие в них сублинейных участков, причем с увеличением уровня освещенности возрастает диапазон напряжений смещений, в котором наблюдается этот участок. После сублинейного участка идет участок резкого спада фототока, приводящий к инверсии знака фототока. Начало участка резкого спада фототока зависит от уровня освещенности, т.е. чем больше уровень освещенности, тем при больших напряжениях проявляется спад. Согласно литературным данным [6,7], сублинейный участок ВАХ наблюдается, когда диффузионные и дрейфовые потоки направлены навстречу друг другу. Такое

явление имеет место, когда в структуре аккумуляция неосновных носителей занимает доминирующее место. Аккумуляция (накопление) неравновесных носителей — один из основных видов контактных явлений, приводящих к возмущению равновесного распределения носителей заряда в объеме полупроводника без существенных нарушений его нейтральности. Необходимым условием возникновения этого эффекта является слабая проницаемость контактного барьера для неосновных неравновесных носителей, дрейфующих к нему в электрическом поле. В структурах с  $n-n^+$ -переходами такое положение возникает, если низкоомный  $n^+$ -слой изотипного перехода имеет отрицательное смещение по отношению к более высокоомному  $n$ -слою, который может быть почти собственным или сильно компенсированным полупроводником. В исследуемой  $p-n-n^+$ -структуре таким изотипным переходом является гетеропереход  $n^+\text{-CdS}-n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ . При подаче отрицательного смещения на слой  $n^+\text{-CdS}$  структуры неосновные неравновесные носители (дырки) из высокоомной базы могут попасть в него, лишь преодолев потенциальный барьер изотипного  $n^+-n$ -гетероперехода. Вследствие этого в приконтактной области их концентрация превышает равновесную концентрацию дырок. Этот эффект усиливается еще тем, что основным инжектирующим источником является изотипный  $n^+-n$ -гетеропереход. Поэтому для обеспечения электронейтральности из противоположного  $n-p$ -гетероперехода входит в базу столько дырок, сколько инжектируется электронов из  $n^+-n$ -гетероперехода. Это явление приводит к усилению аккумуляции неравновесных неосновных носителей. Такой процесс аккумуляции дырок имеет место в первом слое ( $n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ), который является самым высокоомным и широкозонным и непосредственно контактирует со слоем  $n^+\text{-CdS}$ . В условиях развитого биполярного дрей-



**Рис. 4.** Прямые ВАХ структуры  $\text{In}/n^+\text{-CdS}-n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p\text{-Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}/\text{Mo}$  в интервале напряжений ниже точки инверсии в двойном логарифмическом масштабе при уровнях воздействия белым светом  $E$ , лк: 1 — 0.044, 2 — 1.1, 3 — 13.23, 4 — 83.8, 5 — 264.7.  $T = 300 \text{ K}$ .

**Таблица 1.** Электрофизические параметры и фотоэлектрические характеристики структуры  $\text{In}/n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}/\text{Mo}$ 

Белый свет						Лазерное облучение		
$E$ , лк	$N_t$ , $10^9 \text{ см}^{-3}$	$v_\alpha$ , $10^4 \text{ см/с}$	$I_{\text{ph}}$ , А/см <sup>2</sup>	$S_{\text{int}}$ , А/лм	$S_{\text{int}}$ , А/Вт	$P$ , Вт/см <sup>2</sup>	$I_{\text{ph}}$ , А/см <sup>2</sup>	$S_{\text{int}}$ , А/Вт
0.044	0.1	0.8	$1.8 \cdot 10^{-6}$	0.41	45	$1.6 \cdot 10^{-7}$	$8.58 \cdot 10^{-6}$	53.6
1.1	1.2	1.4	$4.74 \cdot 10^{-6}$	0.43	47	$6 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$	21.7
13.23	4	1.8	$3.33 \cdot 10^{-4}$	0.25	27.47	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$2.68 \cdot 10^{-5}$	19.1
83.8	6.8	1.9	$6.34 \cdot 10^{-4}$	0.076	8.35	$1.59 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	0.075
264.7	8	2	$1.1 \cdot 10^{-3}$	0.0415	4.56	$8.43 \cdot 10^{-3}$	$2.82 \cdot 10^{-4}$	0.033
						$13.6 \cdot 10^{-3}$	$4.78 \cdot 10^{-4}$	0.035

фа электронно-дырочная плазма весьма чувствительна к внешним воздействиям, способным вызывать изменение заполнения глубоких примесей. Так, действие примесной подсветки  $\Phi$ , уменьшающей концентрацию дырок  $M$ , захваченных центрами прилипания, которая описывается выражением

$$M = N_1 f_{tp}(\Phi) = \frac{N_t p}{p + p_{1t} + \beta \Phi / c_{pt}}, \quad (1)$$

где  $\beta$  — квантовый выход, оказывает сильное влияние на биполярную скорость дрейфа  $v_\alpha = D_p \alpha_\Phi I$  и величину параметра  $\alpha_\Phi$  [8–10]. В (1)  $f_{tp}$  — вероятность заполнения центров прилипания дырками,  $N_t$  — концентрация центров прилипания,  $p$  — концентрация неравновесных дырок,  $p_{1t}$  — статистический фактор Шокли–Рида,  $c_{pt}$  — сечение захвата дырок на уровень прилипания,  $D_p$  — коэффициент диффузии дырок.

$$\alpha_\Phi = \frac{b N_t}{\{q D_p [(b + 1)(\beta \Phi / c_{pt}) + b N_t]\}}, \quad (2)$$

где  $b = \mu_n / \mu_p$  — отношение подвижностей электронов и дырок,  $q$  — заряд электрона. Согласно данным работы [6], сублинейный участок ВАХ, который описывается формулой

$$V = V_0 \exp(Jaw), \quad (3)$$

отличается высокой фоточувствительностью, а области ВАХ, предшествующие этому участку и следующие за ним, значительно слабее реагируют на подсветку. В (3)  $J$  — плотность тока,  $a = 1/q D_n N_t$ ,  $D_n$  — коэффициент диффузии электронов,  $w$  — длина базы структуры,  $V_0$  — предэкспоненциальный множитель, равный, согласно [7],

$$V_0 = \frac{D_{\text{eff}}}{\mu_p} \frac{b + 1}{b(b\gamma + b + 1)} \frac{p_{sb}^2}{N_t p(w)},$$

$D_{\text{eff}}$  — коэффициент амбиполярной диффузии,  $\gamma = = N_t / p_{1t}$  — фактор прилипания,  $p_{sb}$  — концентрация неравновесных дырок около анода (около  $n^+ - n$ -контакта),  $p(w)$  — концентрация неравновесных дырок около катода (около  $p - n$ -контакта). Максимумы как токовой, так и вольтовой чувствительность и приходятся на сублинейный участок ВАХ. Для проверки данного утверждения были вычислены значения интегральной чувствительности ( $S_{\text{int}}$ ) для разных уровней освещенности по сублинейным участкам ВАХ. Резуль-

таты вычислений приведены в табл. 1. Анализ данных таблицы позволяет сделать однозначный вывод о том, что при уровнях освещенности 0.044–1.1 лк величина интегральной чувствительности имеет наиболее высокое значение и незначительно возрастает. Затем с ростом освещенности до уровня  $E = 264.7$  лк  $S_{\text{int}}$  стремительно падает до значения 4.56 А/Вт. Такое падение величины  $S_{\text{int}}$  связано с опустошением уровней прилипания с ростом уровня освещенности, в результате чего они не влияют на процесс аккумуляции дырок около  $n - n^+$ -гетероперехода [6]. Из сублинейного участка световой ВАХ также были рассчитаны величины биполярной скорости дрейфа  $v_\alpha$  и концентрация уровней прилипания  $N_t$ , которые также приведены в табл. 1. Представляет интерес информация о характеристиках уровней прилипания. Однако прослойка твердого раствора  $n - \text{CdS}_x \text{Te}_{1-x}$  толщиной  $\sim 0.3$  мкм, где происходит модуляция скорости биполярного дрейфа, образуется спонтанно в процессе нанесения CdS на поверхность твердого раствора  $\text{Zn}_y \text{Cd}_{1-y} \text{Te}$   $p$ -типа проводимости. Поэтому определить параметры уровней прилипания практически невозможно. Тем не менее в спектральной зависимости фототока в исследуемых структурах имеется ряд пиков в энергетическом интервале  $\sim (0.4 - 0.7)$  эВ. Выделить из них, какие именно соответствуют уровням прилипания, весьма затруднительно, поскольку твердый раствор имеет переменный состав.

Для определения параметров  $v_\alpha$ ,  $N_t$  из сублинейных участков световых ВАХ были найдены величины  $aJw$  по формуле (3) при различных уровнях освещенности: 0.91 (0.044 лк), 1.8 (1.1 лк), 2.08 (13.23 лк), 2.2 (83.8 лк), 2.31 (264.7 лк). Проведенные расчеты показали, что величина  $aJw < 2$  при уровнях освещенности  $E = 0.044$  и 1.1 лк, а при других уровнях освещенности она  $\geq 2$ , что является основным доказательством появления сублинейных участков [6]. Из таблицы следует, что величины параметров  $v_\alpha$ ,  $N_t$  с ростом уровней освещенности возрастают. Такое поведение параметров обеспечивает рост концентрации дырок около  $n - n^+$ -барьера и увеличение диффузионных потоков в базе структуры, что приводит к сдвигу точки инверсии фототока к более высоким значениям напряжений смещения. Точка инверсии означает равенство диффузионных и дрейфовых потоков, компенсирующих друг друга при данных напряжении смещения

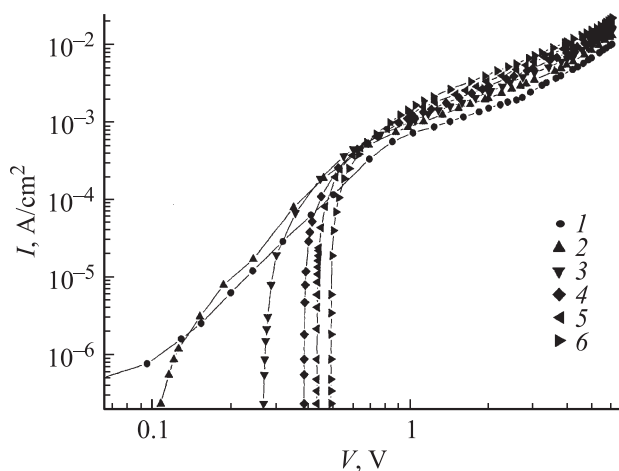
**Таблица 2.** Фотоэлектрические характеристики структуры  $\text{In}/n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}/\text{Mo}$  для участка ВАХ  $I \propto V^2$

$E, \text{лк}$	Белый свет			Лазерное облучение		
	$I_{\text{ph}}, 10^{-2} \text{ А/см}^2$	$S_{\text{int}}, \text{ А/лм}$	$S_{\text{int}}, \text{ А/Вт}$	$P, \text{ Вт/см}^2$	$I_{\text{ph}}, 10^{-2} \text{ А/см}^2$	$S_{\text{int}}, \text{ А/Вт}$
0.044	1.32	700	14 500	$1.6 \cdot 10^{-7}$	1.08	4125
1.1	1.45	45	935	$6 \cdot 10^{-7}$	1.16	2433
13.23	1.68	5	110	$1.4 \cdot 10^{-6}$	1.24	1614
83.8	1.9	1.1	20	$1.59 \cdot 10^{-3}$	1.41	1.53
264.7	2.22	0.45	10	$8.43 \cdot 10^{-3}$	1.6	0.7
				$13.6 \cdot 10^{-3}$	1.78	0.56

*Примечание.* Интегральная чувствительность при воздействии белым светом и при лазерном облучении определялась при  $V = 6 \text{ В}$ . Величина темнового тока составляла  $I_d = 1.01 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$ .

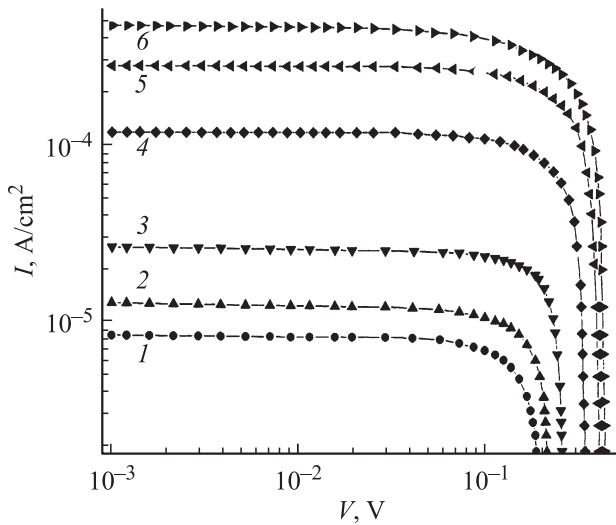
и уровне освещенности. Полученные экспериментальные результаты показывают, что исследуемая структура в прямом направлении тока эффективно работает как инжекционный фотодиод и в нем усиление первичного фототока обусловлено двумя механизмами — положительной обратной связью (ПОС) и параметрическим усилением (ПУ) [11]. После инверсии знака фототока его величина сильно возрастает, причем чем больше уровень освещенности, тем сильнее наблюдаемый рост фототока (см. рис. 5). За этим ростом следует участок ВАХ, в котором фототок линейно растет с напряжением смещения. Этот участок ВАХ сменяется участком, описываемым квадратичной зависимостью тока от напряжения смещения. Эти два участка параллельны участкам темновой ВАХ структуры, и это является доказательством того, что здесь имеются одинаковые механизмы переноса носителей тока (см. рис. 1 и 5). На квадратичном участке световой ВАХ была вычислена интегральная чувствительность в зависимости от напряжения смещения и уровня освещенности, которая приведена в табл. 2. Эти полученные результаты полностью совпадают с результатами работы [11], где было показано усиление первичного фототока, обусловленное

модуляцией подвижности носителей в длинных диодах, в который доминирует дрейфовый механизм переноса носителей заряда. Для подтверждения данного предположения был проведен расчет фототока при освещенности  $E = 0.044 \text{ лк}$  и напряжении смещения  $V = 6 \text{ В}$ . При этом предполагалось, что все падающие фотоны поглощаются и генерируют неравновесные носители, которые без потерь разделяются барьерами и вносят вклад в величину фототока. Для проведения расчета была взята средняя энергия фотонов, поглощаемых в структуре в ее спектральном диапазоне чувствительности. Расчет показал, что в этом случае величина фототока составляет  $I_{\text{ph}} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$ , и она сильно отличается от экспериментального значения  $1.32 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$ . Это означает, что происходит сильная модуляция параметра подвижности, обеспечивающая усиление первичного фототока. С целью установления роли „примесного“ освещения в механизме усиления первичного фототока была исследована прямая ветвь ВАХ при различных мощностях лазерного облучения ( $P$ ). Воздействие проводилось излучением лазера с длиной волны  $\lambda = 0.625 \text{ мкм}$  и мощностью 0.16, 0.6, 1.4, 2.59, 8.43, 13.6 мВт/см<sup>2</sup>. При этом световая ВАХ также состоит из двух частей, как при облучении белым светом. В первой части световой ВАХ при лазерном облучении, как и в случае воздействия белым светом, фототок имеет отрицательный знак в отличие от второй части. Здесь также для удобства анализа первая часть световой ВАХ была взята в положительных значениях и построена в двойном логарифмическом масштабе (рис. 6). Из этого рисунка видно, что световая ВАХ имеет также для всех уровней лазерной мощности сублинейные участки. По этим сублинейным участкам были также вычислены интегральные чувствительности, которые приведены в табл. 1. Для сравнения отметим, что  $S_{\text{int}} = 47 \text{ А/Вт}$  при освещенности  $E = 1.1 \text{ лк}$ , а при лазерном облучении с мощностями  $1.6 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$  интегральная чувствительность равна 53.6 А/Вт. Отсюда следует, что в усилении первичного фототока основную роль играет параметрический механизм, так как энергия фотонов лазерного излучения  $h\nu \approx 2 \text{ эВ}$  меньше ширины запрещенных зон подслоев основного твердого раствора  $n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ . При этом следует отметить, что точка инверсии при лазерном облучении также сдвигается



**Рис. 5.** Прямые ВАХ структуры  $\text{In}/n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}/\text{Mo}$  в области напряжений выше точки инверсии в темноте ( $I$ ) и при уровнях воздействия белым светом  $E, \text{лк}$ : 2 — 0.044, 3 — 1.1, 4 — 13.23, 5 — 83.8, 6 — 264.7.  $T = 300 \text{ К}$ .





**Рис. 6.** Прямые ВАХ структуры  $\text{In}/n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}/\text{Mo}$  в интервале напряжений  $V = 0.05-0.5$  В при лазерном облучении с мощностью  $P$ , Вт/см<sup>2</sup>: 1 —  $1.6 \cdot 10^{-7}$ , 2 —  $6 \cdot 10^{-7}$ , 3 —  $1.4 \cdot 10^{-6}$ , 4 —  $2.59 \cdot 10^{-3}$ , 5 —  $8.43 \cdot 10^{-3}$ , 6 —  $13.6 \cdot 10^{-3}$ .  $T = 300$  К.

в сторону больших напряжений с ростом мощности лазерного облучения  $P$ . Сублинейные участки ВАХ описываются формулой (3), и условия их появления строго выполняются, так как  $\alpha J w \geq 2$  [7], а именно:  $\alpha J w = 4.2, 4, 3.82, 3.22, 2.56, 2.67$  при облучении с  $P = 0.16, 0.6, 1.4, 2.59, 8.43, 13.6$  мВт/см<sup>2</sup> соответственно. При больших мощностях лазерного облучения ( $P = 2.59, 8.43, 13.6$  мВт/см<sup>2</sup>) интегральные чувствительности имеют значения на уровне соответствующих идеальному фотоприемнику, что свидетельствует об отсутствии токовой модуляции уровней прилипания, как при высоких уровнях освещенности белым светом, поскольку они при таких уровнях освещенности полностью опустошены. Выше отмечалось, что сублинейные участки появляются тогда, когда диффузионные и дрейфовые потоки неравновесных носителей заряда имеют противоположные направления. Эти участки световой ВАХ также наблюдаются при тех напряжениях смещения, при которых темновая ВАХ подчиняется закономерности  $I \propto V^3$ , как и при воздействии на структуру белым светом. После изменения знака фототок описывается теми же закономерностями, что и ВАХ в темноте. Эти экспериментальные результаты однозначно показывают, что при малых уровнях освещенности в случае лазерного облучения биполярная скорость дрейфа модулируется, а при больших уровнях нет. Это означает, что имеется токовая модуляция уровней прилипания и преобладающим механизмом усиления первичного фототока является параметрический механизм.

#### 4. Заключение

Таким образом, полученная структура  $\text{In}/n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}/\text{Mo}$  при подаче на In-кон-

такт отрицательного потенциала и положительного на Мо-контакт работает как инжекционный фотоприемник, обладающий высокой интегральной чувствительностью  $S_{\text{int}} \approx 700$  А/лм (14 500 А/Вт) при малых уровнях освещенности ( $E = 0.044$  лк) и комнатной температуре. В этой структуре при малых напряжениях смещения и малых уровнях освещенности наблюдается инверсия фототока, причем точка инверсии с ростом уровня освещенности сдвигается в сторону больших напряжений смещения. В таком фотоприемнике усиление первичного фототока обеспечивается двумя механизмами, преобладающим из которых является параметрический.

#### Список литературы

- [1] Ш.А. Мирсагатов, Б.У. Айтбаев, В.М. Рубинов. ФТП, **30** (3), 550 (1996).
- [2] Sh.A. Mirsagatov, A.S. Achilov, B.N. Zaveryukhin, M.S. Baiev. Rus. Phys. J., **55** (2), 180 (2012).
- [3] Ш.А. Мирсагатов, О.К. Атабоев, К.А. Исмоилов. Матер. 4-й Междунар. научно-практической конф. «Структурная релаксация в твердых телах» (Винница, 2012) с. 236.
- [4] С.А. Музаффарова, Б.У. Айтбаев, Ш.А. Мирсагатов, К. Дуршимбетов, Ж. Жанабергенов. ФТП, **42** (12), 1409 (2008).
- [5] С.М. Фриш. Оптические методы измерения (Л., Изд-во ЛГУ, 1976) ч. 1, с. 26.
- [6] Э.И. Адирович, П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. Токи двойной инжекции в полупроводниках (М., Сов. радио, 1978) с. 126.
- [7] П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. Фоточувствительность полупроводниковых структур с глубокими примесями (Ташкент, Изд-во ФАН, 1981) с. 74.
- [8] П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман, Ф.Я. Рабинович. Изв. АН УзССР, сер. физ.-мат., **3**, 47 (1972).
- [9] П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. ДАН УзССР, **5**, 23 (1975).
- [10] П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. ДАН УзССР, **2**, 29 (1976).
- [11] И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, В.И. Стафеев. ФТП, **42** (1), 113 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Photoelectrical properties of injection photodetector on the base of $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ compounds solid solutions

Sh.A. Mirsagatov, O.K. Ataboev<sup>+</sup>, B.N. Zaveryukhin, Zh.T. Nazarov\*

Physicotechnical Institute, „Physics–Sun“ Research and Production Enterprise,  
Academy of Sciences of Uzbekistan,  
700084 Tashkent, Uzbekistan  
Karakalpak State University  
742000 Nukus, Uzbekistan  
Navoi State Institute of Mines,  
706800 Navoi, Uzbekistan