

УДК 621.315.592+621.384.2

К. т. н. Ю. Н. БОБРЕНКО, д. ф.-м. н. В. Н. КОМАЩЕНКО, Н. В. ЯРОШЕНКО,  
Г. И. ШЕРЕМЕТОВА, к. ф.-м. н. Б. С. АТДАЕВ

Украина, г. Киев, ИФП им. В. Е. Лашкарёва НАНУ

E-mail: sheremet@isp.kiev.ua

## ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ В БАЗЕ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ УФ-ФОТОПРИЕМНИКОВ

*Изучены спектральные, вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики тонкопленочных поверхностно-барьерных структур на основе соединений  $A^2B^6$  с разным распределением концентрации носителей в области пространственного заряда, перспективных для использования в качестве ультрафиолетовых фотоприемников.*

*Ключевые слова: поверхностно-барьерные структуры, соединения  $A^2B^6$ , УФ-фотоприемник, спектральные характеристики, ВФХ, ВАХ.*

В последнее десятилетие стремительно развивается физика широкозонных полупроводников, неразрывно связанная с техническим прогрессом современной фотоэлектроники. Проблемы регистрации и измерения дозы ультрафиолетового излучения, особенно его наиболее биологически активной части с длиной волны  $\lambda = 0,20 - 0,26$  мкм, вынуждают искать новые и совершенствовать имеющиеся способы создания приборов, работающих с жестким УФ-излучением и обладающих большой площадью. Такие приборы необходимы для медицины, мониторинга окружающей среды, военного дела и др. К перспективным материалам здесь следует отнести широкозонные соединения GaN, SiC, ZnO, ZnS, GaP, CdS, ZnSe и др., изготовленные по тонкопленочной технологии.

Уменьшение затрат на изготовление УФ-фотоприемников (ФП) — необходимое условие для создания их массового производства. К сравнительно недорогим ФП относятся приемники с гетеропереходами (ГП)  $p-Cu_xS/n-ZnS/n-CdSe/Mo$  и  $p-Cu_xS/n-ZnSe/n-CdSe/Mo$ , созданные по тонкопленочной вакуумной технологии, где омическим контактом к широкозонному материалу служит структура с узкозонным полупроводником CdSe/Mo, а составляющая гетероперехода  $p-Cu_{1,8}S$  — стабильная фаза сильновырожденного полупроводника. Качество тонкопленочных ФП с нанометровыми слоями ZnS зависит от технологии изготовления базового слоя CdSe, а также переходного слоя  $(ZnS)_{1-x}(CdSe)_x$  толщиной в несколько нанометров, служащего основой для выращивания ZnS.

Целью настоящей работы было исследование влияния распределения концентрации носителей заряда в области пространственного заряда (ОПЗ) узкозонного полупроводника CdSe и условий формирования переходного слоя  $(ZnS)_{1-x}(CdSe)_x$  на фотоэлектрические и электрофизические параметры УФ ФП.

Для исследования были изготовлены две партии ФП  $p-Cu_xS/n-ZnS/n-CdSe/Mo$  с различным распределением концентрации носителей в ОПЗ CdSe. Образцы имели одинаковую толщину  $L = 5$  мкм, площадь  $S = 20$  мм<sup>2</sup> с фотоактивным слоем ZnS, полученным в одинаковых технологических условиях. Концентрация носителей заряда — ионизированных доноров  $N_d^+$  и акцепторов  $N_a^-$  — в слое ОПЗ CdSe в образцах первой партии (образец 1) не зависела от координаты, в образцах второй партии (образец 2) — зависела.

Базовые слои ФП изготавливали по технологии, описанной в [1]. Отметим только, что нанесение слоев происходило без специального легирования в вакууме не хуже  $10^{-5}$  мм рт. ст. в едином технологическом цикле с использованием закрытого кварцевого реактора с подогреваемыми стенками. Необходимая концентрация электрически активных центров достигалась подбором степени пересыщения осаждаемых паров в камере смешивания и температуры подложки.

Особая роль уделялась переходным варизонным прослойкам  $(ZnS)_{1-x}(CdSe)_x$  толщиной несколько нанометров с целью уменьшения влияния дефектов на границе раздела двух фаз ZnS и CdSe и, как следствие, уменьшения потерь на рекомбинацию. Толщина слоя ZnS контролировалась по «свидетелю» и подбиралась из расчета максимального поглощения этим слоем УФ-излучения с энергией фотонов 4–6 эВ и составляла 100–150 нм.



Рис. 1. АСМ-изображение поверхности структуры  $p-Cu_xS/n-ZnS/n-CdSe/Mo$  ( $10 \times 10 \times 1$  мкм)

Пленка  $p\text{-Cu}_x\text{S}$  наносилась в вакууме взрывным методом, имела толщину 30–50 нм и обладала хорошей сплошностью на текстурированной поверхности ZnS. Изображение поверхности одного из образцов, полученное на атомном силовом микроскопе, показано на **рис. 1**.

Контактная разность потенциалов  $U_k$  в ГП  $p\text{-Cu}_x\text{S}/n\text{-ZnS}/\text{CdSe}$  определялась работой выхода трех используемых полупроводников и ионизированных зарядов на границах раздела. Основную роль в формировании ОПЗ играет распределение концентрации носителей заряда в слое CdSe. Тонкий слой ZnS и переходная область  $(\text{ZnS})_{1-x}(\text{CdSe})_x$  также заметно влияют на ОПЗ слоя CdSe, и могут как понижать, так и повышать  $U_k$ . Следовательно, распределение концентрации ионизированных зарядов влияет на фотоэлектрические и электрофизические характеристики, а также на чувствительность ГП и в длинноволновой, и в коротковолновой областях спектра.

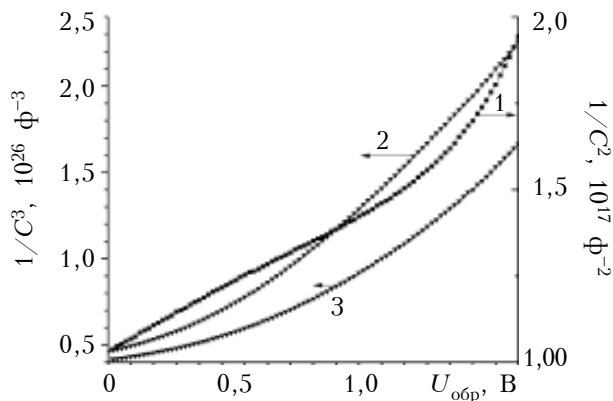


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики образца 1 (1) и образца 2 (2, 3 — прямая и обратная ветви гистерезиса соответственно)

Распределение носителей заряда изучалось по вольт-фарадной характеристике (ВФХ). На **рис. 2** показаны ВФХ для образцов двух партий в координатах  $1/C^2$  и  $1/C^3$  от напряжения обратного смещения  $U_{обр}$ . Следует отметить, что емкость исследуемых структур сложным образом зависит от частоты тестирующего сигнала и величины обратного тока, проходящего через структуру, а также скорости изменения величины напряжения. Частота тестирующего сигнала была равна 5 кГц, смещение подавалось автоматически с амплитудой сигнала 0,04 В и увеличивалась с шагом 0,02 В. На емкость влияет время перезарядки «глубоких» уровней, находящихся в ОПЗ [2, с. 118]. Поскольку ОПЗ состоит из двух последовательно расположенных частей, имеющих различную концентрацию доноров и диэлектрическую проницаемость, результирующая емкость равна

$$C = (C_d C_w) / (C_d + C_w) = C_w / (1 + C_w / C_d), \quad (1)$$

где  $C_w$ ,  $C_d$  — емкость слоев CdSe и ZnS, соответственно.

Пренебрегая влиянием поверхностных зарядов на границах разделов и учитывая, что емкость  $C_d$  слабо меняется с изменением обратного напряжения и что она больше  $C_w$ , можно с незначительными поправками при обратных смещениях положить

$$C \approx C_w.$$

ВФХ образца 1 (**рис. 2**, кривая 1) в координатах  $1/C^2$  от  $U_{обр}$  в диапазоне напряжений до 1,5 В имела вид прямой, что характерно для резкого перехода. При напряжениях  $U_{обр} > 1,5$  В на ток смещения накладывается туннельный ток, производная  $d(1/C^2)/d(U_{обр})$  растет, а также оказывают влияние потенциальные барьеры на границах кристаллитов. Концентрация доноров в слое CdSe для образца 1, найденная из зависимости  $d(1/C^2)/d(U_{обр})$  при  $U_{обр} < 1,5$  В, составляла  $1,02 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Исследования вольт-фарадных свойств образца 2 показали наличие гистерезиса, что характерно для структур с множеством глубоких уровней. Анализ кривых 2 и 3 на **рис. 2** показывает, что распределение концентрации носителей заряда в ОПЗ имеет сложный характер и ее оценка вызывает определенные трудности.

Последовательное сопротивление базы  $R_b$  для образцов 1 и 2 составило, соответственно, 2500 и 2620 Ом. Для образца 1 без слоя ZnS, полученного при тех же условиях,  $R_b = 800$  Ом. Следовательно,  $R_b$  слоя ZnS составляет 1700 Ом. Эти данные позволили найти подвижность  $\mu$  в поликристаллическом слое CdSe при толщине слоя 5 мкм, которая составила  $1,56 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , и оценить концентрацию носителей в слое ZnS образца 2. Концентрация доноров в слое ZnS толщиной 150 нм составила приблизительно  $(1,05 - 1,15) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при подвижности электронов  $19,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  [3, стр. 112]. Низкую подвижность носителей в CdSe можно объяснить влиянием барьеров на межкристаллических границах.

Для анализа представленных ниже ВАХ рассмотрим приведенную на **рис. 3** энергетическую зонную диаграмму. Для упрощения изгиб зон, который неизбежно присутствует в CdSe, здесь не показан. Стрелки указывают направления туннельно-рекомбинационных (3) и термоэмиссионных (4) токов через ГП при прямых смещениях. Из рассмотрения диаграммы можно предположить, что эмиссионный ток при прямом смещении определяется только электронной составляющей тока  $I$ . Поскольку разрыв валентной зоны больше, чем зоны проводимости ( $\Delta E_v > \Delta E_c$ ), ток определяется либо термоэмиссией электронов из CdSe, либо перекрестным туннелированием и рекомбинацией на уровнях в ОПЗ. В случае «прямых» зон (при  $U > 0,6$  В) ток определяется сопротивлениями базы и перехода.

Следует отметить, что механизмы прохождения токов через ГП зависят от температуры. Исследования показали, что при низких температурах преобладают туннельные токи, при высо-

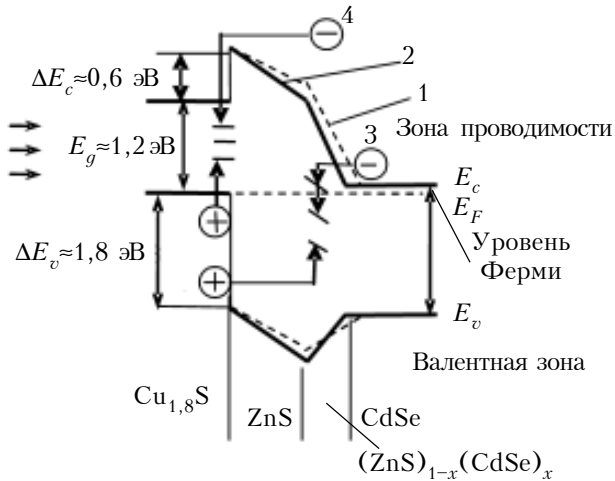
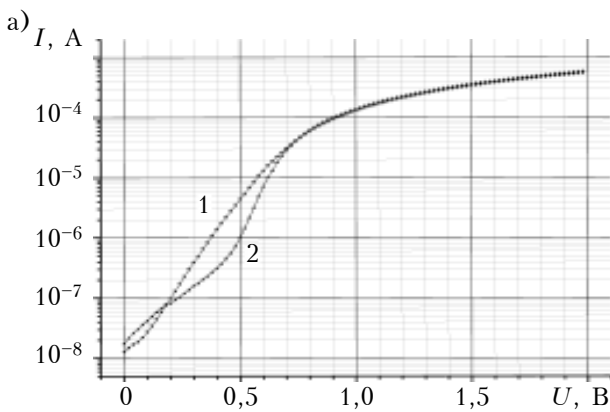


Рис. 3. Энергетическая зонная диаграмма ФП  $\text{Cu}_x\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}/\text{Mo}$ : 1 – ОПЗ образца 1; 2 – ОПЗ образца 2; 3 – туннельно-рекомбинационный ток по глубоким уровням; 4 – термоэмиссионные токи

ких – к туннельным токам добавляются термоэмиссионные. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились в вакуумной ячейке, охлаждаемой водой постоянной температуры ( $T=293\text{ K}$ ). При комнатной температуре в двух образцах преобладают туннельно-рекомбинационные токи с участием уровней в ОПЗ и на границе раздела. (Зависимость ВАХ от температуры в данной работе не рассматривается.) Туннелирование электронов происходит из зоны проводимости CdSe или дырок из валентной зоны  $\text{Cu}_x\text{S}$  на незанятые уровни в ОПЗ с возможной рекомбинацией на этих уровнях (см. рис. 3, поз. 3). Туннельный ток определяется плотностью концентраций носителей на глубоких уровнях, напряженностью поля и энергетическим положением уровней, на которые может туннелировать электрон или дырка. Зависимость тока от напряжения и температуры носит экспоненциальный характер [3]:

$$I = I_0 [\exp(AT)] [\exp(B(U-IR_0))-1],$$



а при постоянной температуре

$$I = I_t [\exp(B(U-IR_0))-1],$$

где  $I_0$ ,  $I_t$  – токи насыщения диодов, соответственно, не зависящие и зависящие от температуры;

$A$  – коэффициент, слабо зависящий от температуры диода;

$B$  – коэффициент, зависящий от механизма туннелирования носителей по глубоким уровням в зоне и от количества уровней в зоне.

Как видно из рис. 4, а, зависимость  $\lg I$  от напряжения при прямом смещении  $U$  для образца 1 сублинейна, что объясняется увеличением рекомбинации в переходном слое  $(\text{ZnS})_{1-x}(\text{CdSe})_x$ . Ток этого образца определяется туннельно-рекомбинационной компонентой с током насыщения  $5,5 \cdot 10^{-6}\text{ A}$  и коэффициентом  $B = 3,3$ .

Кривая зависимости  $\lg I$  от напряжения при прямом смещении  $U$  для образца 2 имеет излом при  $U=0,45\text{ V}$ , что указывает на два параллельно идущих механизма протекания тока. При  $U < 0,45\text{ V}$  в прохождении тока участвуют центры рекомбинации в прослойке  $(\text{ZnS})_{1-x}(\text{CdSe})_x$  и в ОПЗ CdSe. Для этого участка  $I_t=4,4 \cdot 10^{-6}\text{ A}$ ,  $B=5,07$ . При  $U > 0,45\text{ V}$  второй участок кривой 2 имеет большее значение  $d(\lg I)/dU$  и здесь  $I_t=9,6 \cdot 10^{-8}\text{ A}$ ,  $B=4,5$ . Низкое значение  $I_t$  в этом случае обусловлено сменой механизма прохождения тока. Учитывая, что на ВФХ образца 2 наблюдается гистерезис при смене направления измерения, можно предположить, что в данном образце при  $U > 0,45\text{ V}$  больше проявляется термоэмиссионная составляющая тока, что подтверждается проведенными температурными измерениями. Таким образом, можно считать, что при комнатной температуре в образце 2 при  $U < 0,45\text{ V}$  преобладает туннельно-рекомбинационный механизм токопрохождения, а при  $U > 0,45\text{ V}$  на него накладывается термоэмиссионный. Поскольку излом имеется только на ВАХ образца с градиентом концентрации носителей при напряжении  $0,45\text{ V}$ , которое приблизительно совпадает с диф-

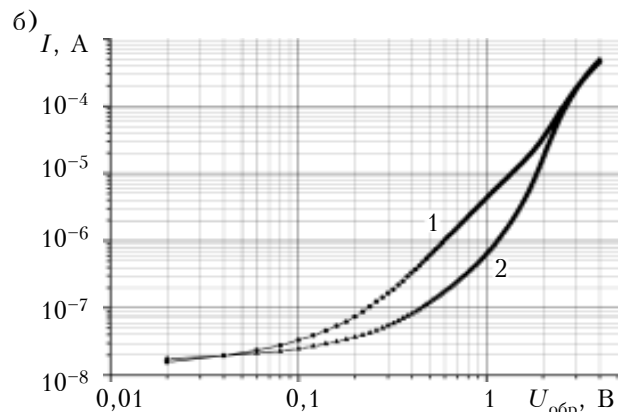


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики первого (1) и второго (2) образцов при прямом (а) и обратном (б) напряжении смещения

фузионным потенциалом в CdSe, когда влиянием ОПЗ CdSe можно пренебречь (прямые зоны), различие в характере ВАХ двух образцов можно объяснить различием значений энергетической концентрации рекомбинационных центров в прослойке  $(ZnS)_{1-x}(CdSe)_x$  и толщины этой прослойки. В образце 1 этот слой содержит больше рекомбинационных центров и, исходя из технологических условий осаждения, имеет меньшую толщину.

Как следует из рис. 4, б, где показаны токи обратносмещенных переходов, при  $U_{обр} < 2,5$  В в обоих образцах наблюдается туннельно-рекомбинационный механизм прохождения тока: здесь темновой ток образца 2 меньше, чем образца 1. Как показывают температурные измерения, при  $U_{обр} > 2,5$  В в обоих образцах преобладает механизм «мягкого» туннельного пробоя, в отличие от туннельного пробоя, имеющего точку излома на ВАХ (как в туннельных диодах). Участок кривой ВАХ образца 1 в диапазоне  $U_{обр}$  от 1,2 до 2,5 В хорошо описывается зависимостью  $I=f(U^{1,8})$ . ВАХ образца 2 в данном интервале нелинейна. При повышении напряжения выше 2,5 В происходит «мягкий» туннельный пробой в обоих образцах, который может смениться на лавинный или тепловой. Туннелирование электронов при обратных смещениях происходит с заполненных состояний валентной зоны  $Cu_xS$  ниже уровня Ферми на незанятые уровни в  $ZnS$  и CdSe с последующей рекомбинацией. Дырочный генерационный ток из CdSe и ZnS в  $Cu_xS$  дает незначительную прибавку к обратному току.

На рис. 5 показаны спектральные характеристики fotocувствительности образцов при пересчете на один падающий фотон. Изготовленные ФП относятся к поверхностно-барьерным гетероструктурам, в которых fotocувствительность в УФ-области спектра сильно зависит от напряженности поля у поверхности. Из рисунка видно, что в коротковолновой области более чувствителен первый образец, а в длинноволновой — второй. Напряженность поля в слое ZnS образца 1 выше, чем образца 2, что способствует лучшему собиранию фотоносителей на ГП в коротковолновой области спектра и уменьшает рекомбинацию на границе раздела, но увеличивает рекомбинационные потери в длинноволновой области. Фоточувствительность в длинноволновой области (0,36–0,72 мкм) за краем поглощения ZnS на 3–3,5 порядка меньше fotocув-

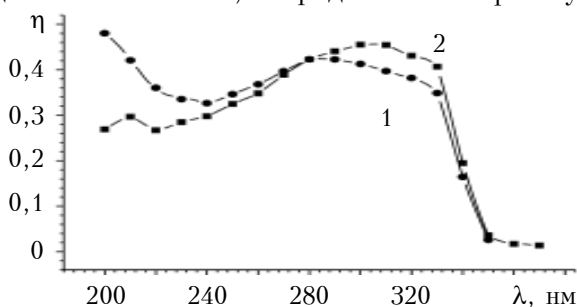


Рис. 5. Квантовая эффективность  $\eta$  спектральных характеристик первого (1) и второго (2) образцов

ствительности в точке максимума для первого образца и на 2–3 порядка меньше для второго.

\*\*\*

Таким образом, исследования показали, что спектральная чувствительность и механизмы прохождения токов тонкопленочных поверхностно-барьерных УФ-фотоприемников  $p-Cu_xS/n-ZnS/n-CdSe/Mo$  в значительной степени определяются распределением концентрации носителей заряда в переходном слое  $(ZnS)_{1-x}(CdSe)_x$  на границе раздела, влияющем на осаждение широкозонного полупроводника  $ZnS_x$ , и слабо зависит от распределения концентрации носителей в области пространственного заряда CdSe.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бобренко Ю. Н., Павелец С. Ю., Павелец А. М. Эффективные фотоэлектрические преобразователи ультрафиолетового излучения с варизонными слоями на основе ZnS // ФТП. — 2009. — Т. 43, вып. 6. — С. 830–835. [Bobrenko Yu. N., Pavelets S. Yu., Pavelets A. M. // FTP. 2009. Vol. 43, iss. 6. P. 830]
2. Ламперт М. Инжекционные токи в твердых телах. — Москва: Мир, 1978. [Lampert M. Inzhektionsionnye toki v tverdykh telakh. Moscow: Mir, 1978]
3. Шарма Б. Л., Пурухит Р. К. Полупроводниковые гетеропереходы. — Москва: Советское радио, 1979. [Sharma B. L., Purokhit R. K. Poluprovodnikovye geteroperekhody. Moscow: Sovetskoe radio, 1979]

Дата поступления рукописи в редакцию 28.03 2012 г.

Bobrenko Yu. N., Komashchenko V. N., Yaroshenko N. V., Sheremetova G. I., Atdaev B. S. **Influence of base impurity distribution on the photoelectric properties of surface-barrier UV photodetectors.**

Keywords: surface-barrier structures,  $A_2B_6$  compounds, UV photodetector, spectral characteristics, CVC, CVC.

The article presents the study on spectral, capacitance-voltage and current-voltage characteristics of surface-barrier structures based on  $A^2B^6$  composition with different carrier concentration profiles in space-charge region sensitive to ultraviolet range and perspective for ultraviolet sensor application.

Ukraine, Kiev, V. E. Lashkaryov ISP.

Бобренко Ю. Н., Комащенко В. М., Ярошенко Н. В., Шереметова Г. І., Агдаєв Б. С. **Вплив розподілу домішки в базі на фотоелектричні властивості поверхнево-бар'єрних УФ-фотоприймачів.**

Ключові слова: поверхнево-бар'єрні структури, з'єднання  $A^2B^6$ , УФ-фотоприймач, спектральні характеристики, ВФХ, ВАХ.

Вивчено спектральні, вольт-фарадні та вольт-амперні характеристики тонкоплівкових поверхнево-бар'єрних структур на основі сполук  $A^2B^6$  з різним розподілом концентрації носіїв в області просторового заряду, перспективних для використання як ультрафіолетових фотоприймачів.

Україна, м. Київ, ІФН ім. В. Є. Лашкар'єва.