

# Структуры на основе полупроводниковых соединений $\text{Cu}(\text{Ag})\text{In}_n\text{S}_m$

© И.В. Боднар<sup>¶</sup>, В.А. Полубок, В.Ю. Рудь<sup>\*¶</sup>, Ю.В. Рудь<sup>+</sup>, М.С. Сергинов<sup>+</sup>

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
220072 Минск, Белоруссия

\* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>+</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 апреля 2003 г. Принята к печати 22 апреля 2003 г.)

Методом направленной кристаллизации расплава выращены кристаллы тройных соединений  $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ ,  $\text{CuIn}_{11}\text{S}_{17}$  и  $\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$ . На основании измерения кинетических коэффициентов определены тип проводимости, удельное сопротивление, концентрация электронов и холловская подвижность носителей заряда, что позволяет отнести полученные вещества к полупроводниковым материалам. Установлена возможность и созданы первые фоточувствительные структуры на основе выращенных соединений. Определены фотоэлектрические параметры полученных твердотельных поверхностно-барьерных структур и фотоэлектрохимических ячеек, обсуждается характер межзонных переходов и оценена ширина запрещенной зоны новых полупроводников. Показано, что разработанные структуры могут применяться в фотодетекторах естественного излучения.

## 1. Введение

Детальные исследования взаимодействия в системах I–III–VI привели к тому, что наряду с достаточно широко известными тройными соединениями  $\text{A}^{\text{I}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$  появились сведения о существовании целого ряда новых полупроводниковых фаз типа  $\text{A}^{\text{I}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$  (где  $n$  и  $m$  — натуральные числа) [1–5]. Такие фазы представляют собой эффективный путь к управлению свойствами полупроводников за счет изменения соотношения между атомами фиксированной природы. Теоретический анализ взаимодействия в этих системах показал, что при изменении состава возникают области стабильности позиционно-упорядоченных фаз, когда изменение индексов  $n$  и  $m$  приводит к образованию новых полупроводниковых соединений [5]. Такие вещества, как и соединения типа  $\text{A}^{\text{I}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$  [6,7], могут оказаться перспективными в решении проблем современной оптоэлектроники и солнечной фотоэнергетики.

В настоящей работе, принадлежащей этому новому направлению, впервые решена проблема получения нескольких новых полупроводниковых соединений  $\text{A}^{\text{I}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$ , изучены их физические свойства и предложены методы создания фоточувствительных структур на их основе.

## 2. Экспериментальная часть

Кристаллы тройных соединений  $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ ,  $\text{CuIn}_{11}\text{S}_{17}$  и  $\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$  выращивали направленной кристаллизацией расплава (горизонтальный вариант метода Бриджмена). Металлические компоненты — медь (серебро) и индий марки В4 (в кварцевой лодочке) и сера — В5 находились в разных частях вакуумированной кварцевой ампулы. Серу брали с избытком относительно стехиометрии,

необходимым для создания паров над образовавшимся расплавом до 2.0 атм. Ампулу размещали в двухзонной горизонтальной печи с независимо регулируемые зонами. Температуру зоны с металлическими компонентами поддерживали в интервале 1370–1400 К (в зависимости от соединения), температуру зоны, где находилась сера, повышали со скоростью 50 К/ч до 700 К, выдерживали 2 ч для протекания химической реакции между медью (серебром), индием и серой. Для более полного протекания указанной реакции температуру этой зоны повышали с той же скоростью до  $\approx 800$  К с повторной выдержкой 1 ч. После этого проводили направленную кристаллизацию путем понижения температуры расплава со скоростью 2–3 К/ч до 1000 К и при этой температуре осуществляли гомогенизирующий отжиг образовавшихся кристаллов в течение 300 ч. Полученные кристаллы были крупноблочными с размером отдельных блоков  $15 \times 8 \times 5$  мм.

Состав выращенных кристаллов определяли с помощью химического анализа по методикам, предложенным в [8–10]. Полученные нами результаты представлены в табл. 1.

Видно, что расчетные и экспериментальные величины вполне удовлетворительно согласуются между собой. Распределение элементов по длине кристалла в пределах погрешности измерений является однородным.

**Таблица 1.** Результаты химического анализа тройных соединений  $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ ,  $\text{CuIn}_{11}\text{S}_{17}$ ,  $\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$

Соединение	Cu, ат%		Ag, ат%		In, ат%		S, ат%	
	I	II	I	II	I	II	I	II
$\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$	5.27	5.30	—	—	36.84	36.52	57.85	58.18
$\text{CuIn}_{11}\text{S}_{17}$	3.45	3.39	—	—	37.93	38.10	58.62	58.51
$\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$	3.45	3.54	—	—	37.93	37.78	58.62	58.68

Примечание. I — расчет, II — эксперимент.

<sup>¶</sup> E-mail: chemzav@gw.bsuir.unibel.by

<sup>¶¶</sup> E-mail: rudvas@spbstu.ru

Таблица 2. Электрические свойства кристаллов соединений I-III<sub>n</sub>-VI<sub>m</sub>

Соединение	Тип проводимости	T = 300 K			T = 77 K		
		$\rho$ , Ом·см	$n$ , см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с	$\rho$ , Ом·см	$n$ , см <sup>-2</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с
CuIn <sub>7</sub> S <sub>11</sub>	<i>n</i>	0.4	$4 \cdot 10^{17}$	40	2	$2 \cdot 10^{17}$	20
CuIn <sub>11</sub> S <sub>17</sub>	<i>n</i>	38	$5 \cdot 10^{15}$	40	$4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{14}$	5
AgIn <sub>11</sub> S <sub>17</sub>	<i>n</i>	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{18}$	30	—	—	—

Структуру и параметры элементарной ячейки полученных кристаллов устанавливали с помощью рентгеновского анализа. Рентгеновские измерения проводили на дифрактометре ДРОН-3М в CuK<sub>α</sub>-излучении с Ni-фильтром. Дифрактограммы, снятые с разных частей кристалла, соответствовали кубической структуре типа шпинели.

### 3. Результаты и их обсуждение

Исследования кинетических коэффициентов проводили на однородных образцах полученных соединений, вырезанных в виде прямоугольных параллелепипедов со средними размерами  $1 \times 2 \times 10$  мм, в постоянных слабых электрических и магнитных полях. Омические контакты создавались привариванием в электрическом разряде тонких (~100 мкм) проводников из платины. Типичные результаты указанных измерений представлены в табл. 2. Видно, что все выращенные нами кристаллы обладают электронным типом проводимости. Их удельное сопротивление и концентрация носителей заряда изменяются в достаточно широких пределах. Уменьшение холловской подвижности электронов с понижением температуры до 77 К, наблюдавшееся в образцах соединений CuIn<sub>7</sub>S<sub>11</sub> и CuIn<sub>11</sub>S<sub>17</sub> (табл. 2), свидетельствует, по-видимому, о том, что рассеяние носителей заряда определяется статическими дефектами. Из сопоставления концентрации свободных электронов в кристаллах CuIn<sub>7</sub>S<sub>11</sub> и CuIn<sub>11</sub>S<sub>17</sub> при T = 300 и 77 К можно сделать предположение о том, что электрические свойства этих соединений обусловлены термической ионизацией электронов с уровней дефектов. В целом электрические свойства выращенных нами новых соединений с общей формулой A<sup>I</sup>B<sub>n</sub><sup>III</sup>C<sub>m</sub><sup>VI</sup> (табл. 2) демонстрируют возможности вариации значениями *n* и *m* (на примере систем CuIn<sub>n</sub>S<sub>m</sub> и AgIn<sub>n</sub>S<sub>m</sub>) для управления электрическими свойствами полупроводников с неизменной природой образующих их атомов.

Результатом исследований контактных явлений на полученных полупроводниках *n*-типа проводимости явилось обнаружение выпрямляющих и фотовольтаических свойств контакта тонких слоев металлического индия ( $d = 1-3$  мкм) с поверхностью естественного скола кристаллов A<sup>I</sup>B<sub>n</sub><sup>III</sup>C<sub>m</sub><sup>VI</sup>. В табл. 3 приведены параметры впервые созданных поверхностно-барьерных структур In/A<sup>I</sup>B<sub>n</sub><sup>III</sup>C<sub>m</sub><sup>VI</sup>. Как показали измерения стационар-

ных вольт-амперных характеристик (ВАХ), структуры In/CuIn<sub>7</sub>S<sub>11</sub>, In/CuIn<sub>11</sub>S<sub>17</sub> и AgIn<sub>11</sub>S<sub>17</sub> обладают выпрямлением, причем пропускному направлению отвечает отрицательная полярность внешнего смещения на указанных кристаллах. Коэффициент выпрямления (*K*) в этих структурах, определенный как отношение прямого и обратного токов при напряжениях  $U \approx 0.5$  В, оказался невысоким (2–5). Прямая ветвь ВАХ при  $U > 0.3$  В обычно подчиняется закону

$$U = U_0 + I \cdot R. \quad (1)$$

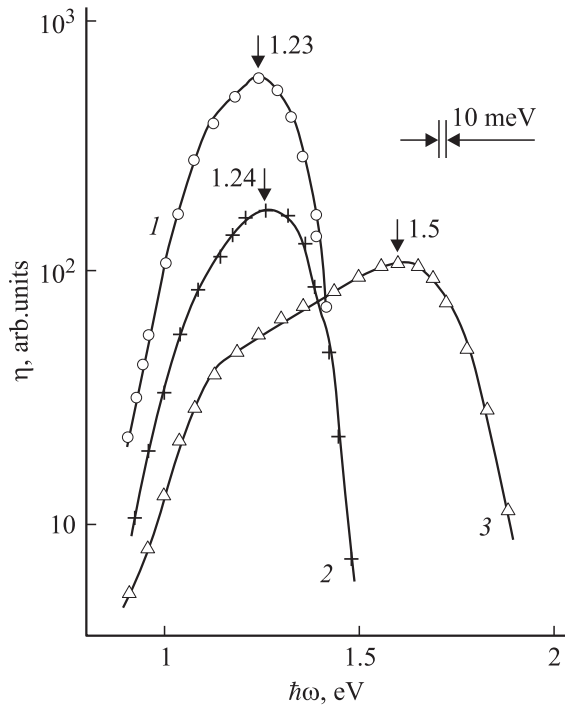
Значения величин остаточного сопротивления  $R_0$  созданных структур приведены в табл. 3, а напряжения отсечки составляют  $U_0 = 0.2-0.4$  В.

При освещении таких структур наблюдается фотовольтаический эффект с положительной полярностью фотонапряжения на барьерном контакте, что согласуется с направлением выпрямления. Максимальные величины вольтовой фоточувствительности для лучших поверхностно-барьерных структур  $S_u^m$  представлены в табл. 3. В полученных барьерах In/A<sup>I</sup>B<sub>n</sub><sup>III</sup>C<sub>m</sub><sup>VI</sup> максимальное фотонапряжение достигается при их освещении со стороны барьерного индиевого контакта.

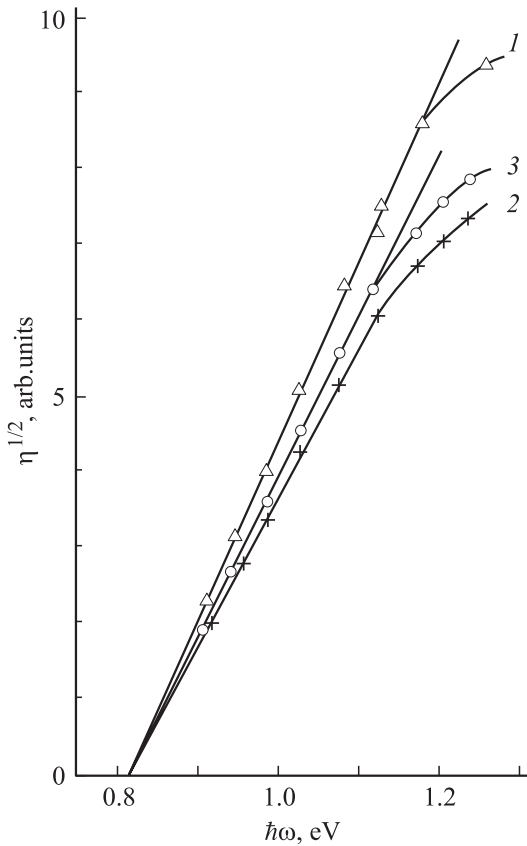
На рис. 1 представлены спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования  $\eta(\hbar\omega)$  для структур In/A<sup>I</sup>B<sub>n</sub><sup>III</sup>C<sub>m</sub><sup>VI</sup> при T = 300 К при освещении их со стороны барьерного контакта. Видно, что спектральные зависимости  $\eta(\hbar\omega)$  в этих структурах имеют вид кривых с максимумом. Быстрый рост фоточувствительности в представленных структурах начинается при энергии фотонов  $\hbar\omega \approx 0.9$  эВ, причем длинноволновый край этих спектров при  $\hbar\omega < 1.1$  эВ (рис. 2) подчиняется закону Фаулера [11], и поэтому его можно связать с фотоэмиссией. Экстраполяция зависимостей  $\eta^{1/2}(\hbar\omega)$  к нулю ( $\eta \approx 0$ ) позволяет определить высоту энергетического барьера ( $\phi_B$ ) в структурах In/A<sup>I</sup>B<sub>n</sub><sup>III</sup>C<sub>m</sub><sup>VI</sup>.

Таблица 3. Фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных структур из соединений I-III<sub>n</sub>-VI<sub>m</sub> при T = 300 К

Соединение	$R_0$ , Ом	$\hbar\omega^m$ , эВ	$\phi$ , эВ	$\delta$ , эВ	$S_u^m$ , В/Вт
In/CuIn <sub>7</sub> S <sub>17</sub>	160	1.23	0.82	0.27	1.0
In/CuIn <sub>11</sub> S <sub>17</sub>	800	1.24	0.82	0.26	0.1
In/AgIn <sub>11</sub> S <sub>17</sub>	75	1.57	0.82	0.60	2



**Рис. 1.** Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования структур  $\text{In}/\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$  (1),  $\text{In}/\text{CuIn}_{11}\text{S}_{17}$  (2) и  $\text{In}/\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$  (3) при 300 К. Освещение структур со стороны барьерного контакта.

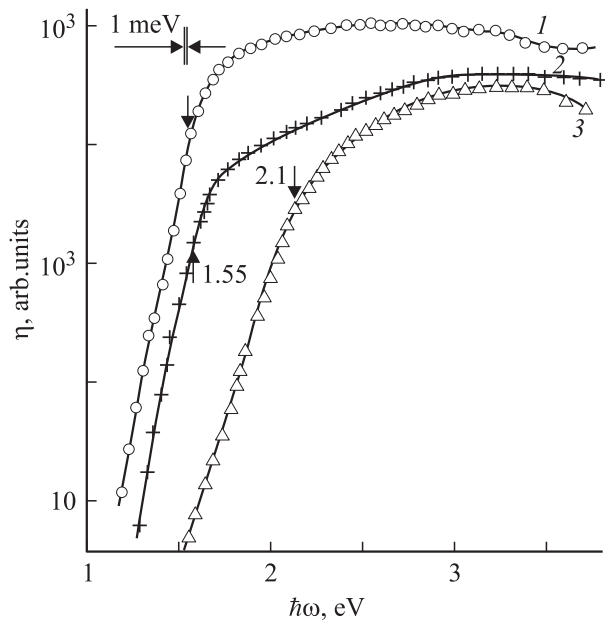


**Рис. 2.** Зависимости  $\eta^{1/2} - \hbar\omega$  для поверхностно-барьерных структур  $\text{In}/\text{Cu}(\text{Ag})\text{In}_n\text{S}_m$  при  $T = 300$  К. Обозначения у кривых соответствуют рис. 1.

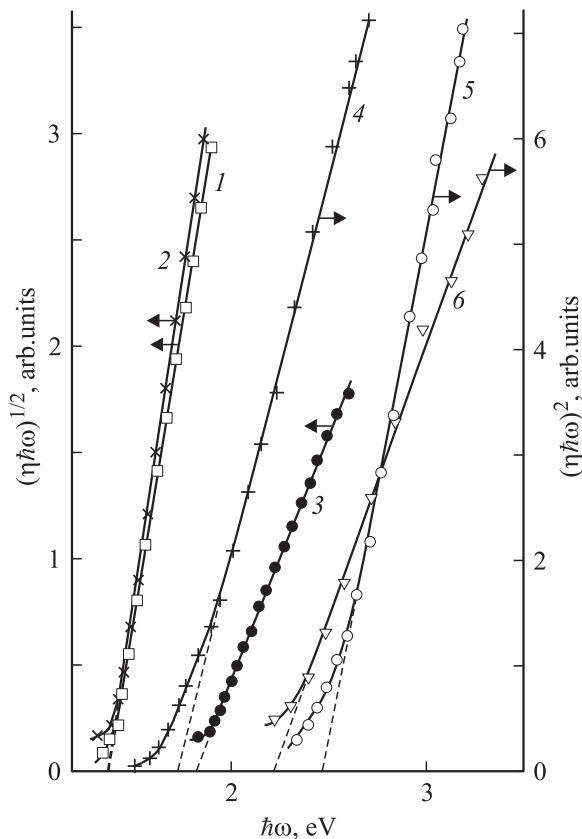
Она оказалась практически независимой от атомного состава использовавшихся при создании поверхностно-барьерных структур полупроводников (табл. 3). Причину установленной особенности еще предстоит выяснить, для чего необходимо будет провести дополнительные исследования.

Следует также отметить и вторую особенность для полученных поверхностно-барьерных структур. Она заключается в наличии достаточно резкого коротковолнового спада fotocувствительности, проявившегося как при освещении структур со стороны барьерного контакта, так и со стороны кристалла. Проведенные измерения показали, что при толщинах пластин кристаллов  $\approx 0.1$  мм энергетическое положение коротковолнового спада  $\eta$  в полученных структурах  $\text{In}/\text{A}^{\text{I}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$  практически не зависит от геометрии освещения. Это обстоятельство позволяет считать, что полученные барьеры не обеспечивают подавления влияния поверхностной рекомбинации фотогенерированных пар, которая, по-видимому, и ответственна за коротковолновый спад  $\eta$  при  $\hbar\omega > \hbar\omega^m$ .

В табл. 3 приведена также полная ширина  $\delta$  спектров  $\eta(\hbar\omega)$  на их полувысоте. Видно, что наиболее широкополосные спектры fotocувствительности характерны для структур  $\text{In}/\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$ . Наряду с твердотельными поверхностно-барьерными структурами на новых полупроводниковых соединениях была изучена также возможность создания фотоэлектрохимических ячеек (ФЭХЯ) [12,13]. В качестве электролита использовалась дистиллированная вода с добавлением  $\text{NaCl}$ , которая приводилась в прямой контакт со скелетной поверхностью кристаллов  $\text{A}^{\text{I}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$ , снабженных омическим контактом. Для изоляции электролита от омического контакта последний покрывался диэлектрическим лаком. В качестве контрэлектрода в ФЭХЯ использовался заостренный платиновый проводник. Измерения fotocувствительности ячеек  $\text{H}_2\text{O}/\text{A}^{\text{I}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$  проводились на модулированном ( $f \approx 20$  Гц) освещении со стороны контрэлектрода неполяризованным излучением [12]. Все полученные ФЭХЯ обнаружили более высокие, чем для твердотельных структур на этих же кристаллах, выпрямление электрического тока ( $K \approx 20$  при  $U \approx 10$  В при  $T = 300$  К) и фотовольтаический эффект. Из сравнения табл. 3 и 4 видно, что максимальная вольтовая fotocувствительность ФЭХЯ оказывается на 3–4 порядка выше, чем в случае поверхностно-барьерных структур  $\text{In}/\text{A}^{\text{I}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$ . При этом следует отметить отсутствие какой-либо деградации фотоэлектрических параметров, созданных ФЭХЯ. На рис. 3 представлены спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования  $\eta(\hbar\omega)$  для фотоэлектрохимических ячеек  $\text{H}_2\text{O}/\text{A}^{\text{I}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$  при освещении их со стороны электролита. Видно, что указанные спектры существенно отличаются от аналогичных спектров для поверхностно-барьерных структур  $\text{In}/\text{A}^{\text{I}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$  (рис. 1). Действительно, на месте коротковолнового спада  $\eta$  в ФЭХЯ  $\text{H}_2\text{O}/\text{A}^{\text{I}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$  возникает практически экспоненциальное возрастание fotocувствительности. Этому возрастанию



**Рис. 3.** Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования ячеек  $\text{H}_2\text{O}/\text{Cu}(\text{Ag})\text{In}_n\text{S}_m$  при 300 К. Освещение со стороны электролита. Вещество фотоэлектрода: 1 —  $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ , 2 —  $\text{CuIn}_{11}\text{S}_{17}$ , 3 —  $\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$ . Для исключения наложения кривые смещены параллельно вдоль оси ординат.



**Рис. 4.** Зависимости  $(\eta \cdot \hbar\omega)^{1/2} - \hbar\omega$  (1–3) и  $(\eta \cdot \hbar\omega)^2 - \hbar\omega$  (4–6) для ячеек  $\text{H}_2\text{O}/\text{Cu}(\text{Ag})\text{In}_n\text{S}_m$  при 300 К. Вещество фотоэлектрода: 1 и 4 —  $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ , 2 и 5 —  $\text{CuIn}_{11}\text{S}_{17}$ , 3 и 6 —  $\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$ .

соответствует крутизна  $S$ , определяемая из соотношения

$$S = \delta(\ln \eta) / \delta(\hbar\omega). \quad (2)$$

Из табл. 4 видно, что крутизна длинноволнового роста в спектрах fotocувствительности оказывается более высокой в случае ФЭХЯ, изготовленных из кристаллов  $\text{CuIn}_n\text{S}_m$ , чем для ячеек, созданных на основе кристаллов соединения  $\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$ . Основываясь на величине крутизны согласно [14], экспоненциальный рост  $\eta$  в случае ячеек из  $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$  и  $\text{CuIn}_{11}\text{S}_{17}$  может свидетельствовать о прямых межзонных переходах, тогда как более низкое значение  $S \approx 12 \text{ эВ}^{-1}$  в ячейках из  $\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$  можно приписать псевдопрямым межзонным переходам, которые известны для ряда полупроводников  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{IV}}\text{C}_2^{\text{V}}$  с решеткой халькопирита [15].

**Таблица 4.** Фотоэлектрические свойства структур  $\text{H}_2\text{O}/\text{I}-\text{III}_n-\text{VI}_m$  и энергии межзонных переходов для соединений  $\text{I}-\text{III}_n-\text{VI}_m$  при  $T = 300 \text{ К}$

Структуры	$\hbar\omega$ , эВ	$\delta$ , эВ	$S_u$ , эВ	$S_u^m$ , В/Вт	$E_g^{\text{in}}$ , эВ	$E_g^{\text{dir}}$ , эВ
$\text{H}_2\text{O}/\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$	2.4–2.8	$\sim 1.8$	21	8000	1.36	1.74
$\text{H}_2\text{O}/\text{CuIn}_{11}\text{S}_{17}$	2.8–3.6	$> 1.1$	19	5000	1.37	2.23
$\text{H}_2\text{O}/\text{AgIn}_{11}\text{S}_{17}$	3.0–3.4	$\sim 1.2$	12	1900	1.83	2.48

Основным отличием спектров fotocувствительности, впервые полученных на кристаллах  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$  ФЭХЯ, по отношению к рассмотренным для поверхностно-барьерных твердотельных структур следует считать отсутствие выраженного коротковолнового спада  $\eta$ . В табл. 4 указан спектральный диапазон максимальной fotocувствительности полученных ФЭХЯ. Значение  $\delta$  для ячеек  $\text{H}_2\text{O}/\text{A}^{\text{IV}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$ , оцененное из спектров  $\eta(\hbar\omega)$ , оказывается намного выше, чем для поверхностно-барьерных структур. Последнее наряду с высокими значениями  $S_u^m$ , дает основание считать, что эффективность разделения и собирания фотогенерированных пар в барьерах полупроводник/электролит оказывается намного выше, чем для твердотельных структур  $\text{In}/\text{A}^{\text{IV}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$ .

На рис. 4 представлены спектральные зависимости  $\eta(\hbar\omega)$  для ФЭХЯ  $\text{H}_2\text{O}/\text{A}^{\text{IV}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$ , построенные в координатах  $(\eta \cdot \hbar\omega)^{1/2} - \hbar\omega$  и  $(\eta \cdot \hbar\omega)^2 - \hbar\omega$ . Предполагая, что эти зависимости определяются в основном процессами межзонного поглощения, на основании существующей теории [16] можно оценить характер межзонных переходов и ширину запрещенной зоны исследованных соединений. Из рис. 4 видно, что длинноволновый рост fotocувствительности ФЭХЯ (кривые 1–3) спрямляется в координатах  $(\eta \cdot \hbar\omega)^{1/2} - \hbar\omega$ . Это позволяет предположить, что длинноволновый край  $\eta(\hbar\omega)$  определяется непрямыми межзонными переходами в кристаллах  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}_n^{\text{III}}\text{C}_m^{\text{VI}}$  и из экстраполяции  $(\eta \cdot \hbar\omega)^{1/2} \rightarrow 0$  можно оценить ширину запрещенной зоны для непрямых оптических переходов ( $E_g^{\text{in}}$ ). Результаты этой оценки даны в табл. 4. Следует отметить, что энергетическое

положение коротковолнового спада в спектрах  $\eta(\hbar\omega)$  поверхностно-барьерных структур удовлетворительно согласуется с  $E_g^{\text{in}}$  для соответствующих соединений (табл. 4). Поэтому коротковолновый спад  $\eta(\hbar\omega)$  можно связать с ростом оптического поглощения падающего излучения в результате наступления не прямых межзонных переходов в соединениях  $A^I B_n^{\text{III}} C_m^{\text{VI}}$ .

Из рис. 4 также видно, что коротковолновая часть спектров фоточувствительности ФЭХЯ уже подчиняется квадратичному закону  $(\eta \cdot \hbar\omega)^2 - \hbar\omega$ . Поэтому есть основания связывать эту особенность с наступлением прямых межзонных переходов и из экстраполяции  $(\eta \cdot \hbar\omega)^2 \rightarrow 0$  можно оценить энергию прямых межзонных переходов ( $E_g^{\text{dir}}$ ) для указанных соединений. Результаты этой оценки приведены в табл. 4.

#### 4. Заключение

На кристаллах тройных соединений  $A^I B_n^{\text{III}} C_m^{\text{VI}}$  впервые установлена возможность получения фоточувствительных барьеров Шоттки и фотоэлектрохимических ячеек. Исследованы фотоэлектрические свойства указанных структур, сделан вывод о характере межзонных переходов в электронном спектре этих материалов и оценена их ширина запрещенной зоны. Показано, что новые фоточувствительные структуры могут найти применение в качестве селективных и широкополосных фотодетекторов естественного излучения.

Работа поддержана грантами ОФН РАН „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах“ и INTAS 01-283.

#### Список литературы

- [1] И.В. Боднар, Т.Л. Кушнер, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, М.В. Якушев. ЖПС, **69**, 519 (2002).
- [2] C. Rincon, S.M. Wasim, G. Marin, R. Marques. *Abstracts 13<sup>th</sup> ICTMC* (Paris, 2002) p. 83.
- [3] S.M. Wasim, G. Marin, C. Rincon, R. Marques, C. Torres, A. Rincon. *Abstracts 13<sup>th</sup> ICTMC* (Paris, 2002) p. 205.
- [4] N.M. Gasanly, A. Serpengurel, A. Audinly, O. Gurli, I. Vilmax. *J. Appl. Phys.*, **85**, 3198 (1999).
- [5] S.B. Tsang, S.H. Wei, A. Zunger, H. Katayama-Yochida. *Phys. Rev. B*, **57**, 9642 (1998).
- [6] J.L. Shay, J.H. Wernick. *Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties and Applications* (N.Y., Pergamon Press, 1975).
- [7] *Copper Indium Diselenide for Photovoltaic Applications*, ed. by T.J. Coutts, L.L. Kazmerskii, S. Wagner (Amsterdam, Elsevier, 1986).
- [8] Н.Н. Ищенко, Л.Г. Старобинец, Л.И. Ганаго. Изв. АН БССР. Сер. хим. наук, № 5, 132 (1977).
- [9] Л.Г. Старобинец, Н.Н. Ищенко, Л.И. Ганаго. Изв. АН БССР. Сер. хим. наук, № 1, 111 (1988).
- [10] П.П. Киш, С.Т. Орловский. ЖАХ, **17**, 1057 (1962).
- [11] Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. *Полупроводниковая оптоэлектроника* (М., Мир, 1963).

- [12] Ю.Я. Гуревич, Ю.В. Плесков. *Фотоэлектрохимия полупроводников* (М., Наука, 1976).
- [13] Ю.В. Рудь, М. Таиров. ФТП, **21**, 615 (1987).
- [14] A. Shileika. *Surf. Sci.*, **37**, 730 (1973).
- [15] В.Д. Прочухан, Ю.В. Рудь. ФТП, **12**, 209 (1978).
- [16] Ж. Панков. *Оптические процессы в полупроводниках* (М., Мир, 1973).

Редактор Л.В. Беляков

#### The Structures based on the $\text{Cu}(\text{Ag})\text{In}_n\text{S}_m$ semiconductor compounds

I.V. Bodnar, V.A. Polubok, V.Yu. Rud<sup>\*</sup>, Yu.V. Rud<sup>++</sup>, M.S. Serginov<sup>+</sup>

Belarusian State University  
of informatics and radioelectronics,  
220072 Minsk, Belarus

\* St. Petersburg State Polytechnic University,  
195251 St. Petersburg, Russia

+ Ioffe Physicotechnical Institute  
of Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia