

Спектральная чувствительность гетероструктур

 $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ © В.Н. Комащенко[¶], К.В. Колежук, Н.В. Ярошенко, Г.И. Шереметова, Ю.Н. Бобренко

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

(Получена 21 июня 2005 г. Принята к печати 15 июля 2005 г.)

Экспериментально исследована фоточувствительность многослойных гетероструктур типа $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}/n\text{-A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ за краем фундаментального поглощения широкозонной составляющей и предложена простая модель для ее объяснения. Установлено, что эффективным методом снижения чувствительности структур за пределами ультрафиолетового диапазона является уменьшение вероятности доминирующих туннельных процессов путем увеличения толщины широкозонного слоя, приводящего к образованию блокирующего барьера для фотогенерированных неосновных носителей. Показана перспективность гетероструктур $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}$ для создания эффективных „солнечно-слепых“ сенсоров ультрафиолетового излучения.

PACS: 73.50.Pz, 73.40.Lq

Потребности медицины, биологии, военной техники в „солнечно-слепых“ фотоприемниках связаны с необходимостью регистрации слабых сигналов на фоне мощного видимого и инфракрасного излучения Солнца [1]. Поэтому важным требованием к таким приборам является уменьшение чувствительности за пределами ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра. Ранее [2] сообщалось о создании на основе гетероструктур (ГС) $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}/n\text{-A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ сенсоров излучения со спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн $\lambda \approx 200\text{--}400$ нм. Однако отношение монохроматической токовой чувствительности в максимуме (S_{max}) к ее величине при $\lambda > 400$ нм у этих сенсоров не превышало 2 порядков. В настоящей работе исследуется природа фоточувствительности ГС в длинноволновой области с целью ее минимизации.

1. Образцы для исследований представляли собой „простые“ и многослойные ГС, соответственно $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdS}$, $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdSe}$ и $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdS}$, $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}$. Относительно низкоомные (с концентрацией носителей $n \sim 10^{15}\text{--}10^{16}$ см⁻³), текстурированные, со столбчатой структурой полукристаллические слои CdS и CdSe толщиной $d \approx 2\text{--}5$ мкм осаждались методом горячих стенок (hot wall technique [3], в русскоязычной литературе — метод квазизамкнутого объема [4]) на металлизированные ситалловые пластины. Как в случае „простых“, так и в случае многослойных структур в качестве барьерообразующей компоненты, прозрачного окна и верхнего токосъемного электрода использовалась тонкая (толщиной ~ 30 нм) пленка дигенита ($\text{Cu}_{1.8}\text{S}$) — вырожденного сульфида меди — p -типа проводимости (концентрация дырок $p \sim 10^{21}$ см⁻³). Пропускание $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ составляло $\sim 90\%$ при $\lambda = 400\text{--}800$ нм и $\sim 50\%$ при $\lambda = 200$ нм. Полученные описанным методом квазимонокристаллические пленки халькогенидов кадмия служили ориенти-

рующей подложкой при эпитаксиальном выращивании ZnS — широкозонной составляющей многослойных ГС. Несоответствие постоянных кристаллических решеток контактирующих материалов уменьшалось путем выращивания промежуточных согласующих прослоек нанометровых толщин ($d < 50$ нм). Толщина высокоомной пленки ZnS (d_{ZnS}) состава, близкого к стехиометрическому, была сопоставимой с эффективной длиной собственного поглощения.

Исследования структурных и морфологических характеристик с использованием методов атомно-силовой микроскопии, рентгенофазового, рентгенофлуоресцентного анализа и оже-спектроскопии показали, что полученные многослойные ГС достаточно совершенны. Гетерограница между фотоактивным слоем (ZnS) и ориентирующей подложкой содержит узкий переходный слой переменного химического состава, характеризуется высокой степенью когерентности и имеет низкую концентрацию дефектов несоответствия [5].

2. Спектральные характеристики образцов разных типов представлены на рис. 1, *a, b*. Как видно, фоточувствительность структур обусловлена в основном генерацией носителей в $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. В длинноволновой области, за краем фундаментального поглощения $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$, фоточувствительность S обязана вкладу неосновных носителей, генерированных в тонкой пленке $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}$ (участки I). Ее величина на 2 порядка меньше S_{max} . Это связано с тем, что в изготовленных структурах $p\text{-}n$ -гетеропереход резко асимметричен, и область пространственного заряда (ОПЗ) локализована в $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. Кроме того, поглощение излучения в сульфиде меди незначительно.

На рис. 2 приведены низкоэнергетические отрезки спектральных зависимостей простых структур (рис. 1, *a, b*, кривые I, участки I), построенные в координатах $S^{2/3} \propto hv$, спрямляющих спектр в случае запрещенных прямых переходов [6]. Видно, что экспериментальные точки удовлетворительно ложатся на прямые линии, экстраполяция которых к значению $S = 0$ дает отсечку

[¶] E-mail: komas@isp.kiev.ua

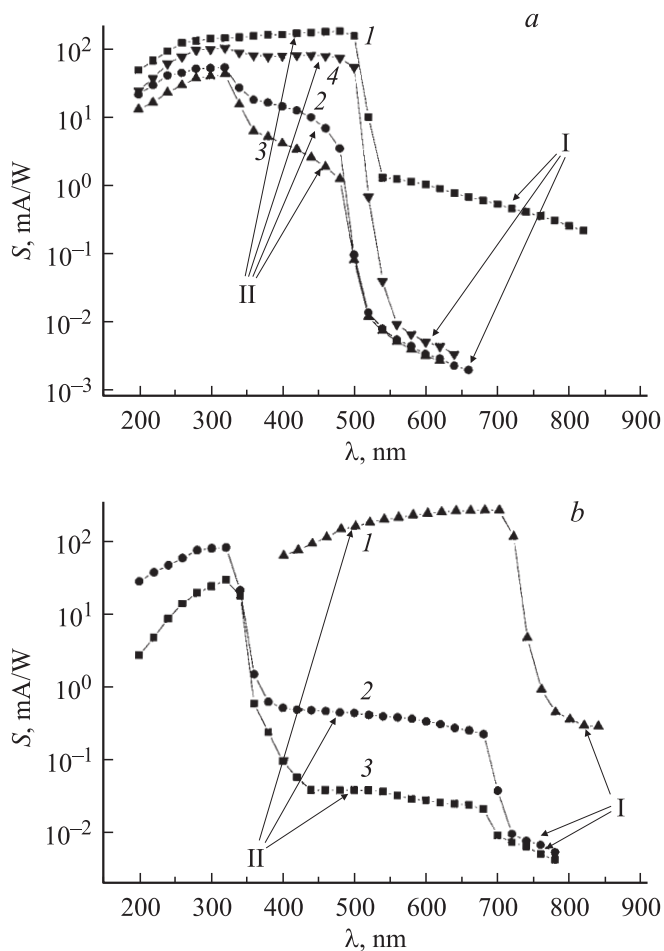


Рис. 1. Спектральные характеристики гетероструктур разных типов. *a*: 1 — $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdS}$; 2 — $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdS}$, $d_{\text{ZnS}} \approx 500$ нм; 3 — $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdS}$, $d_{\text{ZnS}} \approx 1.5$ мкм; 4 — $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdS}$, $d_{\text{ZnS}} < 50$ нм. *b*: 1 — $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdSe}$; 2 — $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}$, $d_{\text{ZnS}} \approx 500$ нм; 3 — $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnSe}/n\text{-CdSe}$, $d_{\text{ZnS}} \approx 1.5$ мкм. I — фоточувствительность, обусловленная поглощением излучения в $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$; II — фоточувствительность, обусловленная поглощением излучения в CdS (*a*) или в CdSe (*b*).

на шкале энергий фотонов $h\nu \approx 1.2$ эВ. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что длинноволновая фоточувствительность структур $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdS}(\text{Se})$ обусловлена вкладом электронов, генерированных излучением в $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}$, ширина запрещенной зоны которого для запрещенных прямых переходов близка к ~ 1.2 эВ.

Из рис. 1, *a*, *b* следует, что и для многослойных ГС низкоэнергетическая длинноволновая чувствительность (кривые 2, 3, 4, участки I) также связана с сульфидом меди, но ее величина примерно на 2 порядка меньше, чем в случае простых структур. Кроме того, обращает на себя внимание и малый вклад узкозонной составляющей $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ — CdS и CdSe — в фоточувствительность таких ГС (рис. 1, *a*, *b*, кривые 2, участки II). Вообще говоря, в рассматриваемой ситуации, когда освещение производится со стороны широкозонного ZnS и его толщина

меньше протяженности ОПЗ, должен наблюдаться эффект „широкозонного окна“. Однако в соответствующих спектральных диапазонах монохроматическая токовая чувствительность структуры $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdS}$ составляет лишь $\sim 20\%$ от S_{max} . Для гетероструктуры $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}$ она и того меньше — около 1% от S_{max} .

3. Отмеченные особенности спектральных характеристик можно объяснить с помощью простой модели. Рассмотрим энергетические зонные диаграммы исследованных структур (рис. 3). Диаграммы построены в приближении Андерсона [7]. Согласно литературным данным значения энергий электронного сродства для CdS, CdSe и ZnS приняты равными $\chi = 4.5$, 4.6 и 3.9 эВ соответственно. Величины контактной разности потенциалов U_{d1} и U_{d2} определены экспериментально. Принципиальные различия диаграмм простых структур (рис. 3, *a*, *b*) и многослойных (рис. 3, *c*, *d*) таковы: разный тип барьера Δ_c в зоне проводимости на границе раздела $\text{Cu}_{1.8}\text{S}/\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ и наличие в многослойных ГС дополнительного потенциального барьера Δ_v в валентной зоне на границе ZnS/CdS(CdSe).

Вклад сульфида меди в фототок как простых, так и многослойных структур (рис. 1, *a*, *b*, участки I) определяется характером барьера Δ_c . Так, в случае простых структур электроны, генерированные в $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$, беспрепятственно разделяются электростатическим полем ОПЗ. Во втором случае они должны туннелировать сквозь дополнительный барьер Δ_c (путь 1 на рис. 3, *c*, *d*) либо преодолеть его, обладая достаточной энергией (горячие электроны, путь 2 на рис. 3, *c*, *d*). Неизменность характера спектральных зависимостей участков I в достаточно широком энергетическом интервале (см. рис. 2) свидетельствует о преобладании туннельного механизма.

Существенное различие в величинах фоточувствительности многослойных ГС в спектральной области,

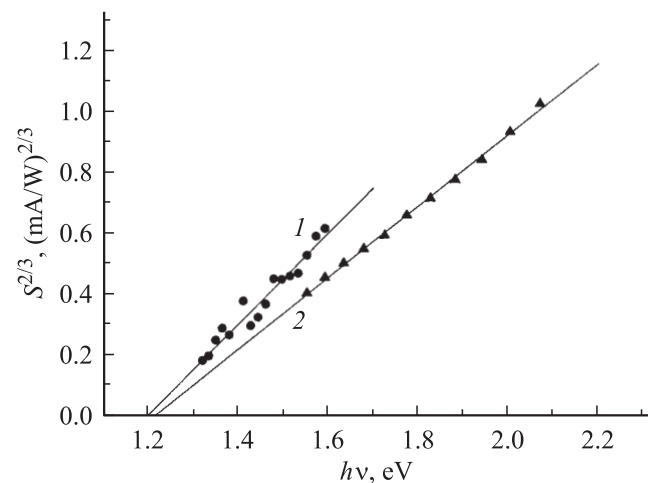


Рис. 2. Низкоэнергетические участки спектральных характеристик структур (300 К): 1 — $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdSe}$; 2 — $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdS}$.

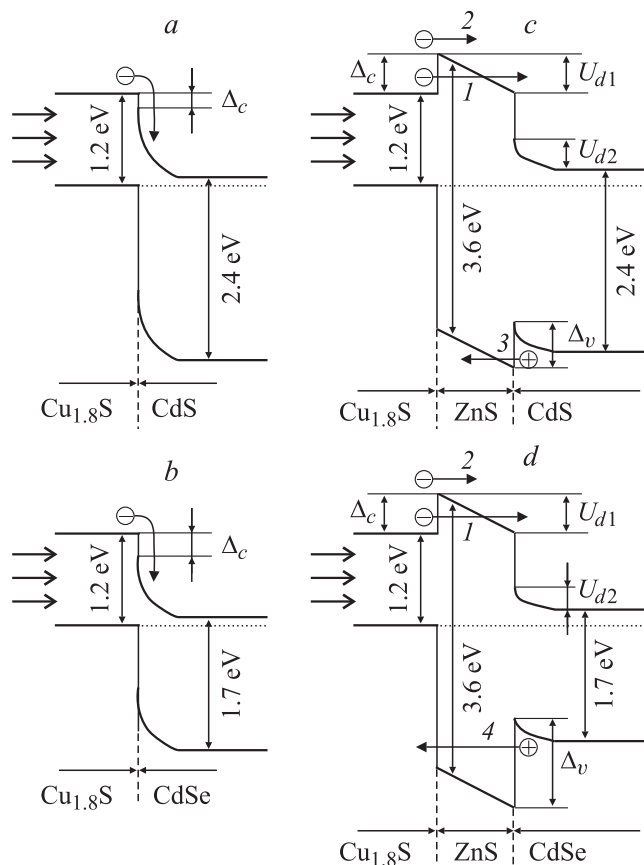


Рис. 3. Энергетические зонные диаграммы гетероструктур. *a:* $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdS}$, $\Delta_c \approx 0.15$ эВ; *b:* $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdSe}$, $\Delta_c \approx 0.25$ эВ; *c:* $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdS}$, $\Delta_c \approx 0.45$ эВ, $\Delta_v \approx 0.4$ эВ, $U_{d1} \approx 0.5$ В, $U_{d2} \approx 0.4$ В; *d:* $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}$, $\Delta_c \approx 0.45$ эВ, $\Delta_v \approx 1.2$ эВ, $U_{d1} \approx 0.5$ эВ, $U_{d2} \approx 0.3$ В.

соответствующей собственному поглощению CdS и CdSe (рис. 1, *a, b*, кривые 2, участки II), связано со следующим. Барьер Δ_v препятствует эффективному собиранию носителей заряда, фотогенерированных в узкозонном полупроводнике (рис. 3, *c, d*). В структуре $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdS}$ туннельный путь дырок, рожденных в сульфиде кадмия, проходит вблизи вершины треугольного барьера Δ_v , преодолев который они попадают в валентную зону ZnS, а далее в валентную зону $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ (рис. 3, *c*, путь 3). В ГС $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}$ такой переход невозможен. Неосновные носители могут попасть в валентную зону сульфида меди, только протуннелировав сквозь всю толщину сульфида цинка (рис. 3, *d*, путь 4). Вероятность последнего процесса гораздо меньше, что и находит свое отражение в величинах фотоотклика участков II двух типов структур (рис. 1, *a, b*, кривые 2, участки II). Справедливость предложенной модели, объясняющей природу фоточувствительности за краем фундаментального поглощения широкозонной составляющей, подтверждается и для гетероструктур $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdS}/n\text{-CdSe}$, $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdS}/$

$n\text{-CdTe}$, $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnSe}/n\text{-CdSe}$, в которых также отсутствует эффект широкозонного окна [8].

4. Чувствительность многослойных ГС в области собственного поглощения узкозонной компоненты $A^{II}B^{VI}$ (рис. 1, *a, b*, кривые 2, участки II) обусловлена туннелированием фотогенерированных дырок. Поэтому эффективным способом ее снижения должно быть уширение слоя ZnS, приводящего к образованию блокирующего барьера. Действительно, для структуры $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}$, в которой толщина слоя ZnS была увеличена до $d_{\text{ZnS}} \approx 1.5$ мкм, величина фотоответа в спектральном диапазоне, соответствующем участку II (рис. 1, *b*, кривая 3), уменьшилась более чем на порядок (ср. с кривой 2). Напротив, как и следовало ожидать, при тех же условиях ($d_{\text{ZnS}} \approx 1.5$ мкм) изменение фотоотклика II участка структуры $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdS}$ не столь радикально (рис. 1, *a*, кривая 3). Отметим важность факта сохранения достаточно высокой фоточувствительности в коротковолновой области спектра многослойных ГС, которые выращены на узкозонной подложке CdSe. Сказанное свидетельствует о перспективности ГС $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}$ для создания эффективных „солнечно-слепых“ УФ сенсоров. Заметим также, что введение в структуру поверхностно-барьерных фотопреобразователей типа $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdSe}$, $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-CdS}$ пленки ZnS нанометровой толщины ($d_{\text{ZnS}} < 50$ нм) позволяет снизить примерно на 2 порядка величины их фоточувствительность в длинноволновой области спектра, при этом коротковолновая чувствительность сохраняется практически неизменной (см. рис. 1, *a*, кривая 4).

Таким образом, в настоящей работе исследована природа фоточувствительности многослойных ГС типа $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-A}^{II}B^{VI}$ при энергиях меньше энергии края фундаментального поглощения сульфида цинка и установлена доминирующая роль туннельных процессов. Оказалось, что эффективным методом снижения чувствительности гетероструктур $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}$ за пределами ультрафиолетового диапазона является увеличение толщины широкозонного слоя. Показана перспективность таких ГС для создания эффективных „солнечно-слепых“ УФ сенсоров.

Список литературы

- [1] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. ФТП. **37**, 1025 (2003).
- [2] В.Н. Комащенко, К.В. Колежук, Е.Ф. Венгер, Г.И. Шереметова, О.А. Мишук, А.В. Комащенко. Письма ЖТФ, **28** (19), 32 (2002).
- [3] A. Lopez-Otero. Thin Sol. Films, **49** (1), 3 (1978).
- [4] И.П. Калинин, В.Б. Алесковский, А.В. Симашкевич. *Эпитаксиальные пленки соединений $A^{II}B^{VI}$* (Л., Изд-во ЛГУ, 1978) гл. 2, с. 41.
- [5] Г.И. Шереметова, О.С. Литвин, К.В. Колежук, В.Н. Комащенко, А.А. Корчевой, П.М. Литвин. В сб.: *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника* (Киев, Наук. думка, 2003) вып. 38, с. 159.

- [6] Ж. Панков. *Оптические процессы в полупроводниках* (М., Мир, 1973) гл. 3, § 1, с. 46. [Пер. с англ.: J.I. Pankove. *Optical processes in semiconductors* (Prentice-Hall, Inc. Englewood, N. J., 1971)].
- [7] R.L. Anderson. *Sol. St. Electron.*, **5** (9–10), 341 (1962).
- [8] Е.Ф. Венгер, К.В. Колежук, В.Н. Комащенко, А.В. Комащенко, О.А. Мишук, Г.И. Шереметова. *Доповіді Національної академії наук України*, № 2, 82 (2002). [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, № 2 (2002)].

Редактор Л.В. Шаронова

Spectral sensitivity of $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ heterostructures

V.N. Komashchenko, K.V. Kolezhuk, N.V. Yaroshenko,
G.I. Sheremetova, Yu.N. Bobrenko

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

Abstract We have studied experimentally the nature of photosensitivity of multilayer heterostructures of $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}/n\text{-A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ -type beyond the fundamental absorption edge of the wide-bandgap component, and advance a simple model for its explanation. It is found that an efficient method for decrease of structure sensitivity beyond UV range is a reduction of probability of the predominant tunneling processes by increasing thickness of the wide-bandgap layer that forms a blocking barrier for optically generated minority charge carriers. The $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-CdSe}$ heterostructures are shown to be promising for development of efficient „solar-blind“ UV sensors.