

Создание и фоточувствительность гетеропереходов на кристаллах CuIn_3Se_5

© И.В. Боднар^{*}, С.Е. Никитин, Г.А. Ильчук, В.Ю. Рудь⁺, Ю.В. Рудь[¶], М.В. Якушев[°]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

^{*} Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220030 Минск, Белоруссия

⁺ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

[°] Университет Стратклайда,
G40NG Глазго, Великобритания

(Получена 22 декабря 2003 г. Принята к печати 25 декабря 2003 г.)

Гетеропереходы на кристаллах $p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ изготовлены методами магнетронного распыления мишени $n\text{-ZnO:Al}$ и посадки естественно-сколотых тонких пластин $n\text{-GaSe}$ на полированную поверхность пластин $p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$. Обсуждаются вольт-амперные характеристики и механизмы прохождения тока в исследуемых диодах. Обнаружен и обсуждается фотовольтаический эффект в созданных структурах. Показано, что полученные фоточувствительные гетеропереходы являются перспективными для создания селективных фотоанализаторов линейно поляризованного излучения.

Полупроводники I–III–VI₂ и их твердые растворы широко исследуются на предмет создания высокоэффективных радиационно стойких солнечных элементов в тонкопленочном исполнении [1–3]. Эффективность фотопреобразования в гетеропереходе $\text{ZnO/CdS/CuInGaSe}_2$ в настоящее время доведена до 19%, что считается рекордным для тонкопленочных фотопреобразователей [2]. Оптимизация свойств тонких пленок Cu–III–VI₂ традиционно обеспечивается использованием твердых растворов, например, $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$, S_{2-2y} . Изучение фазового взаимодействия в системах I–III–VI вскрыло новую возможность в управлении фундаментальными свойствами таких полупроводников. В частности, было открыто множество позиционно упорядоченных фаз I–III_{*n*+2}–VI_{*2n*+3}, где $n = 1, 2, 3, \dots$, которые образуются на квазибинарных разрезах $\text{I}_2\text{VI–III}_2\text{VI}_3$ и позволяют дискретно изменять фундаментальные свойства веществ в пределах областей их стабильности [6–9]. Это обстоятельство выдвигает задачу выявления взаимосвязей физических свойств новых фаз с их атомным составом. С другой стороны, появляются новые основания ожидать, что в разнообразных технологических процессах выращивания тройных соединений типа I–III–VI₂ воспроизводятся условия для возникновения в материнской фазе преципитатов типа I–III_{*n*+2}–VI_{*2n*+3}. Поэтому исследования таких фаз в виде объемных гомогенных кристаллов имеют принципиальное значение для определения того, что дают изменение состава и появление пространственно ограниченных преципитатов различного атомного состава и масштабов. Данная работа принадлежит этому перспективному направлению и посвящена изучению фоточувствительности первых гетеропереходных структур на основе объемных кристаллов CuIn_3Se_5 .

1. Кристаллы CuIn_3Se_5 для создания гетеропереходов выращивались методом направленной кристаллизации

(метод Бриджмена) в вертикальной однозонной печи. Исходными веществами служили медь, индий и селен чистотой 99.9999%. Взятые в стехиометрическом соотношении элементы массой 25 г загрузились в двойные кварцевые ампулы с оттянутым в виде конуса дном. После загрузки ампулы вакуумировались, запаивались и помещались в печь, в которой проводился процесс выращивания. Температура в печи повышалась со скоростью ~ 50 К/ч до 1260–1270 К. Ампулы выдерживались при температуре ~ 1270 К в течение 2 ч с вибрационным перемешиванием расплава. После отключения вибрации проводилась направленная кристаллизация расплава. Для гомогенизации полученных слитков проводился отжиг в вакууме при ~ 1070 К в течение 150 ч. Выращенные кристаллы имели диаметр 12 и длину 40 мм.

Состав кристаллов определялся с помощью микрозондового рентгеноспектрального анализа на установке Cameca-SX100. Содержание элементов в выращенных кристаллах (Cu:In:Se = 11.4:32.9:55.7) удовлетворительно согласуется с заданным составом в исходной шихте (Cu:In:Se = 11.18:33.31:55.51 ат%).

Структура и параметры элементарной ячейки кристаллов определялись с помощью рентгеновского анализа. Дифрактограммы, снятые с разных частей слитка, соответствовали структуре дефектного халькопирита. Параметры элементарной ячейки, рассчитанные методом наименьших квадратов по линиям, для которых $2\theta > 60^\circ$, равны $a = 5.766 \pm 0.001 \text{ \AA}$ и $c = 11.499 \pm 0.005 \text{ \AA}$, что согласуется с данными [9]. Разрешение высокоугловых линий на дифрактограммах свидетельствует о гомогенности выращенных кристаллов.

Для создания фоточувствительных структур слитки разрезались на пластины толщиной 0.2–0.3 мм, которые механически шлифовались и полировались, а затем подвергались обработке в полирующем травителе. По знаку термоэдс кристаллы CuIn_3Se_5 имели p -тип проводимости.

[¶] E-mail: rudvas@spbstu.ru

2. Как показали проведенные физико-технологические исследования, фоточувствительные гетеропереходы получают осаждением тонких пленок $\text{ZnO}:\text{Al}$ ($d \approx 1 \text{ мкм}$) на полированную поверхность пластин CuIn_3Se_5 . Пленки $\text{ZnO}:\text{Al}$ получены магнетронным распылением в аргоновой среде прессованной мишени ZnO с добавкой чистого алюминия с концентрацией $\sim 2.5 \text{ ат\%}$. Давление аргона в процессе нанесения пленок поддерживалось на уровне $\sim 0.5 \text{ Па}$ при температуре подложки $40\text{--}50^\circ\text{C}$. Пленки $\text{ZnO}:\text{Al}$

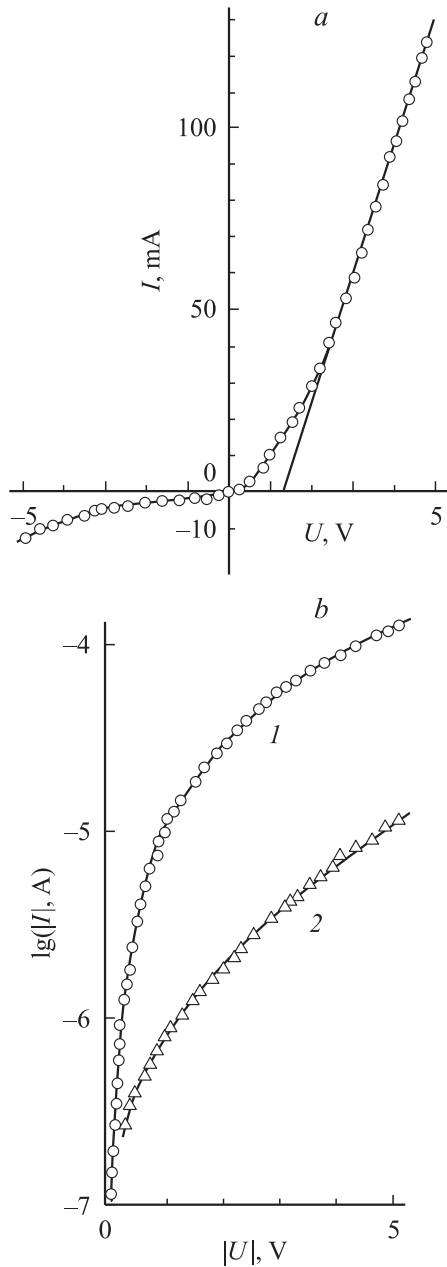


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика гетероперехода $n\text{-ZnO}:\text{Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ в координатах $I-U$ (a) и $\lg I-U$ (b), 2 — прямая ветвь, 3 — обратная при $T = 300 \text{ K}$, образец 2-1. Пропускное направление отвечает положительной полярности внешнего смещения на подложке CuIn_3Se_5 .

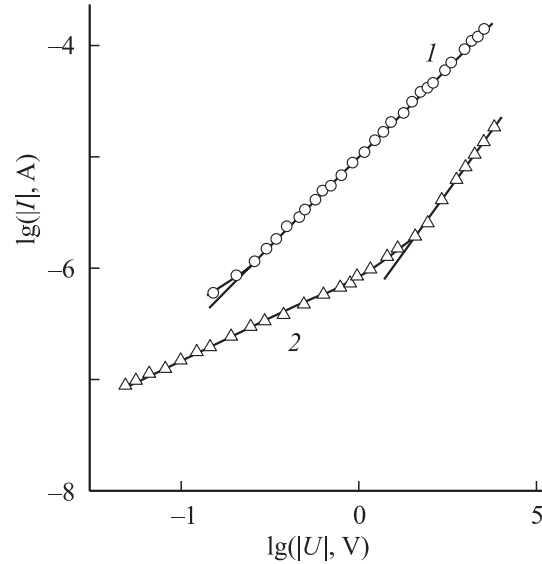


Рис. 2. Прямая (1) и обратная (2) ветви ВАХ гетероперехода $n\text{-ZnO}:\text{Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ в двойном логарифмическом масштабе при $T = 300 \text{ K}$, образец 2-1.

имели концентрацию электронов $\sim 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при холловской подвижности $\sim 5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 300 \text{ K}$ и обладали достаточно хорошей адгезией в отношении поверхности подложек.

Измерения стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) позволили установить, что новые гетеропереходы $n\text{-ZnO}:\text{Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ обладают ярко выраженными диодными характеристиками. На рис. 1, a приведена ВАХ одной из таких структур при $T = 300 \text{ K}$. Оказалось, что пропускное направление во всех созданных гетеропереходах всегда реализуется при отрицательной полярности внешнего смещения на пленке $\text{ZnO}:\text{Al}$, что согласуется с приближенной зонной моделью исследуемого гетероконтакта. Коэффициенты выпрямления в лучших структурах при $|U| = 1\text{--}3 \text{ В}$ достигали значений $K = 15\text{--}20$ (рис. 1, b, кривые 1 и 2). Можно предположить, что полученные значения K ограничены недостаточным совершенством гетеропереходов.

В области прямых смещений $U < 0.35 \text{ В}$ (рис. 1, b, кривая 1) ток возрастает по экспоненциальному закону

$$I = I_s \exp\left(\frac{eU}{\beta kT}\right), \quad (1)$$

где ток насыщения I_s для созданных гетеропереходов находится в пределах $3 \cdot 10^{-7}\text{--}7 \cdot 10^{-8} \text{ А}$, а диодный показатель $\beta = 3\text{--}4$ при $T = 300 \text{ K}$. Это может служить основанием для предположения в пользу туннельно-рекомбинационного механизма токопереноса.

Для напряжений смещения $0.3 < U < 5 \text{ В}$ четко проявляется степенная зависимость прямого тока $I \propto U^m$ (рис. 2, кривая 1). Показатель степени m обычно лежит в диапазоне $1.6\text{--}2.1$ для различных структур и диапазонов напряжения смещения, что может свидетельствовать

о конкуренции вклада токов, ограниченных пространственным зарядом в режиме насыщения скорости [10,11]

$$I = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0v_sA}{L^2} U, \quad (2)$$

и в режиме подвижности (безловушечный квадратичный закон) [12,10]

$$I = \frac{8\varepsilon\varepsilon_0\mu_pA}{L^3} U^2, \quad (3)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость CuIn_3Se_5 , ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, v_s — скорость насыщения, μ_p — подвижность дырок, A — площадь гетерограницы, L — толщина подложки CuIn_3Se_5 .

Прямая ветвь ВАХ гетеропереходов $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ в области $U > 3$ В (рис. 1, а, кривая 1) подчиняется линейному закону

$$U = U_0 + IR_0, \quad (4)$$

где напряжения остечки $U_0 \approx 1.3$ В, а R_0 — сопротивление базы гетероперехода, значение которого для созданных структур заполняет довольно широкий диапазон $2.5 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^7$ Ом при 300 К, что обусловлено изменениями в условиях кристаллизации CuIn_3Se_5 .

Обратные токи гетеропереходов $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$, как следует из рис. 2 (кривая 2), также подчиняются степенному закону $I \propto U^m$ во всем диапазоне реализованных напряжений смещения. В области обратных смещений $|U| < 1$ В наблюдается близкая к степенной зависимость $I \propto U^{0.74}$, что позволяет связать прохождение тока либо с туннельным механизмом, либо с ограничением пространственным зарядом в режиме насыщения скорости и соотношением (2). С дальнейшим ростом обратного смещения в диапазоне $1 < |U| < 10$ В происходит возрастание показателя степени до $m \approx 2$, который уже отвечает соотношению (3), в связи с чем наблюдаемую квадратичную зависимость можно приписать присутствию токов, ограниченных пространственным зарядом в режиме подвижности [10,11].

При освещении гетеропереходов $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ четко проявляется фотовольтаический эффект. Фоточувствительность гетеропереходов была максимальной при освещении со стороны пленок ZnO:Al . Напряжение холостого хода при освещении неполяризованным излучением лампы накаливания мощностью $P \approx 10$ мВт/см² в лучших структурах достигало $U_{oc} \approx 0.45$ В, а ток короткого замыкания $I_{sc} \approx 50$ мкА при $T = 300$ К. Знаки фотонапряжения и фототока короткого замыкания не зависели от энергии фотонов и места попадания светового зонда на поверхность гетеропереходов и соответствовали направлению выпрямления. Это в свою очередь позволяет связать фоточувствительность с единственной активной областью, создаваемой гетероконтактом кристалла CuIn_3Se_5 с пленкой $n\text{-ZnO}$. В лучших гетеропереходах $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ максимальная вольтовая фоточувствительность достигает ~ 50 В/Вт, а токовая ~ 50 мА/Вт при 300 К.

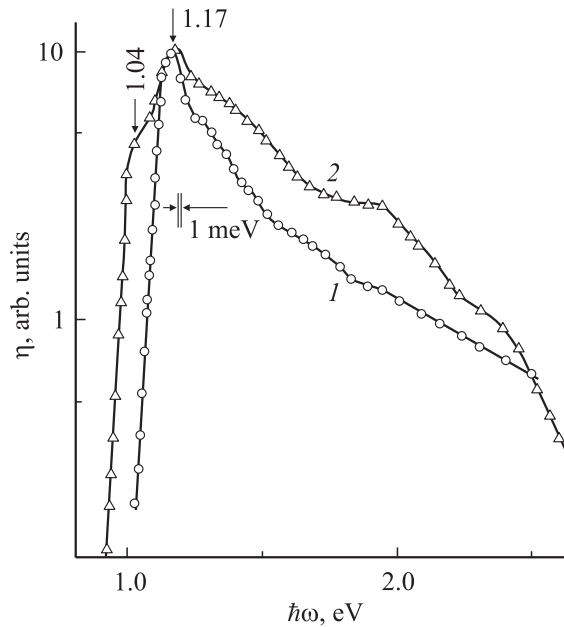


Рис. 3. Спектральные зависимости квантовой эффективности фотопреобразования гетеропереходов $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ при $T = 300$ К (1 — образец 22, 2 — образец 1-2). Освещение неполяризованным излучением со стороны $n\text{-ZnO:Al}$.

Типичные спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования η полученных гетеропереходов $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ при освещении со стороны их широкозонной компоненты $n\text{-ZnO}$ приведены на рис. 3. Характерными особенностями спектров η являются наличие максимума вблизи энергии фотонов $\hbar\omega^m = 1.17 - 1.18$ эВ для разных структур и более выраженный, чем в поверхностно-барьерных структурах $\text{In}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ [8], коротковолновый спад фоточувствительности.

3. Наблюдаются два вида длинноволнового края спектра η в гетеропереходах $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ (рис. 3, кривые 1, 2). В координатах $(\eta\hbar\omega)^2 - \hbar\omega$ длинноволновый край спектра η спрямляется, что согласно теоретическому анализу краевого поглощения полупроводников [13] позволяет приписать его прямым межзонным оптическим переходам. Экстраполяцией $(\eta\hbar\omega)^2 \rightarrow 0$ по энергетическому положению точки отсечки определена энергия прямых межзонных переходов CuIn_3Se_5 $E_g \approx 1.09$ эВ при 300 К. Близкий результат был получен и при подобной обработке длинноволнового края спектров η барьеров Шоттки на кристаллах CuIn_3Se_5 в работе [7].

Среди исследованных гетеропереходов $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ в спектрах η встречались и такие, у которых в области энергий $\hbar\omega < \hbar\omega^m$ имелся четкий перегиб вблизи $\hbar\omega^m \approx 1.04$ эВ (рис. 3, кривая 2). Такая же особенность была ранее обнаружена и в спектрах фоточувствительности барьеров Шоттки $\text{In}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ [7]. Она связывалась с фотоактивным поглощением на уров-

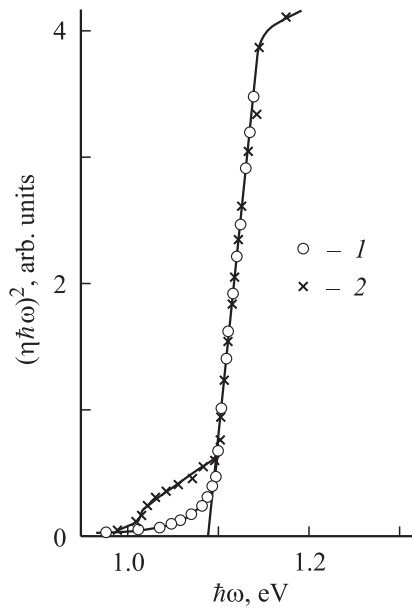


Рис. 4. Длинноволновый край спектральных зависимостей $(\eta\hbar\omega)^2$ гетеропереходов $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ при $T = 300\text{ K}$. Исследованные структуры: 1 — образец 22, 2 — образец 1-2. Освещение неполяризованным светом со стороны $n\text{-ZnO:Al}$.

нях дефектов решетки. Такое же объяснение можно высказать и на основании приводимых спектров длинноволновой фоточувствительности гетеропереходов $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ (рис. 3, кривая 2). Однако если учесть, что значение $\hbar\omega^m$ близко к ширине запрещенной зоны CuInSe_2 [14], то обсуждаемую особенность можно, по-видимому, связывать также и с присутствием преципитатов CuInSe_2 в CuIn_3Se_5 . Очевидно, что для окончательного решения данной неопределенности требуются дополнительные микроскопические исследования с целью поиска пространственно ограниченных включений CuInSe_2 в CuIn_3Se_5 .

Наряду с рассмотренными выше структурами нами была предпринята также попытка получения гетеропереходов методом посадки на прямой оптический контакт с полированной поверхностью $p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ тонких ($\sim 50\text{ мкм}$) сколотых пластинок $n\text{-GaSe}$ с концентрацией свободных электронов $n \approx 10^{14}\text{ см}^{-3}$ ($T = 300\text{ K}$) [15]. На созданных гетеропереходах $n\text{-GaSe}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ также обнаруживаются выпрямление ($K \approx 5$ при $U \approx 40\text{ В}$) и фотовольтаический эффект ($S_u \approx 40\text{ В/Вт}$ при 300 K).

На рис. 5, *a* приведен типичный спектр η одного из гетеропереходов при 300 K в условиях их освещения со стороны GaSe . Фоточувствительность этих гетеропереходов наблюдается в широкой спектральной области от 1 до 2 эВ. Фоточувствительность доминирует в области фундаментального поглощения в GaSe [15,16], что связано с преимущественной локализацией активной области в широкозонной компоненте этого гетероперехода. Это определяется тем, что удельное сопротивление $n\text{-GaSe}$ на 4–5 порядков превышает удельное сопротив-

ление кристалла $p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$. Важно подчеркнуть, что структура и энергетическое положение длинноволнового края в спектре η гетеропереходов $n\text{-GaSe}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ (рис. 5, *a*) очень близки к наблюдавшейся в гетеропереходах $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ и поверхностно-барьерных структурах $\text{In-}p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ [9]. Это позволяет считать, что длинноволновый край фоточувствительности гетеропереходов $n\text{-GaSe}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ определяется межзонным поглощением в тройном соединении CuIn_3Se_5 . Спрямление длинноволнового края фоточувствительности гетеропереходов $n\text{-GaSe}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$, а также близкое значение энергии отсечки при экстраполяции $(\eta\hbar\omega)^2 \rightarrow 0$ в полученных методом посадки на оптический контакт гетеропереходах (рис. 5, *b*) также свидетельствуют в пользу прямых межзонных переходов в кристаллах CuIn_3Se_5 ($E_g \approx 1.08\text{ эВ}$ при 300 K).

При этом важно отметить, что в случае гетеропереходов $n\text{-GaSe}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ отсутствует характерный для барьеров Шоттки [7] и структур $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ коротковолновый спад фоточувствительности в глубине фундаментального поглощения CuIn_3Se_5 при $\hbar\omega > 1.18\text{ эВ}$ (рис. 3). Следовательно, в гетеропереходах $n\text{-GaSe}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ рекомбинация фотогенерированных носителей на интерфейсных состояниях практически не проявляется, что указывает на достигнутое при этом

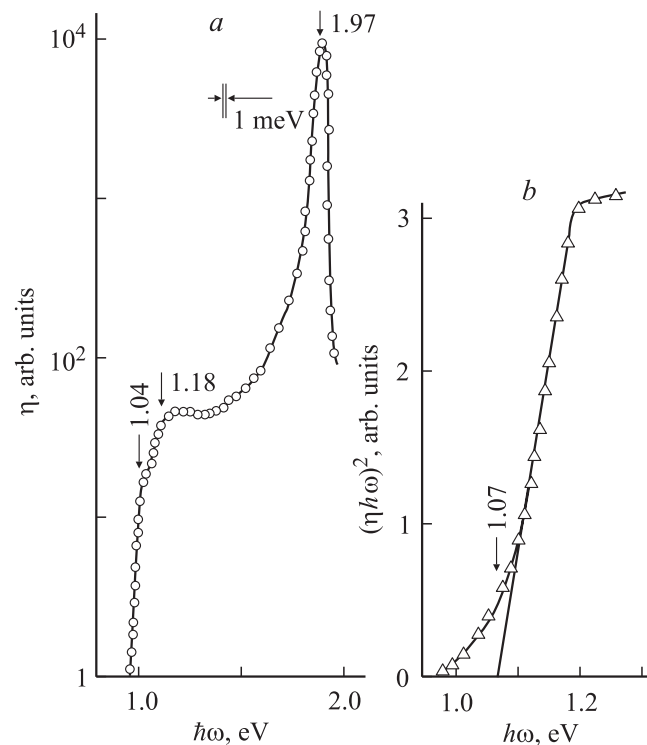


Рис. 5. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования: *a* — гетероперехода $n\text{-GaSe}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ (образец 1-6) при $T = 300\text{ K}$, *b* — длинноволновый край спектральной зависимости. Освещение со стороны пластины $n\text{-GaSe}$ толщиной $d \approx 50\text{ мкм}$. Стрелками указано энергетическое положение спектральных особенностей.

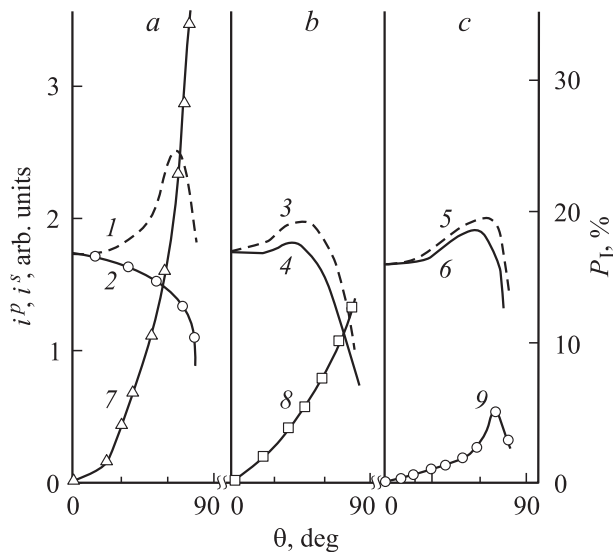


Рис. 6. Зависимости фототоков i^p (кривые 1, 3, 5), i^s (кривые 2, 4, 6) и коэффициента наведенного фотоэффекта P_I (кривые 7, 8, 9) от угла падения линейно поляризованного излучения на приемную плоскость $n\text{-ZnO:Al}$ гетероперехода $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ при $T = 300\text{ K}$ (образец 22) при длинах волн падающего излучения λ , мкм: кривые 1, 2, 7 — 1.15; кривые 3, 4, 8 — 1.05; кривые 5, 6, 9 — 0.86.

достаточное совершенство гетерограницы в отношении рекомбинационных процессов.

4. Исследования фоточувствительности гетеропереходов $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ в линейно поляризованном излучении (ЛПИ) позволили установить, что поляризационная фоточувствительность возникает только в условиях наклонного падения излучения на фотоприемную плоскость $n\text{-ZnO:Al}$. Действительно, как видно из рис. 6, фототоки при падении ЛПИ вдоль нормали к плоскости ZnO (угол падения $\Theta = 0$) равны по величине, а коэффициент наведенного фотоэффекта [17]

$$P_I = \frac{(i^p - i^s)}{(i^p + i^s)} \equiv 0, \quad (5)$$

где i^p и i^s — фототоки при векторе электрического поля \mathbf{E} падающей световой волны, параллельном и перпендикулярном плоскости падения излучения. Установленное нами выполнение тождества (5) означает, что естественный фотоэффект [18] в полученных гетеропереходах отсутствует по причинам поликристалличности использованных в качестве подложек объемных кристаллов CuIn_3Se_5 , с одной стороны, и низкой естественной тетрагональной деформации кристаллической решетки этого соединения [14].

Из рис. 6 видно, что, как только угол падения Θ становится отличным от 0, в области фоточувствительности гетероперехода возникает неравенство фототоков $i^p > i^s$, что сопровождается возникновением наведенного наклонным падением ЛПИ коэффициента

наведенного фотоэффекта [17]

$$P_I > 0. \quad (6)$$

При этом, как видно из рис. 6, угловые зависимости $i^p(\Theta)$ и $i^s(\Theta)$, а также $P_I(\Theta)$ меняются по спектру, а величины коэффициента наведенного фотоэффекта следуют известному из теории квадратичному закону $P_I \propto \Theta^2$ [17].

На рис. 7 приведена типичная для полученных гетеропереходов спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоэффекта при фиксированном угле падения ЛПИ $\Theta = 85^\circ$. В отличие от ожидаемого для оптических однородных сред, практически независимого от энергии фотонов коэффициента наведенного фотоэффекта [17], как видно из рис. 7, коэффициент P_I полученных гетеропереходов обнаруживает явную зависимость от энергии фотонов. Его максимальное значение $P_I \approx 50\%$ оказывается близким к ожидаемому, согласно теории [19], для границы воздух–ZnO только в максимуме спектра экспериментальной кривой P_I при $\Theta = \text{const}$. Резкий спад P_I до значений 4–5% вблизи $\hbar\omega \approx 1\text{ эВ}$ связан со сближением величин фототоков i^s и i^p , что и приводит к выполнению равенства $P_I \approx 0$ при $\Theta \neq 0$. Явление исчезновения наведенного фотоэффекта [17] связывается с интерференционным просветлением в гетеропереходах $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ условием которого является $P_I \rightarrow 0$. С ростом $\hbar\omega > 1\text{ эВ}$, как следует из рис. 7, коэффициент наведенного фотоэффекта увеличивается и достигает своего максимального значения $P_I \approx 50\%$ при $\Theta = 85^\circ$ в области 1.8–2.1 эВ, а с дальнейшим повышением энергии фотонов $\hbar\omega > 2.1\text{ эВ}$ вновь наступает падение величины P_I . Можно предположить, что приведенная на

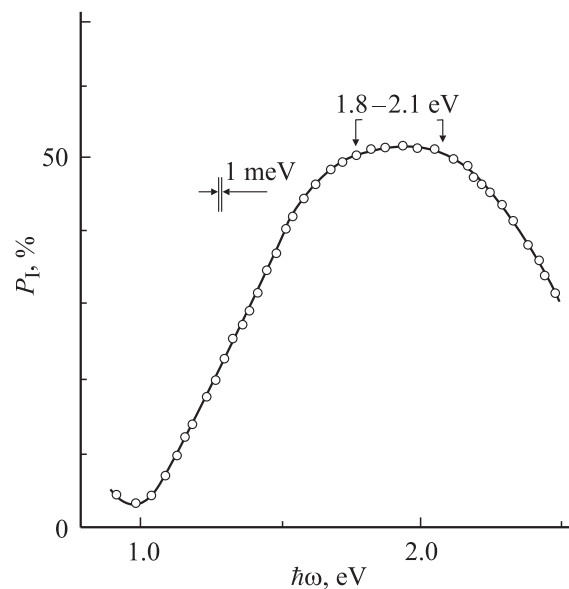


Рис. 7. Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоэффекта гетероперехода $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ при $T = 300\text{ K}$ (образец 22). Освещение со стороны слоя $n\text{-ZnO:Al}$. $\Theta = 80^\circ$.

рис. 7 зависимость $P_I(\hbar\omega)$ есть результат осцилляций коэффициента наведенного фотоплетохроизма в гетероструктурах $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ [17]. Очевидно, что квантовая эффективность фотопреобразования в таких структурах должна отвечать условию $P_I \approx 0$ во всей области спектра падающего излучения. В полученных гетеропереходах это условие не обеспечивается однослойным покрытием ZnO:Al , а для обеспечения условия $P_I \approx 0$ во всем широком спектральном диапазоне необходимы поиск и разработки многослойных интерференционных покрытий, причем экспрессный контроль явления просветления может быть осуществлен посредством измерения зависимости $P_I(\hbar\omega)$ при $\Theta > 0$.

Таким образом, в работе впервые получены новые фоточувствительные гетеропереходы $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$ и $n\text{-GaSe}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$, которые могут найти применение в качестве селективных преобразователей естественного и линейно поляризованного излучений. Показано, что фотоэлектрическая поляризационная спектроскопия может применяться в экспрессном мониторинге готовых фотопреобразователей, что открывает новые возможности эффективного поиска технологических условий оптимизации структур $\text{ZnO-CuIn}_3\text{Se}_5$.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ ОФН РАН „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах“ и фонда INTAS (проект № 2001-283).

Список литературы

- [1] H.W. Schock, A. Shah. Proc. 14th EU PVSEC, 2000 (1997).
- [2] O. Lundberg, M. Edoff, L. Stolt. ISES 2003. Abstract book, Solar World Congress. June 14–19, 2003 (Göteborg, Sweden, 2003) p. 57.
- [3] T.M. Razykov. Abstract book. Solar World Congress. June 14–19, 2003 (Cöteborg, Sweden, 2003) p. 61.
- [4] S.D. Tsang, S.H. Wei, A. Zunger, H. Katayama-Yoshida. Phys. Rev. B, **57**, 9642 (1998).
- [5] S.H. Wei, S.D. Tsang, A. Zunger. Appl. Phys. Lett., **72**, 3199 (1998).
- [6] И.В. Боднар, В.Ф. Гременок, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **33**, 805 (1999).
- [7] И.В. Боднар, Т.Л. Кушнер, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ЖПС, **69**, 519 (2002).
- [8] G. Marin, R. Marques, R. Guevara. Jap. J. Appl. Phys., **39**, pt 1, 44 (2000).
- [9] И.В. Боднар, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, М.В. Якушев. ФТП, **36**, 1211 (2002).
- [10] E. Hernandez. Cryst. Res. Technol., **33**, 285 (1998).
- [11] Г. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные точки в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [12] С.Е. Никитин, Ю.А. Николаев, И.К. Полушина, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков. ФТП, **37**, 1329 (2003).
- [13] Ю.И. Уханов. *Оптические свойства полупроводников* (М., Наука, 1977).
- [14] *Физико-химические свойства полупроводников*. Справочник (М., Наука, 1979).

- [15] I.V. Bodnar, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud'. Cryst. Res. Technol., **31**, S, 261 (1996).
- [16] Н.М. Мехтиев, Ю.В. Рудь, Э.Ю. Салаев. ФТП, **12**, 1566 (1978).
- [17] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **30**, 1921 (1996).
- [18] Ю.В. Рудь. Изв. вузов СССР. Физика, **29**, 68 (1986).
- [19] G.A. Medvedkin, Yu.V. Rud'. Phys. St. Sol. (a), **67**, 333 (1981).

Редактор Л.В. Беляков

Preparation and photosensitivity of heterojunctions based on CuIn_3Se_5 crystals

I.V. Bodnar*, S.E. Nikitin, G.A. Ilchuk, V.Yu. Rud'+, Yu.V. Rud', M.V. Yakushev°

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

* Belorussian State Informatic
and Radioelectronics University,
220030 Minsk, Belarus

+ St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

° Strathclyde University,
G40NG Glasgow, United Kingdom

Abstract Heterojunctions based on crystals of a new ternary semiconductor compound CuIn_3Se_5 were obtained by the magnetron sputtering of ZnO:Al target and by applying thin chopped off plates of $n\text{-GaSe}$ upon polished surfaces of CuIn_3Se_5 wafers. Volt-ampere characteristics and mechanisms of the current flow are being discussed. The photovoltaic effect on obtained heterojunctions has been discovered and analysed. Conclusion has been drawn that obtained photosensitive heterojunctions based on a CuIn_3Se_5 new ternary semiconductor compound are promising when fabricating selective photoanalysers of the linearly-polarized radiation.