

Фотоэлектрические свойства гетеропереходов $n\text{-CdS}/p\text{-InP}$

© В.М. Ботнарюк, Л.В. Горчак, И.И. Диакону, В.Ю. Рудь*, Ю.В. Рудь†

Государственный университет Молдовы,
277069 Кишинев, Молдавия

* Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

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

(Получена 24 июля 1996 г. Принята к печати 10 июня 1997 г.)

Поляризационный метод фотоактивного поглощения гетеропереходов CdS/InP использован для исследования процессов фотопреобразования в зависимости от ориентации подложек из фосфида индия. Результаты этих исследований демонстрируют чувствительность фотоэлектрических процессов к нескольким факторам, включая кристаллографическую ориентацию подложек из $p\text{-InP}$ и оптическое качество слоев CdS . Коэффициент наведенного фотоплекроизма этих гетеропереходов растет пропорционально квадрату угла падения ($P_f \sim \Theta^2$). Гетеропереходы CdS/InP могут найти применение как поляризационно-фоточувствительные приборы.

Фоточувствительность гетеропереходных структур на основе прямозонных полупроводниковых соединений — фосфида индия ($E_g \approx 1.26$ эВ [1,2]) и сульфида кадмия ($E_g \approx 2.53$ эВ [3,4]) давно привлекает внимание исследователей в плане достижения высокоэффективного преобразования энергии солнечного излучения в электрическую [5–10]. Бинарные соединения InP и CdS обладают разными типами кристаллических структур (в нормальных условиях InP имеет структуру сфалерита, а CdS — вюртцита [3,4,9]) и обнаруживают при этом высокое рассогласование параметров решеток Δa : 4.7% при сопряжении кубических модификаций, 13.95% и 34.67% при сопряжении вюртцитной фазы CdS с InP в разных кристаллографических направлениях при $T = 300$ К. Несмотря на столь невыгодные условия сопряжения при нанесении слоев $n\text{-CdS}$ на монокристаллические подложки InP , в последние годы удалось довести коэффициент преобразования солнечного излучения в таких гетеропереходах (ГП) до 18% на площадях ≈ 0.5 см², обеспечив наряду с этим высокую радиационную стабильность [10]. В настоящей работе представлены результаты первых исследований фотоэлектрических свойств гетеропереходов, полученных нанесением слоев $n\text{-CdS}$ на различным образом ориентированные подложки фосфида индия p -типа проводимости.

Методика эксперимента

Слои $n\text{-CdS}$ наносились на монокристаллические подложки $p\text{-InP}$, которые представляли собой пластины, ориентированные в плоскостях (100) и (111). В последнем случае процесс нанесения слоев осуществлялся на плоскости А или В, что позволило в последующем оценить роль полярности решетки сфалерита [1] в процессах осаждения. Концентрация свободных дырок в легированных цинком подложках InP составляла $\approx (3 \div 4) \cdot 10^{18}$ см⁻³ при $T = 300$ К, тогда как использованный режим нанесения слоев CdS позволял обеспечивать концентрации

электронов в них $\approx 10^{18} \div 10^{19}$ см⁻³ при $T = 300$ К. Процесс нанесения слоев CdS осуществлялся газофазным методом в проточной системе и с использованием водорода при температуре 700–730°С. Время процесса обычно не превышало 60 мин. Было установлено, что при идентичных технологических параметрах процесса выращивания CdS изменения в ориентации подложек InP от (100) к (111) воспроизводимо приводили к снижению толщины осаждаемых слоев. Так, например, если на плоскости (100) слои $n\text{-CdS}$ обычно при временах ≈ 30 мин и температурах осаждения $\approx 700\text{--}750^\circ\text{C}$ имели толщины 4–5 мкм, то на плоскостях (111) А и (111) В толщина слоев не превышала 0.5–1 мкм. Это свидетельствует о снижении скорости осаждения в результате изменения только кристаллографической ориентации подложек, однако влияние их полярности на толщину образуемых слоев в литературе еще не отмечалось. Следует также подчеркнуть, что наружная плоскость слоев CdS на подложках (111) InP была более совершенной, тогда как на подложках (100) InP поверхность слоев CdS , как правило, была шероховатой и характеризовалась диффузным отражением.

После нанесения слоев $n\text{-CdS}$ свободная поверхность подложек $p\text{-InP}$ покрывалась посредством термического напыления в вакууме сплошным слоем Ag , который играл роль омического контакта. На наружную плоскость слоев $n\text{-CdS}$ путем термического напыления индия через маску наносилась контактная сетка. Затем структуры $n\text{-CdS}/p\text{-InP}$ монтировались на столик Федорова, который позволяет с угловой точностью не хуже 30' изменять пространственную ориентацию фотоприемной плоскости ГП относительно пучка падающего естественного или линейно-поляризованного излучения (ЛПИ).

На полученных структурах $n\text{-CdS}/p\text{-InP}$ со средними размерами фотоприемной плоскости $n\text{-CdS} \approx 5 \times 5$ мм² исследовались вольт-амперные характеристики, а также угловые и спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования η .

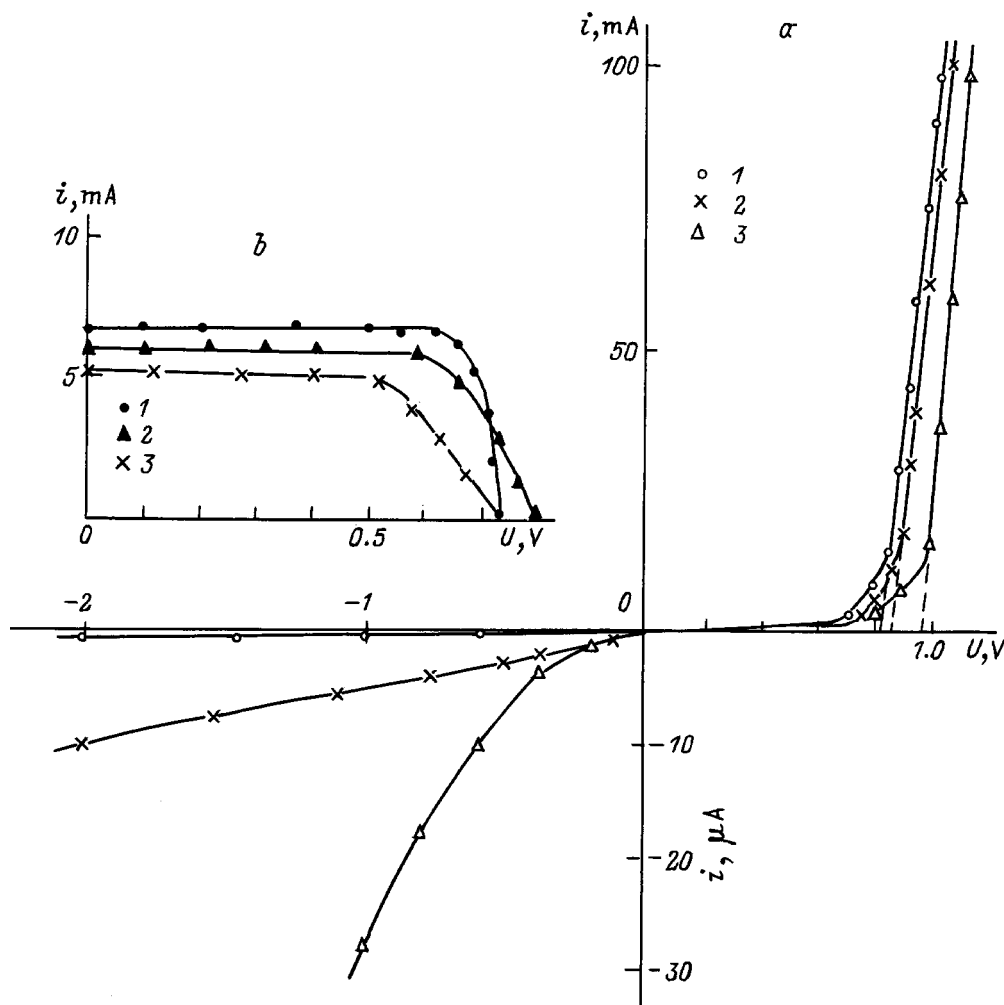


Рис. 1. Стационарные вольт-амперные (а) и нагрузочные (б) характеристики структур *n*-CdS/*p*-InP при $T = 300$ К в зависимости от ориентации подложек InP: [1 — (100), 2 — (111)В, 3 — (111)А].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

1. Стационарные и нагрузочные вольт-амперные характеристики для типичных ГП, полученных осаждением слоев *n*-CdS на различные кристаллографические плоскости InP, представлены на рис. 1, а их фотоэлектрические параметры приведены в таблице. При прямых смещениях, больших напряжения отсечки $U > U_0$, ток в полученных ГП изменяется с напряжением по линейному закону

$$I = \frac{1}{R_0}(U - U_0),$$

где R_0 — остаточное сопротивление. Из таблицы видно, что минимальное значение R_0 обеспечивается при осаждении слоев *n*-CdS на плоскость (100) InP. Остаточное сопротивление оказалось зависимым от полярности плоскости (111) InP и максимальным при использовании ориентации (111) А. Напряжения отсечки

U_0 в этих ГП удовлетворительно согласуются с фотонапряжением насыщения U_{xx}^∞ и поэтому могут быть приняты за величину контактной разности потенциалов

Фотоэлектрические свойства структур *n*-CdS/*p*-InP при $T = 300$ К

Ориентация <i>p</i> -InP	(100)	(111) А	(111) В
d_{InP} , мм	0.4	0.4	0.4
d_{CdS} , мкм	4	1	1
R_0 , Ом	11	59	13
U_0 , В	0.82	0.85	0.96
i_r , мкА ($U = 1$ В)	0.5	26	5
i_{sc} , мА ($L = 20$ мВт/см ²)	14	10	9
U_{xx}^∞ , В ($L = 20$ мВт/см ²)	0.74	0.8	0.75
β ($L = 20$ мВт/см ²)	0.83	0.62	0.75
S_i , мА/Вт	45	10	20
$\delta_{1/2}$, эВ	1.09	0.93	1.2
$\Delta\hbar\omega_m$, эВ	1.5–1.85	1.5–1.6	1.55–1.6
i_{650}^p / i_{0}^p		1.2	1.3

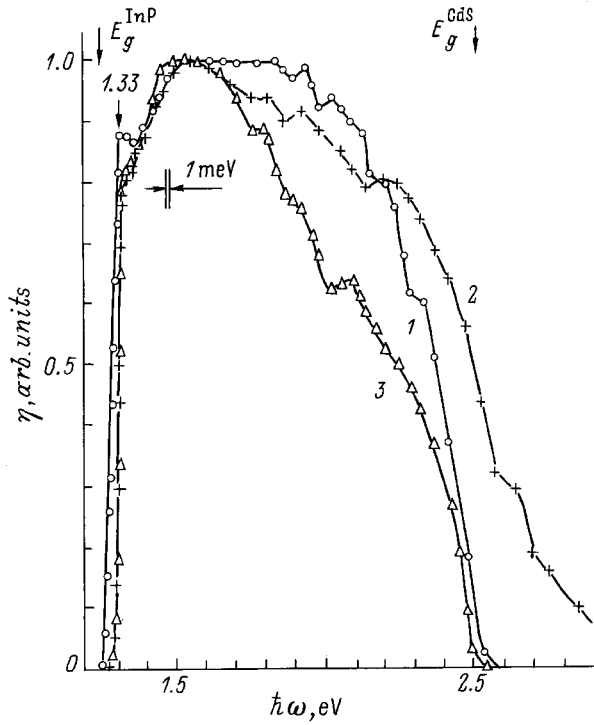


Рис. 2. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования в структурах n -CdS/ p -InP при $T = 300$ К. Освещение естественным излучением со стороны CdS. Кристаллографическая ориентация подложек: 1 — (100), 2 — (111) В, 3 — (111) А. Толщина слоя CdS, мкм: 1 — 4, 2, 3 — 1; $\Theta = 0^\circ$.

φ_B у таких гетероконтактов. Очевидной связи φ_B с кристаллографической ориентацией подложек не установлено. Максимальный ток короткого замыкания $i_{кз}$, коэффициент заполнения нагрузочных характеристик β (рис. 1) и токовая фоточувствительность S_i , как следует из таблицы, достигнуты при осаждении слоев CdS на плоскости (100) InP. В этой геометрии осаждения как раз обеспечивается и минимальный обратный ток i_r (рис. 1, таблица). С переходом к осаждению CdS на плоскости (111) InP происходит возрастание обратного тока, которое наиболее выражено для подложек InP (111) А. Возрастание обратных токов, как и понижение коэффициента заполнения, а также токовой фоточувствительности свидетельствуют об ухудшении качества гетерограницы в отношении процессов фоточувствительности. Следует также подчеркнуть, что обнаруженная при осаждении на плоскость (111) InP зависимость фотоэлектрических свойств ГП от полярности этой грани может указывать на более высокую химическую активность плоскости с оборванными связями индия (111) А, которые вызывают повышение остаточного сопротивления и снижение токовой фоточувствительности ГП.

2. Спектральные зависимости η , вычисленные как отношение фототока короткого замыкания к числу падающих квантов неполяризованного излучения, для ти-

пичных ГП с различной кристаллографической ориентацией подложек InP приведены на рис. 2. Видно, что фоточувствительность этих ГП наблюдается в диапазоне между ширинами запрещенных зон E_g^{InP} и E_g^{CdS} . Проявление "эффекта окна" отражает факт образования резких и достаточно совершенных в отношении процессов фотопреобразования гетеропереходов. Длинноволновая граница фоточувствительности в них практически одинакова, поскольку определяется началом межзонного поглощения в фосфиде индия при $\hbar\omega > 1.26$ эВ (рис. 2). Коротковолновая граница η в полученных ГП примыкает к величине E_g^{CdS} и обусловлена локализацией области фотовозбуждения у поверхности слоев n -CdS, в результате чего происходит удаление этой области от слоя объемного заряда, что и вызывает в конечном счете спад η . Из рис. 2 также следует, что спектральный диапазон фоточувствительности для исследованных ГП определяется только природой контактирующих полупроводников, тогда как изменение кристаллографической ориентации подложек InP проявляется, пожалуй,

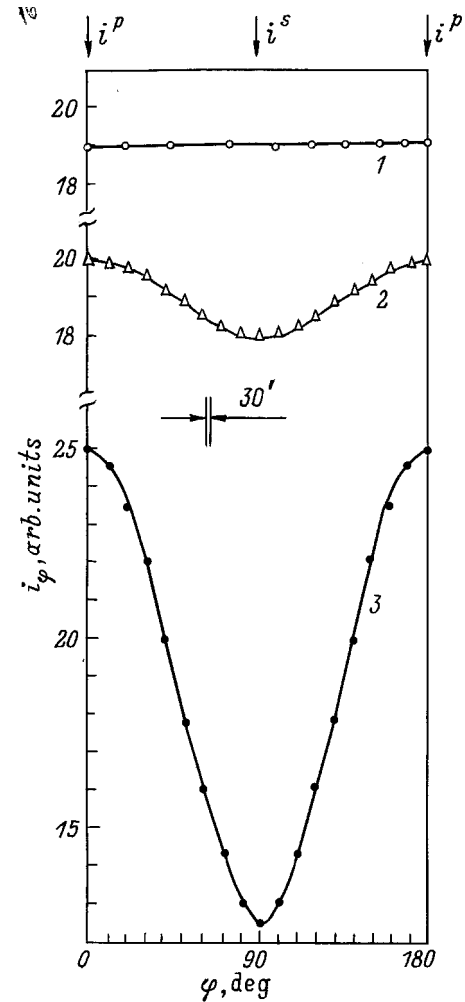


Рис. 3. Поляризационные индикатрисы фототока короткого замыкания структуры n -CdS/ p -InP при $T = 300$ К в зависимости от угла падения ЛПИ на приемную плоскость CdS. $\hbar\omega = 1.4$ эВ; Θ , град.: 1 — 0, 2 — 30, 3 — 70.

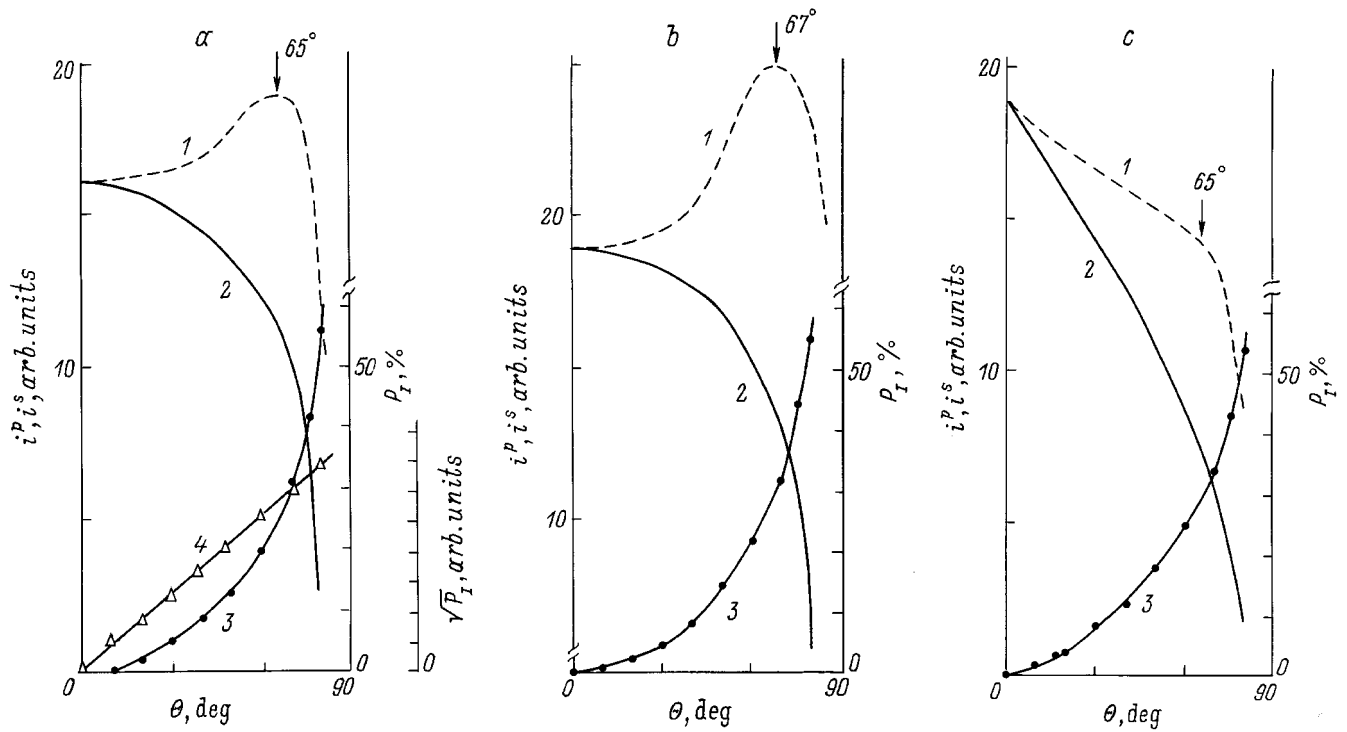


Рис. 4. Зависимости фототоков короткого замыкания 1 — i^p , 2 — i^s и коэффициента наведенного фотоэффекта 3 — $P_I(\Theta)$, 4 — $\sqrt{P_I}(\Theta)$ от угла падения ЛПИ на приемную плоскость CdS структур n-CdS/p-InP при $T = 300$ К. Ориентация подложки: а — (111) В, б — (111) А, с — (100). $\hbar\omega = 1.33$ эВ.

только в спектральном контуре квантовой эффективности фотопреобразования при $\hbar\omega > 1.5$ эВ, когда поглощение излучения локализуется в окрестности гетерограницы со стороны слоев CdS. Наиболее ранний коротковолновый спад и наиболее низкая полуширина спектров $\eta(\hbar\omega)$ на полувысоте $\delta_{1/2} \approx 0.93$ эВ получена в ГП (см. таблицу) с подложками (111) А, тогда как с переходом к подложкам с ориентациями (111) В и (100) наступает рост коротковолновой фоточувствительности. Это обстоятельство можно связать в первую очередь с улучшением интерфейса ГП. Наиболее широкий диапазон максимальной фоточувствительности $\Delta\hbar\omega_m$ от 1.5 до 1.9 эВ (см. таблицу) характерен ГП на основе подложек с ориентацией (100), что свидетельствует о наиболее высоком совершенстве таких структур. При выращивании слоев CdS на пластинках InP с ориентацией (111) для повышения фоточувствительности в спектральном диапазоне $\hbar\omega > 1.6$ эВ, как видно из рис. 2, предпочтение следует отдать росту слоев CdS на InP когда на поверхность выходят связи атомов фосфора.

3. Фототок короткого замыкания полученных ГП при освещении ЛПИ вдоль нормали к приемной плоскости n-CdS оказался независимым от пространственной ориентации электрического вектора световой волны \mathbf{E} и поэтому при угле падения $\Theta = 0^\circ$ поляризационная индикатриса фототока i_φ вырождается в прямую линию (рис. 3 кривая 1). Как только угол падения ЛПИ становится отличным от $\Theta = 0^\circ$ (рис. 3 кривые 2

и 3), возникает периодическая зависимость фототока от азимутального угла φ между \mathbf{E} и плоскостью падения ЛПИ (ПП), которая подчиняется соотношению

$$i_\varphi = i^p \cos^2 \varphi + i^s \sin^2 \varphi,$$

где i^p и i^s соответственно фототоки в поляризациях $\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$ и $\mathbf{E} \perp \text{ПП}$. Во всей области фоточувствительности ГП с разной кристаллографической ориентацией подложек InP сохраняется неравенство $i^p > i^s$, причем отношение i^p/i^s при $\hbar\omega = \text{const}$ возрастает с увеличением Θ (рис. 3).

Отсутствие зависимости i_φ от азимутального угла φ при $\Theta = 0^\circ$ позволяет сделать важный вывод о том, что фотоактивное поглощение в полученных ГП остается изотропным при изменениях в кристаллографической ориентации подложек InP. С переходом к наклонному падению ЛПИ в полученных ГП возникает наведенный фотоэффект [11]

$$P_I = \frac{i^p - i^s}{i^p + i^s},$$

который увеличивается с ростом угла падения по закону $P_I \sim \Theta^2$ (рис. 4). Эти зависимости спрямляются в координатах $\sqrt{P_I} - \Theta$ и оказываются одинаковыми во всей области фоточувствительности ГП, не обнаруживая чувствительности к изменениям в ориентации подложек InP. Это обстоятельство связано с тем, что при наклонном падении ЛПИ наведенный фотоэффект определяется

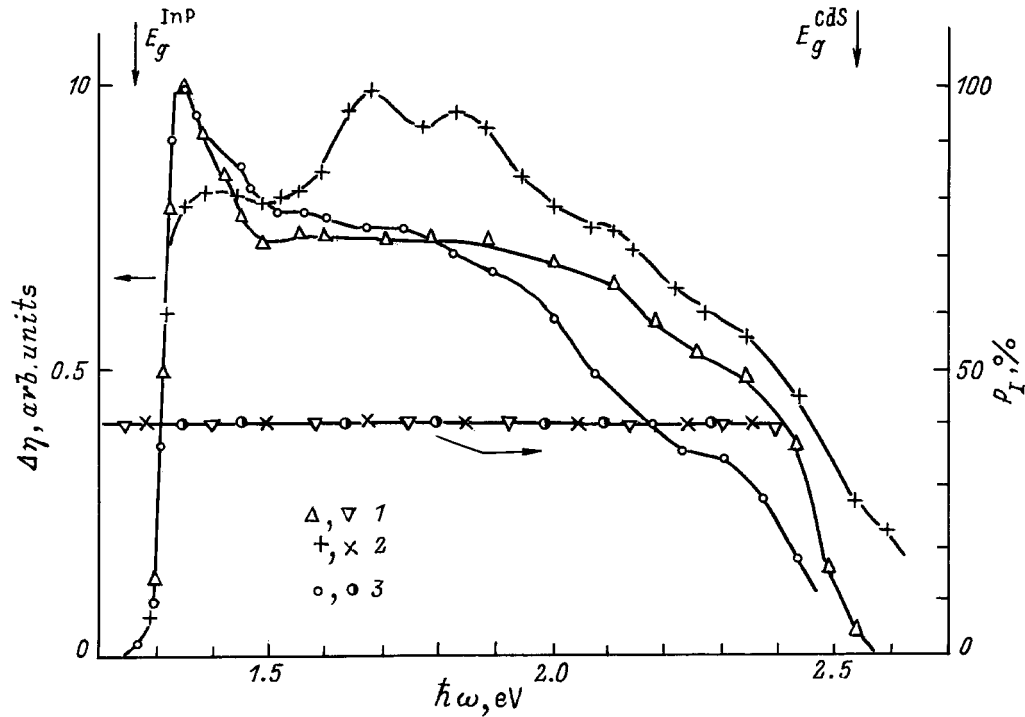


Рис. 5. Спектральные зависимости поляризационной разности квантовой эффективности и коэффициента наведенного фотохроизма структур n -CdS/ p -InP при $T = 300$ К. $\Theta = 75^\circ$, кристаллографическая ориентация InP: 1 — (100), 2 — (111) В, 3 — (111) А.

в основном показателем преломления полупроводника n , на который падает излучение [11,12]. На основании экспериментальных зависимостей $P_I(\Theta)$ в соответствии с [12] для полученных ГП $n \approx 2.5$, что совпадает с известной величиной этого параметра для CdS [13]. Это обстоятельство позволяет считать, что индуцированная наклонным падением ЛПИ фотоэлектрическая анизотропия [11] ГП не зависит от ориентации подложек InP и всецело определяется только природой выращиваемых на этой подложке слоев CdS.

В то же время, как следует из рис. 4, фототок ГП в линейно-поляризованном излучении обнаружил явную зависимость от качества наружной поверхности слоев CdS, через которую излучение поступает в эти структуры. Для зеркально-гладких слоев n -CdS, которые удастся воспроизводимо выращивать на ориентированных в плоскости (111) подложках InP, угловые зависимости фототоков $i^p(\Theta)$ и $i^s(\Theta)$ находятся в соответствии с соотношениями Френеля для амплитудных коэффициентов прохождения ЛПИ через границу воздух–CdS [14]. При этом фототок i^s монотонно спадает с ростом Θ , тогда как i^p вначале увеличивается, проходит через максимум вблизи угла псевдобрюстеровского отражения и только после этого наступает его снижение. В ГП с ориентациями подложек (111) А и (111) В на зависимостях $i^p(\Theta)$ проявляется четкий максимум в окрестности $\Theta \approx 65^\circ$ (рис. 4, *a, b*), а отношение фототоков $i_{65^\circ}^p/i_{0^\circ}^p$ достигает 1.2–1.3 (см. таблицу), что свидетельствует о значи-

тельном снижении потерь на отражение в ориентации $E \parallel$ ПП. Это снижение оказалось максимальным в ГП с кристаллографической ориентацией подложек (111) В, что опять-таки указывает на более высокое оптическое качество слоев CdS, выращиваемых именно в такой геометрии.

В случае ГП с ориентацией подложек (100), как видно из рис. 4, *c*, фототоки i^p и i^s , сохраняя зависимость от поляризации $i^p > i^s$, обнаружили монотонный спад, начиная с $\Theta > 0^\circ$. Такое явление было отмечено ранее при поляризационных исследованиях фоточувствительности структур GaP/Si и связывалось с ухудшением оптического качества слоев GaP [15]. На этом основании характер зависимостей $i^p(\Theta)$ в ГП на подложках (100) InP можно также приписать ухудшению оптического качества поверхности слоев CdS при использовании такой ориентации подложек. Следовательно, поляризационные исследования фототока ГП CdS/InP могут найти применение в качестве новой экспрессной диагностики оптического качества приемной плоскости готовых фотопреобразателей.

4. При наклонном падении ЛПИ спектральный контур η^p и η^s сохраняет основные черты особенностей фотоактивного поглощения таких ГП при освещении их неполяризованным излучением (рис. 1). Переход от поляризации $E \parallel$ ПП к $E \perp$ ПП вызывает параллельное опускание всей кривой η^s относительно η^p вниз в соответствии с поляризационной зависимостью амплитудных

коэффициентов прохождения световой волны границы воздух–слой CdS, причем во всей области фоточувствительности при $\Theta = \text{const}$ выполняется соотношение $\eta^p > \eta^s$.

В спектральных зависимостях поляризационной разности квантовой эффективности фотопреобразования $\Delta\eta = \eta^p - \eta^s$ четко проявляется эффект окна в отношении поляризационной фоточувствительности. Действительно, как видно из рис. 5, в ГП с разной ориентацией подложек InP $\Delta\eta \neq 0$ в диапазоне между E_g^{InP} и E_g^{CdS} . Наблюдаемые различия в спектральном контуре $\Delta\eta$ могут быть отнесены на счет особенностей процессов фотогенерации и разделения неравновесных носителей заряда в этих ГП. Изменение в ориентации подложек позволяет при этом контролировать спектральное распределение $\Delta\eta$. Например, для обеспечения максимальной поляризационной квантовой эффективности в спектральной области $\hbar\omega > 1.6$ эВ следует отдать предпочтение осаждению слоев CdS на подложки InP с ориентацией (111) В.

Коэффициент наведенного фотоплетохроизма в ГП CdS/InP во всей области их фоточувствительности оказывается практически постоянным (рис. 5), что согласуется с выводами [11]. К тому же, как видно из рис. 5, величина P_I в полученных ГП оказалась нечувствительной к изменениям ориентации подложек InP. Это позволяет сделать вывод о том, что коэффициент наведенного фотоплетохроизма в данном случае определяется только природой полупроводника, через который ЛПИ поступает в активную область структур, и в этом смысле является фундаментальным параметром гетероперехода.

Поскольку азимутальная фоточувствительность Φ пропорциональна произведению поляризационной разности квантовой эффективности и коэффициента фотоплетохроизма ($\Phi \sim \Delta\eta \times P_I$ [11]), на основании данных рис. 5 можно также заключить, что спектральная зависимость Φ полученных гетеропереходов определяется только $\eta(\hbar\omega)$. Следовательно, солнечные элементы на основе гетеропереходов CdS/InP в полупленочном исполнении могут быть без каких-либо дополнительных технологических операций использованы в качестве широкополосных фотоанализаторов ЛПИ, причем перевод из поляризационно-нечувствительного к поляриметрическому режиму фоторегистрации достигается за счет простого изменения угла падения ЛПИ на фотоприемную плоскость ГП.

Список литературы

- [1] К. Хилсум, А. Роуз-Инс. *Полупроводники типа A^{III}B^V* (М., ИИЛ, 1963).
- [2] О. Маделунг. *Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп* (М., Мир, 1967).
- [3] *Физики и химия соединений A^{II}B^{VI}*, под ред. С.А. Медведева (М., Мир, 1970).

- [4] П.И. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич. *Полупроводниковая электроника. Справочник* (Киев, Наук. думка, 1975).
- [5] J.L. Shay, S. Wagner, K. Bachman, E. Buehler. *J. Appl. Phys.*, **47**, 614 (1976).
- [6] S. Wagner, J.L. Shay, K. Bachman, E. Buehler. *J. Appl. Phys. Lett.*, **26**, 229 (1975).
- [7] A. Yoshikawa, Y. Sakai. *Sol. St. Electron.*, **20**, 133 (1977).
- [8] K. Ito, T. Ohsawa. *Jap. J. Appl. Phys.*, **14**, 1259 (1975).
- [9] А.В. Симашкевич. *Гетеропереходы на основе полупроводниковых соединений A^{II}B^{VI}* (Кишинев, 1980).
- [10] V.M. Botnaryuk, L.V. Gorchak, С.М. Grigorjeva, M.B. Kogan, Т.А. Kozynova, L.L. Lyubashevskaya, С.В. Russu, A.V. Simashkevich. *Sol. Energy Mater.*, **20**, 359 (1990).
- [11] Ю.В. Рудь. *Изв. вузов. Физика*, **29**, 68 (1986).
- [12] G.A. Medvedkin, Yu.V. Rud'. *Phys. St. Sol. (a)*, **67**, 333 (1981).
- [13] *Физико-химические свойства полупроводниковых материалов* (М., Наука, 1978).
- [14] Г.Л. Ландсберг. *Оптика* (М., 1976).
- [15] Ю.В. Жилиев, Н. Назаров, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Л.М. Федоров. *ФТП*, **27**, 1610 (1993).

Редактор В.В. Чалдышев

Photoelectrical properties of $n\text{-CdS}/p\text{-InP}$ heterojunctions

V.M. Botnaryuk, L.V. Gorchak, I.I. Diaconu,
V.Yu. Rud'* , Yu.V. Rud'†

State University of Moldova,
277069 Kishinev, Moldova

* State Technical University,
195251 St.Petersburg, Russia

† A.F.Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract Polarization photoabsorption description of CdS/InP heterojunctions has been used to investigate the photoconversion as a function of orientation of InP substrates. Results of these investigations demonstrate sensitivity of photoelectrical properties to several factors, including crystallographic orientation $p\text{-InP}$ wafers and the optical quality of CdS layers. The induced photopletochroism coefficient of these heterojunctions rises proportionally to the square of the incidence angle can ($P_I \sim \Theta^2$). The CdS/InP heterojunctions find applications as the polarization-photosensitivity devices.