

## Фоточувствительность гетероструктур InP/CdS в линейно поляризованном свете

© В.М. Ботнарюк\*, Л.В. Горчак\*, В.Н. Плешка\*, В.Ю. Рудь†, Ю.В. Рудь

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

\*Государственный университет Молдовы, Кишинев, Молдавия

†Санкт-Петербургский государственный технический университет  
195254 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 апреля 1996 г. Принята к печати 24 апреля 1996 г.)

Представлены результаты измерений фоточувствительности структур  $(p^+ - p^-)$ -InP/ $n^+$ -CdS, полученных выращиванием слоев фосфида индия и сульфида кадмия на подложках  $p^+$ -InP с ориентацией (100). Токовая фоточувствительность структур составляет  $S_i \simeq 0.13$  А/Вт при  $T = 300$  К в спектральном диапазоне 1.3÷2.4 эВ. Обнаружена поляризационная фоточувствительность при наклонном падении линейно поляризованного излучения на поверхность CdS. Величина наведенного фотоплетохроизма контролируется углом падения ( $\theta$ ) как  $\sim \theta^2$  и достигает максимальной величины  $\sim 50\%$  при  $\theta \simeq 75\div 80^\circ$ . Максимальная азимутальная фоточувствительность достигает  $\sim 0.13$  А/Вт-град. Гетероструктуры InP/CdS могут найти применение в качестве поляриметрических фотодетекторов.

Гетероструктуры на основе фосфида галлия и сульфида кадмия до сих пор исследовались только на предмет создания высокоэффективных солнечных элементов. Комплексные физико-технологические исследования системы InP/CdS позволили создать структуры с высокой радиационной стойкостью и коэффициентом полезного действия до 18% [1–3]. В настоящей работе представлены первые результаты изучения фотоэлектрических свойств структур InP/CdS в линейно поляризованном излучении, что позволило сделать выводы относительно перспектив их применения в поляризационной фотоэлектронике.

1. Гетероструктуры  $(p^+ - p^-)$ -InP/ $n^+$ -CdS были получены следующим образом. На первом этапе на легированных цинком пластинах фосфида индия (с концентрацией дырок  $p^+ = (3 \div 4) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> при  $T = 300$  К, толщиной  $\sim 0.4$  мм с ориентацией (100) и разориентацией  $\sim 4 \div 5^\circ$  в направлении (110)) в хлоридной системе In-PCl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub> выращивались эпитаксиальные слои  $p^-$ -InP. Эпитаксиальный слой в процессе роста легировался цинком до концентраций дырок  $p^- = 10^{16} \div 10^{17}$  см<sup>-3</sup> при холловской подвижности  $\mu_p \simeq 90 \div 120$  см<sup>2</sup>/В·с. Разработанный режим позволял получать электрически однородные слои с толщинами 2÷4 мкм. На втором этапе на поверхность эпитаксиального слоя  $p^-$ -InP без какой-либо дополнительной ее обработки осаждалась слой CdS в проточной системе с использованием водорода. Температура в области источника CdS составляла обычно  $T_s \simeq 840^\circ\text{C}$ , а в зоне осаждения  $T_0 \simeq 700 \div 750^\circ\text{C}$ . Как показали измерения, концентрация свободных электронов в осажденных на поверхность  $p^-$ -InP слоях  $n^+$ -CdS сильно зависит от  $T_0$ . Концентрация электронов в слоях  $n^+$ -CdS, полученных при  $T_0 = 700 \div 730^\circ\text{C}$ , составляла  $n \simeq (3 \div 5) \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> при  $T = 300$  К. Указанный уровень легирования слоев CdS можно

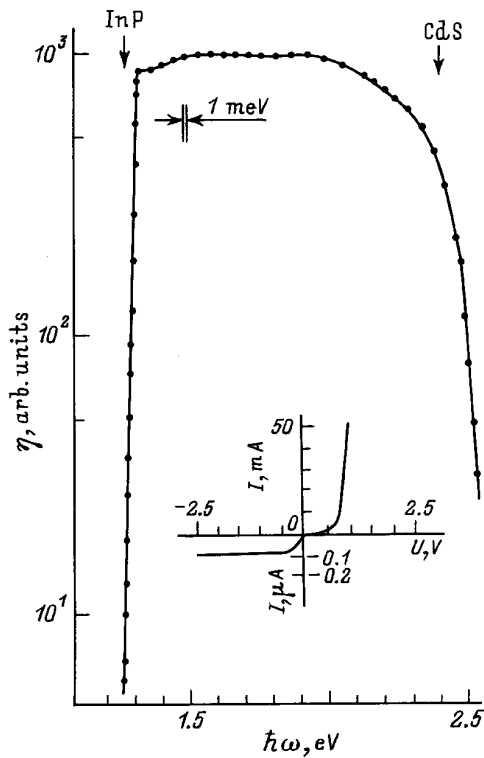
объяснить диффузией индия в образующиеся слои из подложек фосфида индия. Какого-либо влияния уровня легирования InP на концентрацию электронов в слоях  $n^+$ -CdS мы не обнаружили.

После формирования слоев  $n^+$ -CdS структуры  $(p^+ - p^-)$ -InP/ $n^+$ -CdS снабжались химическими контактами. На свободную поверхность подложки  $p^+$ -InP термическим напылением состава Ag + 5%Zn наносился слой толщиной  $\sim 0.1$  мм, а на свободную поверхность  $n^+$ -CdS также термическим напылением состава In + 5%Te через маску наносилась контактная сетка. После напыления контактов готовая структура подвергалась термической обработке при температуре  $\sim 250^\circ\text{C}$  в течение 5 ÷ 10 мин. Полученные таким образом структуры монтировались на стандартный кристаллодержатель.

Спектральные зависимости фотоэлектрических свойств полученных структур измерялись с помощью монохроматора SPM-2 с призмой из SiO<sub>2</sub>; излучение с необходимым положением электрического вектора световой волны **E** выделялось из естественного излучения посредством поляризационных фильтров со степенью поляризации  $\sim 100\%$  в исследованном спектральном диапазоне. Для изменения угла падения  $\theta$  линейно поляризованного излучения (ЛПИ) структуры крепились на столик Федорова. Спектральное разрешение установки было не хуже 1 мэВ, а угол падения контролировался с точностью  $\pm 1^\circ$ .

2. Как показывают измерения стационарных вольт-амперных характеристик, в полученных гетероструктурах наблюдается четкое выпрямление (вставка к рис. 1). Прямая вольт-амперная характеристика в области напряжений  $U > 0.7$  В следует соотношению

$$I = \frac{U - U_0}{R},$$

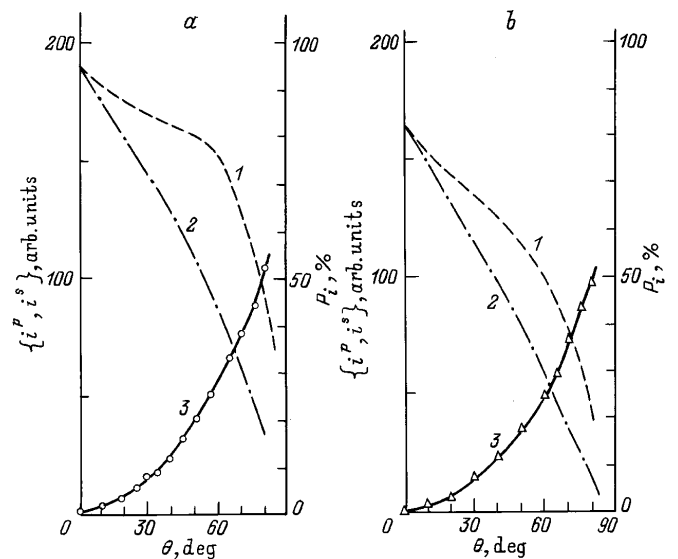


**Рис. 1.** Спектральная зависимость квантовой эффективности фоточувствительности гетероструктуры  $(p^+ - p^-)$ -InP/ $n^+$ -CdS при комнатной температуре. Образец 18-3. Стрелками показана ширина запрещенной зоны InP и CdS. На вставке — стационарные вольт-амперная характеристика.

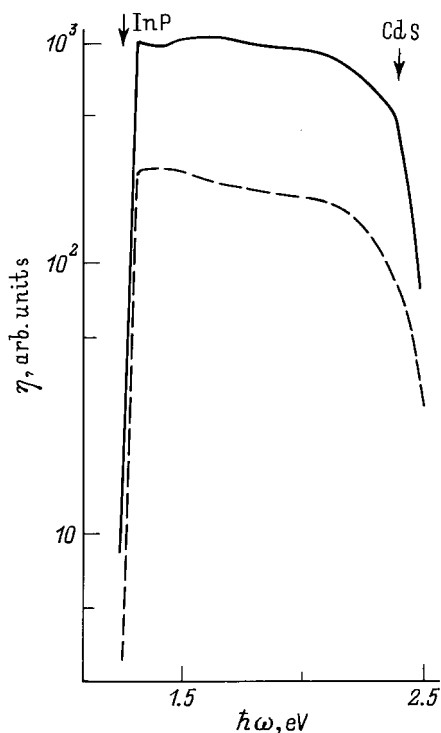
где напряжение отсечки  $U_0 \approx 0.7 \div 0.8$  В, а сопротивление  $R \approx 10 \div 20$  Ом при  $T = 300$  К. Ток насыщения при обратных смещениях до 2 В во всех структурах лежит на уровне  $10^{-7}$  А, а резкий пробой наблюдается при напряжениях  $> 3$  В. Типичная спектральная зависимость относительной квантовой эффективности, рассчитанной как отношение фототока короткого замыкания к числу падающих фотонов, для полученных гетероструктур в естественном (неполяризованном) излучении приведена на рис. 1. Видно, что высокая фоточувствительность ( $\eta$ ) реализуется в широкой спектральной области между значениями ширин запрещенных зон контактирующих материалов. Длинноволновый край спектра фоточувствительности отвечает межзонному фотоактивному поглощению в InP, он описывается экспонентой и характеризуется крутизной  $S \approx 80 \div 100$  эВ $^{-1}$ , что типично для прямых межзонных переходов. Коротковолновая граница фоточувствительности обусловлена появлением межзонного поглощения в широкозонном слое, когда область фотогенерации локализуется у его поверхности на расстояниях от активной области гетероструктуры, превышающих длину диффузионного смещения фотоэлектронов в  $n^+$ -CdS. Следует подчеркнуть, что фотоэлектрические параметры по-

лученных гетероструктур  $(p^+ - p^-)$ -InP/ $n^+$ -CdS оказались воспроизводимыми при неизменных технологических параметрах процесса. Максимальная токовая фоточувствительность этих структур достигает  $S_i \approx 0.13$  А/Вт при  $T = 300$  К. Столь высокое значение фоточувствительности удалось обеспечить в результате эпитаксиального выращивания слоя  $p^-$ -InP. В отсутствие такого слоя, а также при использовании пластин  $p$ -InP с ориентацией (111) величина токовой фоточувствительности  $S_i$  падает, как минимум, на порядок.

3. В случае освещения гетероструктур линейно поляризованным излучением вдоль нормали к поверхности CdS фототок короткого замыкания оказался независимым от положения плоскости поляризации падающего излучения. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что фотоактивное поглощение в области межзонных оптических переходов InP и CdS изотропно. Для фосфида индия, который имеет кубическую решетку сфалерита, это — очевидный результат, тогда как для анизотропного полупроводника CdS этот результат может быть обусловлен либо поликристаллической структурой слоя, либо совпадением нормали к поверхности с осью симметрии CdS, т.е. направлением [0001]. При отклонениях угла падения от нуля ( $\theta \neq 0^\circ$ ) поляризационные индикатрисы фототока короткого замыкания ( $i$ ) для всех гетероструктур обнаруживали периодическую зависимость от азимутального угла  $\varphi$  между вектором электрического поля волны  $\mathbf{E}$  и плоскостью падения (ПП). Эти зависимости следовали соотношению  $i_\varphi = i^p \cos^2 \varphi + i^s \sin^2 \varphi$ , где  $i^p$  и  $i^s$  — соответственно фототоки при  $\mathbf{E} \parallel$  ПП и  $\mathbf{E} \perp$  ПП. Вид



**Рис. 2.** Зависимости фототоков короткого замыкания при  $\mathbf{E} \parallel$  ПП (1) и  $\mathbf{E} \perp$  ПП (2) и коэффициента наведенного фотоплеохроизма (3) от угла падения излучения на поверхность структуры  $(p^+ - p^-)$ -InP/ $n^+$ -CdS при  $T = 300$  К. Образец 18-2. Длина волны, мкм: а — 0.92, б — 0.50.



**Рис. 3.** Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности гетероструктуры  $(p^+ - p^-)\text{-InP}/n^+\text{-CdS}$  в линейно поляризованном излучении при  $T = 300$  К. Образец 18-3.  $\theta = 75^\circ$ . 1 —  $\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$ , 2 —  $\mathbf{E} \perp \text{ПП}$ . Стрелками показана ширина запрещенной зоны InP и CdS.

поляризационных индикатрис был одинаков во всей области фоточувствительности структур, причем отношение  $i^p/i^s$  монотонно возрастало с увеличением  $\theta$  при фиксированной энергии фотонов.

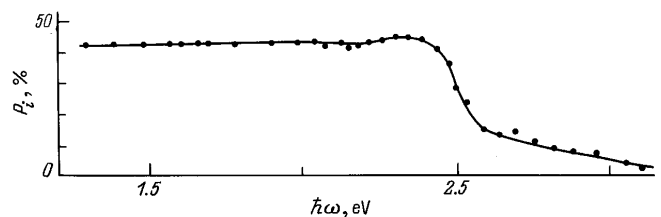
На рис. 2, а и б приведены типичные зависимости  $i^p(\theta)$  и  $i^s(\theta)$  для полученных гетероструктур при двух различных длинах волн из области фундаментального поглощения InP и CdS. Характер этих зависимостей был одинаков для всех гетероструктур и особенностью является то, что с ростом угла падения сразу вблизи  $\theta = 0^\circ$  наступает падение фототоков  $i^p$  и  $i^s$ , т.е. при обеих поляризациях излучения. Следовательно, в этих структурах не удалось наблюдать увеличения  $i^p$ . Рост  $i^p$  наблюдался нами ранее в случае структур, в которых приемная поверхность характеризовалась высоким оптическим качеством, — в соответствии с соотношениями Френеля в окрестности псевдо-брюстеровского угла фототок при  $\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$  достигал своего максимума [4]. При ухудшении оптического качества приемной поверхности в таких структурах рост  $i^p$  по мере увеличения  $\theta$  пропадал [5,6]. Поэтому обнаруженные для полученных гетероструктур особенности в зависимостях  $i^p(\theta)$  как раз и следует связывать с невысоким оптическим качеством отражающей свет плоскости структур. Можно думать, что дальнейший техноло-

гический поиск может позволить улучшить качество слоев, и тогда экспериментальные зависимости  $i^p(\theta)$  будут соответствовать соотношениям Френеля. В этой связи измерение поляризационных индикатрис фототока таких гетероструктур может быть использовано для экспрессной неразрушающей диагностики оптического качества слоев.

Из рис. 2, а и б также следует, что коэффициент фотоплекроизма, связанного с наклонным падением ЛПИ [7],  $P_i = (i^p - i^s)/(i^p + i^s)$  во всей области фоточувствительности находится в соответствии с теоретическим анализом явления [8] и подчиняется закону  $P_i \sim \theta^2$ . Из полученных зависимостей  $P_i(\theta)$  (кривая 3 на рис. 2, а, б) видно, что фотоплекроизм возникает только при  $\theta \neq 0^\circ$  и плавно нарастает с увеличением угла падения, достигая вблизи  $\theta \approx 80^\circ$  своего максимального значения  $P_i^m \approx 50\%$ . Из экспериментальных зависимостей  $P_i(\theta)$ , в соответствии с [8], показатель преломления  $n \approx 2.5$ , что отвечает известной для CdS величине [9]. Поэтому есть основания полагать, что основной вклад в  $P_i$  обеспечивается процессами прохождения ЛПИ сквозь поверхность CdS.

4. Типичные спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования при наклонном падении ЛПИ на примесную поверхность одной из гетероструктур приведены на рис. 3. Эти зависимости подобны полученным при освещении структур неполяризованным излучением, а изменение поляризации от  $\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$  к  $\mathbf{E} \perp \text{ПП}$  сопровождается смещением фототока вниз. Это смещение увеличивается по мере роста угла падения, причем во всей области фоточувствительности структур сохраняется соотношение  $i^p > i^s$ .

Коэффициент наведенного фотоплекроизма в области максимальной фоточувствительности гетероструктур по отношению к интенсивности света остается практически постоянным (рис. 4), а его величина может легко контролироваться выбором соответствующего угла падения. Спад фотоплекроизма в коротковолновой спектральной области согласуется с началом межзонного поглощения в широкозонном слое. Максимальная азимутальная фоточувствительность гетероструктур InP/CdS, которая реализуется в окрестности  $\varphi = 45^\circ$  [7], достигает



**Рис. 4.** Спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплекроизма гетероструктуры  $(p^+ - p^-)\text{-InP}/n^+\text{-CdS}$  при наклонном падении линейно поляризованного излучения на приемную поверхность.  $\theta = 75^\circ$ .

$\Phi_i^m \simeq 0.13$  А/Вт·град при  $T = 300$  К, что находится на уровне рекордных значений этого параметра для полупроводниковых поляриметрических структур [4]. Широкополосный характер квантовой эффективности фотопреобразования (рис. 1) и коэффициента фотоплеохроизма (рис. 4) позволяют считать, что разработанные для солнечных элементов гетероструктуры InP/CdS могут быть использованы и в качестве широкодиапазонных (1.3 ÷ 2.4 эВ) высокочувствительных фотоанализаторов линейно поляризованного излучения. Следует также отметить, что улучшение оптического качества наружной поверхности слоев CdS позволит обеспечить увеличение квантовой эффективности фотопреобразования вблизи псевдобрюстеровского угла и, следовательно, поднять приблизительно на 30% достигнутый в данной работе уровень азимутальной фоточувствительности.

structures exhibited a photosensitivity  $S_i \simeq 0.13$  A/W in spectral range from 1.3 to 2.4 eV at  $T = 300$  K. A polarization photosensitivity was observed under oblique illumination with linearly polarized light of the surface CdS of these structures. The induced photopleochroism coefficient of these structures was governed by the angle of incidence  $\theta$ . The photopleochroism increased proportionally to  $\theta^2$  and its maximum value was  $\sim 50\%$  at  $\theta \simeq 75-80^\circ$ . The maximum of azimuthal photosensitivity was  $\sim 0.13$  A/W·deg. Structures consisting of CdS on InP can find applications as polarimetric photodetectors.

## Список литературы

- [1] S. Wagner, J.L. Shay, K.J. Bachman, E. Buchler. Appl. Phys. Lett., **20**, 220 (1976).
- [2] S. Jasugava, J. Sakai. Sol. St. Electron., **20**, 133 (1977).
- [3] V.M. Botnariuc, L.V. Gorchak, G.N. Grigorieva, M.B. Kagan, T.A. Kozyreva, T.L. Lybasherskaya, E.V. Russu, A.V. Simoshkevich. Sol. Energy Mater., **20**, 359 (1990).
- [4] S.G. Konnikov, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', D.M. Melebaev, A. Berveliev, M. Serginov, S. Tilevov. Japan. J. Appl. Phys., **32**, 515 (1993).
- [5] Ю.В. Жилиев, Н. Назаров, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Л.М. Федоров. ФТП, **27**, 1610 (1993).
- [6] D. Melebaev, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud'. *Book Abstr. ICTMC-10* (Stuttgart, 1995).
- [7] Ю.В. Рудь. Изв. вузов. Физика, **29**, вып. 8, 68 (1986).
- [8] G.A. Medvedkin, Yu.V. Rud'. Phys. St. Sol. (a), **67**, 333 (1981).
- [9] *Физико-химические свойства полупроводниковых материалов* (М., Наука, 1978).

Редактор Л.В. Шаронова

## Photosensitivity of InP/CdS heterostructures in linearly polarized light

V.M.Botnaryuk,\* L.V.Gorchak,\* V.N.Pleshka,\*  
V.Yu.Rud',† Yu.V.Rud'

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

\*Moldovian State University,  
277028 Kishinev, Moldova

†State Technical University,  
195251 St.-Petersburg, Russia

**Abstract** Measurements were made of the photosensitivity of  $(p^+-p^-)$ -InP/ $n^+$ -CdS structures formed by growth of indium phosphide and cadmium sulfide films on  $p^+$ -InP substrates with (100) crystallographic orientation. These