

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР $n\text{-GaAs}-(n-p)\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-p\text{-Al}_{(y>x)}\text{Ga}_{1-y}\text{As}-p^+\text{-GaAs}$ С УЛЬТРАТОНКИМИ ПОВЕРХНОСТНЫМИ СЛОЯМИ

В. М. Андреев, В. С. Калиновский, М. М. Миланова,  
А. М. Минтаиров, В. Д. Румянцев, К. Е. Смекалкин, Е. О. Стругова

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 9.07.1992. Принята к печати 14.07.1992)

Исследованы зависимости темновых вольт-амперных характеристик и спектров фотоответа гетероструктур  $n\text{-GaAs}-(n-p)\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-p\text{-Al}_{(y>x)}\text{Ga}_{1-y}\text{As}-p^+\text{-GaAs}$  от состава фотоактивной области ( $x=0-0.7$ ), толщины и состава слоя широкозонного окна  $p\text{-Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $D=0-300$  х,  $y=0.85-0.95$ ) и толщины наружного слоя  $p^+\text{-GaAs}$  ( $d=0-300$  х). Установлено, что в таких структурах минимальные значения плотности обратных темновых токов  $j_d \approx 10^{-12}$  А/см<sup>2</sup> достигаются при  $x=0.3$  ( $T=300$  К), а максимальные значения коэффициента сбора фотогенерированных носителей в ультрафиолетовой области (при  $\lambda=400$  нм)  $Q_{uv}=0.75$  имеют место при  $d, D=70$  х,  $y=0.95$  и  $x=0$ . Показано, что увеличение ультрафиолетовой чувствительности в этом случае обусловлено аккумулярованием поверхностного объемного заряда в сильно легированном слое  $p^+\text{-GaAs}$  и минимизацией потерь, связанных с поглощением света в слое широкозонного окна и наружном слое  $p^+\text{-GaAs}$ .

Гетероструктуры  $(n-p)\text{-GaAs}-p\text{-AlGaAs}$  с узкозонной фотоактивной областью и широкозонным окном применяются при создании высокоэффективных солнечных элементов [1] и фотоприемников различных типов. Совершенствование и оптимизация таких структур для различных условий работы зависит от возможности варьирования спектрального положения полосы фоточувствительности и повышения обнаружительной способности. Принципиальным является вопрос о повышении коротковолновой фоточувствительности. Последняя радикальным образом зависит от толщины широкозонного окна  $D$  и его уровня легирования, причем, как показано в работе [2], при  $D < 300$  Å необходимо учитывать соотношение между приращением количества фотогенерированных носителей в активной области за счет уменьшения поглощения света в слое  $\text{AlGaAs}$  и снижением количества этих носителей за счет выброса или туннелирования через тонкий слой  $\text{AlGaAs}$  на поверхностные состояния. Очевидно, при увеличении (за счет увеличения доли  $\text{AlAs}$ ) ширины запрещенной зоны фотоактивной области будут существенным образом изменяться условия удержания в ней фотогенерированных носителей, поскольку высота потенциального барьера вблизи поверхности будет уменьшаться, а его конфигурация может изменяться. Таким образом, положение и форма коротковолнового спада фоточувствительности оказываются связанными с содержанием  $\text{AlAs}$  в области  $p-n$ -перехода. Варьирование содержания  $\text{AlAs}$  вместе с тем необходимо при оптимизации целого ряда приборов: широкозонных элементов в каскадных солнечных элементах; датчиков фиолетового и ультрафиолетового излучения с целью снижения их фоточувствительности в видимой и ИК области; фотодетекторов для сцинтилляционных датчиков высокоэнергетических частиц с целью согласования их полосы фоточувствительности с полосой люминесценции кристаллов-сцинтилляторов и повышения их

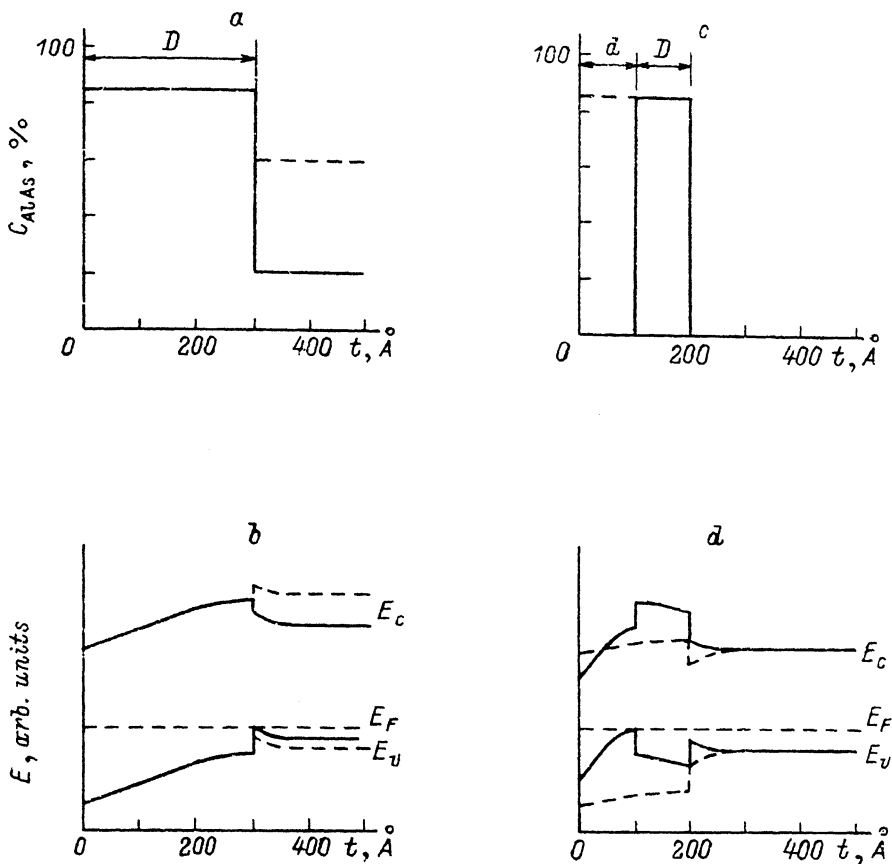


Рис. 1. Распределение содержания AlAs  $C_{AlAs}$  (a, c) и энергетические зонные диаграммы (b, d) вблизи поверхности в гетероструктурах  $n\text{-GaAs}-(n-p)\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-p\text{-Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}-p^+\text{-GaAs}$ .  $t$  — расстояние от поверхности структуры. a, b — структуры типа A:  $D=300 \text{\AA}$ ,  $d=0 \text{\AA}$ ; сплошная линия —  $x=0.2$ , штриховая —  $x=0.6$ ; c, d — структуры типа B:  $x=0$ ; сплошная линия —  $D=d=100 \text{\AA}$ , штриховая —  $D=200 \text{\AA}$ ,  $d=0 \text{\AA}$ .

обнаружительной способности за счет снижения темновых токов в  $p-n$ -переходе на основе более широкозонных материалов.

В настоящей работе представлены результаты исследования темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектров фотоответа гетероструктур  $n\text{-GaAs}-(n-p)\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-p\text{-Al}_{(y>x)}\text{Ga}_{1-y}\text{As}-p^+\text{-GaAs}$ , в которых толщины слоя широкозонного окна  $p\text{-Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $D$ ) и наружного слоя  $p^+\text{-GaAs}$  ( $d$ ) изменялись в диапазоне  $D, d=0-300 \text{\AA}$ , а содержание AlAs в области  $p-n$ -перехода варьировалось в пределах  $x=0-0.7$ . Установлено, что в таких структурах минимальные значения плотности обратных темновых токов  $j_d \approx 10^{-12} \text{ A/cm}^2$  достигаются при  $x=0.3$  ( $T=300 \text{ K}$ ), а максимальные значения коэффициента сбора фотогенерированных носителей в ультрафиолетовой области (при  $\lambda=400 \text{ nm}$ ), достигающие  $Q_{uv}=0.75$ , имеют место при  $d, D=70 \text{\AA}$  и  $x=0$ . Показано, что увеличение ультрафиолетовой чувствительности в этом случае обусловлено аккумулярованием поверхностного объемного заряда в сильно легированном наружном слое  $p^+\text{-GaAs}$  и минимизацией потерь, связанных с поглощением света в слое широкозонного окна и наружном слое  $p^+\text{-GaAs}$ .

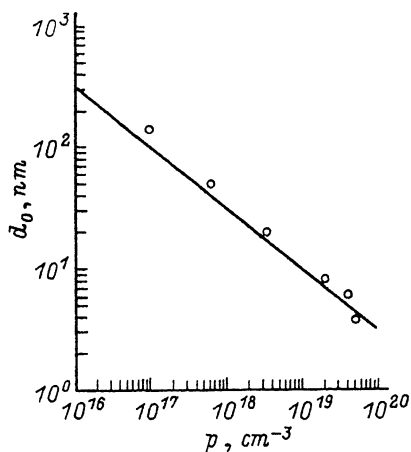


Рис. 2. Расчетная зависимость толщины  $d_0$  обедненного поверхностного слоя в  $p$ -GaAs от концентрации  $p$  свободных дырок. Точки — экспериментальные значения, полученные на эпитаксиальных образцах  $p$ -GaAs из анализа спектров комбинационного рассеяния света.

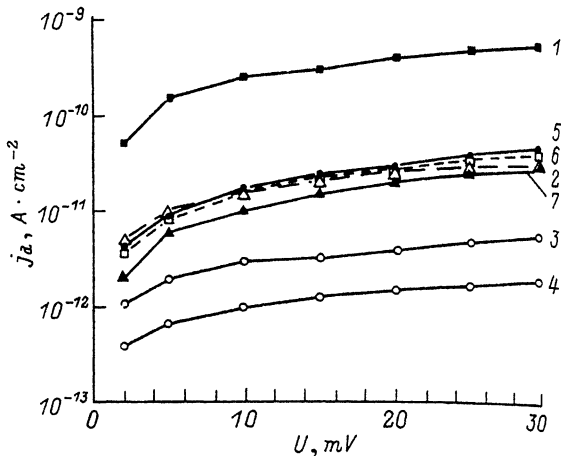


Рис. 3. Обратные ветви вольт-амперных характеристик гетероструктур  $(n-p)$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ - $p$ - $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ .  $x$ : 1 — 0, 2 — 0.05, 3 — 0.15, 4 — 0.3, 5 — 0.4, 6 — 0.55, 7 — 0.66.

### Экспериментальные образцы

Структуры  $n$ -GaAs— $(n-p)$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ — $p$ - $\text{Al}_{(y > x)}\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ — $p^+$ -GaAs выращивались на подложках  $n^+$ -GaAs методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии [3]. Слой широкозонного окна кристаллизовался в интервале температур от  $T = 450$ — $470$  °C (начало) до  $T = 400$ — $410$  °C при скорости охлаждения 0.5 град/мин. В качестве легирующих примесей использовались Sn для получения  $n$ -типа, Ge и Mg — для получения  $p$ -типа проводимости, причем Ge — при выращивании GaAs и твердых растворов с низким содержанием AlAs ( $x < 0.3$ ), а Mg — для твердых растворов с  $x, y > 0.3$ . Концентрации свободных носителей в области  $p$ - $n$ -перехода составляли  $n \approx 10^{17}$  и  $p \approx 5 \cdot 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$ ; в слое  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  —  $p \approx 1 \cdot 10^{18}$   $\text{см}^{-3}$  и в наружном сильно легированном слое GaAs —  $p^+ \approx 10^{19}$   $\text{см}^{-3}$ . Глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода составляла 1—1.5 мкм. Контроль толщин, состава и концентраций свободных носителей слоев  $p$ - $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  и  $p^+$ -GaAs осуществлялся методом комбинационного рассеяния света [4]. Измерения распределения состава по толщине структур показали, что при  $y > 0.9$  между слоями  $p$ - $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  и  $p^+$ -GaAs имеется переходный слой толщиной 30—40 Å с содержанием AlAs  $\approx 50\%$ , что связано с особенностями кристаллизации при замене расплава с большим количеством алюминия.

Были исследованы два набора структур: структуры типа А — с различным содержанием AlAs в фотоактивной области, включающей в себя  $p$ - $n$ -переход ( $x = 0, 0.05, 0.15, 0.3, 0.4, 0.55, 0.66$ ),  $D = 300$  Å ( $y = 0.8$ ), без наружного слоя  $p^+$ -GaAs; структуры типа Б — с  $x = 0$ , но с различной толщиной слоя широкозонного окна  $D = 70, 100, 200$  Å ( $y = 0.85, 0.95$ ), и наружного слоя  $p^+$ -GaAs —  $d = 0, 70, 100$  Å. Структуры типа А имели на поверхности просветляющее покрытие. Для формирования такого покрытия использовались структуры с исходными толщинами  $d \approx 200$  Å и  $D \approx 800$  Å, у которых наружный слой  $p^+$ -GaAs и частично по толщине слой широкозонного окна анодно окислялись по площади поверхности, свободной от контактов. Для структур типа Б про-

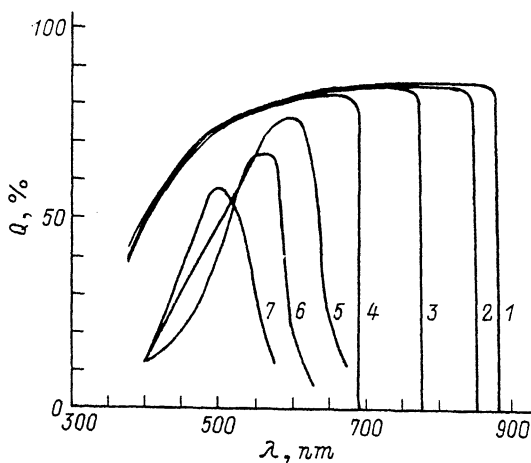


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициента сбора  $Q$  для фотоэлементов на основе гетероструктур  $(n-p)\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-p\text{-Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ . Нумерация кривых и значения  $x$  в слоях  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  соответствуют рис. 3.

водились измерения коэффициента отражения при  $\lambda = 375\text{--}900$  нм, которые использовались для расчета внутреннего коэффициента сбора фотогенерированных носителей.

Распределение АІАs и энергетические зонные диаграммы вблизи поверхностной области структур типов А ( $x = 0.2$  и  $0.6$ ) и В ( $d = 0$ ,  $D = 200 \text{ \AA}$  и  $d = D = 100 \text{ \AA}$ ) приведены на рис. 1, а— $d$ . При построении зонных диаграмм использовались значения ширины запрещенной зоны  $E_g$  и разрывов зон в гетеропереходе  $\Delta E_v$  и  $\Delta E_c$  из работы [5]. Толщины обедненного поверхностного слоя  $p\text{-GaAs}(d_0)$  и  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(D_0)$  рассчитывались по стандартной формуле для случая постоянной плотности объемного заряда [6] при значении поверхностного потенциала  $\varphi_0 = 0.5 E_g$ . Для  $p\text{-GaAs}$   $d_0[\text{нм}] = 31.8 \cdot 10^9 \cdot (p[\text{см}^{-3}])^{-0.5}$ . По спектрам комбинационного рассеяния света нами были проведены измерения зависимости толщины поверхностного обедненного слоя  $p\text{-GaAs}$  от концентрации свободных дырок на эталонных образцах  $p\text{-GaAs}$ , легированных Ge и Si, согласно методике, предложенной в [7]. Результаты измерений приведены на рис. 2, и наблюдается хорошее согласие измеренных и рассчитанных значений  $d_0$ . Как видно из рис. 2, для концентраций свободных дырок  $p = 10^{18}$  и  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  толщина слоя поверхностного объемного заряда в GaAs составляет  $\approx 400$  и  $\approx 100 \text{ \AA}$  и, таким образом, сравнима с толщинами поверхностных слоев исследуемых структур. Как видно из рис. 1, б (структура типа А), когда фотоактивная область образована твердым раствором с непрямой структурой зон ( $x = 0.6$ ), на гетерогранице имеется отрицательный скачок потенциала (по отношению к узкозонной области) в зоне проводимости, т. е. здесь отсутствует потенциальный барьер, удерживающий фотогенерированные электроны в узкозонной области. Для структур типа В (рис. 1,  $d$ ) экранировка поверхностных состояний сильно легированным слоем  $p^+\text{-GaAs}$  для  $d \approx d_0$  создает потенциал, выталкивающий электроны, фотогенерированные в широкозонном слое и фотоактивной области, в сторону  $p\text{--}n$ -перехода.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На образцах типа А исследовались зависимости плотности обратных темновых токов и спектров фоточувствительности от содержания АІАs в области  $p\text{--}n$ -перехода. На рис. 3 представлены обратные ветви темновых ВАХ образцов с  $x = 0, 0.05, 0.15, 0.3, 0.4, 0.55$  и  $0.67$  (кривые 1—7 соответственно) при комнатной

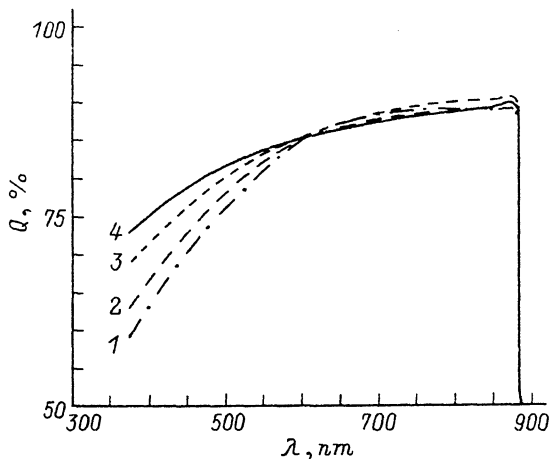


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициента сбора  $Q$  для фотоэлементов на основе гетероструктур  $(n-p)\text{-GaAs-p-Al}_x\text{Ga}_{1-y}\text{As-p}^+\text{-GaAs}$ .  $D, d, x$ : 1 — 200, 0; 2 — 100, 100; 3 — 70, 70; 4 — 70, 70.  $y$ : 1—3 — 0.85, 4 — 0.95.

температуре. Как видно из рис. 3, наблюдаются резкие изменения значений  $j_d$  с увеличением содержания AlAs в области  $p-n$ -перехода: уменьшение  $j_d$  на два порядка при увеличении  $x$  в диапазоне 0—0.3 до значений  $j_d < 10^{-12}$  А/см<sup>2</sup> (кривые 1—4), затем увеличение  $j_d$  на порядок при приближении к области непрямозонных составов с  $x=0.4$  (кривая 5) и последующее уменьшение  $j_d$  в  $\sim 2$  раза при увеличении  $x$  до 0.7 (кривые 6—7). Возрастание темновых токов, наблюдаемое при переходе в область непрямозонных составов, свидетельствует, по-видимому, о кристаллическом несовершенстве твердых растворов с большим содержанием AlAs.

В спектрах фотоответа этих же образцов (рис. 4) при увеличении  $x$  в области  $p-n$ -перехода наблюдалось смещение длинноволновой границы и спектрального положения максимума фоточувствительности в сторону больших энергий фотонов в соответствии с изменением ширины запрещенной зоны  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Высокие значения коэффициента сбора фотогенерированных носителей в максимуме  $Q_{\max} \approx 0.85$  (при  $\lambda = 500\text{--}900$  нм) и в области ультрафиолетового края  $Q_{uv} \approx 0.5$  (при  $\lambda = 400$  нм) сохраняются при увеличении  $x$  до 0.3 (кривые 1—4). При больших  $x$  (кривые 5—7) происходит уменьшение  $Q_{\max}$  и  $Q_{uv}$  до значений 0.6 и 0.1 соответственно, что, по-видимому, как раз и обусловлено ухудшением условий сбора фотогенерированных носителей из фотоактивной области (рис. 1, б) вследствие исчезновения в этом случае потенциального барьера, препятствующего движению электронов к поверхности структуры.

На рис. 5 для структур  $n\text{-GaAs-(}n-p\text{)-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-p-Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As-p}^+\text{-GaAs}$  типа Б (при  $x=0$ ) представлена зависимость спектров фотоответа от толщин поверхностных слоев  $p\text{-Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  и  $p^+\text{-GaAs}$  (кривые 1—3) и от состава широкозонного слоя, т. е. от  $y$  (кривые 3—4). Из сопоставления спектров 1 ( $D=200$  Å,  $d=0$  Å) и 2 ( $D=d=100$  Å) видно, что при одинаковой суммарной толщине поверхностных слоев в структурах с ультратонким наружным слоем  $p^+\text{-GaAs}$  ( $d=100$  Å) наблюдается увеличение ультрафиолетовой чувствительности примерно на 10%. Измерения спектров фотоответа этих структур после удаления слоя толщиной 100 Å с поверхности (т. е. когда для обеих структур  $D=100$  Å,  $d=0$  Å) показали, что для первой структуры спектр не изменяется, в то время как для второй чувствительность в ультрафиолетовой области уменьшается до значений, соответствующих первой структуре. Таким образом, увеличение ультрафиолетовой чувствительности во второй структуре обусловлено экранировкой

поверхностных состояний сильно легированным слоем  $p^+$ -GaAs (рис. 1,  $d$ ), несмотря на то что само присутствие этого слоя несомненно вносит некоторое дополнительное неактивное поглощение коротковолнового излучения.

Как видно из сопоставления спектров 2—4 на рис. 5, дальнейшее увеличение ультрафиолетовой чувствительности гетероструктур  $n$ -GaAs— $(n-p)$ - $Al_xGa_{1-x}As-p-Al_{(y>x)}Ga_{1-y}As-p^+$ -GaAs может быть достигнуто за счет минимизации потерь на поглощение возбуждающего света, т. е. путем уменьшения толщин слоев и увеличения содержания AlAs, что позволяет при  $D=d=70$  нм (при этом процессы туннелирования фотогенерированных носителей на поверхность еще не существенны [2]) и  $y=0.95$  (кривая 4) получить значения внутреннего коэффициента собирания в ультрафиолетовой области  $Q_{uv}=0.75$ . Отметим, что использование поверхностного слоя  $p^+$ -GaAs облегчает изготовление омических контактов и обеспечивает коррозионную стойкость широкозонного слоя, что позволяет поднять содержание AlAs в этом слое до значения  $y=0.95$ .

Таким образом, проведенные исследования показали, что в гетероструктурах  $n$ -GaAs— $(n-p)$ - $Al_xGa_{1-x}As-p-Al_{(y>x)}Ga_{1-y}As-p^+$ -GaAs, полученных методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии, увеличение содержания AlAs в области  $p-n$ -перехода до  $x=0.3$  позволяет получить значения плотности обратных темновых токов на уровне  $10^{-12}$  А/см<sup>2</sup>, а использование ультратонкого наружного слоя  $p^+$ -GaAs, аккумулирующего поверхностный объемный заряд, — значения внутреннего коэффициента собирания в ультрафиолетовой области  $Q_{uv}=0.75$ , что открывает перспективы применения таких структур в солнечных элементах и фотоприемниках различного назначения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. М. Андреев, В. А. Грилихес, В. Д. Румянцев. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения, 309. Л. (1989).
- [2] В. М. Андреев, А. А. Воднев, В. Р. Ларионов, Т. А. Пруцких, В. Д. Румянцев, К. Я. Расулов, В. П. Хвостиков. ФТП, 23, 597 (1989).
- [3] Ж. И. Алфёров, К. Ю. Погребницкий, В. М. Андреев, А. А. Воднев, С. Г. Конников, В. Р. Ларионов, В. Д. Румянцев, В. П. Хвостиков. Письма ЖТФ, 12, 1083 (1986).
- [4] В. Р. Ларионов, А. М. Минтаиров, К. Е. Смекалин, В. П. Хвостиков. Электронная техника, Сер. Материалы, вып. 4 (258), 38 (1991).
- [5] J. Batley, S. L. Wright. J. Appl. Phys., 50, 200 (1986).
- [6] Р. Смит. Полупроводники, 558. М. (1982).
- [7] R. Fukasawa, M. Wakaki, K. Ohta, H. Okumura. Japan. J. Appl. Phys., 25, 652 (1986).

Редактор Л. В. Шаронова