

Фоточувствительность гетерофотоэлементов GaAlAs/GaAs в линейно поляризованном свете

© В.Ю. Рудь*, Ю.В. Рудь, В.П. Хвостиков

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

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

(Получена 20 июля 1998 г. Принята к печати 28 июля 1998 г.)

Исследована поляризационная фоточувствительность гетерофотоэлементов GaAlAs/GaAs двух типов. Показано, что в гетерофотоэлементах без просветляющего покрытия наведенный фотоплетохроизм определяется оптическими процессами на границе воздух–поверхность GaAlAs, а угловые зависимости фототоков короткого замыкания описываются соотношениями Френеля. Установлено, что в гетерофотоэлементах с антиотражающим покрытием угловые зависимости фототоков для *s*- и *p*-поляризаций близкие и обнаруживают рост с увеличением угла падения. В области просветления в спектре коэффициента наведенного фотоплетохроизма наблюдается падение до нуля. Показано, что гетерофотоэлементы без просветляющего покрытия могут использоваться как широкополосные фотоанализаторы с максимальной азимутальной фоточувствительностью до 0.1 А/Вт·град при угле падения, равном 75°, а поляризационная спектроскопия фоточувствительности позволяет вести экспрессную диагностику эффекта просветления в тонкопленочных солнечных элементах.

Работы по созданию и исследованиям фотоэлектрических явлений в гетерофотоэлементах (ГФ) GaAlAs/GaAs традиционно сориентированы на достижение высокой квантовой эффективности фотопреобразования солнечного света [1–4]. Поэтому фотоэлектрические свойства гетеропереходов, созданных на основе изотропных полупроводников GaAs и GaAlAs, изучаются обычно с применением неполяризованного света. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований фоточувствительности ГФ GaAlAs/GaAs в линейно поляризованном излучении (ЛПИ), что в итоге позволило вскрыть новые возможности применения поляризационной фотоэлектрической спектроскопии для диагностики качества готовых структур и указать на новую область применения этих ГФ.

Исследованные ГФ выращивались при температурах ≈ 550–750°С методом жидкофазной эпитаксии из растворов–расплавов системы Ga–Al–As. В качестве подложек использовались ориентированные в плоскости (100) пластины GaAs:Sn с концентрацией свободных электронов до 10¹⁸ см⁻³ при *T* = 300 К. Выращенные слои, согласно микронзондовым исследованиям, имели состав Ga_{0.15}Al_{0.85}As и их толщина *d*₁ ≈ 0.15 мкм. Концентрация дырок в широкозонных слоях за счет легирования примесью магния достигала 10¹⁸ см⁻³. В созданных на основе таких ГФ солнечных элементах были достигнуты КПД 24.6% (АМО, 100 Солнц) и 27.5% (АМ 1.5, 100 Солнц) [4].

Фотоэлектрические измерения проводились на двух типах ГФ. В одном из них излучение падало непосредственно на поверхность эпитаксиального слоя Ga_{0.15}Al_{0.85}As (А-тип). В другом типе ГФ (В-тип) поверхность широкозонного слоя с целью снижения потерь на отражение подвергалась анодному окислению в нейтральной среде [5], в результате чего на поверхности широкозонного слоя формируется однослойное

антиотражающее покрытие. Площадь исследованных ГФ составляла ≈ 50–100 мм².

1. В неполяризованном излучении спектральные зависимости токовой фоточувствительности *S*_{*i*} обоих типов ГФ, как видно из рис. 1, во многом оказываются сходными. Действительно, длинноволновый край фоточувствительности в них одинаковый и описывается экспоненциальным законом, из которого следует, что его крутизна $s = \delta(\ln S_i) / \delta(\hbar\omega)$ в таких ГФ соответствует прямым оптическим переходам в материале подложки. Энергетическое положение длинноволнового края фоточувствительности и излома $\hbar\omega_1$ отвечают межзонному поглощению в GaAs, а разброс значений $\hbar\omega_1$ в диапазоне 1.40–1.44 эВ, вероятно, обусловлен некоторой растворимостью Al в активной области ГФ. Наблюдаемые различия в полной ширине спектров фоточувствительности на их полувысоте $\delta_{1/2}$, диапазоне максимальной фоточувствительности $\Delta\hbar\omega_m$ и ее коротковолнового спада, представленного в таблице как отношение фототоков короткого замыкания при $\hbar\omega = 2.5$ эВ — *I*_{2.5} к его максимальному значению *I*_{*m*}, определяются для исследованных структур рекомбинацией в области интерфейса и оптическими потерями в слоях анодного окисла. Наиболее высокая максимальная фоточувствительность

Фотоэлектрические свойства ГФ *p*-Ga_{0.15}Al_{0.85}As при *T* = 300 К

Тип ГФ	№ образца	$\hbar\omega_1$, эВ	<i>s</i> , эВ ⁻¹	$\delta_{1/2}$, эВ	$\Delta\hbar\omega_m$, эВ	<i>I</i> _{2.5} / <i>I</i> _{<i>m</i>}	<i>S</i> _{<i>i</i>} ^м , мА/Вт
А	1	1.40	190	1.45	1.40–1.68	0.65	80
В	2	1.40	115	1.10	1.55–1.65	0.53	10
В	3	1.40	190	0.88	1.40–1.63	0.32	48
В	4	1.44	80	1.17	1.55–1.72	0.67	33
В	5	1.40	90	1.04	1.50–1.65	0.41	58

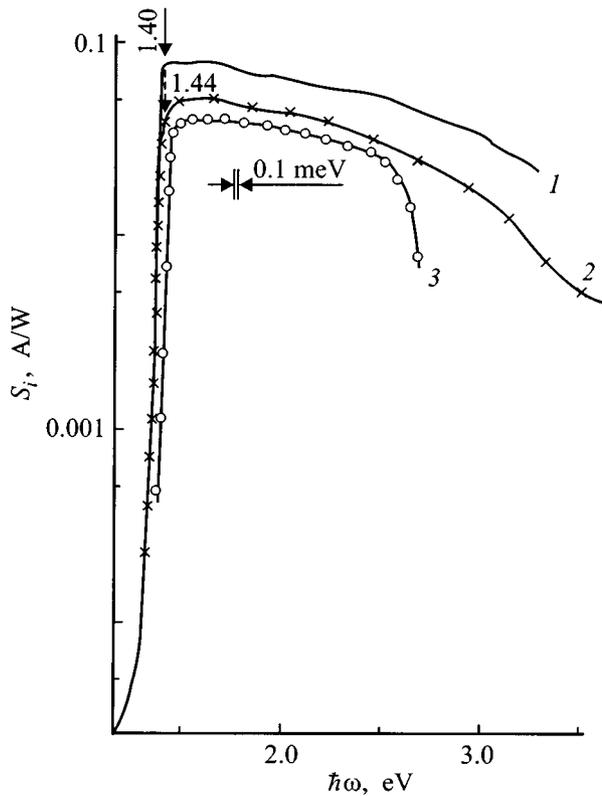


Рис. 1. Спектральные зависимости токовой фоточувствительности ГФ GaAlAs/GaAs (1) и Ox/GaAlAs/GaAs (2 — образец 3, 3 — образец 4) при $T = 300$ К в естественном излучении.

S_j^m наблюдается в ГФ А-типа (рис. 1, таблица), тогда как в ГФ В-типа имеется значительный разброс значений фотоэлектрических параметров, обусловленный в основном колебаниями свойств слоя окисла и активной области ГФ.

Из рис. 1 также видно, что в обоих типах ГФ спектральные зависимости фоточувствительности не проявляют заметных осцилляций, обычно сопутствующих интерференции падающего излучения в тонких слоях достаточно высокого качества [6,7].

2. При освещении ГФ линейно поляризованным излучением вдоль нормали к плоскости широкозонного слоя фоточувствительность обоих типов структур не обладала явной зависимостью от положения электрического вектора световой волны \mathbf{E} относительно главных кристаллографических осей в подложках GaAs, что соответствует изотропному характеру оптических процессов в кубических полупроводниках и заодно указывает на отсутствие существенных одноосных деформаций эпитаксиальных слоев GaAlAs.

Поляризационная фоточувствительность обнаруживается только при наклонном падении ЛПИ на приемную плоскость (001) ГФ. В ходе этих исследований было обнаружено, что если в неполяризованном излучении закономерности фотоэлектрических процессов для обо-

их типов ГФ были близкими (рис. 1), то в линейно поляризованном излучении фотоэлектрические явления явно зависят от типа ГФ.

На рис. 2 приводятся типичные для ГФ А-типа зависимости фототоков короткого замыкания i^P , когда вектор \mathbf{E} совмещен с плоскостью падения (ПП) ЛПИ ($\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$) и i^S ($\mathbf{E} \perp \text{ПП}$) от угла падения Θ при фиксированной энергии фотонов в области фоточувствительности структур. Видно, что при $\Theta > 0^\circ$ возникает неравенство $i^P > i^S$ с существенными отличиями в угловых зависимостях $i^P(\Theta)$ и $i^S(\Theta)$. Действительно, фототок i^P вначале возрастает, достигает максимума вблизи $\Theta \approx 55^\circ$, а затем спадает. В то же время фототок i^S обнаруживает плавное понижение с ростом Θ в диапазоне от 0 до 90° . Такое поведение соответствует ожидаемому из анализа процессов прохождения излучением s - и p -поляризаций границы воздух–приемная плоскость структуры на основании соотношений Френеля [8,9] и отмечалось ранее при исследованиях поляризационной фоточувствительности барьеров Шоттки [10,11]. Согласно этим исследованиям, увеличение i^P следует связывать с устранением потерь на отражение излучения p -поляризации, тогда как для s -поляризации такой эффект отсутствует. Коэффициент

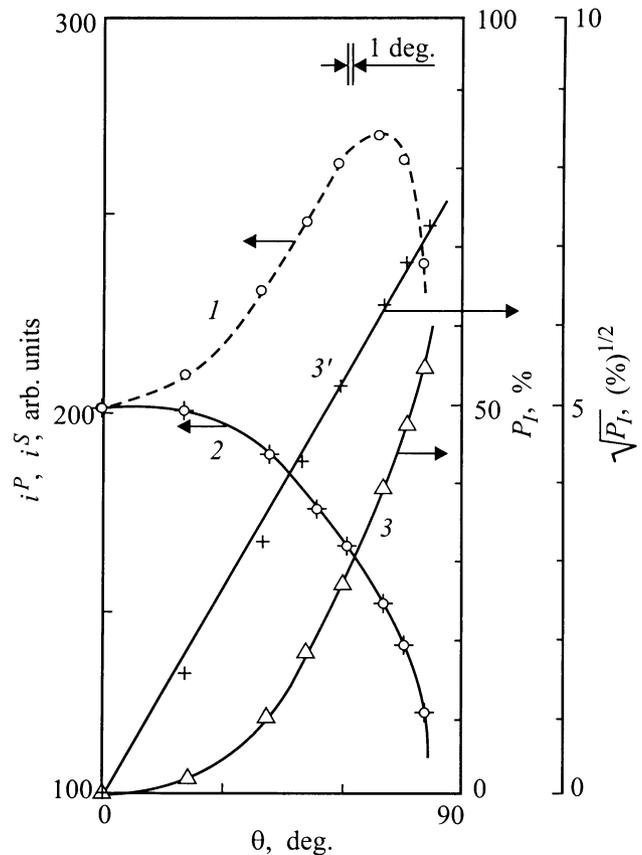


Рис. 2. Зависимости фототоков короткого замыкания (i^P — 1, i^S — 2) и коэффициента наведенного фотопоглощения (3, 3') ГФ GaAlAs/GaAs от угла падения ЛПИ на поверхность слоя GaAlAs ($\hbar\omega = 1.41$ эВ, $T = 300$ К, образец 1).

наведенного фотоплеохроизма

$$P_I = \{(i^P - i^S)/(i^P + i^S)\} \times 100\% \quad (1)$$

для ГФ А-типа, как видно из рис. 2 (кривые 3 и 3'), увеличивается с ростом угла падения ЛПИ по параболическому закону $P_I \sim \Theta^2$ в полном соответствии с [12]. Представленные закономерности в угловых зависимостях фототоков и наведенного фотоплеохроизма оказались характерными для ГФ А-типа во всей области их фоточувствительности.

Согласно теоретическому рассмотрению, коэффициент наведенного фотоплеохроизма пропорционален показателю преломления n среды, на которую падает ЛПИ [12]. Поэтому из значения $P_I \simeq 56-58\%$ при $\Theta = 80^\circ$ на основании [12] можно оценить показатель преломления для широкозонного слоя в ГФ А-типа $n \simeq 3.2$ при $\hbar\omega = 1.40$ эВ, что находится в хорошем согласии с данными эллисометрии [13].

В структурах В-типа, снабженных просветляющим в диапазоне длин волн 0.5–0.75 мкм однослойным покрытием из анодного окисла, угловые зависимости фототоков и P_I оказываются совершенно другими по отношению к ГФ А-типа. Типичные примеры таких зависимостей приведены на рис. 3 при нескольких длинах волн в области фоточувствительности таких ГФ. Закономерности этих зависимостей состоят в следующем.

Угловые зависимости фототоков для обеих поляризаций ЛПИ оказываются сходными между собой и свидетельствуют об устранении потерь на отражение как для p -, так и для s -поляризаций одновременно, что не соответствует результатам анализа процессов прохождения ЛПИ границы двух сред на основании соотношений Френеля [8,9]. Из рис. 3 можно также видеть, что с изменением энергии падающих фотонов изменяется и значение угла Θ , при котором достигаются максимумы в зависимостях $i^P(\Theta)$ и $i^S(\Theta)$, а также зазор между этими кривыми при одинаковых значениях Θ . Поскольку неравенство $i^P > i^S$ сохраняется во всем диапазоне фоточувствительности ГФ В-типа, коэффициент наведенного фотоплеохроизма остается положительным ($P_I > 0$), однако его величина, вопреки [12], начинает явно зависеть от энергии фотонов. Поэтому можно утверждать, что теряется предсказываемая теорией однозначная связь $P_I \sim n$ [12]. Такое поведение коэффициента фотоплеохроизма с учетом результатов [6,7] является следствием интерференционного просветления, которое в анализе [12] не учитывалось вообще.

На рис. 4 приводятся типичные спектральные зависимости P_I для ГФ А- (кривая 1) и В-типа (кривые 2 и 3). Обратим внимание на принципиальное различие в характере спектральных зависимостей поляризационной фоточувствительности в сравниваемых типах ГФ.

В случае ГФ без анодного окисла (А-тип) коэффициент наведенного фотоплеохроизма при $\Theta = 75^\circ$ в длинноволновой области спектра (1–2 эВ) слабо изменяется в пределах 48–50%, затем плавно возрастает до 60%,

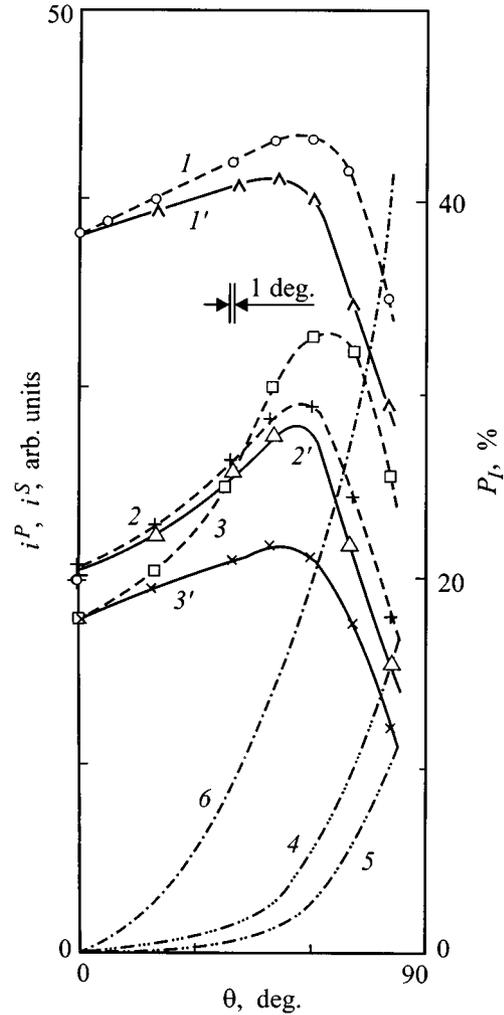


Рис. 3. Зависимости фототоков короткого замыкания (i^P — 1–3, i^S — 1'–3') и коэффициента наведенного фотоплеохроизма (4–6) ГФ Ох/GaAlAs/GaAs от угла падения ЛПИ на поверхность слоя анодного окисла — Ох. (Образец 4; $T = 300$ К; $\hbar\omega$, эВ: 1, 1', 4 — 1.41, 2, 2', 5 — 2.07, 3, 3', 6 — 2.75).

оставаясь на этом уровне практически постоянным в области 2.8–3.4 эВ, и, наконец, при $\hbar\omega > 3.5$ эВ начинает спадать до $\simeq 50\%$. Следует отметить, что спектральная зависимость P_I в ГФ А-типа коррелирует с характером аналогичной зависимости n для эпитаксиальных слоев твердого раствора AlGaAs с близким атомным составом [13], причем оценки показателя преломления из поляризационных измерений фоточувствительности с учетом [12] согласуются с экспериментальными данными [13].

С переходом к ГФ В-типа в спектральных зависимостях P_I возникает характерный "провал", в пределах которого фотоплеохроизм остается близким к нулю. Такое исчезновение наведенного фотоплеохроизма с учетом [6] следует связывать с эффектом просветления поверхности ГФ однослойным анодным окислом. Следует

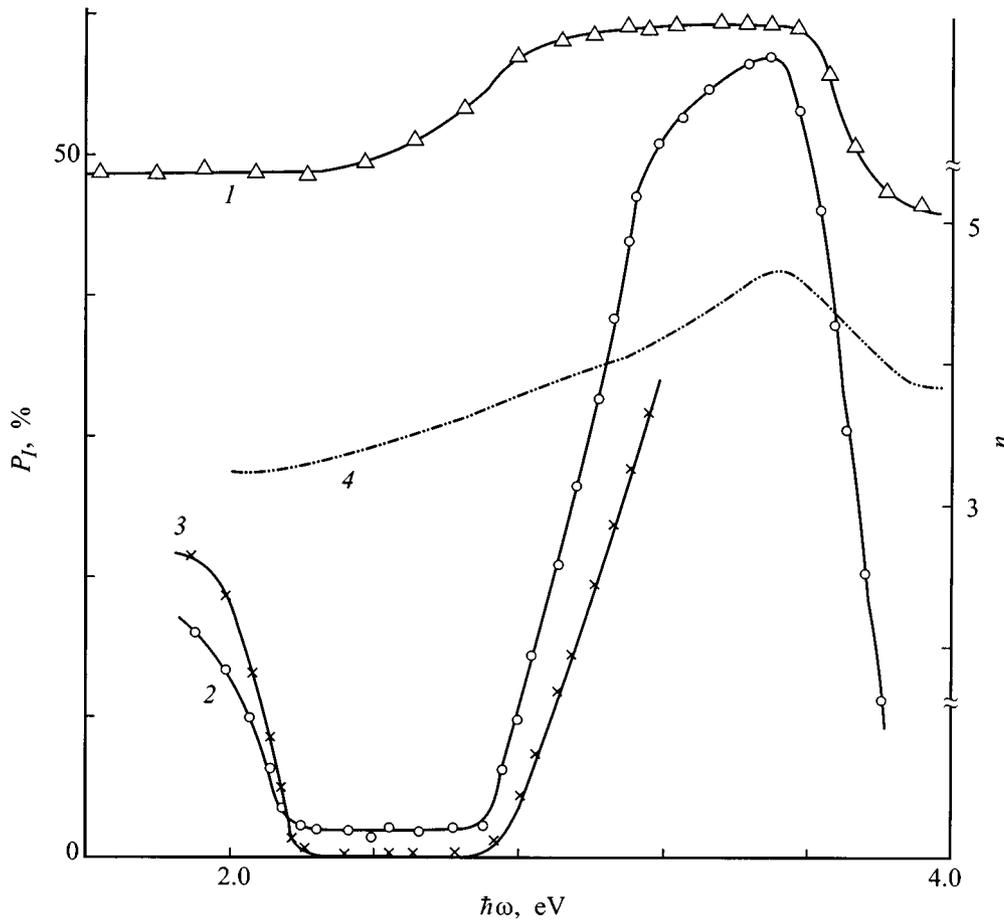


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплетохроизма ГФ (1–3) и показателя преломления $\text{Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ (4 — данные из работы [13]) при $T = 300$ К (тип ГФ: 1 — $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$, образец 1; 2 — $\text{Ox}/\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$, образец 4; 3 — $\text{Ox}/\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$, образец 2).

подчеркнуть, что спектральный диапазон, в пределах которого выполняется критерий $P_I \rightarrow 0$, совпадает с полученным из измерений коэффициента отражения ($R \rightarrow 0$) от таких же слоев. Различия в спектральном диапазоне, где достигается минимум P_I , наряду с различиями в величинах P_I в области этого минимума для двух различных ГФ В-типа (рис. 4, кривые 2 и 3) демонстрируют возможности поляризационной спектроскопии фоточувствительности для диагностики спектрального контура и величины эффекта просветления в готовых солнечных элементах с нанесенной на их прежную плоскость контактной сеткой. Из рис. 4 можно также видеть, что вне диапазона просветления коэффициент наведенного фотоплетохроизма увеличивается, стремясь к свойственным для ГФ без антиотражающего покрытия значениям P_I .

Таким образом, в отсутствие антиотражающего покрытия и без каких-либо изменений доведенного до высокого совершенства технологического процесса создания [4] ГФ $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$ пригодны для применения в качестве высокочувствительных фотоанализаторов линейно поляризованного излучения с максимальной ази-

мутальной фоточувствительностью $\Phi_I^n \approx 0.1$ А/Вт·град ($T = 300$ К, $\Theta = 75^\circ$) в широком спектральном диапазоне от 1 до 3.5 эВ. С другой стороны, также укажем, что поляризационная спектроскопия фоточувствительности снабженных антиотражающим покрытием солнечных элементов (на примере $\text{Ox}/\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$) позволяет проводить экспрессную неразрушающую диагностику эффекта просветления в готовых солнечных элементах, осуществляя тем самым совершенствование технологического процесса, а также выбор материала и параметров просветляющих покрытий, что особенно важно для случая многослойных покрытий. Достаточно высокая локальность предлагаемой фотоэлектрической методики (диаметр светового зонда около 0.2 мм) позволяет контролировать однородность эффекта просветления по всей фотоприемной площади солнечного элемента в присутствии контактной сетки и независимо от структуры поверхности фронтального слоя фотопреобразователя.

Авторы признательны проф. В.М. Андрееву за поддержку настоящей работы и полезные обсуждения ее результатов.

Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров. ФТП, **11**, 2072 (1977).
- [2] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, Е.Л. Портной, Н.И. Протасов. ФТП, **3**, 1324 (1969).
- [3] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, Н.С. Зимогорова, Д.Н. Третьяков. ФТП, **3**, 1633 (1969).
- [4] V.M. Andreev, A.B. Kazantsev, V.P. Khvostikov, E.V. Paleeva, V.D. Rumyantsev, M.Z. Shvarts. *Proc. First WCEPSEC* (Hawaii, USA, Dec. 5–9, 1994) p. 2096.
- [5] Н. Hosegawa, К.Е. Forward, Н. Hartnagel. *J. Electron. Lett.*, **6**, 11 (1975).
- [6] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **31**, 309 (1997).
- [7] В.М. Ботнарюк, А.В. Коваль, А.В. Симашкевич, В.А. Щербань, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **31**, 800 (1997).
- [8] Г.С. Ландсберг. *Оптика* (М., Наука, 1976).
- [9] Р. Аззам, М. Башара. *Эллипсометрия и поляризованный свет* (М., Мир, 1981).
- [10] С.Г. Конников, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, М. Сергинов. *Письма ЖТФ*, **18**, 39 (1992).
- [11] С.Г. Конников, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, Л.М. Федоров. *Письма ЖТФ*, **18**, 11 (1992).
- [12] G.A. Medvedkin, Yu.V. Rud'. *Phys. St. Sol. (a)*, **67**, 333 (1981).
- [13] D.E. Aspnes, S.M. Kelso, R.A. Logan, R. Bhat. *J. Appl. Phys.*, **60** (2), 754 (1986).

Редактор В.В. Чалдышев

Photosensitivity of GaAlAs/GaAs heterophotoelements in linearly polarized light

V.Yu. Rud'*, Yu.V. Rud', V.P. Khvostikov

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

* St.Petersburg State Technical University,
195251 St.Petersburg, Russia

E-mail: rudvas@uniys.hop.stu.neva.ru