

Наведенный фотоплетохроизм $p\text{-GaAlAs-p-n-GaAs}$ структур

© А. Бердинобатов, Н. Назаров, В.Ю. Рудь*, Ю.В. Рудь†, В.М. Саркисова

Физико-технический институт Академии наук Туркмении,
744000 Ашхабад, Туркмения

* Государственный технический университет, Санкт-Петербург
195251 Россия

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

(Получена 29 октября 1997 г. Принята к печати 3 ноября 1997 г.)

Экспериментально исследована поляризационная фоточувствительность фотопреобразовательных структур анодный окисел- $p\text{-Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As-p-n-GaAs}$, возникающая при наклонном падении линейно-поляризованного излучения на покрытую анодным окислом приемную плоскость. Установлено, что наведенный фотоплетохроизм структур увеличивается с ростом угла падения по квадратичному закону и в длинноволновой спектральной области ($\hbar\omega < 1.5\text{ эВ}$) определяется оптическими процессами на границе воздух-анодный окисел. Обнаруженный "провал" в спектральной зависимости коэффициента наведенного фотоплетохроизма в диапазоне 1.6–3 эВ связывается с явлением просветления, критерием которого может служить падение наведенного фотоплетохроизма $\mathcal{P}_i \rightarrow 0$. Сделан вывод о возможности применения поляризационной спектроскопии для диагностики просветления в фотопреобразовательных структурах на основе GaAlAs-GaAs.

1. Открытие и создание в физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе идеальных гетеропереходов в системе GaAlAs-GaAs в свое время привело к разработке широкой группы полупроводниковых приборов нового поколения: полупроводниковых лазеров, высокоэффективных солнечных фотопреобразователей и др. [1–7]. Однако фотопреобразование в таких гетероструктурах пока исследовалось только по отношению к естественному излучению. Настоящая работа посвящена первому экспериментальному изучению возникающей в условиях наклонного падения линейно поляризованного излучения [8,9], поляризационной фоточувствительности покрытых анодным окислом гетероструктур $p\text{-GaAlAs-p-n-GaAs}$.

2. Фотопреобразовательные структуры получены методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного объема раствора-расплава системы Ga-Al-As на ориентированные в кристаллографической плоскости (100) монокристаллические пластины GaAs при температуре $\sim 850^\circ\text{C}$. Подложки GaAs были легированы теллуром до концентрации свободных электронов $n_n = (3-5) \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ при $T = 300\text{ К}$. Содержание AlAs в широкозонных слоях GaAlAs составляло $\sim 70\%$. Эпитаксиальные слои с толщиной 2 мкм легировались путем введения в раствор-расплав примесей Zn и Mg, что обеспечивало концентрацию свободных дырок $p_p \simeq 10^{18}\text{ см}^{-3}$ при 300 К. Непосредственно после эпитаксии на широкозонной поверхности полученной структуры в процессе анодного окисления в кислотном растворе [10] формировалась окисная пленка толщиной $\sim 1500\text{ \AA}$. Такое однослойное покрытие вызывает просветление широкозонной поверхности структуры, что позволяет существенно снизить потери на отражение и довести кпд GaAlAs-GaAs фотопреобразователей до 20–25% [7,11]. Омические контакты к подложке n-GaAs и освещаемой поверхности p-GaAlAs создавались в результате электрохимического осаждения Ni. После нанесения омических контактов структуры подвергались термообработке при темпера-

туре 550°C в атмосфере водорода в течение ~ 2 мин. Площадь изученных структур $p\text{-GaAlAs-p-n-GaAs}$ составляла 10–20 мм².

3. Типичная стационарная вольт-амперная характеристика одной из изученных структур приведена на рис. 1 (кривая 1). Прямая ветвь этих структур при напряжениях смещения $U > 0.8\text{ В}$ подчиняется соотношению $U = U_0 + R_0 \cdot I$. Напряжение отсечки $U_0 = 0.8\text{ В}$, что хорошо воспроизводится в полученных структурах и соответствует контактной разности потенциалов. Остаточное сопротивление $R_0 = (2-4) \cdot 10^3\text{ Ом}$ при 300 К. Максимальная токовая фоточувствительность этих структур достигает $\sim 80\text{ мА/Вт}$ при условиях освещения AM1.5. Эффективность фотопреобразования исследованных структур при этом достигает $\sim 20\%$.

Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования η для типичной структуры при освещении естественным излучением вдоль нормали к плоскости анодного окисла представлена на рис. 1 (крива 2). Длинноволновый экспоненциальный рост η характеризуется крутизной $S = d(\ln \eta)/d(\hbar\omega) = 60-70\text{ эВ}^{-1}$ для разных структур, что соответствует прямым межзонным переходам в узкозонной компоненте, а энергетическое положение длинноволнового края и отклонение от экспоненциального хода при $\hbar\omega > 1.41\text{ эВ}$ хорошо согласуется с шириной запрещенной зоны GaAs [5]. Для всех полученных структур, как правило, реализуется широкополосный характер спектральной зависимости η . Начало заметного коротковолнового спада η наблюдается при энергиях фотонов $\hbar\omega > 2, 2\text{ эВ}$, что может быть связано с наступлением межзонных переходов в широкозонном слое. Усиление коротковолнового спада η , наступающее при $\hbar\omega > 2.8\text{ эВ}$, по-видимому, можно связывать с ростом поглощения в слое анодного окисла. В качестве количественной характеристики широкополосности фотопреобразования можно привести значение полной

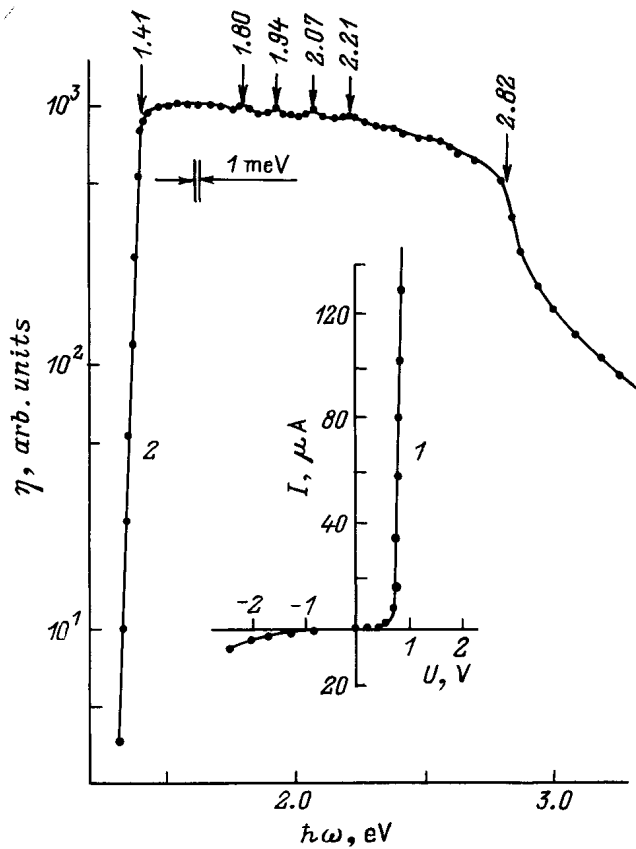


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика (1) и спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования (2) структуры анодный окисел-*p-Ga_{0,3}Al_{0,7}As-p-n-GaAs* при освещении естественным излучением ($T = 300\text{ K}$).

ширины спектральной зависимости η на полувысоте $\delta_{1/2} = 1.7\text{--}1.8\text{ эВ}$. Это значение хорошо воспроизводилось для всех полученных структур. Следует обратить также внимание на проявление в спектральных зависимостях η (рис. 1) нескольких эквидистантных максимумов, которые могут быть обусловлены интерференцией падающего излучения в слое анодного окисла либо в широкозонном эпитаксиальном слое $\text{Ga}_{0,3}\text{Al}_{0,7}\text{As}$. Оценка показателя преломления из формулы

$$n = \lambda_m \cdot \lambda_{m-1} / 2d(\lambda_m - \lambda_{m-1}), \quad (1)$$

где λ_m и λ_{m-1} — длины волн, отвечающие ближайшим максимумам в спектре фоточувствительности (рис. 1), m -номер максимума, позволяет отнести наблюдаемые особенности на счет интерференции в слое GaAlAs .

4. Измерения фоточувствительности структур анодный окисел-*p-GaAlAs-p-n-GaAs* при их освещении вдоль нормали (угол падения $\theta = 0$) к плоскости окисла линейно поляризованным излучением (ЛПИ) позволяют считать, что фототок короткого замыкания при этом оказывается независимым от положения электрического вектора световой волны \mathbf{E} относительно кристаллографических осей в слое GaAlAs и подложке из GaAs . Этот

результат, вообще говоря, не является неожиданным и обусловлен изотропными свойствами поглощающей среды, а также отсутствием деформации эпитаксиального слоя при его росте на подложке с одинаковым типом кристаллической структуры и очень близкими параметрами кристаллической решетки. Как результат отмеченной особенности GaAs и его твердого раствора GaAlAs , естественный фотоэффект $\mathcal{P}_N = 0$ при $\theta = 0^\circ$ во всей области фоточувствительности этих структур.

При наклонном падении ЛПИ с ростом θ в полученных структурах начинает возникать наведенный фотоэффект \mathcal{P}_I , величина которого определяется из соотношения

$$\mathcal{P}_I = \left(\frac{i^p - i^s}{i^p + i^s} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где i^p и i^s — фототоки при $\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$ и $\mathbf{E} \perp \text{ПП}$ соответственно, ПП — плоскость падения ЛПИ. На рис. 2, *a-c* представлены примеры полученных зависимостей фототоков и \mathcal{P}_I при нескольких значениях энергии падающих фотонов для одной из исследованных структур от угла падения ЛПИ на приемную плоскость. Главные закономерности измерений фоточувствительности изученных в этой работе структур сводятся к следующему. Коэффициент наведенного фотоэффекта во всем диапазоне фотопреобразования возрастает с ростом угла падения по квадратичному закону $\mathcal{P}_I \sim \theta^2$ (рис. 2, кривые 3 и 4), что находится в соответствии с выводами [8]. Если характер угловых зависимостей $\mathcal{P}_I(\theta)$ сохраняется во всем спектральном диапазоне фоточувствительности, то его величина при $\theta = \text{const}$ оказалась зависимой от энергии падающих фотонов. Исходя из (2) это может происходить вследствие изменений по спектру в угловых зависимостях $i^p(\theta)$ и $i^s(\theta)$. Результаты выполненных исследований $i^p(\theta)$ и $i^s(\theta)$ позволяют сделать вывод о том, в длинноволновой спектральной области фоточувствительности ($\hbar\omega < 1.5\text{ эВ}$) эти зависимости соответствуют ожидаемым из анализа оптических процессов с помощью соотношений Френеля [12,13]. Пример таких зависимостей приведен на рис. 2, *a* (кривые 1 и 2). Действительно, в случае поляризации $\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$ фототок с ростом угла падения вначале увеличивается, проходит через максимум вблизи $\theta \simeq 70^\circ$ и при $\theta > 70^\circ$ начинает резко снижаться. Отношение $i^p_{70^\circ}/i^p_{0^\circ} = 1.2$, что соответствует устранению потерь на отражение. Для ортогональной волны $\mathbf{E} \perp \text{ПП}$ рост $\theta > 0^\circ$ сопровождается монотонным снижением фототока (рис. 2, *a*, кривая 2).

В коротковолновой области фоточувствительности $\hbar\omega > 1.5\text{ эВ}$ рассмотренная выше закономерность $i^p(\theta)$ сохранялась (рис. 2, *b* и *c*, кривые 1), тогда как зависимости $i^s(\theta)$ становятся подобными $i^p(\theta)$. Это позволяет трактовать данный результат, как и в случае $i^p(\theta)$, устранением потерь на отражение и для волны $\mathbf{E} \perp \text{ПП}$. Такая закономерность не может быть объяснена с позиций соотношений Френеля [12,13] и может являться следствием интерференционных эффектов. При сопоставлении зависимостей $i^p(\theta)$ и $i^s(\theta)$ (рис. 2, *b* и *c*) можно

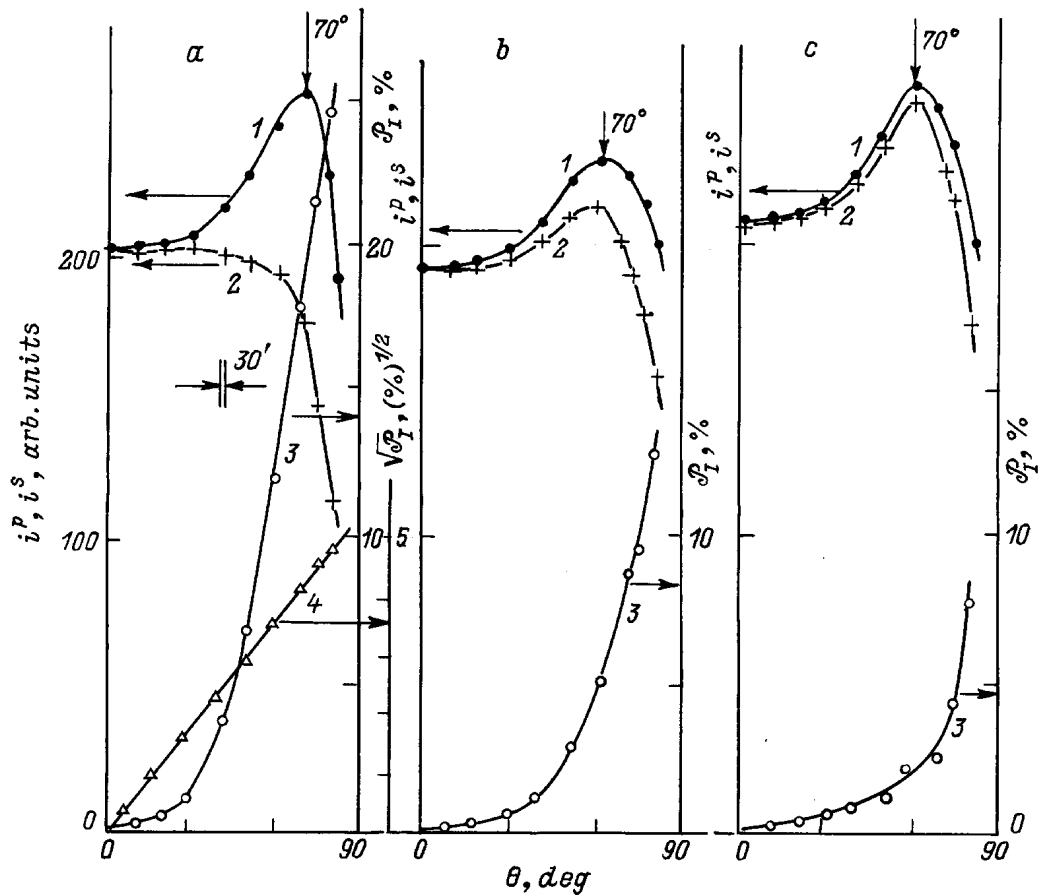


Рис. 2. Зависимость фототока короткого замыкания (1 — i^p , 2 — i^s) и коэффициента наведенного фотоплекроизма (3, 4) структуры анодный окисел- $p\text{-Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As-p-n-GaAs}$ от угла падения линейно поляризованного излучения на плоскость анодного окисла ($T = 300\text{ K}$, $\hbar\omega$, эВ: $a - 1.42$, $b - 1.77$, $c - 2.07$).

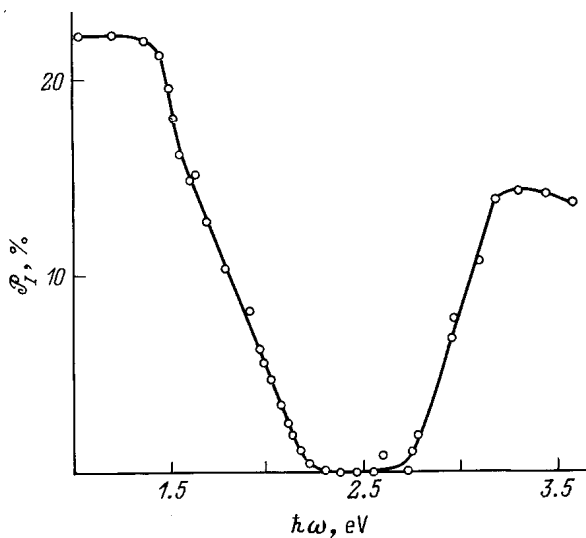


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплекроизма структуры анодный окисел- $p\text{-Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As-p-n-GaAs}$ ($T = 300\text{ K}$, $\theta = 75^\circ$).

также видеть сближение между зависимостями $i^p(\theta)$ и $i^s(\theta)$, в результате чего и падает сама величина наведенного фотоплекроизма. Подобные закономерности были установлены ранее и в других структурах, для которых также проявлялись интерференционные явления [14,15].

Спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплекроизма для одной из структур анодный окисел- $p\text{-GaAlAs-p-n-GaAs}$ приведена на рис. 3. Ее характерной особенностью является сильная зависимость P_I от энергии фотонов. Только в длинноволновой области ($\hbar\omega \lesssim 1.4\text{ эВ}$) коэффициент фотоплекроизма практически постоянен, как и для поверхностно-барьерных структур, например, на GaAs [9] во всей области фоточувствительности. Если, согласно [16], оценить по экспериментально полученной величине $P_I \approx 20\text{--}22\%$ (рис. 3) показатель преломления, то получим значение $n = 1.8$, что совпадает с известным для анодного окисла на GaAlAs [10]. На этом основании наведенный фотоплекроизм полученных структур в длинноволновой области можно приписывать оптическим процессам на границе воздух-анодный окисел. Наблюдаемый в диапазоне между энергиями падающих фотонов от 1.5 до 3 эВ "провал" в спектральной зависимости можно связывать с

явлениями просветления. Об этом свидетельствуют зависимости $i^p(\theta)$ и $i^s(\theta)$ (рис. 2, b и c). Когда с ростом угла падения начинают уменьшаться потери на отражение для обеих поляризаций света, это в итоге приводит к сближению значений $i^s \rightarrow i^p$, в результате чего обеспечивается снижение наведенного фотоплеохроизма. Как видно из (2), этот эффект максимален при условии $i^p = i^s$. Следовательно, на основании поляризационных измерений fotocувствительности структур с антиотражающим покрытием можно легко определить область максимального просветления. Из рис. 3 следует, что максимальное просветление в полученных структурах обеспечивается в диапазоне от 2.2 до 2.8 эВ, когда $\mathcal{P}_I = 0$. Очевидно, что такой экспрессный контроль области просветления может дать возможность корректировать условия создания структур в требуемом конкретной практической задачей направлении.

Таким образом, применение поляризационной фотоэлектрической спектроскопии к фотопреобразовательным структурам p -GaAlAs- p - n -GaAs позволяет контролировать величину и спектральный диапазон просветления, что открывает новые возможности диагностики технологических процессов создания высокоэффективных фотопреобразователей солнечного излучения.

Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, Е.Л. Портной, Н.И. Протасов. ФТП, **3**, 1324 (1969).
- [2] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, Н.С. Зимогорова, Д.Н. Третьяков. ФТП, **3**, 1633 (1969).
- [3] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.И. Корольков, С.Г. Конников, С. Табаров, Ф.М. Таджибаев. ФТП **12**, 285 (1978).
- [4] Ж.И. Алфёров, Б.В. Царенков. ФТП, **19**, 2113 (1985).
- [5] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник* (М., Мир, 1975).
- [6] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Сов. радио, 1979).
- [7] А.Н. Именков, А.А. Стамкулов, Т.И. Таурбаев, Б.В. Царенков, В.Ф. Шорин, Ю.П. Яковлев. ФТП, **12**, 948 (1978).
- [8] Ю.В. Рудь, Г.А. Медведкин. А. с. СССР, № 671634, БИ, № 41, 291 (1980).
- [9] С.Г. Конников, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, М. Сергинов. Письма ЖТФ, **18** (12), 39 (1992).
- [10] И.Н. Сорокин, В.З. Петрова, Ю.Д. Чистяков, Н.Р. Аигина, Л.Е. Гатько. Зарубеж. электрон. техн., **14** (209), 64 (1979).
- [11] М.М. Колтун. *Оптика и метрология солнечного излучения* (М., Наука, 1985).
- [12] Г.С. Ландсберг. *Оптика* (М., Наука, 1976).
- [13] Р. Аззам, М. Башара. *Эллисометрия и поляризованный свет* (М., Мир, 1981).
- [14] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **31**, 309 (1997).
- [15] В.М. Ботнарюк, А.В. Коваль, А.В. Симашкевич, В.А. Щербань, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **31**, 800 (1997).
- [16] G.A. Medvedkin, Yu.V. Rud'. Phys. St. Sol. (a), **67**, 333 (1981).

Редактор В.В. Чалдышев

An induced photopleochroism of p -GaAlAs- p - n -GaAs structures

A. Berdinobatov, N. Nazarov, V.Yu. Rud'^{*}, Yu.V. Rud'[†], V.M. Sarkisova

Physicotechnical Institute
of Academy of Sciences of Turkmenistan,
744000 Ashgabad, Turkmenistan

^{*} State Technical University,
195251 St. Petersburg, Russia

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