

©1995 г.

## ОСОБЕННОСТИ ФОТОЭФФЕКТА В РЕЗКИХ ИЗОТИПНЫХ $N^+ - n^0 - n^+$ -ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

*И.А. Жебулев, В.И. Корольков, Т.С. Табаров*

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

(Получена 26 июля 1994 г. Принята к печати 2 августа 1994 г.)

Представлены результаты исследования фотоэлектрических свойств гетероструктур на основе InP/InGaAs и GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с тонкой узкозонной областью. Подробно изучены зависимости коэффициента усиления образцов (сформированных в виде вертикальных фотосопротивлений) от полярности и величины приложенного смещения, а также от интенсивности падающего света и температуры. Предлагается объяснение замеченных особенностей в экспериментальных данных.

В резких изотипных гетеропереходах даже при одинаковом уровне легирования обеих частей структуры образуется потенциальный барьер на гетерогранице [1]. Форма и высота потенциального барьера, а значит, и выпряляющие свойства изотипных гетероструктур сильнее всего зависят от резкости перехода [2]. Электрические свойства изотипных переходов, в которых проводимость в пропускном направлении осуществляется основными носителями, изучены достаточно полно. Менее изучены их фотоэлектрические свойства. Если в анизотипных гетеропереходах появление фототока связано с пространственным разделением электронов и дырок, то в изотипных переходах при определенных условиях существенную роль может играть эффект фотопроводимости с последующим прохождением одним из типов носителей гетерограницы. Именно это обстоятельство способствовало разработке вертикальных фотосопротивлений, обеспечивающих высокую эффективность ввода света [3,4].

В данной работе приведены результаты исследования асимметричных изотипных  $N^+ - n^0 - n^+$ -гетероструктур на основе GaAs/AlGaAs и InP/InGaAs с тонкой нелегированной узкозонной областью. Такие структуры обладают заметным усилением фототока, механизм которого не совсем ясен.

# 1. Методика получения и электрические свойства изотипных гетероструктур

Исследуемые изотипные  $N^+ - n^0 - n^+$ -гетероструктуры на основе  $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  были получены селективным выращиванием  $GaAs$  и  $Al_xGa_{1-x}As$  [ $x = 0.2 - 0.3$ ,  $n^0 \simeq 5 \cdot 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ] МОС гидридной эпитаксией [3]. Структуры на основе изорешеточных  $InP/InGaAs$  изготавливались методом жидкофазной эпитаксии. При этом концентрация в нелегированной области лежала в пределах  $(0.6 - 5.0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а толщина этой области варьировалась от 0.5 до 5 мкм. Используя фотолитографию и химическое травление, из полученных структур изготавливались фотосопротивления вертикальной геометрии со сплошным контактом к узкозонной  $n^+$ -области и с кольцевым — к широкозонному материалу, со стороны которого вводился свет.

Темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) изотипных  $N^+ - n^0 - n^+$ -гетероструктур обладали заметной асимметрией. За пропускное направление принималась такая полярность приложенного напряжения, когда плюс подавался на узкозонный материал. Не останавливаясь на деталях темновых ВАХ, отметим, что основываясь на их характере, можно заключить: механизм переноса носителей в прямом направлении — термоэмиссионный, а в обратном — существенный вклад вносит туннелирование электронов через барьер в зоне проводимости. Величина темновых сопротивлений для структур на основе  $InP/InGaAs$  составляла в пропускном направлении  $R^+ \simeq 10 \text{ Ом}$  и в обратном —  $R^- \simeq 100 \text{ Ом}$ , а для структур  $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  благодаря низкой концентрации в  $n^0$ -области  $R^+$  и  $R^-$  почти на порядок больше.

## 2. Фотоэлектрические свойства

Описываемые изотипные резкие  $N^+ - n^0 - n^+$ -гетероструктуры обладали типичными для гетерофотодетекторов спектральными характеристиками fotocувствительности, когда длинноволновая граница чувствительности определяется шириной запрещенной зоны узкозонного  $n^0$ -материала, а коротковолновая — как толщиной так и шириной запрещенной зоны широкозонного  $N^+$ -материала. Поэтому для структур на основе  $InP/InGaAs$  чувствительность лежала в диапазоне  $\lambda \simeq (1.0 - 1.55) \text{ мкм}$ , а для  $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  —  $\lambda \simeq (0.8 - 0.9) \text{ мкм}$ .

Фотоэффект в резких изотипных  $N - n$ -гетеропереходах изучался в ряде работ [5-6], где отмечена существенная роль туннельного разделения неравновесных носителей заряда. Как уже отмечалось, при исследовании фотоэлектрических свойств изотипных структур с нелегированной узкозонной областью было обнаружено заметное усиление фототока, механизм которого не совсем ясен [3]. Поэтому в данной работе проведено подробное изучение зависимостей коэффициентов усиления от полярности и величины приложенного напряжения смещения, а также от интенсивности падающего света и температуры. При этом коэффициент усиления определялся как обычно:  $G = \Delta I_{ph} h\nu / q\eta P$ , где  $\Delta I_{ph} = I_l - I_d$  — фототок, равный разности светового  $I_l$  и темнового  $I_d$  токов  $h\nu$  — энергия падающего света,  $\eta$  — внутренний квантовый выход,  $P$  — мощность падающего света,  $q$  — заряд электрона. На рис. 1,2

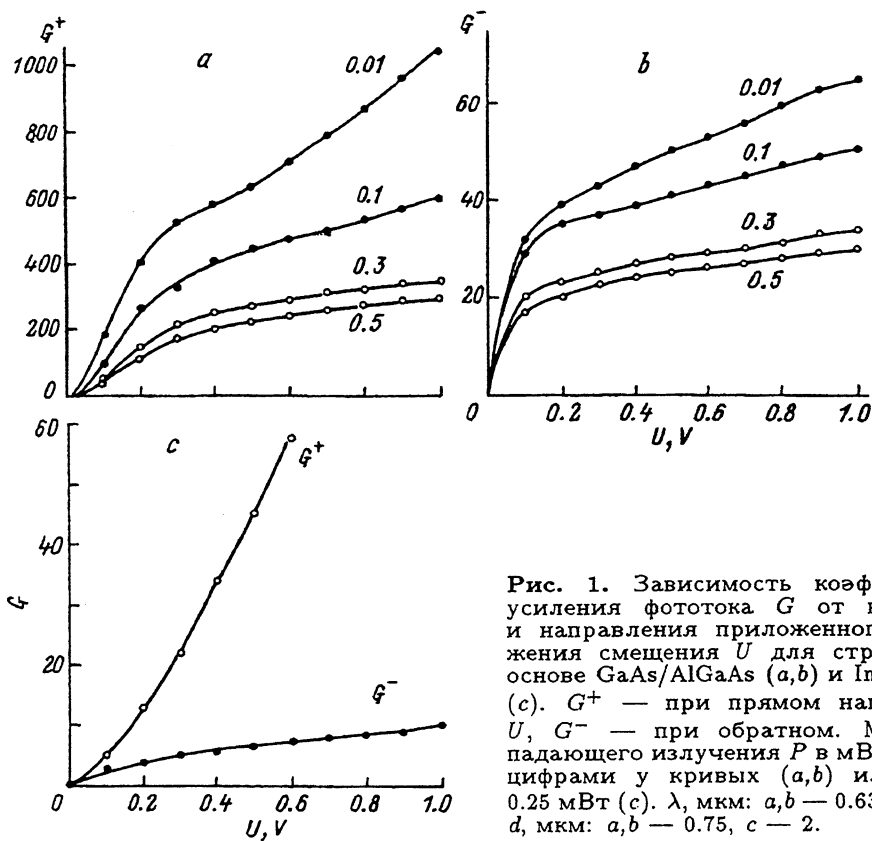


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления фототока  $G$  от величины и направления приложенного напряжения смещения  $U$  для структур на основе GaAs/AlGaAs (a,b) и InP/InGaAs (c).  $G^+$  — при прямом напряжении  $U$ ,  $G^-$  — при обратном. Мощность падающего излучения  $P$  в мВт указана цифрами у кривых (a,b) или равна 0.25 мВт (c).  $\lambda$ , мкм: a,b — 0.63, c — 1.3; d, мкм: a,b — 0.75, c — 2.

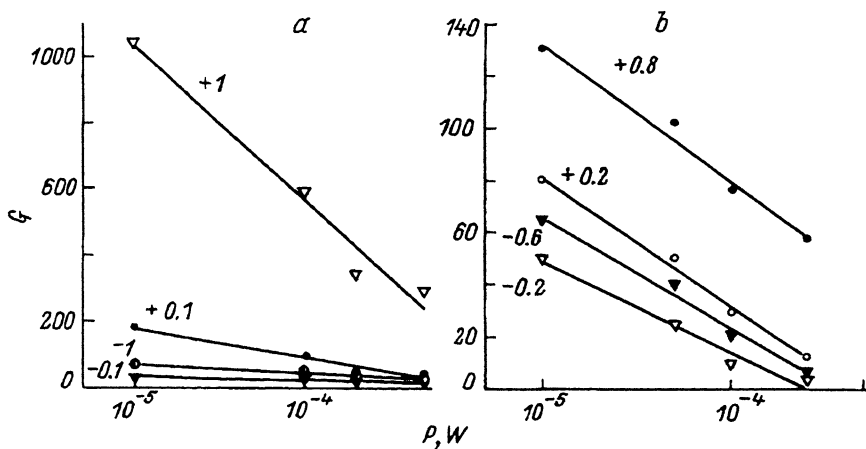


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления фототока  $G$  от мощности падающего излучения  $P$  для структур на основе GaAs/AlGaAs (a) и InP/InGaAs (b). Величина и полярность напряжения  $U$  указаны цифрами у кривых. Значения  $\lambda$  и  $d$  — те же, что и на рис. 1 для соответствующих структур.

приведены зависимости коэффициента усиления от величины и полярности приложенного напряжения смещения и мощности падающего излучения для ряда образцов на основе GaAs/AlGaAs и InP/InGaAs. Заметим, что характер наблюдаемых функциональных зависимостей во многом сходен для обеих систем.

Анализ полученных результатов показывает, что коэффициент усиления зависит от полярности и величины приложенного смещения. Всегда в исследуемом интервале освещенностей и напряжений коэффициент усиления  $G^+$  в пропускном направлении (плюс приложенного напряжения смещения приходится на узкозонный материал) больше, чем  $G^-$  при отрицательном смещении. При этом как в прямом, так и в обратном направлениях коэффициент усиления почти экспоненциально уменьшается с ростом интенсивности падающего света. Коэффициент усиления  $G^+$  достигает значений  $\sim 10^3$  при  $P \simeq 10^{-7}$  Вт и уменьшается до значений 10–20 при  $P \geq 10^{-4}$  Вт для структур на основе AlGaAs/GaAs, а для структур на основе InP/InGaAs при тех же уровнях освещенности составляет  $\sim 10^2$  и 10–20 соответственно.

Для понимания процессов, происходящих в изотипных  $N^+ - n^0 - n^+$ -гетероструктурах при освещении, для гетероструктур AlGaAs/GaAs было проведено подробное исследование температурных зависимостей  $G(T)$  при различных освещенностях и полярностях приложенного напряжения. При температурах выше комнатной и фиксированных значениях  $P$  и  $U$  коэффициент усиления экспоненциально уменьшался с ростом температуры:  $G \sim \exp(q\phi/kT)$  (рис. 3). По наклону зависимости  $\ln G = f(1/T)$  определялось значение энергии активации  $q\phi$ . Оказалось, что значения энергии активации также зависят от многих факторов. Так, в области малых уровней освещенности и небольших приложенных напряжений,  $U < 0.3$  В, энергия активации для пропускного направления составляет  $q\phi^+ = (0.25 - 0.32)$  эВ, а для обратной полярности  $q\phi^- = (0.12 - 0.18)$  эВ.

По мере роста приложенного смещения и уровня освещенности характер температурных зависимостей  $G^+$  и  $G^-$  изменяется. Так, если  $G^-$  практически не зависит от температуры, то  $G^+$  по-прежнему экспоненциально зависит от температуры, но энергия активации уменьшалась до (0.11–0.14) эВ. При этом энергия активации не зависит от интенсивности падающего света.

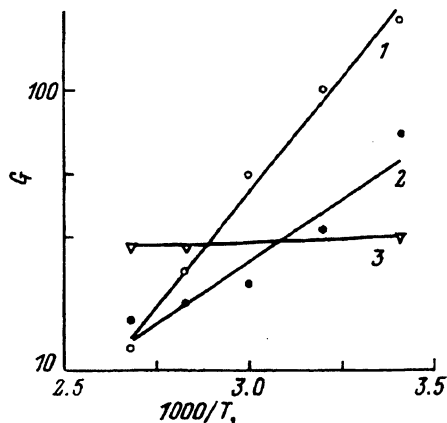


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента усиления фототока  $G$  в двух полярностях для структуры на основе GaAs/AlGaAs. Мощность  $P$ , мВт и напряжение  $U$ , В: 1 — 0.01 и +0.1, 2 — 0.01 и -1, 3 — 0.5 и -1. Энергия активации  $q\phi$ , эВ: 1 — 0.32, 2 — 0.18, 3 — 0.

### 3. Обсуждение результатов

Сложный характер наблюдаемых зависимостей коэффициента усиления фототока в зависимости от различных факторов свидетельствует об отсутствии единого механизма усиления и, по-видимому, связан с особенностями фотоэффекта в изотипной  $N^+ - n^0 - n^+$ -гетероструктуре, зонная энергетическая диаграмма которой приведена на рис. 4. Это расчетная диаграмма.

Согласно современным представлениям в резких изотипных гетеропереходах величины разрывов зоны проводимости  $\Delta E_c = 0.23$  и  $0.22$  эВ, а валентной зоны  $\Delta E_v = 0.15$  и  $0.41$  эВ соответственно для GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As и InP/In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As [5,6].

Формально для  $N^+ - n^0 - n^+$ -гетероструктур коэффициент усиления фототока можно выразить как и для обычных фотопроводников в виде  $G = \tau_{\text{эф}}/t_d$ , где вместо времени жизни дырок вводится эффективное время  $\tau_{\text{эф}}$ , а  $t_d$  — время пролета электронов. Основное отличие рассматриваемой структуры от классических фотопроводников заключается в существенно меньшем влиянии поверхности и в наличии гетерограницы. Зная  $G$ , подвижность электронов  $\mu_n$ , геометрические размеры и пренебрегая небольшим различием в оценке величины электрического поля при изменении полярности, можно оценить  $\tau_{\text{эф}}$  при различных интенсивностях падающего света и полярностей приложенного напряжения. Оказалось, что  $\tau_{\text{эф}}$  зависит не только от интенсивности, но и от полярности, отличаясь более чем на порядок. При этом всегда в пропускном направлении больше, чем в обратном,  $\tau_{\text{эф}}^+ > \tau_{\text{эф}}^-$ . Это обстоятельство свидетельствует, что наблюдаемые зависимости не связаны с захватом дырок на глубокие центры, а определяются формой потенциального барьера и зарядом носителей, подходящих к гетерогранице, т.е. механизмом прохождения гетерограницы. Кроме того, значительное влияние на фототок оказывает и изгиб зон в активной области структуры, величина которого определяется толщиной и уровнем легирования  $n^0$ -области.

В области малых приложенных напряжений ( $U \simeq V_D$ ), когда почти все напряжение приходится на гетеробарьер из-за изгиба зон в активной области (рис. 4), при освещении происходит накопление дырок, что в свою очередь уменьшает величину изгиба зон. При этом для дырок

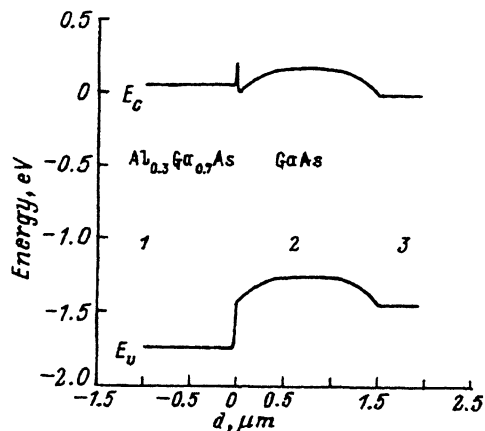


Рис. 4. Расчетная равновесная зонная энергетическая диаграмма  $N^+ - n^0 - n^+$ -структуры на основе GaAs/AlGaAs. Концентрация доноров  $N_d$  в  $\text{см}^{-3}$  в областях: 1 —  $10^7$ ; 2 —  $8 \cdot 10^{14}$ , 3 —  $10^{18}$ .

существует барьер  $q\varphi = \Delta E_v + qV_D$  в случае положительной полярности и барьер  $\sim qV_D$  при отрицательной полярности. Для электронов фактически барьера нет, так как уже при небольших отрицательных смещениях из-за сильного легирования  $N^+$ -областей барьер на гетерогранице практически прозрачен [8].

Пространственное разделение электронов и дырок эквивалентно увеличению времени жизни дырок

$$\tau_p^{\text{eff}} = \tau_p \exp(q\varphi/kT).$$

С ростом уровня освещенности высота барьера  $\varphi$  уменьшается, при обеих полярностях напряжения падает  $\tau_p^{\text{eff}}$  и соответственно  $G$  (рис. 2). Кроме того, по мере увеличения приложенного напряжения растет темновой ток и все большая часть напряжения падает на активную область.

При спрямлении активной области для дырок в случае положительной полярности остается барьер  $\sim \Delta E_v$ . В этом случае соотношение  $G^+/G^- \simeq \exp(\Delta E_v/kT)$  и должно составлять 300–400 для системы GaAs/AlGaAs и на несколько порядков больше для InP/InGaAs. В реальных условиях это отношение лежит в пределах 10–20 (рис. 5).

В рамках рассматриваемой модели столь значительное расхождение обусловлено наличием на гетерогранице потенциального мешка для электронов, глубина которого определяется уровнем легирования  $N$ - и  $n^0$ -областей, резкостью гетерограницы и величиной  $\Delta E_c$ . Не останавливаясь на особенностях энергетического спектра электронов в треугольной яме, отметим, что при отрицательных смещениях туннелировать могут электроны, энергии которых выше положения дна зоны проводимости широкозонного материала. Таким образом, при небольших смещениях и низких уровнях освещенности величина  $G^-$  определяется термополевой эмиссией. По-видимому, с увеличением напряжения и уровня освещенности и связан рост отношения  $G^+/G^-$ , а также слабая температурная зависимость  $G^-$  (рис. 3). Оценки показывают, что величина этого дополнительного барьера для структур на основе GaAs/AlGaAs не превышает  $(2-3)kT$ . Таким образом, наличие резкой гетерограницы в вертикальных фотосопротивлениях обес-

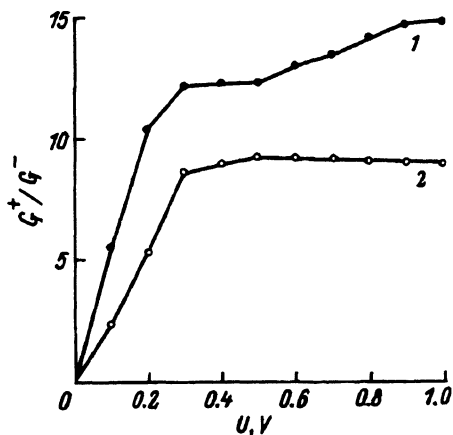


Рис. 5. Зависимость отношения коэффициентов усиления фототока в пропускном и запиорном направлениях ( $G^+/G^-$ ) для структуры на основе GaAs/AlGaAs при различных уровнях освещенности.  $P$ , мВт: 1 — 0.01, 2 — 0.5.  $\lambda = 0.63$  мкм.

печивает высокие значения коэффициента усиления. Однако для получения высокого быстродействия предпочтительней являются плавные гетероструктуры или резкие но, с небольшим, порядка нескольких  $kT$ , разрывом валентной зоны.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность Ж.И. Алферову за интерес и внимание к работе и О.В. Константинову за плодотворное обсуждение результатов.

#### Список литературы

- [1] R.L. Anderson. Sol. St. Electron., **5**, 341 (1962).
- [2] W.G. Oldham, A.G. Milnes. Sol. St. Electron., **7**, 153 (1964).
- [3] Л.А. Волков, В.И. Корольков, А.А. Пулатов, И. Рахимов, Т.С. Табаров, Б.С. Явич. Письма ЖТФ, **11**, 800 (1985).
- [4] A. Antreasyan, C.Y. Chen. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-33**, 188 (1986).
- [5] E.S. Snow, P.M. Campbell, O.J. Glenbocki, W.J. Moore, S.W. Kirchoer. Appl. Phys. Lett., **56**, 117 (1990).
- [6] S.R. Forrest, O.K. Kim. Appl. Phys., **52**, 5838 (1981).
- [7] P.K. Bhattacharya, H.J. Buhlmann, M. Pegems, P. Schmid, H. Melchior. Appl. Phys. Lett., **41**, 449 (1982).
- [8] В.И. Корольков, В.Г. Никитин, Д.Н. Третьяков. ФТП, **8**, 2355 (1974).

Редактор Т.А. Полянская

### The photoeffect characteristics in abrupt isotype $N^+ - n^0 - n^+$ -heterostructures

*I.A. Zhebulev, V.I. Korol'kov, T.S. Tabarov*

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

---