

©1994 г.

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР $p\text{-GaAs}/n\text{-Ge}$ В ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Ю.В.Жиляев, Н.Назаров, В.Ю.Рудь, Ю.В.Рудь, Л.М.Федоров

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 6 апреля 1993 г. Принята к печати 11 апреля 1993 г.)

Методом газофазной эпитаксии получены эпитаксиальные слои арсенида галлия на подложках из германия. Исследованы фотоэлектрические свойства гетероструктур  $p\text{-GaAs}/n\text{-Ge}$  в неполяризованном и линейно поляризованном излучении. Показано, что при наклонном падении линейно поляризованного излучения на приемную поверхность GaAs возникает наведенный фотоплеохроизм, величина которого сохраняется постоянной в области 0.8–1.5 эВ и контролируется углом падения. Полученные зависимости квантовой эффективности фотопреобразования от угла падения в случае совмещения плоскостей падения и поляризации указывают на высокое структурное совершенство эпитаксиальных слоев GaAs на подложках из Ge. На основании полученных поляризационных параметров сделан вывод о перспективах применения гетероструктур GaAs/Ge в фотопреобразователях линейно поляризованного излучения.

Интерес к изучению совершенных эпитаксиальных слоев GaAs на подложках из германия определяется в основном перспективами создания на их основе высокоэффективных солнечных элементов, в том числе двухкаскадных [1,2]. Высокоэффективные фотопреобразователи на основе GaAs/Ge могут стать также основой для серийного изготовления матричных фотоанализаторов линейно поляризованного излучения [3].

В настоящей работе представлены результаты первых исследований фотоэлектрических явлений в эпитаксиальных гетероструктурах GaAs/Ge с использованием линейно поляризованного излучения.

1. Объектом исследований служили анизотипные гетероструктуры  $p\text{-GaAs}/n\text{-Ge}$ . В качестве подложек для получения гетероструктур применялись полированные пластины Ge, легированного оловом до концентраций свободных электронов  $n \simeq (1 \div 2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 300 \text{ K}$ , толщиной  $\simeq 400 \text{ мкм}$ . Пластины Ge были ориентированы в плоскости (100) и характеризовались разориентацией  $\sim 4^\circ$  в направлении [100]. Методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе

(GaAs-AsCl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>) [4] на пластинах *n*-Ge выращивались эпитаксиальные слои *p*-GaAs толщиной до 25 мкм. Эпитаксиальные слои *p*-GaAs в процессе роста легировались примесью цинка до концентрации свободных дырок  $p \simeq (1-3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 300 \text{ К}$ .

Обычно площадь исследуемых структур *p*-GaAs/*n*-Ge составляла  $(6-10) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ . Омические контакты изготавливались вплавлением металла в атмосфере очищенного водорода при температурах  $T = 500 \div 520 \text{ }^\circ\text{C}$ , причем для эпитаксиального слоя *p*-GaAs использовался сплав состава (In + 2%Zn), тогда как для подложки из *n*-Ge-(In + 2.5%Te).

При проведении измерений фоточувствительности гетероструктуры монтировались на столике Федорова, который позволял в пределах углов падения  $\theta$  от 0 до 90° с точностью  $\simeq 30'$  изменять ориентацию приемной поверхности структуры относительно направления падающего на них параллельного пучка света неполяризованного или линейно поляризованного. Спектральные зависимости фототока короткого замыкания пересчитывались на постоянное число падающих фотонов и, следовательно, трансформировались в спектры квантовой эффективности  $\eta$  процесса фотопреобразования.

2. Измерения стационарных вольт-амперных характеристик показали, что полученные структуры обладают ярко выраженным эффектом выпрямления: отношение прямого и обратного токов имеет величину  $i_d/i_r \simeq 10^2$  при напряжении  $u = 0.2 \text{ В}$  и температуре  $T = 300 \text{ К}$ , причем пропускное направление в согласии с энергетической диаграммой структуры соответствует отрицательной полярности внешнего смещения на германии. При прямых смещениях выше 1 В вольт-амперная характеристика обычно следует соотношению  $u = u_c + iR_c$ , где  $R_c \simeq 2-4 \text{ кОм}$ , а  $u_c \simeq 0.8-1.0 \text{ В}$ .

При освещении полученных структур возникает фотовольтаический эффект, знак которого отвечает плюсу на слое *n*-GaAs и не изменяется в зависимости от положения светового зонда и энергии фотонов. Токовая фоточувствительность лучших гетероструктур достигает 10 мА/Вт при  $\lambda \simeq 0.91 \text{ мкм}$  и максимальна при освещении структур со стороны слоя GaAs. Спектральная зависимость квантовой эффективности фотопреобразования  $\eta$  типичной структуры в неполяризованном излучении приведена на рис. 1. Длинноволновый край фоточувствительности таких гетероструктур определяется началом межзонного поглощения в германии, и в области энергий фотонов 0.9-1.3 эВ фототок сохраняется практически постоянным. С началом прямых переходов в GaAs при  $\hbar\omega > 1.3 \text{ эВ}$  происходит резкий экспоненциальный рост квантовой эффективности, которая достигает своего максимального значения при  $\hbar\omega_m \simeq 1.38 \text{ эВ}$ . Это значение  $\hbar\omega_m$  отвечает ширине запрещенной зоны GaAs при 300 К, а экспоненциальному росту  $\eta$  можно сопоставить высокую крутизну  $\delta = 80-10 \text{ эВ}^{-1}$ , что находится в соответствии с прямой структурой зон в этом полупроводнике. При энергиях фотонов выше  $\hbar\omega_m$  происходит резкий спад фоточувствительности, который обусловлен влиянием поглощения в приповерхностном слое GaAs. Это объяснение подтверждается тем обстоятельством, что при освещении таких структур в торец коротковолновый спад  $\eta$  в значительной мере ослабляется. В результате конкуренции упомянутых процессов в гетероструктуре в спектре квантовой эффективности в области  $E_g$  GaAs возникает узкий пик, ширина которого на полувысоте составляет  $\simeq 25 \text{ мэВ}$  при  $T = 300 \text{ К}$ .

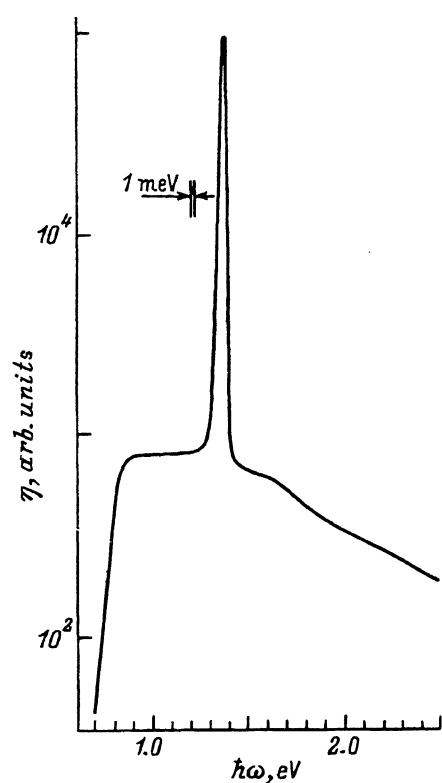


Рис. 1. Спектральная зависимость квантовой эффективности фотопреобразования естественного излучения в структуре  $p\text{-GaAs}/n\text{-Ge}$  при освещении со стороны GaAs.  $T = 300$  К.

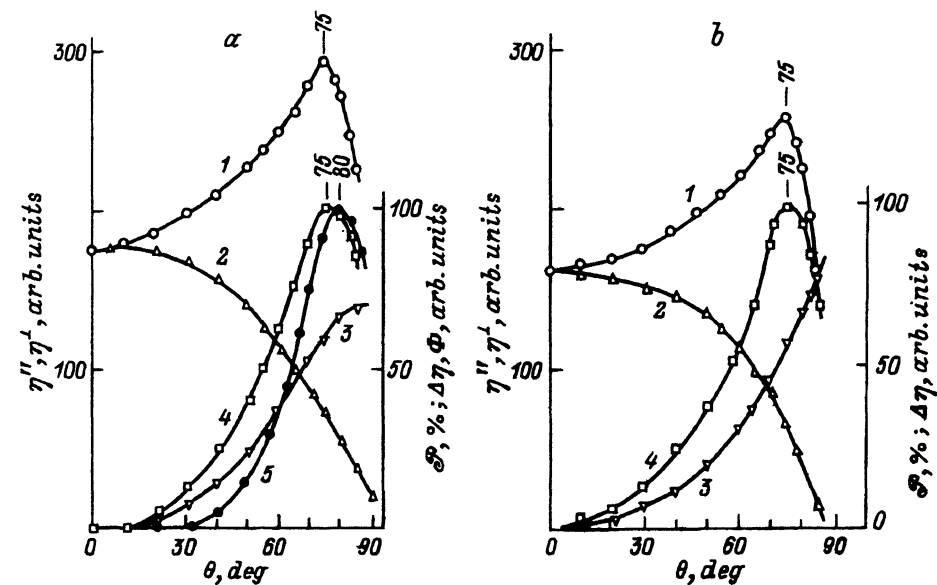


Рис. 2. Угловые зависимости квантовой эффективности фототоков  $\eta^{\parallel}$  (1) и  $\eta^{\perp}$  (2), коэффициента наведенного фотоплекроизма  $P_i = (\eta^{\parallel} - \eta^{\perp}) / (\eta^{\parallel} + \eta^{\perp})$  (3), поляризационной разности  $\Delta\eta = \eta^{\parallel} - \eta^{\perp}$  (4) и азимутальной фоточувствительности  $\Phi \approx \Delta\eta P_i$  (5) для структуры  $p\text{-GaAs}/n\text{-Ge}$  при  $T = 300$  К.  $\lambda$ , мкм: а — 0.9, б — 1.2.

3. Исследования фоточувствительности полученных гетероструктур в линейно поляризованном излучении показали, что при их освещении по нормали к поверхности GaAs во всей области фоточувствительности фототок не зависит от положения электрического вектора световой волны  $\mathbf{E}$  относительно кристаллографических осей образца. Это обстоятельство позволяет считать, что в указанном направлении распространения света в гетероструктуре процесс фотоактивного поглощения изотропен, как и должно быть в случае полупроводников Ge и GaAs.

Как только происходит отклонение линейно поляризованного излучения от нормали, наблюдается периодическая зависимость фототока от азимутального угла  $\varphi$  между  $\mathbf{E}$  и плоскостью падения ( $IP$ ) излучения на поверхность  $p$ -GaAs. Эта активность следует закону Малюса [3], причем во всей области фоточувствительности  $\eta^{\parallel} > \eta^{\perp}$  ( $\eta^{\parallel}$  соответствует поляризации  $\mathbf{E} \parallel IP$ , а  $\eta^{\perp} - \mathbf{E} \perp IP$ ) и, следовательно, поляризационная разность квантовой эффективности  $\Delta\eta = \eta^{\parallel} - \eta^{\perp} > 0$ . На рис. 2 представлены типичные зависимости поляризационных параметров полученных структур в области межзонного поглощения в GaAs (а) и Ge (б). Эти зависимости близки между собой, что является следствием определяющей роли границы воздух-арсенид галлия на возникающую при наклонном падении линейно поляризованного излучения анизотропию фоточувствительности [3]. Как видно из рис. 2, в поляризации  $\mathbf{E} \parallel IP$  фототок с увеличением угла падения  $\theta$  возрастает и достигает максимума при  $\theta \simeq 75^\circ$ , тогда как фототок при  $\mathbf{E} \perp IP$  монотонно падает во всей области исследованных значений  $\theta$ . В целом угловые зависимости  $\eta^{\parallel}(\theta)$  и  $\eta^{\perp}(\theta)$  находятся в качественном соответствии с поляризационной зависимостью амплитудных коэффициентов прохождения границы воздух-арсенид галлия световой волной [5]. В результате поляризационная разность квантовой эффективности (рис. 2, кривая 4) с ростом  $\theta$  вначале возрастает и достигает максимума вблизи псевдобрюстеровского угла  $\theta \simeq 75^\circ$ , а затем резко уменьшается. Коэффициент наведенного фотоплекроизма  $\mathcal{P}_i = (\eta^{\parallel} - \eta^{\perp}) / (\eta^{\parallel} + \eta^{\perp})$  (рис. 2, кривая 3) подчиняется параболическому закону и достигает максимального значения 69–75% вблизи  $\theta \simeq 85^\circ$ . Наконец, азимутальная фоточувствительность, определяемая соотношением  $\Phi \sim \Delta\eta\mathcal{P}_i$ , как видно из рис. 2 (кривая 5), также возрастает с ростом  $\theta$  и достигает своего максимума вблизи  $80^\circ$ . Отсюда вытекает возможность плавно контролировать азимутальную фоточувствительность структур  $p$ -GaAs/ $n$ -Ge за счет изменения угла падения линейно поляризованного излучения на поверхность.

Обратим также внимание на то, что для полученных структур эффект увеличения квантовой эффективности фотопреобразования в поляризации  $\mathbf{E} \parallel IP$  выражен намного ярче, чем, например, в структурах GaP/Si и GaAs/Si [6,7]. Этот эффект в случае полученных структур в широкой спектральной области постоянен и отношение  $\eta^{\parallel}(\theta = 75^\circ) / \eta^{\parallel}(\theta = 0^\circ) \simeq 1.7$ , что свидетельствует о высоком совершенстве эпитаксиальных слоев GaAs и, в частности, его наружной поверхности. Подчеркнем, что столь высокое «оптическое качество» поверхности GaAs достигается непосредственно в процессе выращивания, и

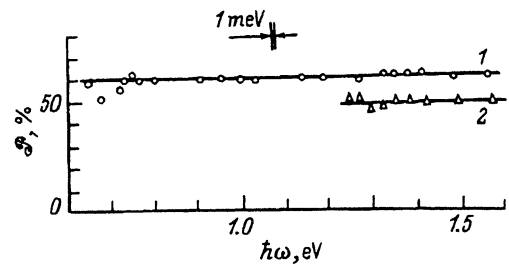
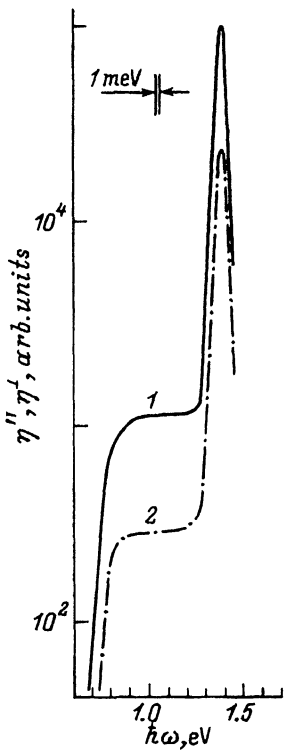


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплекроизма в структуре  $p\text{-GaAs}/n\text{-Ge}$  при  $T = 300$  К.  $\theta$ , град: 1 — 78, 2 — 70.

Рис. 3. Спектральные зависимости квантовой эффективности фотопреобразования излучения в структуре  $p\text{-GaAs}/n\text{-Ge}$  для поляризации  $E \parallel IP$  (1) и  $E \perp IP$  (2).

не требуется прибегать к дополнительным операциям по его улучшению. Поскольку в технологии газовой эпитаксии GaAs на подложках Si и Ge используются пластины с близкой разориентацией, установленное различие в «оптическом качестве» слоев GaAs на этих подложках следует, вероятно, связывать с малой величиной рассогласования параметров решеток контактирующих фаз. По этому критерию система GaAs/Ge, безусловно, превосходит GaAs/Si и, как следствие, достигается более высокое качество слоев GaAs на германиевых подложках.

Спектральные зависимости квантовой эффективности типичной структуры GaAs/Ge в поляризованном свете приведены на рис. 3 в области больших углов падения,  $\theta \simeq 75^\circ$ . Хорошо видно, что изменение поляризации от  $E \parallel IP$  к  $E \perp IP$  не влияет на спектральный контур фототока и наблюдается лишь параллельное смещение кривой  $\eta^\perp$  относительно  $\eta^\parallel$ . Величина смещения контролируется углом падения линейно поляризованного излучения на приемную поверхность структуры  $p\text{-GaAs}$ . Особенности спектральных зависимостей  $\eta^\parallel$  и  $\eta^\perp$  такие же, как и для неполяризованного излучения (рис. 1). Следовательно, закономерности фотоэлектрических процессов от поляризации не зависят, но величина  $\eta$  модулируется углами  $\theta$  и  $\varphi$ .

Наведенный фотоплекроизм структур  $p\text{-GaAs}/n\text{-Ge}$  во всей области фоточувствительности сохраняется на постоянном уровне, определяемом углом падения линейно поляризованного излучения (рис. 4), т.е. ярко выражен его неселективный характер. Поэтому азимутальная фоточувствительность полностью определяется спектральной зависимо-

стью поляризационной разности  $\Delta\eta$ , которая имеет сходный с поляризационной квантовой эффективностью спектральный контур. Следовательно, в полученных структурах азимутальная фоточувствительность имеет селективный характер и достигает максимальных значений  $\Phi \simeq 20 \div 30$  мА/(Вт·град) при  $\theta \simeq 75 \div 78^\circ$  и  $T = 300$  К. Следует отметить, что в гетероструктурах GaAs/Ge можно в принципе обеспечить и широкополосный характер азимутальной фоточувствительности, если за счет оптимизации электрических параметров GaAs и Ge реализовать неселективный спектральный ход квантовой эффективности процесса фотопреобразования.

Таким образом, эпитаксиальные слои GaAs на германиевых подложках могут найти применение в качестве поляризационно-чувствительных фотопреобразователей, причем использованная технология допускает изготовление таких структур в матричном исполнении.

#### Список литературы

- [1] S.J. Wojtczuk, S.P. Tobin, C.J. Keavney, C. Bajgar, M.M. Sanfacon. IEEE Trans. Electron. Dev., **37**, 455 (1990).
- [2] S.P. Tobin, S.M. Vernon, C. Bajgar, V.E. Haven, L.M. Geoffroy, D.R. Lillington. IEEE Electron. Dev. Lett., **9**, 256 (1988).
- [3] Ю.В. Рудь. Изв. вузов СССР. Физика, **29**, вып. 8, 68 (1986).
- [4] *Актуальные проблемы материаловедения*, под ред. Э.Калдиса (М., Мир, 1983) вып. 2.
- [5] Г.С. Ландсберг. *Оптика* (М., 1976).
- [6] Ю.В. Жилев, Н. Назаров, В.Ю. Рудь, Л.М. Федоров. ФТП, **27**, 1611 (1993).
- [7] Ю.В. Жилев, А. Беркелиев, Н. Назаров, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Л.М. Федоров. Письма ЖТФ, **19**, 53 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова