

## ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И НАВЕДЕННЫЙ ФОТОПЛЕОХРОИЗМ ДВУХБАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР Au—*n*-GaP/*p*-Si

Ю. В. Жилияев, Д. Мелебаев, Н. Назаров, В. Ю. Рудь, Ю. В. Рудь

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

Физико-технический институт Академии наук Туркменистана, Ашгабад, Туркменистан  
(Получена 21 июня 1993 г. Принята к печати 29 июня 1993 г.)

Исследована фоточувствительность структур Au—*n*-GaP/*p*-Si, включающих гетеропереход (*n*-GaP/*p*-Si) и диод Шоттки (Au—*n*-GaP) со встречно направленными электрическими полями. Показано, что при освещении таких структур со стороны барьерного контакта (золота) в спектре фототока возникает инверсия его знака, обусловленная конкуренцией фоточувствительности составляющих структуру барьеров. Установлено, что наличие инверсии знака фототока при наклонном падении линейно поляризованного излучения на поверхность структур со стороны слоя золота приводит к селективному эффекту усиления наведенного фотоплекроизма. Сделан вывод о возможностях использования созданных двухбарьерных структур Au—*n*-GaP/*p*-Si в качестве поляриметрических фотодетекторов.

Исследования фоточувствительности двухбарьерных структур со встречным направлением электрических полей сопровождаются инверсией знака фототока, которая контролируется либо энергией фотонов, либо положением плоскости поляризации падающего излучения [1]. Этот эффект связан с конкуренцией фототоков, возникающих в результате разделения фотогенерированных носителей электрическим полем каждого из барьеров.

В настоящей работе представлены результаты исследований двухбарьерных структур, включающих гетеропереход *n*-GaP/*p*-Si и диод Шоттки Au—*n*-GaP. При наклонном падении линейно поляризованного излучения (ЛПИ) на приемную плоскость таких структур обнаружен эффект усиления наведенного фотоплекроизма.

Объектами исследования служили структуры Au—*n*-GaP/*p*-Si, полученные вакуумным термическим напылением золота на эпитаксиальный слой *n*-GaP на подложке из *p*-Si. Толщина полупрозрачной пленки Au составляла ~150÷200 Å, причем в процессе нанесения Au подложки *p*-Si с эпитаксиальным слоем *n*-GaP нагревались до температуры ~250 °С.

Эпитаксиальные слои *n*-GaP на подложках *p*-Si получены методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе [2]. В процессе эпитаксии слои *n*-GaP легировались теллуром и серой до концентраций электронов  $n \approx (1 \div 2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и имели толщину ~6÷7 мкм. Подложками для получения структур *n*-GaP/*p*-Si служили полированные пластины *p*-Si—КДБ-001 толщиной ~400 мкм, ориентированные в плоскости (100) с разориентацией 4° в направлении [110].

Площадь барьерного (Au) контакта в исследованных структурах Au—*n*-GaP/*p*-Si составляла  $s \approx 7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ . Омические контакты к *n*-GaP и *p*-Si создавались сплавлением сплавов In+2% Te и In+2.5% Zn соответственно в атмосфере очищенного водорода при температуре 550÷600 °С.

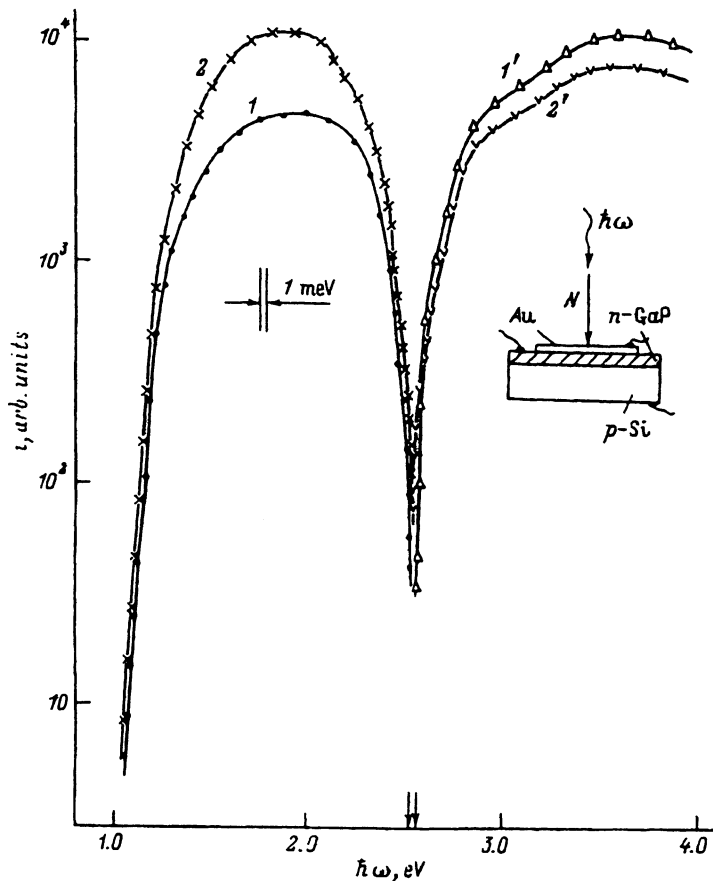


Рис. 1. Спектральные зависимости фототока структур Au—n-GaP/p-Si (1, 1' — ДН-141-3; 2, 2' — ДН-200-1) в неполяризованном свете при  $T = 300$  К. На вставке приведена схема освещения структуры. Угол падения излучения  $\theta = 0^\circ$ . Полярность барьерного контакта: 1, 2 — минус; 1', 2' — плюс. Стрелками на оси энергии помечены значения  $\hbar\omega$ , eV: 2.57 и 2.58, при которых происходит инверсия фототока.

Структуры Au—n-GaP/p-Si монтировались на столике Федорова таким образом, чтобы имелась возможность плавно изменять ориентацию зеркальной поверхности Au относительно падающего на него пучка ЛПИ. Точность измерения угла падения ЛПИ была не хуже  $\pm 30'$ . Фоточувствительность структур Au—n-GaP/p-Si, а также ее обеих составляющих n-GaP/p-Si и Au—n-GaP измерялась в режиме фототока короткого замыкания  $i$ , а спектральные зависимости  $i(\hbar\omega)$  пересчитывались на равное число падающих фотонов. Как показали измерения фототока, максимальная фоточувствительность полученных структур Au—n-GaP/p-Si реализуется, как правило, при их освещении со стороны барьерного контакта из Au. Максимальная фоточувствительность по отношению к интенсивности излучения достигнута в структуре Au—n-GaP/p-Si (ДН-200-1) и составляет 0.1 А/Вт при  $T = 300$  К.

На рис. 1 приведены типичные спектральные зависимости фототока  $i(\hbar\omega)$  изученных в работе структур при их освещении неполяризованным излучением. Видно, что эти зависимости для всех исследованных структур практически одинаковы. Главной особенностью таких структур является наличие в спектрах фототока точки инверсии его знака  $\hbar\omega_i$  (см. таблицу). Раздельное исследование

Номера образцов	$\hbar\omega_m$ , эВ	$\delta_{1/2}$	$i_{3.5}$ эВ/ $i_{1.9}$ эВ	$\hbar\omega_j$ , эВ	$P_i$ , % ( $\theta=0^\circ$ )
ДН-200-1	1.80—2.00	0.77	0.9	2.57	55
ДН-200-2	1.80—2.05	0.77	0.6	2.56	60
ДН-141-3	3.30—3.70	0.85	3.3	2.45	62
ДН-141-4	3.50—3.80	0.93	2.3	2.58	60

вкладов каждого из барьеров в суммарный фототок изученных структур показывает, что инверсия связана с конкуренцией его составляющих. В коротковолновой области fotocувствительность определяется разделением носителей полем барьера Au—n-GaP, тогда как в длинноволновой области при  $\hbar\omega < \hbar\omega_j$  знак фототока уже определяется гетеропереходом n-GaP/p-Si. В точке инверсии знака фототока  $i$  вклады каждого из барьеров сравниваются по амплитуде. Наблюдаемое изменение спектрального положения точки инверсии обусловлено различием в параметрах гетеропереходов и диодов Шоттки, образующих структуру (см. таблицу).

Длинноволновая граница fotocувствительности в таких структурах отвечает наступлению фундаментального поглощения в кремнии. Коротковолновая fotocувствительность структур Au—n-GaP/p-Si при  $\hbar\omega > \hbar\omega_j$  приходится на область фундаментального поглощения GaP и свидетельствует об определяющей роли поверхностного барьера металл—фосфид галлия.

Широкая полоса fotocувствительности, характерная для всех полученных структур Au—n-GaP/p-Si, реализуется между значениями энергии ширины запрещенных зон кремния и фосфида галлия. Полная ширина этой полосы на ее полувысоте  $\delta_{1/2}$  обычно лежит в интервале  $0.77 \div 1.00$  эВ (см. таблицу).

Следует также отметить, что в одном типе структур максимальная fotocувствительность приходится на область фундаментального поглощения в фосфиде галлия (рис. 1, кривая 1'), тогда как в другом типе структур доминирующий вклад в фототок обусловлен гетероструктурой n-GaP/p-Si. Спектральный интервал полосы максимальной fotocувствительности  $\Delta\hbar\omega_m$  для некоторых из исследованных структур Au—n-GaP/p-Si и соотношение фототоков короткого замыкания для коротковолновой и длинноволновой составляющих  $i_{3.5}$  эВ/ $i_{1.9}$  эВ приводятся в таблице. Наблюдаемые изменения этих параметров для полученных структур обусловлены в основном изменениями в толщине барьерного слоя и качестве самого барьера металл—полупроводник. По мере ухудшения свойств барьера инверсия в коротковолновой области спектров  $i(\hbar\omega)$  исчезает и присутствие барьера металл—полупроводник в таких структурах проявляется лишь в коротковолновом спаде фототока вблизи  $\hbar\omega = 2.5$  эВ, а также в резком падении отношения  $i_{3.5}$  эВ/ $i_{1.9}$  эВ.

Исследования fotocувствительности полученных структур в линейно поляризованном излучении показали, что при нормальном падении излучения ( $\theta = 0^\circ$ ) на поверхность барьерного контакта поляризационные индикатрисы фототока оказываются нечувствительными к изменениям положения плоскости поляризации E. Это естественное следствие изотропного характера фотоактивного поглощения в обоих активных областях изученных структур. При отклонениях направления падения ЛПИ от нормали ( $\theta \neq 0^\circ$ ) во всей области fotocувствительности проявлялась периодическая зависимость фототока от азимутального угла  $\varphi$  между E и плоскостью падения излучения (IP). При условии  $\theta = \text{const}$  поляризационные индикатрисы фототока обеих полярностей следуют закону

$$i_\varphi = |i^0| \cos^2 \varphi + |i^\perp| \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

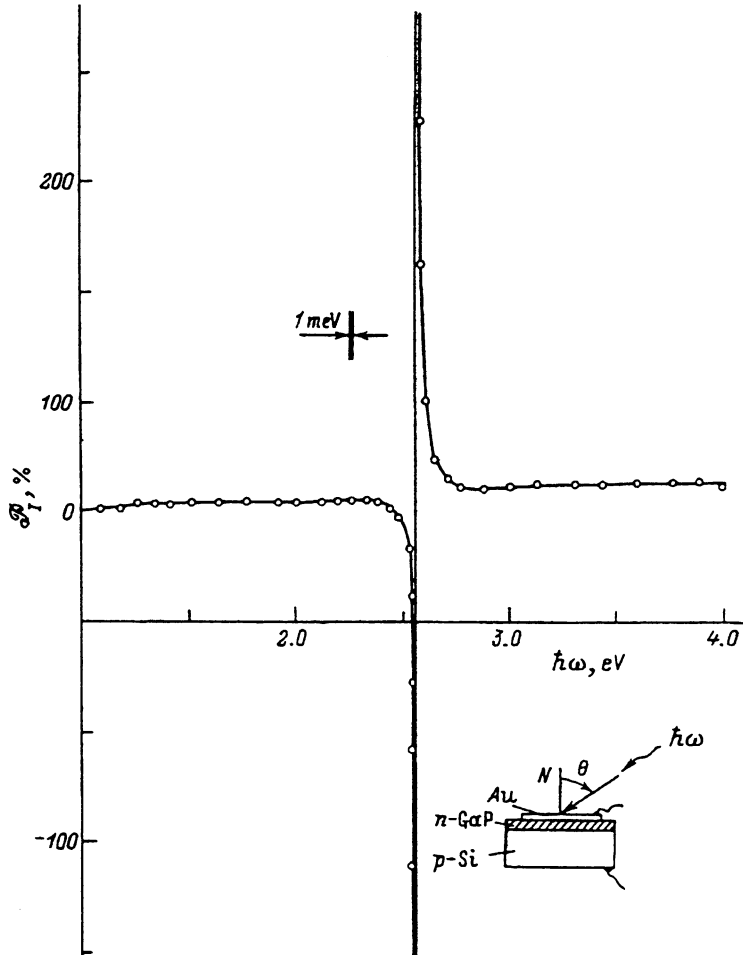


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплетохроизма для структуры Au-n-GaP/p-Si (ДН-200-1) при  $T = 300$  К.  $\theta = 80^\circ$ ; на вставке указана схема освещения структуры ЛПИ.

причём во всей области фоточувствительности фототок при  $E \parallel IP$  превышает фототок при  $E \perp IP$ , т. е.  $|i^{\parallel}| > |i^{\perp}|$ . Это обстоятельство является непосредственным следствием из соотношений Френеля, описывающих поляризационную зависимость амплитудных коэффициентов прохождения излучением границы воздух—поверхность пленки золота [3]. Коэффициент наведенного фотоплетохроизма, вычисляемый из соотношения

$$\mathcal{P}_1 = \left( \frac{i^{\parallel} - i^{\perp}}{i^{\parallel} + i^{\perp}} \right), \quad (2)$$

при фиксированной длине волны увеличивается с ростом угла падения излучения  $\theta$  по квадратичному закону.

На рис. 2 приведена типичная спектральная зависимость (с инверсией знака фототока) коэффициента наведенного фотоплетохроизма для структуры Au-n-GaP/p-Si при наклонном падении ЛПИ на поверхность золота. Видно, что вне точки инверсии знака фототока коэффициент фотоплетохроизма во

всей области фоточувствительности структуры при  $\theta = \text{const}$  практически постоянен и его величина (см. таблицу) находится на характерном для однобарьерных структур уровне, отвечающем прохождению ЛПИ через границу воздух—слой золота [3]. В области инверсии знака фототока коэффициент фотоплекроизма претерпевает разрыв и устремляется к бесконечности, как и в случае структур с естественным фотоплекроизмом  $\mathcal{P}_N$ , инвертирующих знак фототока [1]. Проявление эффекта усиления наведенного фотоплекроизма (рис. 2) обусловлено векторной природой фототока. Из (2) следует, что в случае различия в знаках  $i^{\#}$  и  $i^{\pm}$ , а также сближения их амплитуд ( $|i^{\#}| \approx |i^{\pm}|$ ) при определенных для каждой из структур энергиях фотонов коэффициент  $\mathcal{P}_1 \rightarrow \pm \infty$ , в результате чего спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплекроизма приобретает вид гиперболы и в узкой области энергий фотонов для изученных структур наступает эффект усиления их поляризационной фоточувствительности. Спектральное положение такой точки легко изменяется внешним смещением. В окрестности этой энергии  $\mathcal{P}_1 \approx 300 \div 500\%$ .

Таким образом, создание двухбарьерных структур на основе Au—*n*-GaP/*p*-Si позволяет реализовать эффект усиления наведенного фотоплекроизма, что может найти применение при создании селективных поляриметрических фотодетекторов в матричном исполнении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ю. В. Рудь. Изв. вузов. Физика, 29, 68 (1986).
- [2] Ю. В. Жилев, В. В. Криволапчук, Н. Назаров, И. П. Никитина, Н. К. Полегаев, Д. В. Сергеев, В. В. Травников, Л. М. Федоров. ФТП, 24, 1303 (1990).
- [3] Г. С. Ландсберг. Оптика, 927. М. (1976).

Редактор Т. А. Полянская

---