

06.3;07

©1993

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaP/Si В ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Ю.В.Жуляев, Н.Назаров, Ю.В.Рудь

Исследования гетероструктур в системе кремний-соединения A^3B^5 непрерывно расширяются и в основном нацелены на использование в оптоэлектронике кремния, который опускает высокую степень интеграции устройств с плотностью до 10^6 см^{-2} [1]. Недавно была установлена возможность достижения высокой поляризованной фоточувствительности в гетероструктурах GaP/Si, возникающей при наклонном падении линейно-поляризованного излучения (ЛПИ) на поверхность эпитаксиального слоя GaP на Si подложках [2]. В настоящей работе, являющейся логическим развитием [2,3], представлены результаты впервые выполненных поляризационных измерений фоточувствительности анизотропных гетероструктур $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ и $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$, полученных эпитаксиальным выращиванием слоев фосфида галлия n - и p -типа проводимости на подложки из кремния противоположного слоя типа проводимости.

Объектами исследования служили гетероструктуры $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ и $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ с толщинами эпитаксиального слоя фосфида галлия от 1 до 7 мкм. Обе разновидности анизотропных гетероструктур, $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ и $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$, создавались методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе $\text{Ga}(\text{GaP})\text{-PCl}_3\text{-H}_2$ [4,5].

Выращиваемые слои $n\text{-GaP}$ на $p\text{-Si}$ подложках легировались в процессе эпитаксии теллуром и серой до концентраций $n \simeq (1 - 3) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а слои $p\text{-GaP}$ на $n\text{-Si}$ подложках легировались цинком до концентраций $p \simeq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Толщина полученных слоев GaP изменялась за счет управления технологическими процессами в диапазоне 1–7 мкм.

Подложками для выращивания слоев GaP служили полированные пластины кремния марки КЭФ-001 и КБД-001, толщиной ~ 400 мкм, ориентированные в плоскости (100) с разориентацией $4\text{--}6^\circ$ с направлением [110].

Площади исследованных гетероструктур $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ и $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ составляли $S \simeq (1.0 - 1.2) \cdot 10^{-1} \text{ см}^2$.

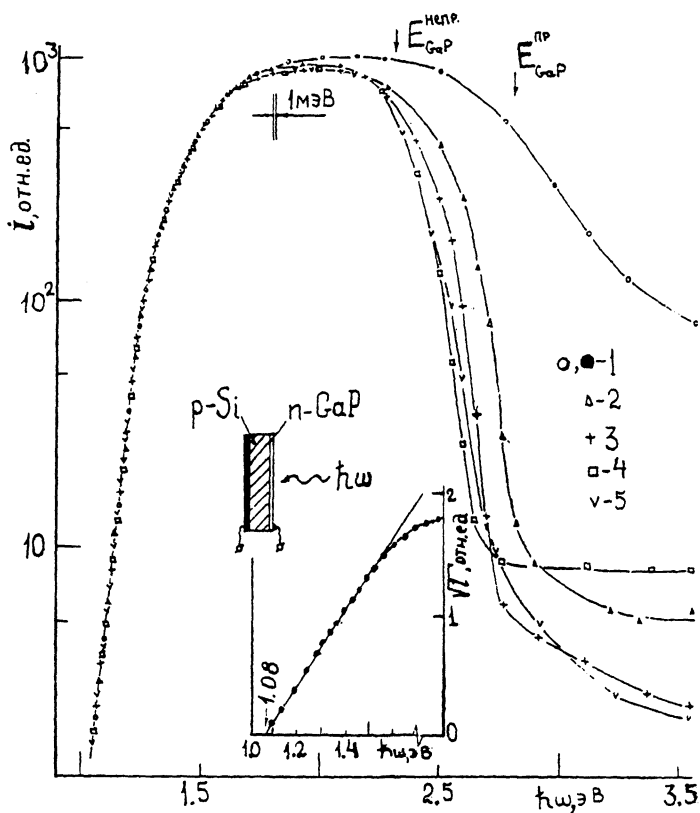


Рис. 1. Спектральные зависимости фототока короткого замыкания гетероструктур $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ в неполяризованном излучении.

($T = 300$ К. N образцов: 1 — 159-1, 2 — 158-2, 3 — 157-3, 4 — 141-10, 5 — 154-4).

На вставке указана геометрия освещения структур. Стрелками указаны энергии непрямых и прямых межзонных оптических переходов в GaP [6].

Омические контакты создавались вплавлением в атмосфере очищенного водорода при температурах $550\text{-}600^\circ\text{C}$; для $p\text{-Si}$ и $p\text{-GaP}$ использовался сплав $\text{In}+2\%\text{Zn}$, для $n\text{-Si}$ и $n\text{-GaP}$ — сплав $\text{In}+2\%\text{Te}+1\%\text{Ni}$.

Эпитаксиальные слои GaP в исследуемых структурах были монокристаллическими и имели зеркально-гладкую наружную поверхность.

Структуры $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ и $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ монтировались на столике Федорова, допускающем весь необходимый для поляризационных исследований набор манипуляций с образцами. Измерения спектров фототока короткого замыкания проводились при комнатной температуре, спектры пересчитывались на равное число падающих фотонов, спектральное разрешение приведено на рисунках 1–3. Перейдем к рассмотрению главных результатов выполненных исследований.

Знак фототока короткого замыкания для структур $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ и $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ оказывается не зависящим от места попадания светового зонда на гетероструктуру и величины энергии падающих фотонов, находясь в полном соответствии с энергетической диаграммой полученных типов энергетических барьеров. Следовательно, фотовольтаический эффект контролируется процессами разделения неравновесных носителей заряда в поле образуемого энергетического барьера на границе подложка-слой. Эта закономерность сохранялась и при увеличении толщины слоя $n\text{-GaP}$ от 1 до 7 мкм.

На рис. 1 представлены типичные спектральные зависимости фототока короткого замыкания гетероструктур $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ при освещении неполяризованным излучением вдоль нормали к освещаемой поверхности слоя $n\text{-GaP}$. Как видно из рис. 1, спектральный контур длинноволнового края фоточувствительности гетероструктур оказывается независимым от толщины слоя d_c и для всех изученных структур спрямляется в координатах $\sqrt{i} - \hbar\omega$ (рис. 1, вставка). При экстраполяции этих зависимостей $\sqrt{i} \rightarrow 0$ на ось энергий фотонов получается отсечка, которая оказывается близкой к энергии непрямых межзонных переходов в кремний [6]. На этом основании длинноволновый край фоточувствительности гетероструктур $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ можно связать с межзонным поглощением в кристалле подложки. Максимальная фоточувствительность в изученных гетероструктурах наблюдается в широком спектральном диапазоне. Интервал энергий, в пределах которого фоточувствительность сохраняется на максимальном уровне (см. таблицу), достаточно широкий и имеет тенденцию к расширению в коротковолновую область по мере снижения толщины слоя d_c . Эффект сужения области фоточувствительности с ростом d_c хорошо иллюстрируется значениями полной ширины спектральных зависимостей фоточувствительности на полувысоте $\delta_{1/2}$ (см. таблицу). Так, с увеличением толщины слоя $n\text{-GaP}$ от 1 до 7 мкм величина $\delta_{1/2}$ падает от 1300 до 850 мэВ. Что касается максимального значения квантовой эффектив-

ности фотопреобразования η_m , то она сопутствует гетероструктурам с наиболее тонким слоем n -GaP.

Начало коротковолнового спада fotocувствительности в полученных гетероструктурах отвечает энергии прямых оптических переходов в GaP [7], а сам процесс спада i усиливается и становится резко выраженным все в более узком спектральном диапазоне по мере увеличения d_c . Эти особенности позволяют связать коротковолновую границу fotocувствительности в структурах n -GaP/ p -Si при $d_c \gtrsim 3$ мкм с усилением поглощения излучения в слое GaP, прилегающем к его поверхности. Из рис. 1 и таблицы можно видеть, как с понижением $d_c < 3$ мкм ослабевает коротковолновый спад fotocувствительности и, соответственно, снижается отношение фототока при $\hbar\omega \simeq 3.0$ эВ к фототоку в максимуме $i_{3.0}/i_m$. Таким образом, в гетероструктурах n -GaP/ p -Si, полученных в хлоридном газотранспортном эпитаксиальном процессе, воспроизводимо наблюдается широкополосный фотовольтаический эффект в диапазоне энергий фотонов между ширинами запрещенных зон контактирующих полупроводников. При $d_c \simeq 1$ мкм наблюдается переход от обычного для гетероструктур эффекта окна в отношении интенсивности падающего излучения к характерному для поверхностно-барьерных структур спектральному контуру фототока без выраженного коротковолнового спада [8]. Именно такой эффект в полученных гетероструктурах может быть достигнут, как видно из рис. 1 (кривая 1), если выполнить условие $d_c < 1$ мкм.

На рис. 2 приведены типичные спектральные зависимости фототока структур p -GaP/ n -Si. Как и в случае n -GaP/ p -Si, в таких структурах fotocувствительность максимальна при освещении со стороны слоя GaP. Ширина спектров fotocувствительности в p -GaP/ p -Si структурах, как видно из таблицы, существенно меньше, чем n -GaP/ p -Si при близких величинах d_c и к тому же область максимальной fotocувствительности имеет ярко выраженный максимум. Длинноволновый край fotocувствительности в этих структурах, как и в случае n -GaP/ p -Si, спрямляется в координатах $\sqrt{i} - \hbar\omega$ с отсечкой по оси энергий вблизи ширины запрещенной зоны кремния [6]. Обращает на себя внимание тот факт, что коротковолновый спад фототока для гетероструктур p -GaP/ n -Si начинается при более низких энергиях фотонов, чем у n -GaP/ p -Si (рис. 1). Максимальная квантовая эффективность процесса фотопреобразования для анизотропных гетероструктур p -GaP/ n -Si, как видно из таблицы, достаточно высокая и по величине оказывается даже выше, чем в n -GaP/ p -Si с $d_c \simeq 1$ мкм.

Фотоэлектрические параметры гетероструктур GaP/Si при 300 К

Тип гетероструктуры	Номер образца	d_c , мкм	$\hbar\omega_m$, эВ	$\delta_{1/2}$, мэВ	η_m , * эл./фат.	$i_{3.0}/i_m$	$P_h^m \theta = 75^\circ$, %	$(\Delta\hbar\omega)P_m$, эВ	Φ_i^m **, A/Вт.град.
n-GaP/p-Si	159-1	1	1.9-2.3	1300	0.25(0.65)	0.26	68	1.2-3.1	0.17(0.65)
	158-2	3	1.9-2.1	1040	0.18(0.65)	$8 \cdot 10^{-3}$	60	1.4-2.6	0.11(0.65)
	157-3	4	1.8-2.05	940	0.15(0.65)	$4 \cdot 10^{-3}$	65	1.4-2.6	0.10(0.65)
	141-10	6	1.9-2.0	830	0.17(0.65)	$8 \cdot 10^{-3}$	58	1.4-2.5	0.10(0.65)
	154-4	7	1.9-2.05	840	0.10(0.65)	$8 \cdot 10^{-3}$	58	1.3-2.3	0.10(0.65)
p-GaP/n-Si	1-3	4	1.6	620	0.31(0.78)	$1.4 \cdot 10^{-2}$	58	1.4-1.8	0.18(0.78)
	99-1	3	1.4-1.55	640	0.23(0.86)	$3.3 \cdot 10^{-2}$	58	1.4-1.7	0.14(0.86)

* В скобках указаны длины волн, для которых приводится максимальная квантовая эффективность фотообразования при освещении гетероструктур со стороны слоя GaP и нормальном падении естественного излучения (угол падения $\theta = 0^\circ$).

** В скобках указаны длины волн, для которых приведены значения максимальной азимутальной фоточувствительности при $\theta \simeq 75^\circ$.

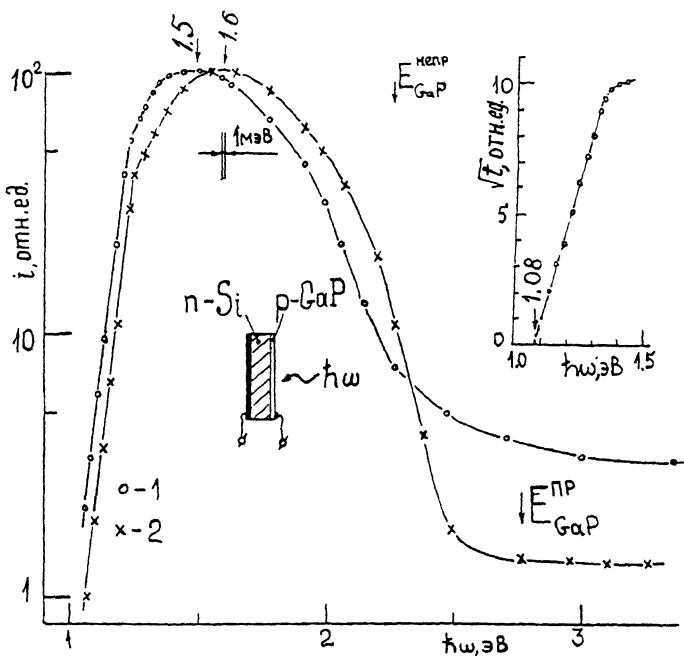


Рис. 2. Спектральные зависимости фототока короткого замыкания гетероструктур $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ в неполяризованном излучении.

($T = 300$ К. N образцов: 1 — 1-3, 2 — 99-1).

На вставке дана геометрия освещения структур. Стрелками указаны энергии прямых и непрямых межзонных оптических переходов в GaP [6].

Как показывают поляризационные измерения фоточувствительности, в случае освещения гетероструктур обоих типов вдоль нормали к поверхности широкозонного слоя коэффициент фотополюхризма

$$P_h = \left(\frac{i^{\parallel} - i^{\perp}}{i^{\parallel} + i^{\perp}} \right) \cdot 100\%,$$

где значки “ \parallel ” и “ \perp ” отвечают фототокам, когда электрический вектор световой волны \mathbf{E} параллелен или перпендикулярен плоскости падения (ПП) линейно-поляризованного излучения, оказывается равным нулю. Это характерное свойство фотоактивного поглощения ЛПИ изотропной средой [3]. При переходе к наклонной геометрии освещения и как только угол падения θ становится отличным от нуля фототоки $i^{\parallel} > i^{\perp}$ становятся различными, причем $i^{\parallel} > i^{\perp}$. Изменение азимутального угла φ между \mathbf{E} и ПП вызывает

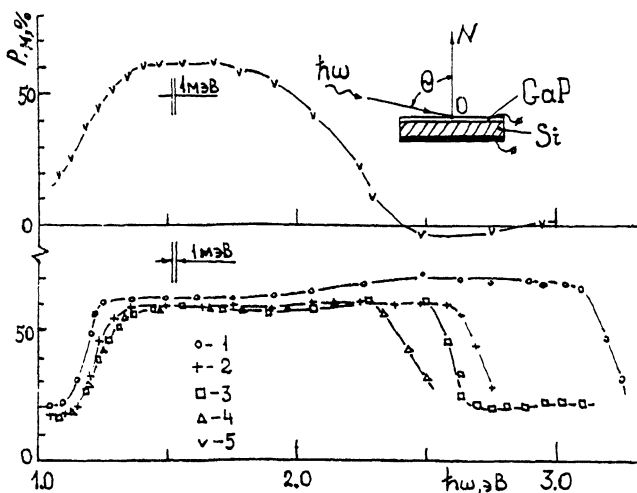


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплеохроизма гетероструктур GaP/Si.

($T = 300$ К. $\theta = 75^\circ$. N образцов: 1 — 159-1, 2 — 158-2, 3 — 141-10, 4 — 154-4, 5 — 1-3).

На вставке указана геометрия поляризационных измерений фоточувствительности гетероструктур.

периодическое изменение фототока согласно соотношению $i_\varphi = i^{\parallel} \cdot \cos^2 \varphi + i^{\perp} \sin^2 \varphi$.

С увеличением угла падения θ коэффициент наведенного фотоплеохроизма во всех структурах растет по квадратичному закону $P_h \sim \theta^2$. Угловые зависимости $P_h(\theta)$ для гетероструктур с освещаемыми n - или p -слоями оказались близкими между собой. Это обусловлено тем, что наведенный фотоплеохроизм определяется одинаковой для всех гетероструктур поляризационной зависимости амплитудных коэффициентов прохождения ЛПИ через границу воздух-поверхность слоя GaP. Численные различия в коэффициенте P_h при одинаковых значениях θ для различных гетероструктур (см. таблицу) могут быть связаны с различиями в оптическом качестве наружной плоскости широкозонного слоя GaP. Следует подчеркнуть, что для гетероструктур GaP/Si значения P_h оказываются близкими к определенным ранее в барьерах Au-GaP [8].

На рис. 3 представлены типичные спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплеохроизма для полученных гетероструктур. Из этих кривых следует, что в таких энергетических барьерах проявляется эффект окна для наведенного фотоплеохроизма. В случае структур

n-Ga/*p*-Si ширина полосы максимальной поляризационной фоточувствительности ($\Delta\hbar\omega$) P_m (см. таблицу и рис. 3) оказалась выше, чем у *p*-GaP/*n*-Si. В то же время с уменьшением толщины слоя *n*-GaP происходит закономерное смещение коротковолновой границы наведенного фотоплекроизма от 2.3 эВ ($d_c = 7$ мкм) к 3.1 эВ ($d_c = 1$ мкм). Поэтому есть основания связывать коротковолновую границу P_h с влиянием оптического поглощения в приповерхностном слое GaP. Действительно, с уменьшением d_c роль поглощения падает и полоса высокого фотоплекроизма расширяется в сторону более коротких волн. Длинноволновая граница наведенного фотоплекроизма в структурах *n*-GaP/*p*-Si не обнаруживает столь выраженной зависимости от d_c , поскольку определяется процессами поглощения в кристалле Si. В отличие от рассмотренных выше, в структурах *p*-GaP/*n*-Si, как и в спектральных зависимостях фототока к интенсивности неполяризованного излучения (рис. 1 и 2), полоса поляризационной фоточувствительности заметно сужается.

По результатам выполненных поляризационных исследований были определены также значения максимальной азимутальной токовой фоточувствительности полученных структур согласно соотношению [9]

$$\Phi_i = 2 \cdot P_h \cdot S_i,$$

где S_i — токовая фоточувствительность структуры. Результаты определения азимутальной фоточувствительности приведены в таблице. Эти данные показывают, что использованная технология хлоридной газотранспортной эпитаксии позволяет создавать высокочувствительные поляриметрические фотодетекторы, на основе гетероструктур GaP на Si подложках, поляризационные свойства которых экспрессно контролируются посредством выбора угла падения ЛПИ.

Список литературы

- [1] Тучкевич В.М. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 11. С. 2065–2071.
- [2] Жилев Ю.В., Назаров Н., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Федоров Л.М. // ФТП. 1993. Т. 27. В. 9.
- [3] Рудь Ю.В. // Известия вузов. Физика. 1986. Т. 28. В. 8. С. 62–83.
- [4] Жилев Ю.В., Криволапчук В.В., Назаров Н., Никитина И.П., Полетаев Н.К., Сергеев Д.В., Травников В.В., Федоров Л.М. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 7. С. 1303–1305.
- [5] Евстропов В.В., Жилев Ю.В., Назаров Н., Сергеев Д.В., Федоров Л.М. // ФТП. 1993. Т. 27. В. 4. С. 668–673.
- [6] Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник. М.: Наука. 1979. 339 с.

- [7] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х томах. Кн. 2. М.: Мир. 1984. 456 с.
- [8] Конников С.Г., Мелебаев Д., Рудь В.Ю., Федоров Л.М. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 12. С. 11-15.
- [9] Медведкин Г.А., Рудь Ю.В., Таиров М.А. Полупроводниковые кристаллы фотоприемников линейно-поляризованного излучения. Ташкент: ФАН. 1992. 296 с.

Физико-технический
институт им.А.Ф.Иоффе
РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию
27 апреля 1993 г.
