

06.3;07

©1993

ФОТОПЛЕОХРОИЗМ ГЕТЕРОСТРУКТУР

 $n\text{-GaAs}_x\text{P}_{1-x}/p\text{-Si}$ Ю.В. Жиляев, А. Беркелиев, Н. Назаров,
В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Л.М. Федоров

Гетероструктуры в системе кремний — полупроводники A^3B^5 широко изучаются в основном с целью монолитной интеграции оптоэлектронных приборов на основе полупроводников A^3B^5 и их твердых растворов с быстродействующими интегральными схемами на кремнии. Поэтому представляют значительный интерес исследования фотоэлектрических свойств гетероструктур GaAs/Si, GaAsP/Si как в неполяризованном, так и в линейно-поляризованном свете. Следует также отметить, что до сих пор такие гетероструктуры исследовались исключительно с применением естественного излучения.

В настоящей работе сообщаются результаты первых исследований наведенной поляризационной фоточувствительности в гетероструктурах $n\text{-GaAs}_x\text{P}_{1-x}/p\text{-Si}$, $n\text{-GaAs}/p\text{-Si}$ и $p\text{-n-GaAs}/n\text{-Si}$.

1. Объектами исследования служили гетероструктуры $n\text{-GaAs}_{0.3}\text{P}_{0.7}/p\text{-Si}$, $n\text{-GaAs}/p\text{-Si}$ и $p\text{-GaAs-}n\text{-GaAs}/n\text{-Si}$, полученные методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе Ga(GaP)-PCl₃-H₂ и Ga(GaAs)-AsCl₃-H₂ [1-3]. Эпитаксиальные слои $n\text{-GaAs}$ и $n\text{-GaAs}_{0.3}\text{P}_{0.7}$ легировались теллуром и серой в процессе эпитаксии до концентраций электронов $n \simeq 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а слой $p\text{-GaAs}$ — цинком до концентраций дырок $p \simeq (0.5 - 1.0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Толщины эпитаксиальных слоев в исследованных структурах были различными: $n\text{-GaAs}_{0.3}\text{P}_{0.7}$ — 2-3 мкм, $n\text{-GaAs}$ — 8 мкм и $p\text{-GaAs}$ — 6 мкм.

В качестве подложек для получения указанных выше структур использовались полированные пластины Si марки КЭФ-001 и КДБ-001 толщиной ~ 400 мкм, ориентированные в плоскости (100) с разориентацией под углом $\sim 6^\circ$ в направлении [110].

Площади исследованных структур $n\text{-GaAs}_{0.3}\text{P}_{0.7}/p\text{-Si}$, $n\text{-GaAs}/p\text{-Si}$ и $p\text{-n-GaAs}/n\text{-Si}$ составляли $S = 0.1 \div 0.2 \text{ см}^2$. Омические контакты получались сплавлением в атмосфере очищенного водорода [2,3].

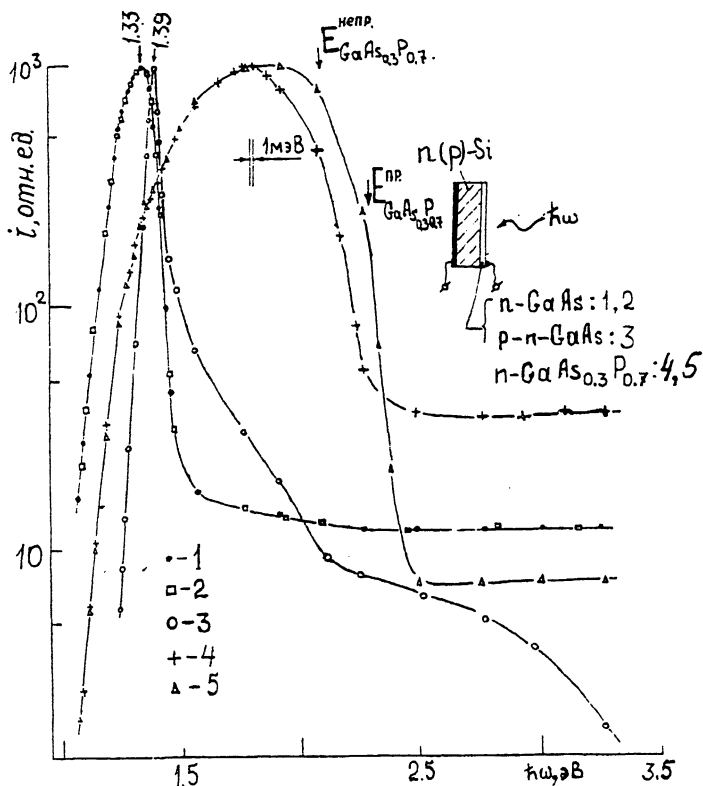


Рис. 1. Спектральные зависимости фототока короткого замыкания структур $n\text{-GaAs}/p\text{-Si}$ (1, 2), $p\text{-n-GaAs}/n\text{-Si}$ (3) и $n\text{-GaAs}_x\text{P}_{1-x}/p\text{-Si}$ (4, 5) в неполяризованном излучении. $T = 300$ К. Номер образцов: 1 — 183-1, 2 — 183-2, 3 — 188-1, 4 — 161-2, 5 — 162-1. На вставке представлена геометрия освещения структур. Стрелками указана энергия прямых (~ 2.3 эВ) и непрямых (~ 2.1 эВ) межзонных оптических переходов в твердом растворе $\text{GaAs}_{0.3}\text{P}_{0.7}$ [5].

Исследуемые структуры монтировались на столике Федорова, позволяющем необходимым образом изменять ориентацию приемной плоскости гетероструктур относительно направления падающего пучка излучения. Спектры фоточувствительности исследовались при освещении структур естественным и линейно-поляризованным излучением при $T = 300$ К и пересчитывались на равное число падающих фотонов. Типичные результаты выполненных исследований сведены в таблице и представлены на рис. 1-3. Основные закономерности состоят в следующем.

Спектральные зависимости фоточувствительности гетероструктур $n\text{-GaAs}/p\text{-Si}$ (рис. 1, кривые 1, 2) при их освещении естественным излучением со стороны слоя $n\text{-GaAs}$

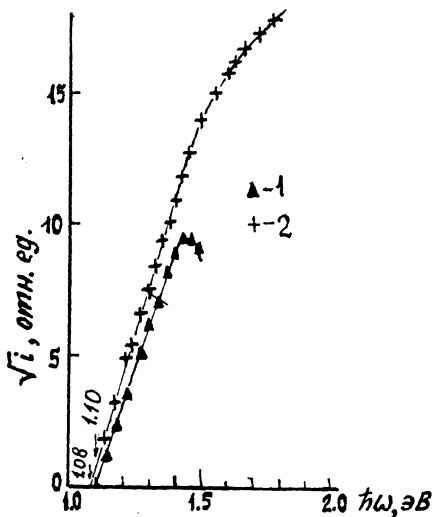


Рис. 2. Спектральные зависимости длинноволнового края фототока короткого замыкания гетероструктур $n\text{-GaAs}/p\text{-Si}$ (1, обр. N 183-1) и $n\text{-GaAs}_{0.3}\text{P}_{0.7}/p\text{-Si}$ (2, обр. N 161-2) при $T = 300$ К в неполяризованном излучении.

вдоль нормали имеют вид широких полос (полная ширина полос на полувысоте $\delta_{1/2} = 170$ мэВ) с максимумом $\hbar\omega_m \simeq 1.33$ эВ. Положение максимума в спектрах фототока и ширины этих полос $\delta_{1/2}$ хорошо воспроизводится в образцах из разных технологических процессов (таблица). Длинноволновый край фототока короткого замыкания таких структур в координатах $\sqrt{i} - \hbar\omega$ имеет вид прямой линии, которая при экстраполяции значения фототока $\sqrt{i} \rightarrow 0$ дает отсечку на оси энергий при $\hbar\omega_0 \simeq 1.1$ эВ, что соответствует непрямому энергетическому зазору в кремнии [4]. На этом основании можно считать, что длинноволновая граница фоточувствительности гетероструктур $n\text{-GaAs}/p\text{-Si}$ определяется межзонным поглощением в кристалле подложки. Что касается коротковолнового спада фототока при $\hbar\omega > 1.35$ эВ, то его следует связывать с поглощением в активной области гетероструктур слоем GaAs. Резкий спад фоточувствительности приходится на область энергий, отвечающую прямым межзонным переходам в арсениде галлия [7], когда в результате увеличения коэффициента поглощения область фотогенерации локализуется вблизи освещаемой поверхности слоя GaAs и с ростом энергии фотонов все более удаляется от активной области гетероструктуры. Тот факт, что фототок короткого замыкания при $\hbar\omega > 1.5$ эВ

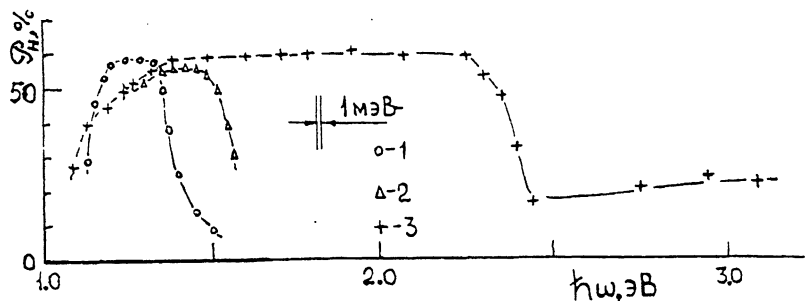


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплеохроизма структур n -GaAs/ p -Si (1, обр. N 183-1), p - n -GaAs/ n -Si (2, обр. N 188-1) и n -GaAs_{0.3}P_{0.7}/ p -Si (3), обр. N 161-2). ($T = 300$ K. Угол падения линейно-поляризованного излучения $\theta \approx 75^\circ$ со стороны слоя).

насыщается на некотором постоянном уровне свидетельствует о том, что область фотогенерации и при энергиях фотонов до 2.7 эВ все еще находится в пределах длины диффузионного смещения фотовозбужденных носителей в n -GaAs.

Спектральная зависимость фототока структур p - n -GaAs/ n -Si (рис. 1, кривая 3) характеризуется значительным сужением краевой полосы до $\delta_{1/2} \approx 60 - 65$ мэВ и смещением ее максимума в коротковолновую область. Длинноволновый край фоточувствительности при этом в отличие от структур n -GaAs/ p -Si (рис. 1, кривые 1, 2) становится экспоненциальным и его можно характеризовать высоким значением крутизны $S = \frac{d(\ln i)}{d(\hbar\omega)} \approx 45 - 50$ эВ⁻¹, отвечающим прямым межзонным переходам в GaAs [5]. Резкий коротковолновый спад фототока при $\hbar\omega > 1.39$ эВ в этих структурах можно, как и в случае более простых структур n -GaAs/ p -Si, объяснить поглощением излучения с энергией $\hbar\omega \gtrsim E_g^{\text{GaAs}}$. Толщина эпитаксиальных слоев GaAs n - и p -типа проводимости в таких гетероструктурах оказывается значительно выше эффективной длины поглощения излучения с энергией фотонов $\hbar\omega \gtrsim E_g^{\text{GaAs}}$. Следовательно, в структурах p - n -GaAs/ n -Si максимум фоточувствительности определяется фотоактивными процессами поглощения в арсениде галлия и поэтому его энергетическое положение оказывается меньше величины E_g^{GaAs} . Вклад кремния в фоточувствительность структур p - n -GaAs/ n -Si, как видно из рис. 1, не проявляется.

В гетероструктурах на основе эпитаксиальных слоев твердых растворов n -GaAs_{0.3}P_{0.7} на Si подложках область максимальной фоточувствительности смещается в коротко-

волновый спектральный диапазон и ширина полосы высокой фоточувствительности существенно уширяется до значений ~ 690 мэВ (см. таблицу). Это связано, по-видимому, с существенным уменьшением толщины слоев (d_c) GaAsP по сравнению с d_c GaAs, а также с понижением рассогласования параметров кристаллических решеток слоя и подложки и, соответственно, улучшением совершенства переходной области гетероструктур. В пользу этих предположений говорит и наблюдаемое при переходе к слоям n -GaAs_{0.3}P_{0.7} сильное возрастание квантовой эффективности процесса фотопреобразования в гетероструктурах n -GaAs_{0.3}P_{0.7}/ p -Si по сравнению с гетероструктурами, в которых гетерограница формируется сопряжением GaAs и Si. Отметим также, что длинноволновый край фоточувствительности гетероструктур n -GaAs_{0.3}P_{0.7}/ p -Si определяется фотоактивным поглощением в кремнии, поскольку он впрямляется в координатах $\sqrt{i} - \hbar\omega$ и отсечка оказывается близкой к ширине запрещенной зоны подложки E_g^{Si} (рис. 2, кривая 2). Коротковолновый спад фототока в гетероструктурах n -GaAs_{0.3}P_{0.7}/ p -Si, как видно из рис. 1 (кривые 4 и 5), приходится на область фундаментального поглощения в слое GaAs_{0.3}P_{0.7} [5] и поэтому может быть приписан влиянию поглощения падающего излучения в широкозонном "окне" таких гетероструктур.

2. Наклонное падение линейно-поляризованного излучения (ЛПИ) на приемную плоскость рассмотренных выше типов гетероструктур приводит к возникновению в них поляризованной фоточувствительности, которая наблюдается во всей области фоточувствительности этих структур по отношению к интенсивности естественного излучения (рис. 1). Как только угол падения ЛПИ становится отличным от нуля ($\theta > 0^\circ$), возникает эффект наведенной поляризации фоточувствительности [6], обусловленной анизотропией оптических процессов на границе воздух-слой полупроводника. Спектральный контур фототока для всех изученных гетероструктур при $\theta > 0^\circ$ при любых изменениях ориентации электрического вектора световой волны \mathbf{E} относительно плоскости падения (ПП) излучения от $\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$ на $\mathbf{E} \perp \text{ПП}$ сохраняется и не отличается от спектрального контура фототока этих структур в естественном излучении (рис. 1). Коэффициент наведенного фотополюхрома, который является главной количественной характеристикой поляризационной фоточувствительности полупроводников [6], определяется в соответствии с соотношением:

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

Фотоэлектрические параметры гетероструктур $n\text{-GaAs}/p\text{-Si}$, $n\text{-GaAs}_x\text{P}_{1-x}/p\text{-Si}$ и $p\text{-n-GaAs}/n\text{-Si}$ при $T = 300 \text{ K}$

Тип гетероструктуры	№ обр.	d_c , мкм	$\hbar\omega_m$, эВ	$\delta_{1/2}$, мэВ	$\eta_m(\theta \simeq 75^\circ)^*$ эл/фот	$\frac{i_{3.0}}{I_m}$	$\rho_H^m(\theta \simeq 75^\circ)$, %	Φ_i^m , А/Вт. град
$n\text{-GaAs}/p\text{-Si}$	183-1	8	1.33	170	0.032 (1.33)	$1 \cdot 10^{-2}$	57	0.027 (1.33)
	183-2	8	1.33	170	0.030 (1.33)	$1.2 \cdot 10^{-2}$	57	0.026 (1.33)
$n\text{-GaAs}_{0.3}\text{P}_{0.7}/p\text{-Si}$	162-1	2	1.85	690	0.17 (1.85)	$7 \cdot 10^{-2}$	60	0.11 (1.85)
	161-2	3	1.78	620	0.12 (1.78)	$4 \cdot 10^{-2}$	60	0.08 (1.78)
$p\text{-n-GaAs}/n\text{-Si}$	188-1	6	1.39	60	0.0020 (1.39)	$3.5 \cdot 10^{-3}$	60	0.0024 (1.39)
	188-2	6	1.39	65	0.0020 (1.39)	$3.0 \cdot 10^{-3}$	58	0.0024 (1.39)

* В скобках указана энергия фотонов, которым соответствуют приводимые значения η_m и Φ_i^m .

где фототоки i^{\parallel} и i^{\perp} отвечают ЛПИ при $E \parallel PP$ и $E \perp PP$ соответственно. Как показали выполненные измерения, с увеличением угла падения θ коэффициент фотоплеохроизма возрастает по квадратичному закону $\mathcal{P}_H \sim \theta^2$. В таблице приводятся типичные величины \mathcal{P}_H для исследованных гетероструктур, которые достаточно близки к известным для поверхностно-барьерных структур [7].

Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплеохроизма для типичных структур при $T = 300$ К и освещении со стороны эпитаксиальных слоев приведены на рис. 3. Видно, что в спектральном диапазоне, отвечающем высокой фоточувствительности исследованных гетероструктур, коэффициент наведенного фотоплеохроизма сохраняется на уровне максимального значения \mathcal{P}_H^m (см. таблицу). Такая неселективность, вообще говоря, является характерной для наведенного наклонным падением ЛПИ на границу двух сред фотоплеохроизма [6].

Следует обратить внимание на наличие в спектральных зависимостях \mathcal{P}_H всех полученных гетероструктур коротковолновой границы. Ее проявление сопутствует ситуации, когда происходит спад фототоков i^{\parallel} и i^{\perp} из-за влияния поглощения в толще эпитаксиального слоя, со стороны которого ЛПИ поступает в активную область гетероструктур. Заметим, что в случае поверхностно-барьерных структур, где излучение попадает в активную область сквозь полупрозрачный слой металла, в спектрах фотоплеохроизма коротковолновый спад не наблюдался [7], что также свидетельствует в пользу предположения о его связи с влиянием поглощения в толще полупроводника, примыкающего к активной области структуры.

В таблице приведены также типичные максимальные значения азимутальной токовой фоточувствительности Φ_i^m полученных гетероструктур на основе кремния и полупроводников A^3B^5 .

Наиболее высокие величины Φ_i^m достигнуты в гетероструктурах на основе твердых растворов $GaAs_{0.3}P_{0.7}$. Эти величины находятся на уровне характерных для поверхностно-барьерных структур [7,8] и указывают на возможность применений фотопреобразователей типа $n-GaAs_xP_{1-x}/p-Si$ в качестве высокочувствительных фотоанализаторов линейно-поляризованного излучения, спектральный диапазон которых определяется составом полупроводникового слоя, а величина азимутальной фоточувствительности — углом падения ЛПИ на приемную плоскость структур.

Список литературы

- [1] Жиляев 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.
- [2] Евстропов В.П., Жиляев Ю.В., Назаров Н., Сергеев Д.В., Федоров Л.М. // ФТП. 1993. Т. 27. В. 4. С. 668-673.
- [3] Жиляев Ю.В., Липко А.Л., Мынбаева М.Г., Назаров Н., Федоров Л.М. // Письма в ЖТФ. Т. 19. В. 7. С. 30-33.
- [4] Физико-химические свойства полупроводниковых веществ (справочник). М. Наука. 1979. 339 с.
- [5] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В двух книгах. Кн. 2. М. Мир. 1984. 456 с.
- [6] Рудь Ю.В. // Изв. вузов. Физика. 1986. Т. 28. В. 8. С. 68-83.
- [7] Конников С.Г., Мелебаев Д., Рудь В.Ю., Сергинов М. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 12. С. 39-42.
- [8] Конников С.Г., Мелебаев Д., Рудь В.Ю., Федоров Л.М. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 12. С. 11-15.

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

Поступило в Редакцию
26 апреля 1993 г.

