

НАВЕДЕННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ n -GaP/ p -Si

А. Беркелиев, Ю. В. Жилиев, Н. Назаров, В. Ю. Рудь, Ю. В. Рудь

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

(Получена 14 мая 1993 г. Принята к печати 24 мая 1993 г.)

Методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе выращены структурно-совершенные монокристаллические слои n -GaP с толщиной до 6 мкм. Исследованы спектры фоточувствительности гетеропереходов n -GaP/ p -Si при наклонном падении линейно-поляризованного излучения на приемные плоскости n -GaP и p -Si. Обнаружена поляризационная фоточувствительность и обсуждаются ее особенности в зависимости от геометрии освещения. Показана возможность достижения на полученных гетеропереходах широкополосного и селективного режимов фоторегистрации линейно-поляризованного излучения путем экспрессного изменения геометрии освещения.

Создание гетеропереходов в системе GaP/Si представляет большой интерес для полупроводниковой электроники, что вызвано возможностями сочетания в таких гетероструктурах преимуществ кремния с особенностями фосфида галлия и позволяет рассчитывать на решение ряда принципиальных задач микроэлектроники [1-5].

Нами в работе [6] сообщалось об обнаружении полученных широко распространенным методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе гетероструктурах GaP/Si, поляризационной фоточувствительности, возникающей в результате наклонного падения линейно-поляризованного излучения (ЛПИ) на приемную GaP-плоскость таких структур. Настоящая работа является развитием [6] и посвящена сравнительному экспериментальному изучению наведенной наклонным падением ЛПИ поляризационной фоточувствительности [7] в зависимости от геометрии освещения.

Исследуемые гетероструктуры n -GaP/ p -Si с толщиной эпитаксиального слоя фосфида галлия ~6 мкм создавались методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе Ga(GaP)—PCl₃—H₂ [8]. Выращиваемые слои n -GaP на p -Si подложках легировались в процессе эпитаксии теллуром и серой до концентрации электронов $n \approx (1-3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и имели холловские подложности $\mu_n \approx 40-70 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ($T = 300 \text{ К}$). Подложками для выращивания слоев n -GaP служили полированные пластины кремния марки КЭФ-001, толщиной ~400 мкм, ориентированные в плоскости (100) с разориентацией ~6° по отношению к направлению [110]. Площади исследованных гетероструктур n -GaP/ p -Si составляли $S \approx 0.2 \text{ см}^2$. Омические контакты создавались сплавлением в атмосфере очищенного водорода при температурах 550÷600 °С в случае p -Si сплава (In+2% Zn), а n -GaP — сплава (In+2.5% Te). Эпитаксиальные слои n -GaP в исследованных структурах были монокристаллическими и имели зеркально гладкую наружную плоскость.

Структуры монтировались на столике Федорова таким образом, что имелась возможность освещать их как со стороны поверхности кремния, так и со

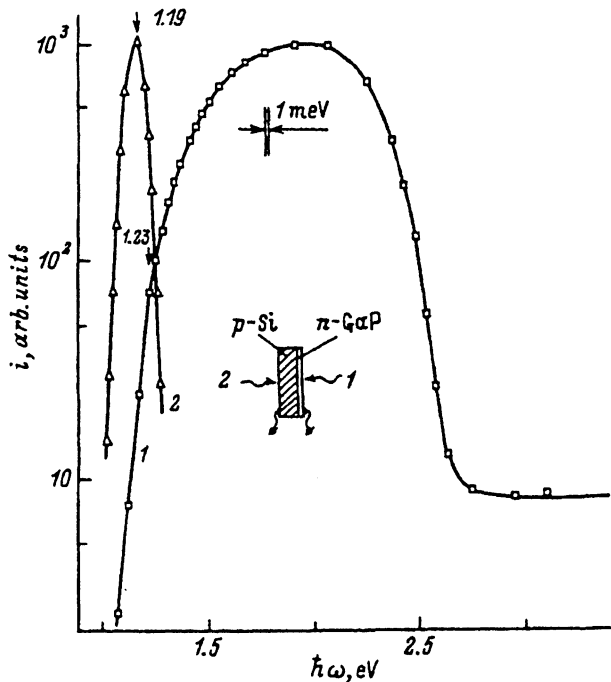


Рис. 1. Спектральные зависимости фоточувствительности гетероперехода $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ в неполяризованном свете. $T = 300$ К. На вставке указаны геометрия освещения: 1 — освещение со стороны слоя $n\text{-GaP}$, 2 — со стороны подложки $p\text{-Si}$. $d_e \approx 6$ мкм, $d_s \approx 400$ мкм.

стороны фосфида галлия, допуская все необходимые в поляризационных измерениях изменения ориентации приемной плоскости гетероперехода относительно пучка падающего ЛПИ с точностью не ниже $\pm 30'$. Выделение излучения с известным положением электрического вектора световой волны E из пучка монохроматического естественного излучения осуществлялось посредством поляризационных фильтров, обладающих степенью поляризации $\sim 100\%$ в исследуемом спектральном диапазоне. На полученных гетеропереходах были измерены стационарные вольт-амперные характеристики (ВАХ) и спектральные зависимости фототока короткого замыкания i при 300 К. ВАХ полученных гетеропереходов обнаруживают четко выраженное выпрямление, причем отношение прямого и обратного токов при $|U| \approx 0.5$ В достигало $\sim 10^5$, а прямое направление соответствовало положительному потенциалу на $p\text{-Si}$.

При освещении гетеропереходов возникает фотовольтаический эффект, причем независимо от места попадания светового зонда на их поверхность, а также длины волн падающего излучения в пределах всей спектральной области фоточувствительности Si подложка в соответствии с энергетической диаграммой гетероструктуры всегда заряжается положительно. Токовая фоточувствительность оказывается максимальной при освещении гетеропереходов со стороны широкозонного слоя $n\text{-GaP}$ и достигает 90 мА/Вт при $T = 300$ К.

На рис. 1 приведены типичные спектральные зависимости фототока короткого замыкания i одного из исследованных гетеропереходов $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ при двух геометриях освещения неполяризованным излучением. Все приводимые в работе спектральные зависимости i пересчитывались на равное число падающих фотонов и поэтому отражают спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования в полученных гетеропереходах.

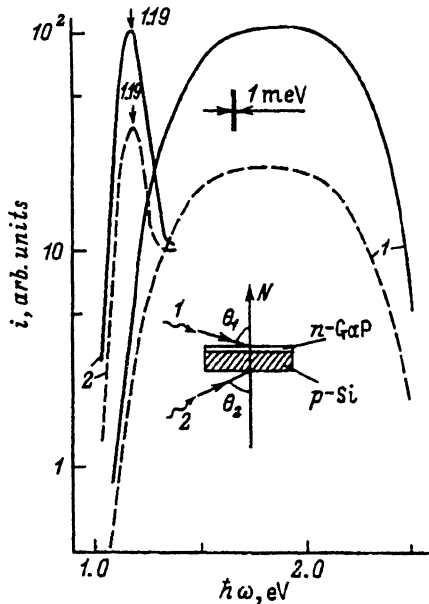


Рис. 2. Спектральные зависимости фото-чувствительности гетероперехода n -GaP/ p -Si при наклонном падении линейно-поляризованного излучения со стороны слоя n -GaP (кривые 1, $\theta_1 \approx 75^\circ$) и со стороны подложки p -Si (кривые 2, $\theta_2 \approx 70^\circ$). $T = 300$ К. Поляризация излучения: сплошные кривые — $E \parallel P$, пунктирные кривые — $E \perp P$. На вставке указана геометрия освещения.

Основные закономерности этих спектральных зависимостей фото-чувствительности по отношению к интенсивности падающего излучения состоят в следующем. При освещении гетеропереходов со стороны слоя n -GaP фото-чувствительность обнаруживает широкополосный характер. Типичное значение ширины спектральной полосы фото-чувствительности на ее полувысоте составляет обычно $\delta \approx 900$ мэВ, причем полоса расширяется по мере уменьшения толщины эпитаксиального слоя d_1 . Длинноволновая граница фото-чувствительности определяется началом

фундаментального поглощения в кристалле подложки p -Si, тогда как коротковолновый спад i обусловлен влиянием поглощения излучения в широкозонном слое n -GaP. При освещении гетеропереходов со стороны кремния спектр фото-чувствительности (рис. 1, кривая 2) сужается до значений $\delta \approx 100$ — 150 мэВ и обусловлен в основном фотоактивным поглощением в кристалле подложки. Положение коротковолновой границы фото-чувствительности зависит от толщины подложки Si и определяется удалением слоя фотогенерированных носителей заряда от активной области гетероперехода.

При освещении гетеропереходов линейно поляризованным излучением было установлено, что поляризационная фото-чувствительность наступает, как только угол падения излучения θ на любую из двух приемных плоскостей гетероперехода становится отличным от нуля. В случае, когда $\theta = 0^\circ$, спектральные зависимости фототока короткого замыкания оказываются нечувствительными к положению электрического вектора световой волны E и в точности соответствуют спектральным зависимостям фототока в неполяризованном излучении (рис. 1). При $\theta \neq 0^\circ$ фототок начинает зависеть от азимутального угла φ между E и плоскостью падения (P) линейно-поляризованного излучения, согласно соотношению $i_\varphi = i^\parallel \cdot \cos^2 \varphi + i^\perp \sin^2 \varphi$, где « \parallel » и « \perp » отвечают фототоку, возникающему в гетеропереходе при $E \parallel P$ или $E \perp P$ соответственно. Во всей области фото-чувствительности и независимо от геометрии освещения всегда выполняется соотношение $i^\parallel > i^\perp$. На рис. 2 приведены типичные спектральные зависимости фототока одного из гетеропереходов n -GaP/ p -Si для случая $\theta = \text{const}$ и при падении ЛПИ как со стороны слоя GaP, так и со стороны подложки. Видно, что фототок доминирует, когда плоскость поляризации излучения совмещена с плоскостью падения, что находится в качественном соответствии с формулами Френеля для амплитудных коэффициентов прохождения ЛПИ границы раздела сред с различными показателями преломления [9]. Важно также подчеркнуть, что спектральные контуры фототоков i^\parallel и i^\perp , с одной стороны, совпадают между собой и, с другой стороны, аналогичны спектру фототока в естественном излучении (рис. 1). Эта закономерность оказывается нечувствительной к геометрии освещения гетероперехода.

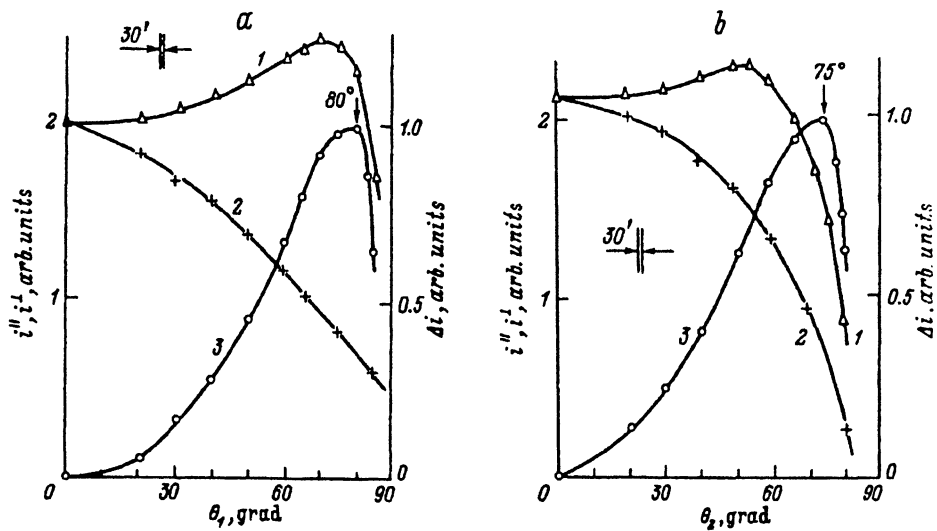


Рис. 3. Зависимости фототока короткого замыкания гетероперехода $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ (1 — $E \parallel P$, 2 — $E \perp P$) и поляризационной разности фототоков Δi (3) от угла падения линейно-поляризованного излучения со стороны слоя $n\text{-GaP}$ (a) и со стороны подложки $p\text{-Si}$ (b). $T = 300 \text{ K}$. λ , мкм: a — 0.90; b — 1.05.

На рис. 3, a и b представлены типичные примеры зависимостей фототоков i'' и i^\perp , а также их поляризационные разности $\Delta i = i'' - i^\perp$ для каждой из геометрий освещения. Видно, что характер этих угловых зависимостей качественно одинаков, и их закономерности состоят в следующем. При совмещении плоскости поляризации с плоскостью падения фототок i'' с ростом угла падения ЛПИ в обеих геометриях освещения вначале увеличивается (проходит через максимум), а затем начинает падать. Увеличение фототока при освещении структур со стороны слоя GaP (рис. 3, a) достигает $\sim 26\%$, что может быть связано с понижением потерь на отражение вблизи псевдобрюстеровского угла $\theta_1 \approx 70^\circ$. При освещении гетеропереходов со стороны кремния также с ростом угла падения достигается увеличение фототока (рис. 3, b), которое составило $\sim 11\%$ вблизи $\theta_2 \approx 55^\circ$. Если увеличение i'' с ростом θ связывать с понижением потерь на отражение, то следует заключить, что этот эффект при освещении гетероперехода $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ со стороны Si проявляется слабее, чем при освещении со стороны слоя GaP. Последнее, по-видимому, следует связывать в основном с более высоким оптическим качеством освещаемой поверхности эпитаксиального слоя фосфида галлия и образованием окисной пленки на поверхности кремния.

Поляризационная разность фототока Δi в полученных гетеропереходах, как видно из рис. 3 a и b, возникает только в случае $\theta > 0^\circ$. Это обстоятельство отражает изотропный характер фотоактивного поглощения в Si и GaP. Посредством управления величинами θ_1 и θ_2 можно плавно контролировать значение поляризационной разности фототока, которая достигает максимума в окрестности углов падения $75\text{--}80^\circ$.

Типичные угловые зависимости коэффициента наведенного фотоплеохроизма, вычисленного из соотношения $\mathcal{P}_1 = \left(\frac{i'' - i^\perp}{i'' + i^\perp} \right) \cdot 100\%$, для исследованных геометрий освещения гетероперехода $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ приведены на рис. 4. Эти зависимости подчиняются для обоих случаев освещения квадратичному закону $\mathcal{P}_1 \sim \theta^2$. При этом обращают на себя внимание более

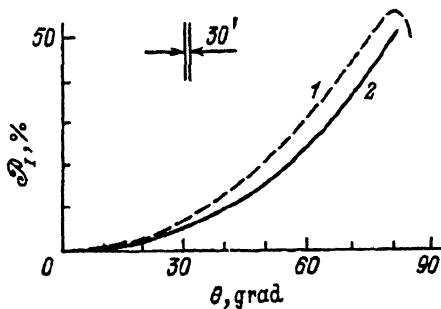


Рис. 4. Зависимости коэффициента наведенного фотоплекроизма гетероперехода n -GaP/ p -Si от угла падения линейно-поляризованного излучения со стороны слоя n -GaP (1, $\lambda = 0,90$ мкм) и подложки p -Si (2, $\lambda = 1,05$ мкм).

высокие значения Si при одинаковых углах падения, достигаемые при освещении гетероперехода со стороны слоя GaP, по сравнению с освещением со стороны Si. Если учесть значения показателей преломления кремния ($n_1 \approx 3,57$) и фосфида галлия ($n_2 \approx 3,37$), то наблюдаемое различие кривых $\mathcal{P}_1(\theta)$, согласно анализу [10], для исследованных геометрий освещения можно объяснить образованием на поверхности кремния слоя окисла с показателем преломления $n_1 \approx 1,5$ [11]. Следовательно, полученные угловые зависимости поляризационных параметров (рис. 4) открывают возможность плавной перестройки величины коэффициента фотоплекроизма посредством выбора необходимого значения угла падения (θ_1 или θ_2) на одну из двух приемных плоскостей гетерофотопреобразователя.

Спектральные зависимости поляризационной разности фототока короткого замыкания одного из типичных гетеропереходов для двух геометрий фоторегистрации представлены на рис. 5 (кривые 1 и 2). Спектральный контур поляризационной разности фототока полностью определяется спектральной зависимостью фототока (рис. 2), поскольку угол падения излучения контролирует только величину фототока. Из рис. 5 видно, что при освещении со стороны GaP поляризационная разность фототока имеет широкополосный характер и отлична от нуля в диапазоне между ширинами запрещенных зон контактирующих полупроводников. Следовательно, для наведенного наклонным падением ЛПИ фотоплекроизма [7] имеет место поляризационный «эффект окна». При переходе к освещению гетероперехода со стороны кремния поляризационный эффект окна (рис. 5, кривая 2) исчезает, спектральная зависимость Δi становится селективной и определяется в основном фотоактивным поглощением в узкозонной компоненте гетероперехода n -GaP/ p -Si.

Геометрия освещения влияет очевидным образом и на спектральный контур коэффициента наведенного фотоплекроизма (рис. 5, кривые 3 и 4). Так, при освещении со стороны GaP коэффициент фотоплекроизма в широкой спектральной области сохраняет постоянное значение, тогда как при переходе к освещению со стороны фотоплекроизм приобретает селективный характер, сохраняясь на постоянном уровне только в пределах ширины полосы Δi и на ее полувысоте. Для наведенного фотоплекроизма в обеих геометриях освещения коэффициент фотоплекроизма остается положительным и в отличие от естественного фотоплекроизма не изменяет знак и в случае, когда начинает сказываться поглощение в объеме полупроводника [7]. Когда гетеропереход n -GaP/ p -Si освещается со стороны Si, влияние поглощения ЛПИ при $\hbar\omega > 1,2$ эВ вызывает снижение Δi и \mathcal{P}_1 соответственно из-за того, что фотогенерация происходит все в более тонком приповерхностном слое, который к тому же еще и удаляется от активной области гетероперехода. Аналогичный

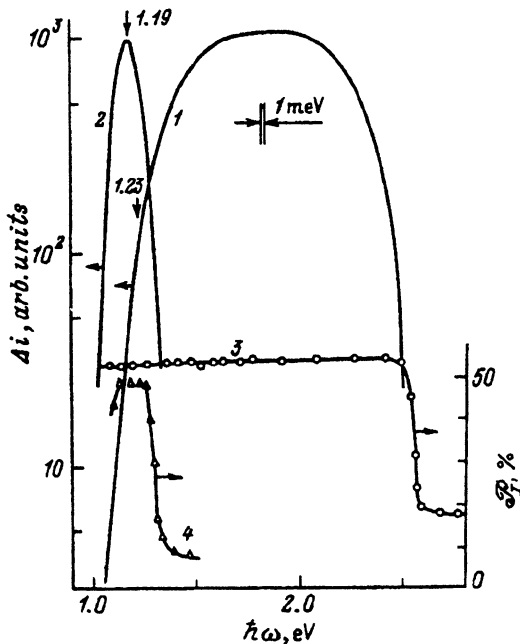


Рис. 5. Спектральные зависимости поляризационной разности фототока (1, 2) и коэффициента наведенного фотополюхроизма (3, 4) гетероперехода $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$. $T = 300$ К. Геометрия освещения: 1, 3 — освещение со стороны слоя $n\text{-GaP}$; 2, 4 — освещение со стороны подложки $p\text{-Si}$.

Эффект имеет место и при освещении гетероперехода со стороны слоя $n\text{-GaP}$ при $\hbar\omega > 2$ эВ. Именно с этим связано и появление коротковолнового спада в спектральных зависимостях $\mathcal{P}_i(\hbar\omega)$. Однако поскольку в Si и GaP поглощение ЛПИ изотропное, то, следовательно, и глубина поглощения излучения оказывается одинаковой для света с поляризациями $E \parallel P$ и $E \perp P$. Поэтому в результате того, что при прохождении излучением границ воздух—Si и воздух—GaP в случае наклонного падения ЛПИ коэффициент поглощения всегда подчиняется соотношению $\alpha'' > \alpha^\perp$, что в свою очередь обеспечивает также выполнение соотношения $i'' > i^\perp$. Именно по этой причине инверсия знаков Δi и \mathcal{P}_i в области фоточувствительности $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ при обеих геометриях освещения не обнаруживается (рис. 5).

Таким образом, представленные результаты по фотоэлектрическим процессам в гетеропереходах $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ открывают возможность осуществлять переход от широкодиапазонного к селективному режиму фотоанализатора линейно-поляризованного излучения за счет экспрессного изменения геометрии освещения при неизменной конструкции самой структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] G. Zeidenbergs, R. L. Anderson. Sol. St. Electron., 10, 113 (1967).
- [2] Б. Л. Шарма, Р. К. Пурухит. Полупроводниковые гетеропереходы, 232. М. (1979).
- [3] Н. Н. Герасименко, Л. В. Лежейко, Е. В. Любопытова, Л. В. Шаронова, А. Г. Шаршунов, А. Я. Шик, Ю. В. Шмарцев. ФТП, 15, 1088 (1981).
- [4] Л. Б. Карлина, Е. И. Леонов, Л. В. Шаронова, Ю. В. Шмарцев. ФТП, 15, 1202 (1981).
- [5] А. Я. Вуль, Н. Н. Герасименко, Л. В. Лежейко, Л. В. Шаронова, Ю. В. Шмарцев. ФТП, 12, 1232 (1978).
- [6] Ю. В. Жиляев, Н. Назаров, В. Ю. Рудь, Ю. В. Рудь, Л. М. Федоров. ФТП, 27, 1610 (1993).
- [7] Ю. В. Рудь. Изв. вузов. Физика, 29, 67 (1986).

- [8] Ю. В. Жилыев, В. В. Криволапчук, Н. Назаров, И. П. Никитина, Н. К. Полетаев, Д. В. Сергеев, В. В. Травников, Л. М. Федоров. ФТП, 24, 1303 (1990).
- [9] Г. С. Ландсберг. Оптика, 926. М. (1976).
- [10] G. A. Medvedkin, Yu. V. Rud. Ph. St. Sol. (a), 67, 333 (1981).
- [11] Е. М. Воренкова, Б. Н. Гречушников, Г. И. Дисглер, И. П. Петров. Оптические материалы для инфракрасной техники, 234. М. (1965).

Редактор В. В. Чалдышев
