

ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

С. Г. Конников, Д. Мелебаев, Ю. В. Рудь

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

Физико-технический институт Туркменской академии наук, 744000, Ашгабад, Туркменистан
(Получена 20 мая 1992 г. Принята к печати 15 октября 1992 г.)

Представлены экспериментальные результаты впервые выполненных исследований фотоэлектрических процессов в поверхностно-барьерных структурах $\text{Au-n-GaP}_x\text{As}_{1-x}$ в линейно поляризованном излучении. Показано, что при наклонном падении излучения в структурах возникает поляриметрический эффект. Величина эффекта контролируется углом падения. Максимальный коэффициент фотоплекроизма достигает 60—64% и в области fotocувствительности остается практически постоянным. Для полученных структур характерна максимальная азимутальная fotocувствительность $\Phi_j = 0.17 - 0.18$ А/Вт·град, что свидетельствует о возможности их применения в поляризационной электронике.

В настоящее время интенсивно исследуются фотоэлектрические явления в поверхностно-барьерных структурах на основе широкозонных полупроводников $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Как правило, эти исследования ведутся с использованием неполяризованного излучения [¹⁻⁶], и поэтому поляриметрический эффект в таких структурах в литературе еще не обсуждался. В результате такого подхода функциональный диапазон фотодетекторов указанного типа ограничивался чувствительностью только к интенсивности оптического излучения. Расширение функционального диапазона поверхностно-барьерных структур с относительно хорошо поставленной технологией в направлении обеспечения чувствительности к поляризации оптического излучения является актуальной задачей. Проявление поляриметрического эффекта в фотоэлектрических процессах диодных структур с изотропным строением активной области, в частности, наступает при наклонном падении линейно поляризованного излучения на их приемную плоскость [⁷⁻⁹]. В настоящей работе изложены результаты впервые выполненных исследований поляризационной fotocувствительности поверхностно-барьерных структур $\text{Au-GaP}_x\text{As}_{1-x}$, которые открывают возможность применить известный класс полупроводниковых приборов в новой для них области — в качестве широкодиапазонных поляриметрических фотодетекторов.

1. Поляризационные исследования выполнялись на поверхностно-барьерных структурах $\text{Au-GaP}_x\text{As}_{1-x}$ и Au-GaP . Активные варизонные слои $n\text{-GaP}_x\text{As}_{1-x}$ с переходным пассивным слоем с общей толщиной 80—120 мкм выращивались методом жидкостной эпитаксии на подложках $n\text{-GaP}$ (111) по методике [^{10, 11}]. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что состав эпитаксиальных слоев $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ плавно изменяется по толщине, причем наибольшее содержание GaP $x_0 = 0.6 - 0.8$ отмечено на границе слой—подложка, а наименьшее — на поверхности слоя $x_s = 0.3 - 0.4$. Для изменения спектральной области fotocувствительности и в качестве контрольного образца использовались монокристаллические пластины $n\text{-GaP}$ (100) толщиной 350—390 мкм, полученные методом Чохральского. Концентрация свободных электронов соответственно равна $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ и $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в GaP при 300 К. Омические контакты

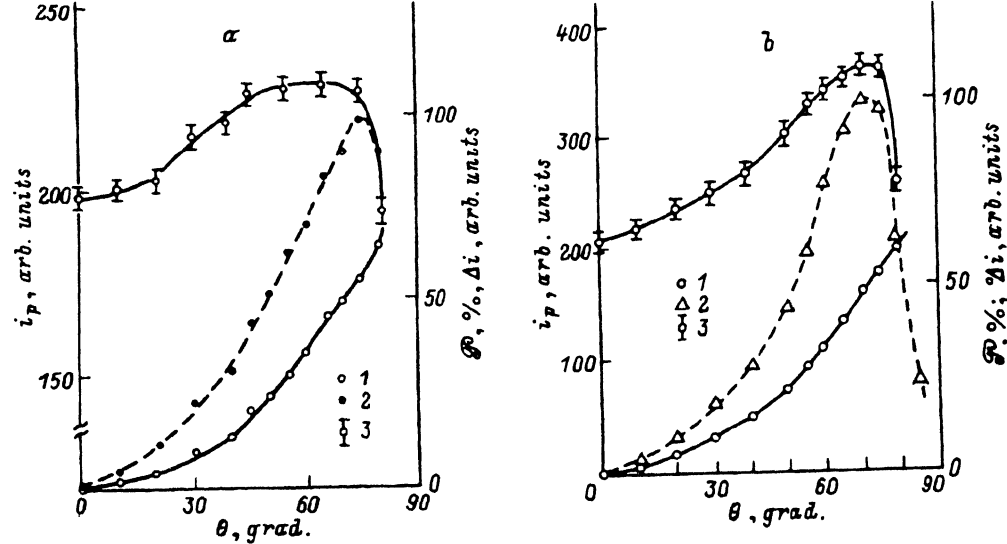


Рис. 1. Зависимости коэффициента фотополюхризма (1), поляризационной разности фототока (2) и фототока i_p (3) от угла падения излучений для поверхностно-барьерных структур Au—CaP (a — образец 10) и Au—GaP_xAs_{1-x} (b — образец 11, $x_s \approx 0.4$). Освещение со стороны барьерного контакта. Температура комнатная.

изготавливались вплавлением чистого индия, а барьерные создавались нанесением химическим способом слоя золота с толщиной 100—150 Å по методике [12, 13]. Площадь барьерного контакта у разных структур лежала в пределах 0.3—1.0 см². К барьерному и омическому контактам припаивались токоотводы из серебра с диаметром 0.05 мм. Величины плотности темнового тока исследованных структур при обратном смещении 2 В были 10⁻⁹—10⁻⁸ А/см². Созданные фотодетекторы имели токовую фоточувствительность к интенсивности излучения $S_i = 0.11$ —0.14 А/Вт (Au—n—GaP_xAs_{1-x} при $\lambda = 0.44$ мкм, Au—n—GaP при $\lambda = 0.35$ мкм).

2. На рис. 1, а и б приведены типичные результаты измерений коэффициента фотополюхризма $\mathcal{P} = \left(\frac{i_p - i_s}{i_p + i_s} \right) \cdot 100\%$ ¹ в зависимости от угла падения излучения θ на приемную плоскость структур, которые освещались линейно-поляризованным излучением со стороны барьерного контакта. Эти зависимости оказались одинаковыми как для структур на основе фосфида галлия, так и на основе твердых растворов GaP_xAs_{1-x}. Главные закономерности поляризационных измерений фототока состоят в следующем. При освещении структур вдоль нормали к освещаемой плоскости ($\theta = 0^\circ$) фототок оказывается изотропным ($i_p = i_s$) во всей области фоточувствительности, т. е. коэффициент естественного фотополюхризма $\mathcal{P} = 0$. Это обусловлено изотропным характером фотоактивного поглощения в исследованных полупроводниковых структурах. При наклонном падении линейно-поляризованного излучения на приемную плоскость поверхностно-барьерных структур ($\theta \neq 0^\circ$) фототок обнаруживает зависимость от азимутального угла φ между плоскостью падения излучения и электрическим вектором световой волны. Поляризационные индикатрисы фототока при фиксированном угле падения подчиняются обобщенному закону Малюса

$$i_\varphi = i_p \cos^2 \varphi + i_s \sin^2 \varphi.$$

¹ Фототоки i_p и i_s отвечают освещению структур, когда электрический вектор световой волны E параллелен или перпендикулярен плоскости падения излучения (ППИ).

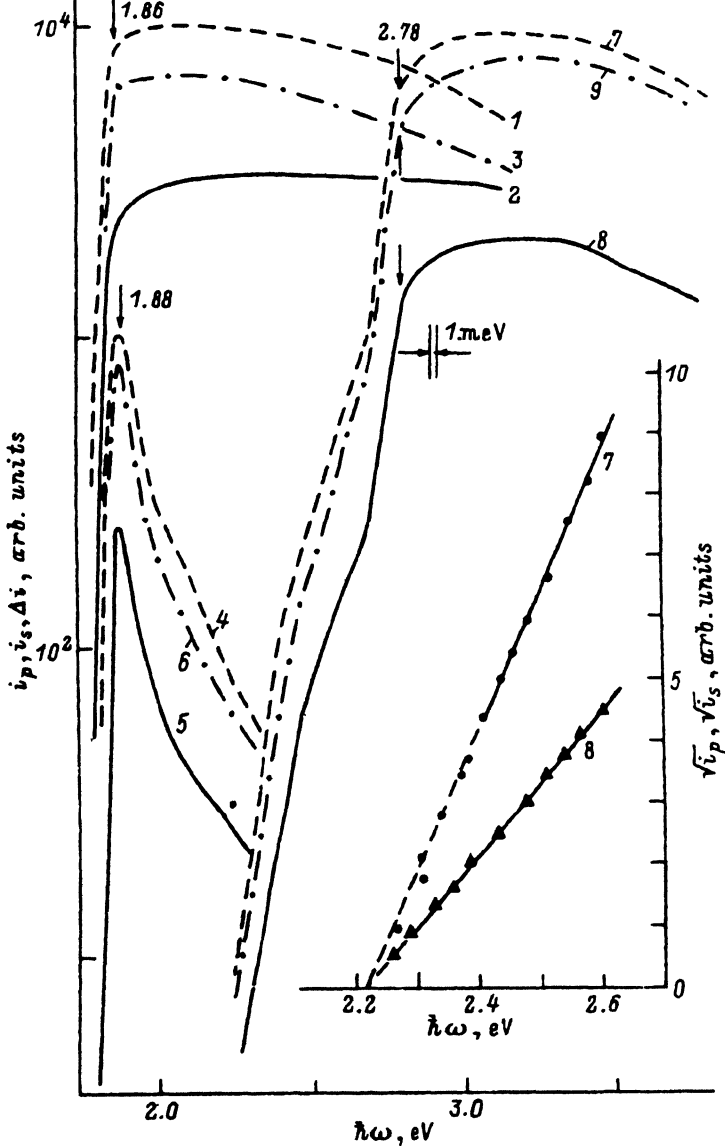


Рис. 2. Спектральные зависимости фототока короткого замыкания i_p (1, 4, 7), i_s (2, 5, 8) и поляризационной разности фототока (3, 6, 9) для поверхностно-барьерных структур Au—GaP_xAs_{1-x} (1—3 — образец 11, $x_s \approx 0.4$; 4—6 — образец 4, $x_s \approx 0.42$). Угол падения $\theta = 80^\circ$. Температура комнатная.

Экспериментальные значения коэффициента фотоплекроизма исследованных структур с ростом угла падения растут по закону $\mathcal{P} \sim \theta^2$, что находится в соответствии с результатами теоретического рассмотрения поляризационного эффекта, возникающего на границе воздух—полупроводник [9]. В исследуемом здесь случае линейно поляризованное излучение падает на зеркальную поверхность слоя золота и проходящая в активную область структуры часть этого излучения генерирует электронно-дырочные пары. Этот случай более сложный, однако следует отметить, что экспериментальные зависимости $\mathcal{P}(\theta)$ для структур

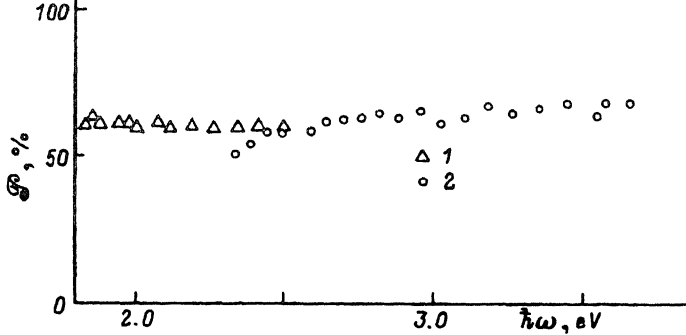


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента фотохроизма для поверхностно-барьерных структур $\text{Au-GaP}_x\text{As}_{1-x}$ ($1 - x_s \approx 0.4$, $\lambda = 0.65$ мкм) и Au-GaP ($2 - \lambda = 0.44$ мкм). Угол падения $\theta = 80^\circ$. Температура комнатная.

на основе фосфида галлия хорошо описываются теорией [9], если для показателя преломления принять $n_2 = 3.2$, что отвечает известному значению для GaP [15]. Для структур на основе твердых растворов $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ ($x_s \approx 0.4$) экспериментальные кривые $\mathcal{P}(\theta)$ описываются [9], если принять $n_2 = 3.1$. Следовательно, присутствие тонкого полупрозрачного слоя золота на поверхности кристаллов $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ практически не отражается на характере теоретической зависимости $\mathcal{P}(\theta)$, учитывающей оптические процессы на границе воздух—полупроводник [9]. Полученные зависимости $\mathcal{P}(\theta)$ (рис. 1, а, б) показывают также, что плавное увеличение угла падения дает возможность контролировать величину коэффициента фотохроизма, которая для изученных структур при $\theta = 80^\circ$ может быть доведена до 60—64%.

На рис. 1, а, б также приведены угловые зависимости поляризационной разности фототоков $\Delta i = i_p - i_s$ (кривые 2), которая является аналогом поляризационной квантовой эффективности [9]. Эти зависимости также находят в соответствии с результатами анализа [16]. Как видно из рис. 1, при наклонном падении излучения четко проявился эффект увеличения фототока i_p с ростом θ , который качественно согласуется с аналогичными зависимостями коэффициента отражения как от поверхности полупроводника, так и от золота [14]. Из такого сравнения можно заключить, что наблюдаемый максимум i_p в области $\theta = 60^\circ$ является следствием снижения потерь на отражение в окрестности псевдобрюстеровского угла. Следует отметить при этом, что возрастание i_p по сравнению с $\theta = 0^\circ$, как правило, связано с качеством поверхности барьерного металлического контакта. Следовательно, наклонное падение линейно поляризованного излучения на поверхность барьерного контакта может вызывать эффект, аналогичный по своему результату тому, который достигается нанесением просветляющих покрытий. Разница здесь существенная и состоит в том, что увеличение i_p при $\theta \neq 0^\circ$ не требует проведения каких-либо дополнительных технологических операций с готовыми структурами.

3. Спектральные зависимости поляризационного эффекта в типичных поверхностно-барьерных структурах при углах падения $\theta = 80^\circ$ приведены на рис. 2. Как видно из рис. 2, для исследованных структур во всей спектральной области fotocувствительности фототок доминирует в поляризации $E \parallel \text{ПП}$, причем спектральный контур i_p для обеих поляризаций ($E \parallel \text{ПП}$ и $E \perp \text{ПП}$) оказался близким. Поляризационная разность фототока Δi по своему спектральному контуру наследует спектры фототоков i_p и i_s . Длинноволновый край фототока для структур $\text{Au-GaP}_x\text{As}_{1-x}$ ($x_s \approx 0.4$) экспоненциальный и описывается высоким значением крутизны $S \approx 80 \text{ эВ}^{-1}$, что указывает на наличие прямых переходов, а ступенька

при $\hbar\omega = 1.86$ эВ отвечает значению ширины запрещенной зоны. В качестве примера на рис. 2 приведены широкополосный и селективный спектры фоточувствительности, что связано с технологическими особенностями нанесения барьерного контакта. Из этого сравнения можно заключить, что для получения структур с высоким значением Δi в широкой спектральной области необходимо достижение широкополосного режима фоточувствительности (рис. 2, кривая 1). В случае структур на основе фосфида галлия длинноволновая часть спектров фототоков i_p и i_s также отражает особенность их зонного спектра. Так, в области $\hbar\omega < 2.7$ эВ спектры фототоков i_p и i_s спрямляются в координатах $\sqrt{i} - \hbar\omega$ и их экстраполяция к $i = 0$ дает энергию, близкую к энергии непрямых переходов GaP ($E_G^{\text{ind}} = 2.25$ эВ) [15], тогда как экспоненциальный рост i при $\hbar\omega > 2.7$ эВ описывается значениями $S \approx 20$ эВ⁻¹, что отвечает наступлению прямых межзонных переходов $E_G^d = 2.8$ эВ [15].

Коэффициент фотополюхризма поверхностно-барьерных структур \mathcal{P} (рис. 3) во всей области фоточувствительности оказался практически постоянным. Этот результат находится в соответствии с работами [8, 9] и демонстрирует существенное отличие от естественного фотополюхризма поляриметрических структур на анизотропных полупроводниках [16], в которых поляриметрический эффект отражает анизотропию фотоактивного поглощения, обусловленную анизотропией энергетического спектра полупроводника.

В заключение укажем, что на полученных поверхностно-барьерных структурах из кристаллов GaP_xAs_{1-x} максимальная азимутальная поляризационная фоточувствительность [16] достигает $\Phi_i = 0.17-0.18$ А/Вт·град при 300 К и $\theta = -80^\circ$, причем спектральный контур поляриметрического эффекта контролируется выбором состава твердого раствора и условиями создания барьерного контакта. Следовательно, поверхностно-барьерные структуры на основе изотропных полупроводников могут использоваться в качестве поляриметрических фотодетекторов, экспрессная перестройка функционального назначения которых осуществляется посредством угла падения пучка анализируемого излучения на их приемную плоскость.

В заключение авторы выражают благодарность О. В. Корняковой за проведение микрорентгеноспектральных исследований и А. Беркелиеву, Б. В. Царенкову, В. Е. Челнокову за внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов, 2. М. (1984).
- [2] Э. К. Родерик. Контакты металл-полупроводник. М. (1982).
- [3] Б. В. Царенков, Ю. А. Гольдберг, Г. В. Гусев, В. И. Огурцов. ФТП, 8, 410 (1974).
- [4] А. А. Гуткин, М. В. Дмитриев, Д. Н. Наследов, А. В. Пашковский. ФТП, 5, 1927 (1971).
- [5] А. Беркелиев, Ю. А. Гольдберг, Т. Н. Данилова, А. Н. Именков, Д. Мелебаев, Б. В. Царенков, Ю. П. Яковлев. ФТП, 10, 2352 (1976).
- [6] Г. П. Пека, В. Ф. Коваленко, А. Н. Смоляров. Варизонные полупроводники. Киев (1989).
- [7] Ю. В. Рудь, Г. А. Медведкин. А. с. № 671634. БИ, № 41, 291 (1980).
- [8] Г. А. Медведкин, Ю. В. Рудь. Письма ЖТФ, 6, 986 (1981).
- [9] G. A. Medvedkin, Yu. V. Rud. Phys. St. Sol. (a), 67, 333 (1981).
- [10] A. Berkeliev, M. G. Durdimuradova, O. V. Cornikova, D. Melebaev. [Pap.] IX Int. Conf. Cryst. Growth., 107. Sendai, Japan (1989). 22a. C. 15.
- [11] D. Melebaev, M. G. Durdimuradova, A. Berkeliev, O. V. Cornikova. [Pap.] I Int. Conf. Cryst. Growth., 420. Hungary, Budapest (1990).
- [12] Ю. А. Гольдберг, Д. Н. Наследов, Б. В. Царенков. ПТЭ, вып. 3, 207 (1971).
- [13] Е. Н. Вигдорович, Ю. А. Гольдберг, М. Г. Дурдымурадова, Д. Мелебаев, Б. В. Царенков. ФТП, 25, 1419 (1991).
- [14] Р. Аззам, М. Башара. Эллипсометрия и поляризованный свет. М. (1981).
- [15] Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник. М. (1979).
- [16] G. A. Medvedkin, Yu. V. Rud, M. A. Tairov. // Phys. St. Sol. (a), 115, 11 (1989).