

06.2; 06.3

© 1993

ВАРИЗОННЫЕ $Au-GaP_xAs_{1-x}$ СТРУКТУРЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ФОТОПРИЕМНИКАХ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

С.Г. Конников, Д. Мелебаев,
В.Ю. Рудь, А. Беркелиев
М.Г. Дурдымурадова, О.В. Корнякова

Полупроводниковые твердые растворы GaP_xAs_{1-x} относятся к наиболее перспективным материалам для изготовления светоизлучающих оптоэлектронных р-п-структур, работающих в видимой области спектра [1-3]. Барьеры Шоттки на их основе в последнее время находят все большее применение при решении проблем ультрафиолетовой фотоэлектроники из-за низких шумовых характеристик и высокой радиационной стойкости [4, 5]. Систематические исследования поверхностно-барьерных структур металл (m)-полупроводник (S) из однородных кристаллов GaP_xAs_{1-x} [6-10] показали, что контролируемая шириной запрещенной зоны красная граница фоточувствительности закономерно смещается посредством выбора необходимого состава твердого раствора x . В результате реализации этого подхода были созданы структуры $AuGaP_xAs_{1-x}$ пригодные для применения в качестве нечувствительных к инфракрасному свету фотоприемников видимого и ультрафиолетового излучения [8] и фотоэлектрических приборов [5, 10], которые с успехом заменяют кремниевые фотодиоды в ультрафиолетовой области спектра [4, 5]. Изучение фотоэлектрических свойств поверхностно-барьерных структур (барьеров Шоттки) на основе эпитаксиальных варизонных слоев GaP_xAs_{1-x} представляет научно-практический интерес как с точки зрения расширения функциональных возможностей фотоприемников, так и изучения свойств системы твердых растворов GaP_xAs_{1-x} в переходной области составов, поскольку в варизонных полупроводниках фундаментальные параметры плавно меняются по координате.

В данной работе приводятся результаты впервые выполненных исследований спектров фоточувствительности варизонных поверхностно-барьерных структур $Au-n-GaP_xAs_{1-x}/n-GaP$, для которых составы твердых растворов на межфазной границе металл-полупроводник охватывают переходную область от прямозонных к непрямозонным полупроводникам [3] и, в принципе, могут открыть новую возможность увеличения квантовой эффективности фотоприемников ультрафиолетового спектрального диапазона.

Активные варизонные слои $n-GaP_xAs_{1-x}$ с переходным слоем общей толщиной $Z = 70-120$ мкм выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложках $n-GaP$ (111) по методике [11,

12]. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что между активным варизонным слоем GaP_xAs_{1-x} и подложкой GaP в едином технологическом процессе удается получить переходной слой постоянного состава $0.7 \leq x \leq 0.85$, толщина которого в разных структурах заполняет интервал 0.5–6.0 мкм. В активном варизонном слое GaP_xAs_{1-x} содержание фосфора плавно изменяется по толщине и наибольшее содержание фосфора $X_0 = 0.7-0.85$, имеется на границе переходного слоя с подложкой, а наименьшее содержание фосфора реализуется на свободной поверхности слоя и составляет $X_5 = 0.1-0.7$. Градиент ширины запрещенной зоны в полученных слоях GaP_xAs_{1-x} был 40–150 эВ/см.

Определенная величина x на поверхности достигалась либо в процессе выращивания, либо химическим травлением. Полупрозрачный барьерный $m-s$ -переход на узкозонной поверхности $n-GaP_xAs_{1-x}$ создавался химическим осаждением слоя палладий-золото по методике [13, 14]. Площадь барьерного контакта у разных структур составляла 0.015–0.3 см². Как показали измерения, созданные по развитой методике поверхностно-барьерные структуры $Au-n-GaP_xAs_{1-x}$ обладали фоточувствительностью при освещении как со стороны Au , так и со стороны кристалла. Главные закономерности фотоэлектрических свойств этих структур при освещении со стороны полупрозрачного слоя металла состоят в следующем.

1. Исследование зависимости дифференциальной емкости C варизонных $Au-n-GaP_xAs_{1-x}$ структур от напряжения U при комнатной температуре показало, что $C \sim (U_C - U)^{-1/2}$ при $U = 0.4-3$ В (рис. 1), т.е. глубокие уровни не проявляются. По напряжению отсечки U_C можно считать, что содержания фосфора на образующей межфазную границу металл-полупроводник поверхности GaP_xAs_{1-x} находится в разных структурах в интервале значений от 0.1 до 0.7. Высота потенциального барьера структур $Au-n-GaP_xAs_{1-x}$ при этом находится в диапазоне от 0.95 до 1.45 эВ 300 К. Разность концентраций ионизованных доноров и акцепторов $N_d - N_a$ в варизонных слоях с различным значением x_5 на свободной поверхности составляла $(0.5-1.1) \cdot 10^{17}$ см⁻³ при 300 К.

Зависимости прямого тока I от напряжения U для изученных структур в интервале плотностей тока $10^{-7}-10^{-2}$ А/см² оказались экспоненциальными. Из них был определен характеристический коэффициент β , величина которого оказалась 1.1–1.3. Следовательно, электрические характеристики таких структур не уступают известным поверхностно-барьерным структурам, созданным из гомозонных полупроводниках A^3B^5 [15]. Следует особо подчеркнуть, что при изменении x_5 в пределах переходной области составов системы GaP_xAs_{1-x} [3] вольт-емкостная и вольт-амперная характеристики таких структур хорошо описываются в рамках единой модели Бете-Бардина.

2. При освещении варизонных поверхностно-барьерных структур $Au-n-GaP_xAs_{1-x}/n-GaP$ со стороны полупрозрачного металла спектр фототока всегда оказывается широкополосным (рис. 2, кривые 2–6), как и в случае гомозонных поверхностно-барьерных

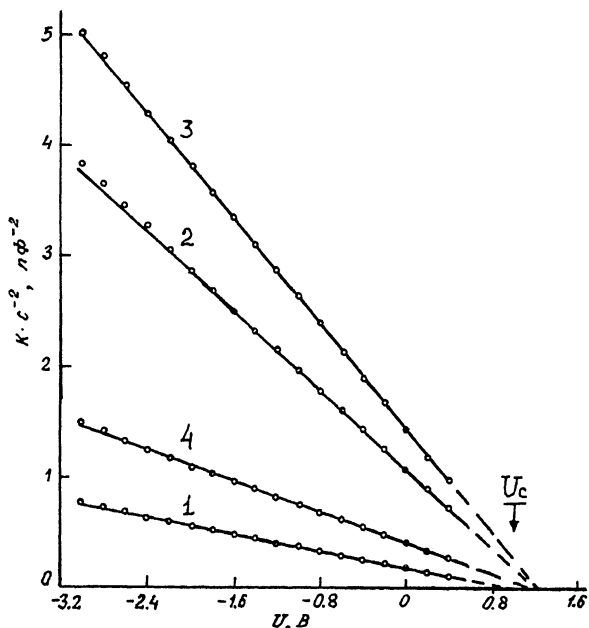


Рис. 1. Зависимость емкости от напряжения для варизонных поверхностно-барьерных структур $Au-n-GaP_xAs_{1-x}$ при комнатной температуре X_S : 1 - 0.23, 2 - 0.44, 3 - 0.45, 4 - 0.50. K : 1 - $\times 10^6$, 2 - $\times 10^9$, 3 - $\times 10^8$, 4 - $\times 10^7$.

структур $Au-n-GaAs$ (рис. 2, кривая 1) и $Au-n-GaP$ (рис. 2, кривая 7). Из полученных результатов следует, что фототок структур при энергиях фотонов, больших высоты потенциального барьера ($q\varphi_B$), но меньших ширины запрещенной зоны твердого раствора E_g , обусловлен фотоэмиссией электронов из металла в полупроводник и поэтому его зависимости в координатах $I_f^{1/2} - h\nu$ для всех исследованных структур оказываются линейными, т.е. функционально соответствуют закону Фаулера $I_f \sim (h\nu - q\varphi_B)^2$. Высота потенциального барьера отождествлялась с $h\nu = h\nu_0 = q\varphi_B$ при экстраполяции линейного участка к значению $I_f^{1/2} = 0$. Высота потенциального барьера в структурах $Au-n-GaP_xAs_{1-x}$, как следует из полученных результатов, зависит от содержания фосфора на образующей $m-S$ -переход поверхности слоев, а определенные для разных составов величины $q\varphi_B$ приведены в таблице.

3. Фототок созданных структур при энергиях фотонов, близких и больших E_g , либо пороговой энергии прямых оптических переходов E_0 (рис. 2), обусловлен возбуждением электронно-дырочных пар в полупроводнике и разделением их контактным полем поверхностного потенциального барьера. Из зависимостей спектров фототока структур $Au-GaP_xAs_{1-x}$ с использованием известной ме-

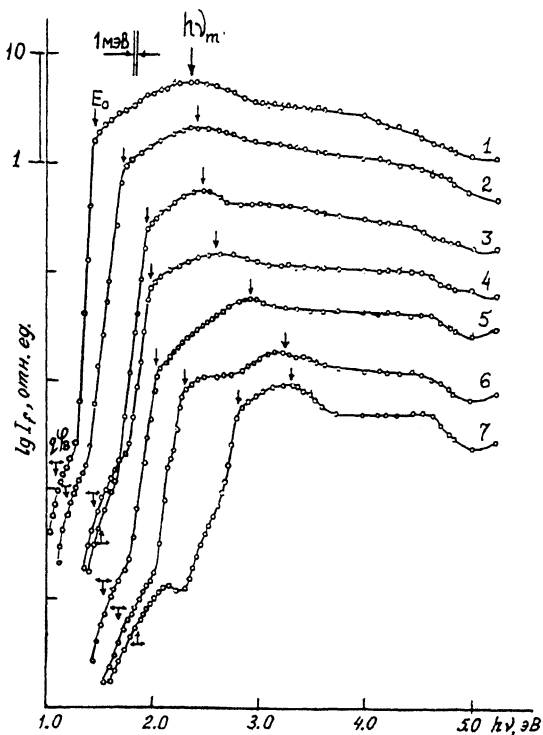


Рис. 2. Зависимость фототока короткого замыкания I_f от энергии фотонов для гомозонных и варизонных m - s -структур $Au-GaAs$ (1), $Au-GaP$ (7) и $Au-GaP_xAs_{1-x}$ (2-6). x_s : 1 - 0.00, 2 - 0.23, 3 - 0.40, 4 - 0.44, 5 - 0.50, 6 - 0.65, 7 - 1.00. Фототок приведен к равному числу падающих фотонов. Величина максимальной напряженности электрического поля в структурах, В/см: (1-7) - $(1-3) \cdot 10^5$. Кривые $I_f(h\nu)$ сдвинуты относительно друг друга по оси ординат. $T = 300$ К.

Параметры широкополосных фотоприемников на основе варизонной $Au-GaP_xAs_{1-x}$ структуры ($T = 300$ К).

№	Фотоприемники	x_s , моль	$\eta_{\text{Ф}}^{\text{Ф}}(I_f - h\nu)$, эВ	ϵ , эВ	$h\nu_m$, эВ	γ_m , эл./фот.	I_f^*/I_f^m , отн. ед.
1	$Au-GaAs$	0.00	0.90	0.022	2.30	0.30	0.46
2	$Au-GaP_xAs_{1-x}$	0.23	1.12	0.040	2.40	0.32	0.45
3	$Au-GaP_xAs_{1-x}$	0.40	1.20	0.050	2.48	0.38	0.75
4	$Au-GaP_xAs_{1-x}$	0.44	1.24	0.052	2.60	0.40	0.80
5	$Au-GaP_xAs_{1-x}$	0.50	1.31	0.058	3.00	0.45	0.85
6	$Au-GaP_xAs_{1-x}$	0.65	1.41	0.052	3.20	0.35	0.70
7	$Au-GaP$	1.00	1.29	0.068	3.30	0.39	0.72

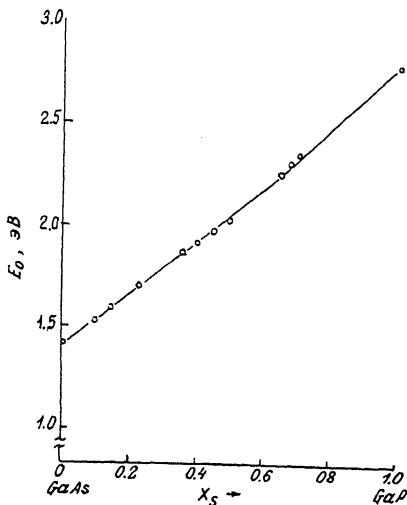


Рис. 3. Зависимость энергии прямых оптических переходов от состава твердого раствора в структурах $Au-GaP_xAs_{1-x}$. $T = 300$ К.

годики [16] были определены пороговые энергии прямых переходов E_0 . Изменение содержания фосфора на образующей $m-s$ -переход свободной поверхности GaP_xAs_{1-x} приводит к закономерному изменению E_0 и, соответственно, E . На рис. 3 также представлены полученные нами зависимости E_0 от x , которые хорошо согласуются с известными данными [17, 18], определенными другими методами.

4. Согласно полученным здесь результатам, есть основания считать, что фоточувствительность $m-s$ -структур на основе варизонных твердых растворов GaP_xAs_{1-x} , как в длинноволновой ($q\varphi_B < h\nu \leq E_0$), так и в коротковолновой части спектров ($h\nu > E_0$) определяется содержанием фосфора на образующей контакт металл-полупроводник свободной поверхности эпитаксиальных варизонных слоев GaP_xAs_{1-x} (рис. 2). С ростом содержания фосфора на свободной поверхности слоев твердых растворов (x_S) в диапазоне от 0.23 до 0.65 красная граница фоточувствительности структур задается шириной запрещенной зоны полупроводника и с ростом x_S закономерно смещается в сторону увеличения энергии фотонов, причем энергетическое положение максимума фоточувствительности ($h\nu_m$) также сдвигается в коротковолновую область спектра, изменяясь в интервале от 2.4 до 3.2 эВ (рис. 2, кривые 2-6). В некоторых поверхностно-барьерных структурах (рис. 2) в области фотонов $q\varphi_B < h\nu < E_0$ в спектре фототока наблюдался перегиб (структура № 6) или максимум (структура № 7) при $h\nu \approx 2.18$ эВ.

Такой эффект ранее наблюдался в работе [19]. В исследованных в нашей работе структурах максимум I_p при $h\nu \approx 2.18$ эВ может быть связан с экситонным поглощением или переходами валентная зона-мелкий донор, поскольку кристалл слабо легирован донорами. Связанные носители заряда, появляющиеся в результате таких переходов, выбрасываются в разрешенные зоны электрическим полем в слое объемного заряда и фононами в объеме и создают фототок.

5. Как видно из рис. 2, фототок варизонных поверхностно-барьерных структур $Au-n-GaP_xAs_{1-x}$ в ультрафиолетовой области спектра оказывается слабо зависимым от энергии падающих фотонов. Необходимо также подчеркнуть, что при энергиях фотонов $h\nu > E_0$ фототок с ростом энергии фотонов вначале возрастает и при $h\nu = h\nu_m$ обычно достигает максимальных значений. При энергиях фотонов $h\nu > h\nu_m$, как следует из рис. 2, фототок слегка понижается и в ультрафиолетовом диапазоне этот спад прекращается, так что фоточувствительность практически не изменяется вплоть до энергий фотонов ~ 4.8 эВ. Следовательно, в области очень высоких коэффициентов поглощения излучения фототок практически перестает зависеть от энергии фотонов, что соответствует выводам теории Гартнера [20]. Незначительное уменьшение фототока при энергии фотонов ~ 4.8 эВ можно связать с тем, что некоторая доля электронов, генерируемых в слое объемного заряда полупроводника, диффундирует против контактного электрического поля в направлении границы полупроводника с металлом и рекомбинирует на ней [21].

6. Максимум фоточувствительности структур $h\nu_m$ располагается, как правило, выше E_0 , причем величина $h\nu_m$ для структур $Au-n-GaP_xAs_{1-x}$ определяется значением x_s . Поэтому для количественной оценки зависимости коротковолновой фоточувствительности от состава x_s используем отношение I_p^*/I_p^m , где I_p^* - фототок при $h\nu = 4.5$ эВ и I_p^m - фототок при $h\nu = h\nu_m$. Полученные значения отношения I_p^*/I_p^m и квантовой эффективности фотоприемников (γ_m) в максимуме спектра, а также обратной крутизны края поглощения (ε) для $Au-n-GaP_xAs_{1-x}$ структур разного состава x_s в области m - S -перехода приведены в таблице. Анализ параметров структур показал, что наиболее высокая коротковолновая фоточувствительность в структурах GaP_xAs_{1-x} достигается для составов $x_s = 0.4-0.5$, относящихся к переходной области составов этой системы [3]. В структурах $Au-GaP_xAs_{1-x}$ с $x_s \approx 0.5$ нами обнаружено, что твердый раствор этого состава ведет себя как прямозонный полупроводник, хотя по составу он и относится к непрямозонным полупроводникам [3].

Таким образом, на основании результатов выполненного исследования можно сделать вывод о том, что для создания высокоэффективных фотоприемников ультрафиолетового излучения можно применять варизонные твердые растворы GaP_xAs_{1-x} с составом $x_s = 0.4-0.5$.

В заключение авторы выражают благодарность Б.В. Царенкову за внимание к работе и А.А. Гуткину за полезные обсуждения экспериментальных результатов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Алферов Ж.И., Амосов В.И., Гарбузов Д.З., Жилыев Ю.В., Конников С.Г., Копьев П.С., Трофим В.Г. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 10. С. 1879-1887.
- [2] Берг А., Дин Г. Светодиоды. М.: Мир, 1979. 589 с.
- [3] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 2. 455 с.
- [4] GaAsP Shottky diodes beat Silicon for UV // Laser Focus/Elect. Opt. 1985. V. 21. N. 2. P. 56-58.
- [5] Wilson A.D., Lyall H. // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 24. P. 4540-4546.
- [6] Spritzer W.G., Mead A.C. // Phys. Rev. 1964. V. 133. N 3A. P. A872-A875.
- [7] Беркелиев А., Гольдберг Ю.А., Мелебаев Д. // Изв. АН. ТССР. Сер. ФТХ и ГН. 1975. № 6. С. 44-49.
- [8] Беркелиев А., Гольдберг Ю.А., Мелебаев Д., Царенков Б.В. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 8. С. 1532-1534.
- [9] Беркелиев А., Мелебаев Д. // Изв. АН. ТССР. сер. ФТХ и ГН. № 6. С. 17-21.
- [10] Беркелиев А., Дурдымурадова М.Г., Мелебаев Д. // Тез. докл. Всес. конф. по физике и применение контакта металл-полупроводник. Киев, 1987. С. 27.
- [11] Berkeliev A., Durdimuradova M.G., Cornikova O.V., Melebaev D. // [Pap.] 9-th. Int. Conf. Cryst. Growth., Sendai, Japan. 20-25 Aug. 1989. 22a. С. 15. P. 107.
- [12] Melebaev D., Durdimuradova M.G., Berkeliev A., Cornikova O.V. // Crystal Properties and Preparation. Trans. Tech. Publications, Switzerland-Germany-USA. 1991. V. 32-34. P. 573-575.
- [13] Вигдорович Е.Н., Гольдберг Ю.А., Дурдымурадова М.Г., Мелебаев Д., Царенков Б.В. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 8. С. 1419-1422.
- [14] Мелебаев Д., Беркелиев А., Корнякова О.В., Ильясов У.И. // Тез. докл. II Всес. конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупроводниках. Ашхабад, 1991. С. 328.
- [15] Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. М.: Мир, 1975. 432 с.
- [16] Беркелиев А., Гольдберг Ю.А., Именков А.Н., Мелебаев Д., Розьева М.Х. // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХ и ГН 1986. № 1. С. 8-14.

- [17] Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1981. Т. 2. 364 с.
- [18] Субашиев В.К., Чаликян Г.А. // ФТП. Т. 3. В. 10. С. 1447-1451.
- [19] Беркелиев А., Жилыев Ю.В., Федоров Л.М., Мелебаев Д., Тилевов С., Старобинец С.М. // Тез. докл. II Всес. конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупроводниках. Ашхабад, 1991. С. 147-148.
- [20] G a r t n e r W.W. // Phys. Rev. 1959. V. 116. N 1. P. 84-87.
- [21] Гуткин А.А., Седов В.Е. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 9. С. 1761-1765.

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

Поступило в Редакцию
8 февраля 1993 г.