

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Ж. И. Алферову за интерес к работе и неоднократное обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов Ж. И. и др. Фото-эдс в плавной гетероструктуре на основе твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.— Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, № 7.
2. Алферов Ж. И. и др. Фотоэлектрические преобразователи концентрированного солнечного излучения на основе AlGaAs -гетероструктур.— ФТП, 1979, т. 13, вып. 3.
3. Евдокимов В. М., Милованов А. Ф., Стребков Д. С. Использование излучения в полупроводниках с объемным фотовольтаическим эффектом.— ФТП, 1977, т. 11, вып. 11.
4. Casey H. C., Sell D. D., Wecht K. W. Concentration Dependence of the Absorption Coefficient for n - and p -GaAs between 1,3 and 1,6 eV.— J. Appl. Phys., 1975, vol. 46, p. 250—257.
5. Monemar B., Shih K. K., Pettit G. D. Some Optical Properties of the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ System.— J. Appl. Phys., 1976, vol. 47, p. 2604—2613.
6. Именков А. Н. и др. Экспериментальное обнаружение варизонной фото-эдс.— ФТП, 1978, т. 12, с. 2377—2385.

Поступила в редакцию 10 февраля 1980 г.

УДК 621.315.595

А. Т. ГОРЕЛЕНКО, М. З. ЖИНГАРЕВ, В. В. МАМУТИЦ,
В. К. ТИБИЛОВ, А. С. УСИКОВ

(Ленинград)

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ГЕТЕРОФОТОДИОДЫ $\text{InGaAsP} - \text{InP}$ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1,0—1,6 мкм

Большой интерес к изопериодическим гетероструктурам $\text{InGaAsP} - \text{InP}$ обусловлен тем, что излучающие и фотоприемные приборы на их основе позволяют перекрыть спектральный диапазон от 1,0 до 1,7 мкм [1]. На этот интервал длин волн приходится минимум потерь излучения и нулевая дисперсия в стекловолокне [2]. Поэтому изопериодические гетероструктуры $\text{InGaAsP} - \text{InP}$ перспективны для элементной базы волоконных оптических линий связи [3].

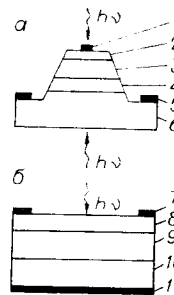
Ранее сообщалось о фотоприемниках на основе p - n -гомопереходов [4—6] и p - n -гетеропереходов [7—9] в системе InGaAsP , работающих в спектральном диапазоне 1,0—1,6 мкм. Особенностью таких фотоприемников являются малые темновые токи ($3 \cdot 10^{-6}$ А/см²) [6], высокая чувствительность (0,54 А/Вт) [7] в режиме лавинного умножения, большие коэффициенты умножения при достаточно низких темновых токах (3000 при $3 \cdot 10^{-6}$ А/см²) [6].

В данной работе приводятся результаты исследования фотоэлектрических свойств одиночных и двойных гетероструктур $\text{InGaAsP} - \text{InP}$ с чувствительностью в спектральном диапазоне 1,0—1,6 мкм.

Методика эксперимента. Изопериодические гетероструктуры $\text{InGaAsP} - \text{InP}$ создавались жидкостной эпитаксией по методике, приведенной в [10]. В качестве подложек использовался n - InP с $n = (2 - 7) \cdot 10^{17}$ см⁻³, ориентированный по кристаллографической плоскости $B(111)$ или (100). Создавались структуры двух типов: 1) n - InP (нелегированный толщиной ~ 5 мкм) — p - $\text{InGaAsP}:\text{Mg}$ (~ 2 мкм) с $E_g = 0,75 - 1,0$ эВ в

Рис. 1. Конструкции фотодиодов с двойной (а) и одиночной (б) гетероструктурой:

1 — Au — Zn, 2 — p -InP: Mg (3 мкм), 3 — p -InGaAsP: Mg (2,5 мкм), 4 — n -InP: Sn (5 мкм), 5 — Au — Te, 6 — n -InP: Te, 7 — Au — Zn, 8 — p -InGaAsP: Mg (3 мкм), 9 — n -InP (5 мкм), 10 — n -InP: Te, 11 — Au — Te.



кассетах пенального типа; 2) n -InP (нелегированный толщиной ~ 5 мкм) — p -InGaAsP: Mg ($p = 7 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $E_g = 0,8 - 1,0$ эВ, толщина 2—3 мкм) — p -InP: Mg ($p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщина 3 мкм) в кассетах поршневого типа, которые позволяют получать более однородные слои по составу.

Из гетероструктур первого типа изготавливались фотоприемники планарного типа: на p -InGaAsP: Mg напылялся в вакууме сплошной контакт Au — Zn, а на n -InP — кольцевой контакт Au — Te (рис. 1, б). На гетероструктурах второго типа с помощью фотолитографической техники формировались мезы (см. рис. 1, а), и затем напылялись контакты Au — Zn и Au — Te к p - и n -областям соответственно, которые после фотогравировки вжигались в атмосфере H_2 при 450°C в течение 1 мин. Диаметр мезы был 320 мкм, диаметр контакта к p -области мезы — 100 мкм. Антиотражающие покрытия на фотоприемные поверхности не наносились.

Исследование спектров фототовета проводилось с помощью монохроматора ИКМ-1. Источником возбуждения служил глобар или гетеролазер в системе InGaAsP, излучающий на длине волны 1,3 мкм в случае исследования быстродействия фотоприемников. Освещение осуществлялось перпендикулярно плоскости p - n -перехода со стороны мезы и со стороны подложки.

Результаты и обсуждение. Исследования вольт-емкостных характеристик показали, что p - n -гетероструктуры были резкими, т. е. зависимость $1/C^2 = f(V)$ была линейной. Емкостное напряжение отсечки для различных составов узкозонной области изменялось в пределах 0,5—1,0 В. Концентрация дырок в узкозонной p -области InGaAsP, определенная C - V -методом, изменялась от $3,5 \cdot 10^{16}$ до $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Слой объемного заряда находился внутри эпитаксиального твердого раствора, и его толщина составляла 0,1—0,3 мкм. Емкость диодов при нулевом смещении была 60—120 пФ.

Фотодиоды мезаконструкции с диаметром мезы 320 мкм имели обратный темновой ток $2 \cdot 10^{-7}$ А при смещении — 5 В и ширине запрещенной зоны узкозонной области 0,9 эВ. Коэффициент лавинного умножения составлял 4. Быстродействие фотодиодов при освещении лазером с $\lambda = 1,3$ мкм было не хуже 10 нс.

На рис. 2 приведены типичные спектры фототовета при освещении мезадиодов со стороны мезы и подложки (образец Б139) и планарных диодов при освещении узкозонной p -области твердого раствора InGaAsP. Спектры нормализованы к равному числу падающих фотонов. Спектры фототовета имеют обычный для гетероструктур вид плато, ограниченного краями собственного поглощения окна и узкозонного слоя. Некоторый спад в коротковолновой области обусловлен влиянием поверхностной рекомбинации и малой диффузионной длины носителей в узкозонной области. С изменением состава узкозонной области длинноволновая граница смещалась в соответствии с ходом ширины запрещенной зоны твердого раствора InGaAsP.

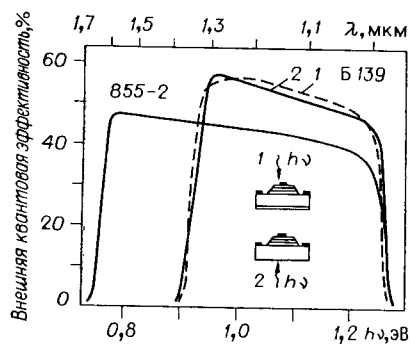


Рис. 2. Спектры фототовета планарной (855-2) и мезаконструкции (Б139) со стороны мезы (1) и подложки (2).

Максимальная величина внешней квантовой эффективности фотодиодов была равна $Q = 0,57$ для $\lambda = 1,3$ мкм и $Q = 0,48$ для $\lambda = 1,6$ мкм (без антиотражающих покрытий). Максимальная величина токовой чувствительности составляла $0,59$ А/Вт для $\lambda = 1,3$ мкм.

Таким образом, в данной работе получены высокоэффективные гетерофотодиоды с чувствительностью в диапазоне длин волн $1,0$ — $1,6$ мкм и исследованы их основные параметры. Дальнейшие перспективы связаны с созданием лавинных фотодиодов на основе гетероструктур в системе InGaAsP.

Авторы выражают благодарность Ж. И. Алферову за постоянный интерес и внимание к работе, а также В. И. Королькову за полезные дискуссии и Б. В. Егорову и В. И. Ильиной за помощь в изготовлении образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов Ж. И. и др. Гетеролазеры непрерывного действия в системе InGaAsP.— Изв. АН СССР. Сер. Физика, 1979, т. 43, № 7.
2. Kimura T., Daikoku K. A Proposal on Optical Fibre Transmission Systems in a Low-Loss 1.0 — 1.4 μm Wavelength Region.— Opt. Quant. Elektron., 1977, vol. 9, N 1.
3. Алферов Ж. И. и др. Волоконно-оптическая линия передачи сигналов для систем дальней связи на длине волны $1,3$ мкм.— Квант. электроника, 1978, т. 5, № 11.
4. Pearsall T. R., Papuchon M. InGaAsP Homogunction Photodiode — a New Avalanche Photodetector in the Near Infrared between 1.0 and 1.6 mkm.— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 33, N 7.
5. Takanashi Y., Horikoshi Y. InGaAsP/InP Avalanche Photodiode Prepared by Zn-Diffusion.— Jpn. J. Appl. Phys., 1979, vol. 18, N 8.
6. Taguchi K., Matsumoto Y., Nishida K. InP — InGaAsP Planar Avalanche Photodiodes with Self-Guard-Bing Effect.— Elektron. Lett., 1979, vol. 15, p. 15.
7. Долгинов Л. М. и др. Фотоэлектрические свойства гетероструктур на основе четырехкомпонентного раствора InGaAsP с высокой квантовой эффективностью на длине волны 1060 нм.— Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, № 14.
8. Clawson A. R., Lum W. Y., McWilliams G. E., Wieder H. H. Quaternary Alloy $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-x}$ /InP Photodetectors.— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 32, N 9.
9. Washington M. A., Nahory R. E., Pollack M. A., Beebe E. D. High-Efficiency $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ /InP Photodetector with Selective Wavelength Response between 0.9 and 1.7 mkm.— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 33, N 10.
10. Берг Н. А. и др. Твердые растворы InGaAsP, изопериодические с InP.— Автометрия, 1980, № 6.

Поступила в редакцию 13 февраля 1980 г.