

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР НА ОСНОВЕ CdGeP₂ И ЕГО БИНАРНОГО АНАЛОГА InP

Г. А. Медведкин, Ю. В. Рудь, М. А. Таиров, Ю. К. Ундалов

Жидкостная эпитаксия бинарных соединений III—V получила широчайшее развитие в полупроводниковой оптоэлектронике при создании идеальных гетероструктур из бинарных полупроводниковых соединений III—V [1]. В данной работе исследуется возможность жидкофазной эпитаксии фосфида индия на подложки его тройного аналога CdGeP₂ с решеткой типа халькопирита и рассмотрены результаты первых исследований фотоэлектрических процессов в полученных фоточувствительных структурах.

Гетероструктуры (ГС) получали методом жидкостной эпитаксии в замкнутой вакуумированной системе (кварцевый контейнер). Процесс выращивания слоев InP осуществлялся из разбавленного раствора фосфора в расплаве индия или индия и кадмия (1 : 1). Слои выращивали в интервале температур 690—630 °С при скоростях охлаждения ~60 К/ч. В качестве подложек использовались монокристаллы CdGeP₂, как специально не легированные ($n=10^{10}$ см⁻³ при 300 К), так и легированные индием ($n=10^{13}$ — 10^{14} см⁻³ при 300 К). Выращивание слоев проводилось в большинстве случаев в вакуумированном контейнере, а в ряде случаев свободный объем контейнера заполнялся аргоном либо порошком тройного соединения. Во всех опытах достигался сплошной рост слоя с зеркальной поверхностью, граница раздела ГС не имела макротрещин и была достаточно совершенной. Сопротивление подложек из CdGeP₂, как правило, на несколько порядков превышало сопротивление легированных примесью кадмия слоев *p*-InP. После наращивания слоя ГС обрабатывались полирующим травителем и снабжались омическими контактами. Толщины слоя были в пределах 0.1—1 мкм, а подложек 100—200 мкм.

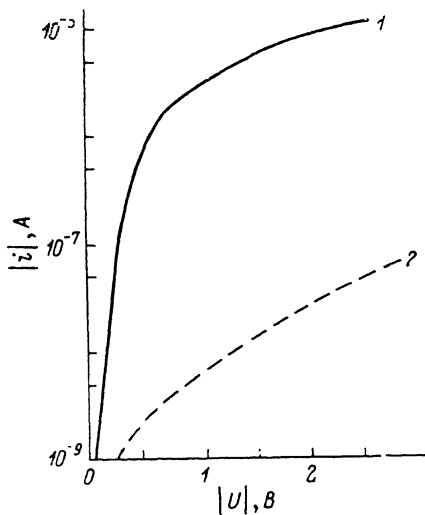


Рис. 1. Темновая ВАХ гетероструктуры *p*-InP—*n*-CdGeP₂(In).

1 — прямое, 2 — обратное смещение; $T=300$ К.

В подавляющем большинстве изотипных и анизотипных ГС пропускному направлению соответствовало положительное напряжение, прикладываемое к подложке из CdGeP₂, и только в отдельных изотипных *p*-*p*-ГС отрицательное напряжение на CdGeP₂ отвечало пропускному направлению. В лучших ГС при 300 К коэффициент выпрямления достигал 400 при $U=2$ В. На прямой ветви ВАХ таких ГС можно было выделить две области. При низких напряжениях ($U < 0.3$ В при 300 К) ток, по-видимому, имеет рекомбинационную природу и может быть представлен выражением $I=I_0 \exp(eU/\beta kT-1)$ с $\beta=2.0$ — 2.1 , тогда как в области более высоких напряжений $I \sim \exp AU$, что характерно для туннельной природы тока. Обратная ВАХ при $U \leq 1$ В описывается зависимостью $I \sim U$, а при высоких напряжениях вплоть до 30 В $I \sim U^m$ с $m=4$ — 5 , что также не противоречит предположению о туннельном механизме протекания тока [2]. В области 30—35 В на обратной ВАХ обычно наблюдался мягкий провал.

При освещении ГС через широкозонную подложку перпендикулярно границе раздела генерировалось фотонапряжение, приблизительно на порядок величины более высокое, чем со стороны тонкого узкозонного слоя, и достигало в лучших образцах 0.3—0.4 В при 300 К, вольтовая фоточувствительность $S_u \approx 10^4$ В/Вт, а токовая $S_i \approx 10$ мА/Вт. С понижением температуры до 80 К фоточувствительность полученных ГС снижалась по отношению к 300 К на 2—3 порядка величины. В большинстве *p*-*p*- и *p*-*n*-ГС подложка из CdGeP₂ заряжалась

положительно при освещении структур со стороны узкозонного слоя.

На рис. 2 приведены типичные спектры фототока короткого замыкания $i(\hbar\omega)$ для p - p - и p - n -гетероструктур. Только в случае изотипных p - p -гетероструктур фототок во всей области фоточувствительности и независимо от места попадания излучения на потенциальный барьер течет в одном направлении, причем подложка p -CdGeP₂ имеет положительную

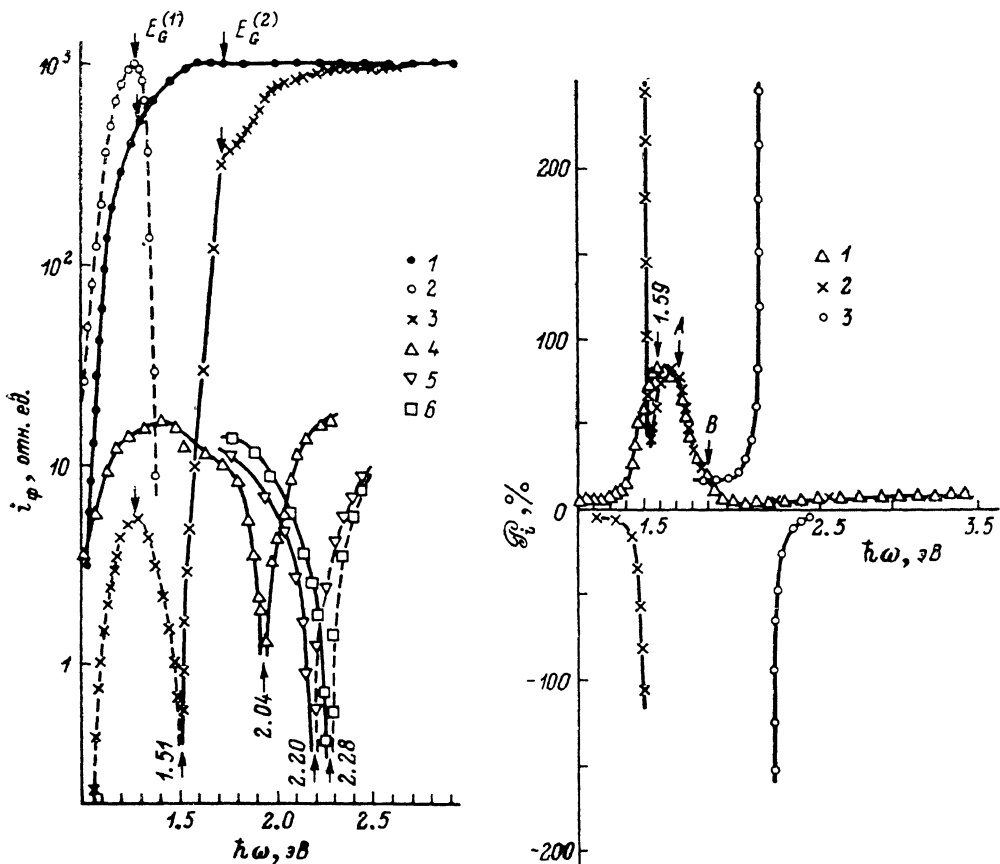


Рис. 2. Спектральные зависимости фототока гетероструктур p -InP- p -CdGeP₂ (1) и p -InP- n -CdGeP₂ (2-6) при $T=300$ К.

1, 2 — освещение со стороны InP; 3-6 — со стороны CdGeP₂; 1-4 — неполяризованный свет; 5, 6 — линейно поляризованный; гетерограница ориентирована в плоскости (100), освещение вдоль нормали к освещаемой плоскости (100) CdGeP₂, стрелками у кривых $E_G^{(1)}$ и $E_G^{(2)}$ указаны значения ширины запрещенных зон InP и CdGeP₂; сплошные кривые — положительные полярности фототока на CdGeP₂, штриховые — отрицательные; $U_{пр}$, В: 1-3 — 0; 4 — 1.3; 5, 6 — 3.2.

Рис. 3. Спектры фотохроизма гетероструктур p -InP- n -CdGeP₂(In) при различных напряжениях прямого смещения.

$T=300$ К; $U_{пр}$, В: 1, 2 — 0, 3 — 3.2; 1 — образец 35; 2, 3 — образец 30.

полярность. Длинноволновая граница фоточувствительности таких ГС определяется фундаментальным поглощением в фосфиде индия (рис. 2, кривая 1) и фототок не обнаруживает коротковолнового спада в глубине фундаментального поглощения CdGeP₂, что указывает на возможность эффезивного гетерограницы между бинарным и тройным аналогами в качестве достаточно эффективного барьера, спектральный контур фоточувствительности которого отвечает требованиям к материалу для солнечных элементов.

Для полученных структур типичной оказалась инверсия знака фототока по спектру при освещении со стороны n -CdGeP₂ (рис. 2, кривая 3), тогда как при освещении со стороны тонкого слоя p -InP фоточувствительность обычно на 1-2 порядка ниже, чем при освещении со стороны подложки. В последнем случае фоточувствительность доминирует в области фундаментального поглощения InP и подложка имеет отрицательную полярность. При освещении со стороны подложки, напротив, CdGeP₂ заряжается положительно в области фун-

даментального поглощения тройного соединения, а инверсия знака фототока наступает вблизи $E_g^{(1)}$. Следовательно, знак фототока $p-n$ -ГС в отсутствие внешнего смещения зависит от места поглощения падающего излучения в ГС. По-видимому, эта закономерность обусловлена образованием в процессах эпитаксии по крайней мере двух неэквивалентных потенциальных барьеров со встречным направлением электрических полей. Смещение таких ГС в запертом направлении, уже начиная с $U_{обр} > 1$ В, при освещении со стороны CdGeP₂ сопровождается подавлением инверсии, в результате чего фототок во всей области фоточувствительности ($\hbar\omega > 0.6$ эВ) приобретает положительную полярность на подложке тройного соединения.

При смещении ГС с $p-n$ -переходом в пропускном направлении (плюс на n -CdGeP₂) с ростом $U_{пр}$ энергетическое положение точки инверсии знака фототока, как видно из рис. 2 (кривые 3—6), смещается в коротковолновую область спектра. Это обусловлено снижением вклада фототока от обратнсмещенного энергетического барьера с максимальной фоточувствительностью, который при $U=0$ обеспечивает фототок противоположной полярности. Исследование фоточувствительности гетероструктур в линейно поляризованном излучении показывает, что поляризационная фоточувствительность доминирует для структур, не имеющих по спектру инверсии знака фототока вблизи $E_g^{(2)}$. Поляризационная индикатриса фототока $p-n$ -ГС описывается типичным для одноосных кристаллов обобщенным законом Малюса [3]. Точка инверсии знака фототока в полученных ГС в поляризованном излучении расщепляется (рис. 2, кривые 5 и 6), в результате чего в определенной области энергий знак i изменяется в зависимости от положения плоскости поляризации излучения относительно тетрагональной оси CdGeP₂ при $\hbar\omega = \text{const}$. Благодаря векторной природе фототока естественный фотоплексроизм в окрестности точки инверсии знака i обнаруживает резкое возрастание ($\mathcal{S}_i \gg 100\%$). На рис. 3 приведены типичные спектры естественного фотоплексроизма $\mathcal{S}_i(\hbar\omega)$ в режимах фотопреобразования, при которых не наблюдается (кривая 1) или же реализуется поляризационная инверсия знака i (кривые 2 и 3). Для ГС, в спектре которых инверсия i отсутствует, спектральный контур естественного фотоплексроизма имеет типичный для другого типа ГС из CdGeP₂ спектральный контур [4]. Отличие состоит, пожалуй, в том, что максимум фотоплексроизма смещен в длинноволновую спектральную область и это, по-видимому, обусловлено анизотропным поглощением в интерфейсной активной области данных гетероструктур. Отсутствие инверсии знака \mathcal{S}_i (рис. 3, кривая 1) вплоть до 3.5 эВ указывает на достаточное совершенство гетерограницы в отношении рекомбинации фотогенерированных пар. Как видно из рис. 3, эффект «гигантского» увеличения естественного фотоплексроизма [3] в полученных $p-n$ -ГС позволяет существенно превысить характерную для безынверсионного режима фоторегистрации амплитуду $\mathcal{S}_i \simeq 80\%$. За счет увеличения напряжения смещения достигается экспрессная перестройка спектрального положения точки инверсии, в окрестности которой «гигантский» фотоплексроизм резко возрастает до амплитуды 500—1000 %.

Полученные результаты позволяют указать на перспективность применения системы InP—CdGeP₂ при создании фотопреобразователей солнечной энергии и фотоанализаторов с «гигантской» поляризационной чувствительностью.

Список литературы

- [1] Андреев В. М., Долгинов Л. М., Третьяков Д. Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов / Под ред. Ж. И. Алферова. М.: Сов. радио, 1975. 328 с.
- [2] Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник. М.: Мир, 1972. 344 с.
- [3] Рудь Ю. В. // Изв. вузов СССР. Физика. 1986. Т. 29. № 6. С. 68—83.
- [4] Лунев А. В., Рудь Ю. В., Таиров М. А., Ундалов Ю. К. // Препринт ФТИ АН СССР. № 1147. Л., 1987. 57 с.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
15 августа 1989 г.