

Я. ААРИК, Я. БЕРГМАНН, Р. ВАНЕМ,  
П. ЛЫУК, Я. ФРИДЕНТАЛ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ GaSb—AlGaAsSb

J. AARIK, J. BERGMANN, R. VANEM, P. LOUK, J. FRIEDENTHAL. GaSb—AlGaAsSb HETERO-SIIRETE UURIMINE

J. AARIK, J. BERGMANN, R. VANEM, P. LOUK, J. FRIEDENTHAL. INVESTIGATION OF GaSb—AlGaAsSb HETEROJUNCTIONS

(Представил К. К. Ребане)

В последнее время проявляется значительный интерес к полупроводниковым оптоэлектронным приборам, работающим в ближней инфракрасной области спектра. Одним из перспективных материалов для этого диапазона (от 0,8 до 1,8 мкм) является  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ . Его преимущество перед другими материалами заключается в существовании непрерывного ряда твердых растворов с прямозонной энергетической структурой при  $x \leq 21$  [1] и в относительно небольшом различии постоянных решеток GaSb и AlSb ( $\Delta a/a \approx 0,7\%$ ) [2]. Малый скачок  $\Delta a$  на гетерогранице позволяет вырастить методом жидкостной эпитаксии монокристаллические слои  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$  непосредственно на GaSb [3].

Применением четырехкомпонентной системы  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  на подложках GaSb можно в принципе добиться дальнейшего улучшения согласования параметров решеток. Однако переход к четырехкомпонентной системе в значительной степени усложняет технологию изготовления гетероструктур. Поэтому оправдан вопрос — улучшаются ли параметры реальных гетероструктур при использовании четырехкомпонентной системы?

Перед нами стояло две задачи: изучить зонную энергетическую диаграмму гетероперехода GaSb— $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  и выяснить зависимости его характеристик от содержания мышьяка в твердом растворе.

Гетеропереходы выращивались методом жидкостной эпитаксии на подложках GaSb  $n$ -типа проводимости, ориентированных в плоскости (100) ( $n \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Выращивание осуществлялось при  $570^\circ\text{C}$  в режиме принудительного охлаждения раствора-расплава со скоростью  $0,3 \text{ град/мин}$ . Концентрация основных носителей в твердом растворе составляла  $p = (2-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Омические контакты к  $n$ - и  $p$ -областям создавались вакуумным напылением и последующим вжиганием соответственно сплавов Au—Te и Au—Zn. Образцы были прямоугольной формы с площадью  $(1-7) \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$ . Для ввода излучения в контакте со стороны твердого раствора были оставлены щели. Составы эпитаксиальных слоев определялись методом локального рентгеноспектрального анализа и с помощью лазерного микрозонда [4]. Полученные на установке JXA-50A



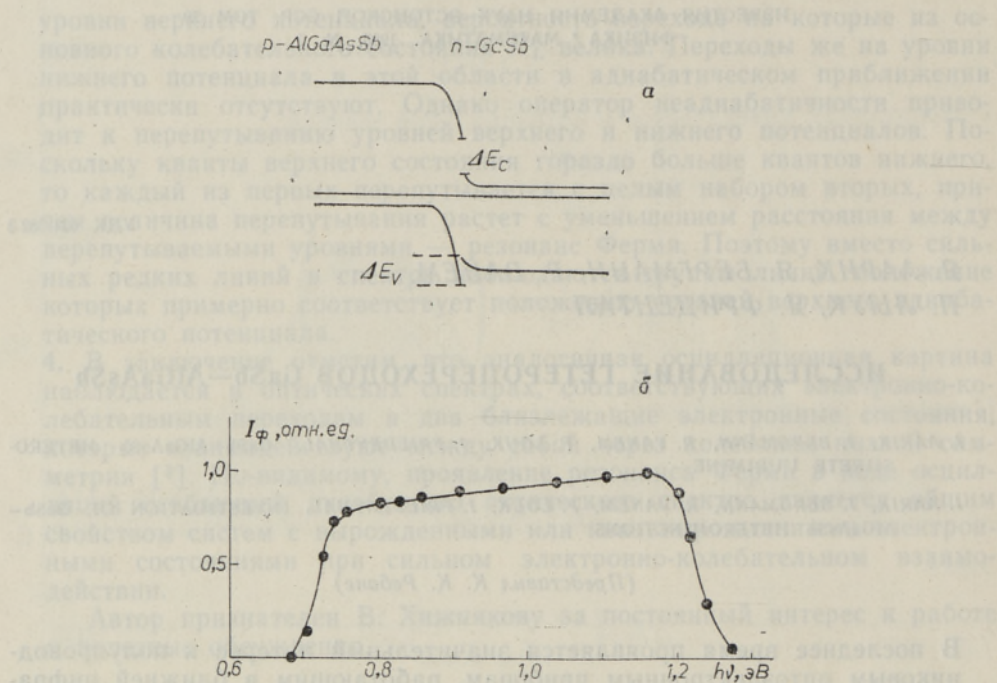


Рис. 1. Зонная энергетическая диаграмма гетероперехода (а) и спектральная характеристика его фоточувствительности при 300 К (б).

распределения Al и Ga и местоположение полос излучения в спектрах фотолюминесценции при сканировании лазерным микрозондом свидетельствуют о наличии резкого гетероперехода.

Зонная диаграмма данного гетероперехода до сих пор не установлена. Так как необходимое для построения диаграммы значение сродства к электрону для AlGaAsSb в литературе также отсутствует, мы оценили его путем экстраполяции известных значений сродства для GaSb и AlSb [2]. При этом пренебрегали влиянием мышьяка ввиду его малого содержания в твердом растворе. Для интересующего нас состава твердого раствора  $\text{Ga}_{0.65}\text{Al}_{0.35}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  сродство оказалось равным 3,79 эВ. Исходя из этого значения и определенной экспериментально ширины запрещенной зоны 1,22 эВ, построена зонная диаграмма (рис. 1, а). При этом предполагалось, что уровень Ферми практически совпадает с краем зоны как в  $n$ -, так и в  $p$ -области (обе стороны гетероперехода достаточно сильно легированы). Характерным для зонной диаграммы является то, что разрывы имеются в обеих зонах, причем  $\Delta E_c \approx \Delta E_v \approx 0,27$  эВ.

Достоверность полученной зонной диаграммы проверялась исследованием вольтфарадных и фотоэлектрических характеристик гетероперехода. Емкостные напряжения отсечки  $U_{от}$  в среднем имеют значение 0,93 В. Учитывая, что искривление зон происходит в основном в твердом растворе (GaSb легирован сильнее),  $\Delta E_c$  и  $\Delta E_v$  можно определить из соотношений

$$U_{от} \approx E_g(\text{GaSb}) + \Delta E_v,$$

$$E_g(\text{AlGaAsSb}) - E_g(\text{GaSb}) = \Delta E_v + \Delta E_c.$$



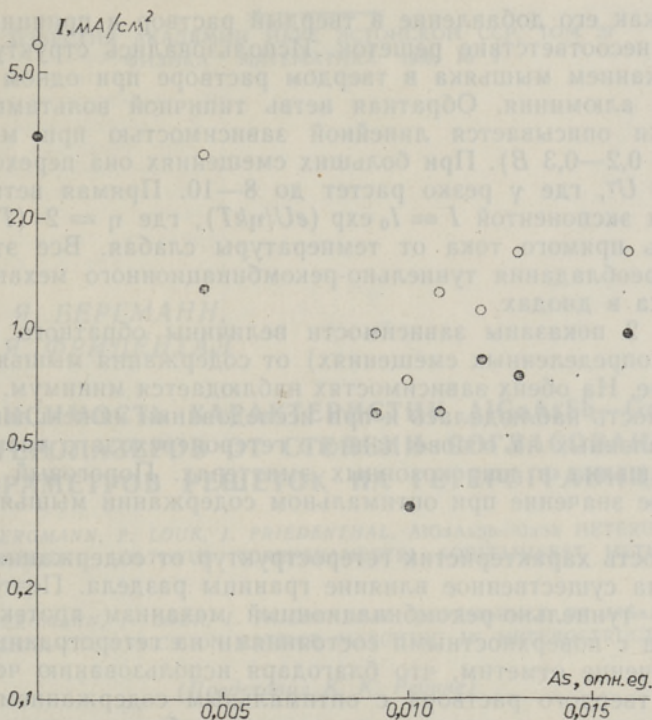


Рис. 2. Зависимости величин прямого (O) и обратного (●) токов от содержания мышьяка в твердом растворе гетероперехода при постоянном смещении ( $|U| = 0,1$  В).

Полученные значения  $\Delta E_c \approx 0,25$  эВ и  $\Delta E_v \approx 0,29$  эВ близки к вышеприведенным оценкам.

Спектр фоточувствительности  $p$ — $n$ -гетероперехода показан на рис. 1, б. Коротковолновая граница фотоответа определяется шириной запрещенной зоны твердого раствора, а длинноволновая граница — шириной запрещенной зоны GaSb. Это значит, что практически все фотоносители, которые разделяются полем  $p$ — $n$ -перехода, генерируются в узкозонной части. Дырки, генерированные в  $n$ -области, должны преодолеть барьер  $\Delta E_v$  в валентной зоне (рис. 1, а). Наблюдаемое в эксперименте высокое значение квантового выхода (0,35) трудно объяснить термическим прохождением дырок над барьером, так как  $\Delta E_v \gg kT$ . Однако дырки, как и электроны [5], могут в принципе проходить в широкозонную часть гетероперехода путем туннелирования. Так как вероятность туннелирования зависит от ширины барьера на уровне  $E_v$ , приложение обратного смещения должно было бы вызывать увеличение фотоответа. Однако влияния обратного смещения на величину фотоответа экспериментально не наблюдалось. Это указывает на то, что потенциальный барьер для фотоносителей в валентной зоне либо отсутствует, либо он полностью прозрачен для дырок и без обратного смещения.

В любых реальных гетеропереходах, несмотря на малую разницу в параметрах решеток, на поверхности раздела нарушается совершенство кристаллической структуры. Поэтому нам представлялось интересным экспериментально проверить зависимость свойств гетеропереходов  $n$ -GaSb— $p$ -AlGaAsSb от содержания мышьяка в широкозонной



части, так как его добавление в твердый раствор в принципе должно уменьшить несоответствие решеток. Использовались структуры с разным содержанием мышьяка в твердом растворе при одном и том же содержании алюминия. Обратная ветвь типичной вольтамперной характеристики описывается линейной зависимостью при малых смещениях (до 0,2—0,3 В). При больших смещениях она переходит в степенную  $I \approx U^\gamma$ , где  $\gamma$  резко растет до 8—10. Прямая ветвь хорошо описывается экспонентой  $I = I_0 \exp(eU/\eta kT)$ , где  $\eta = 2$  ( $T = 300$  К). Зависимость прямого тока от температуры слабая. Все это говорит в пользу преобладания туннельно-рекомбинационного механизма протекания тока в диодах.

На рис. 2 показаны зависимости величины обратного и прямого токов (при определенных смещениях) от содержания мышьяка в твердом растворе. На обеих зависимостях наблюдается минимум. Аналогичная зависимость наблюдалась и при исследовании инжекционных лазеров, изготовленных на основе данного гетероперехода с разным содержанием мышьяка в широкозонных эмиттерах. Пороговый ток имеет минимальное значение при оптимальном содержании мышьяка в эмиттерах.

Зависимость характеристик гетероструктур от содержания мышьяка указывает на существенное влияние границы раздела. Поэтому вышеупомянутый туннельно-рекомбинационный механизм протекания тока тесно связан с поверхностными состояниями на гетерогранице.

В заключение отметим, что благодаря использованию четырехкомпонентного твердого раствора с оптимальным содержанием мышьяка удастся заметно уменьшить туннельно-рекомбинационную составляющую тока в диодах на основе гетеропереходов.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность К. К. Ребане за интерес и внимание к работе, Э. Куус за помощь при изготовлении образцов, Х. Келле и В. Саммелсельгу за проведение микрорентгеноспектрального анализа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Allegre, J., Averous, M., Joullie, A., J. Luminescence, 17, № 3, 301—310 (1978).
2. Милнс А., Фойхт Д., Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник, М., «Мир», 1975.
3. Гончарова Т. С., Конников С. Г., Рябцев Н. Г., Третьяков Д. Н., Александрова Т. П., Изв. ВУЗов, Физика, вып. 9, 146—149 (1973).
4. Аарик Я. А., Коппель Х. Д., Кютт Я. Я., Розенталь А. И., Фриден-тал Я. К., Уч. зап. Тартуск. ун-та, Гетеропереходы, вып. 466, 86—91 (1978).
5. Корольков В. И., Никитин В. Г., Третьяков Д. Н., Физ. и техн. полупроводников, 8, № 12, 2355—2358 (1974).

Институт физики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
3/1 1980