

зоны проводимости, которое в свою очередь задается двумя параметрами: величиной зазора между минимумами (т. е. составом твердого раствора) и положением уровня Ферми (т. е. уровнем легирования материала). Как видно из таблицы, для достижения требуемых параметров материала при меньших составах требуется более высокий уровень легирования, а при составах, близких к  $x=0.4$ , материал должен быть невырожденным. При этом в области составов  $x > 0.37$  достаточно высокая температурная стабильность коэффициента чувствительности оказывается вообще недостижимой. Поэтому, по-видимому, более предпочтительным как с технологической точки зрения, так и в отношении качества материала является использование составов  $x=0.33-0.36$  с суммарной концентрацией электронов в зоне проводимости  $(1-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 1 представлены расчетные температурные зависимости значения  $S$  при давлениях  $P=0, 1$  и  $2$  кбар для  $\text{GaAs}_{0.64}\text{P}_{0.36}$  при  $n_1+n_2=1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 2 для этого материала представлена температурная зависимость эффективной концентрации электронов, измеренной с помощью холл-эффекта, которая с определенной степенью точности может служить для контроля основных параметров материала: уровня легирования — величина  $n_x$  и состава твердого раствора — наклон температурной зависимости  $n_x$ .

#### Список литературы

- [1] Лукичева Н. И., Юрова Е. С. // Электрон. техн. Сер. Материалы. 1975 № 6. С. 119—120.  
 [2] Юрова Е. С., Пель Э. Г. // ФТП. 1973. Т. 7. В. 2. С. 385—387.

Государственный научно-исследовательский  
и проектный институт радиометаллической  
промышленности  
Москва

Получено 21.05.1991  
Принято к печати 17.06.1991

ФТП, том 25, вып. 10, 1991

## ПОВЕДЕНИЕ ИТТЕРБИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ $p\text{-GaInSbAs}$

Саморуков Б. Е., Сиповская М. А., Сяврис Е. А.,  
Тихомирова В. В.

Твердые растворы  $p\text{-GaInSbAs}$  находят применение в качестве материалов для светодиодов, лазеров и фотоприемников на диапазон  $1.8-2.5 \text{ мкм}$  [1-3]. В работе [4] показано, что эпитаксиальные слои (ЭС)  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$  ( $0 < x < 0.25$ ) на подложке  $\text{GaSb}$  вырастают до  $p$ -типа проводимости. Концентрация акцепторов  $V_{\text{Ga}}-\text{GaSb}$  с энергией активации  $E_a+0.03 \text{ эВ}$ , присущих  $p\text{-GaSb}$  [5], и дырок в слое уменьшается от  $1 \cdot 10^{17}$  до  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при росте  $\text{InAs}$  в слое от 0 до 0.22. При выращивании ЭС на подложке  $n\text{-GaSb} : \text{Te}$  происходит диффузия  $\text{Te}$  из подложки в ЭС. При этом часть атомов  $\text{Te}$  увеличивает концентрацию компенсирующих доноров, а часть участвует в образовании комплексов  $V_{\text{Ga}}-\text{TeSb}$  с энергией активации  $E_a+0.1 \text{ эВ}$ . Кроме того, слои  $p\text{-GaInSbAs}$ , выращиваемые методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), содержат значительную концентрацию фоновых примесей  $\text{Si}, \text{O}, \text{S}, \text{C}, \text{Te}$ .

Наличие дефектов  $V_{\text{Ga}}-\text{GaSb}$  и  $V_{\text{Ga}}-\text{TeSb}$  и неконтролируемых фоновых примесей несомненно должно сказаться на работе приборов, изготавливаемых на основе  $p\text{-GaInSbAs}$ .

Известно [6-8], что добавление редкоземельных элементов при ЖФЭ слоев  $\text{InP}, \text{InGaAs}, \text{GaAs}, \text{GaSb}$  позволяет очистить их от неконтролируемых примесей. Причем в большей степени происходит снижение фона доноров VI группы.

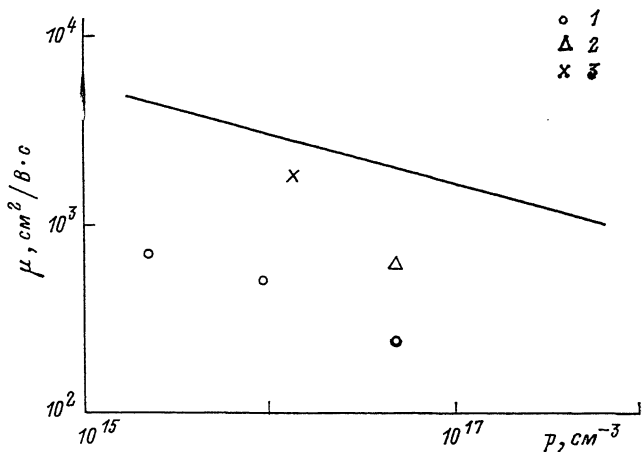


Рис. 1. Зависимость подвижности носителей заряда от концентрации при 77 К для твердых растворов  $p\text{-GaInSbAs}$ .

Образцы: 1 — нелегированные, 2 — легированный 0.005 ат% иттербия, 3 — легированный 0.01 ат% иттербия; сплошная кривая — теоретический расчет.

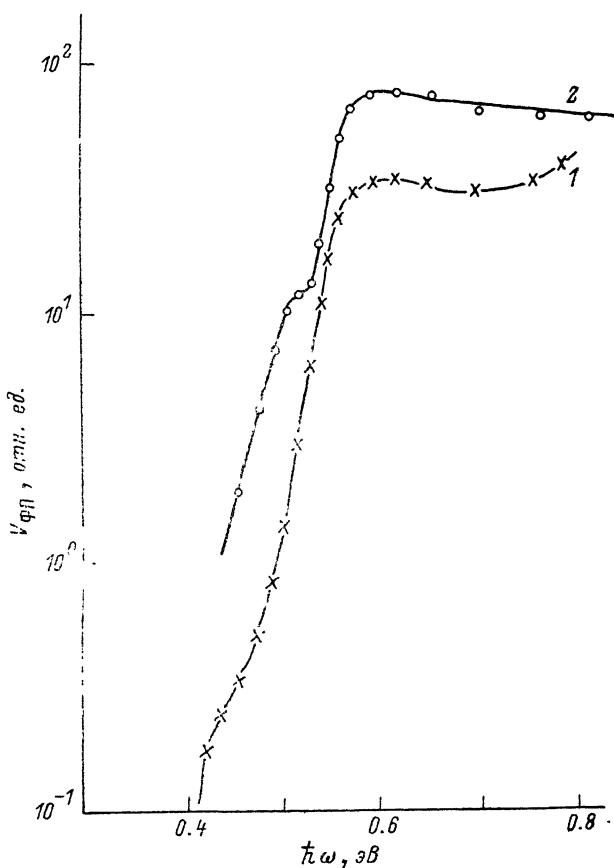


Рис. 2. Зависимость сигнала фотопроводимости ( $V_{\text{ФП}}$ ) от энергии падающих квантов ( $\hbar\omega$ ) твердых растворов  $p\text{-Ga}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{Sb}_{0.84}\text{As}_{0.16}$  при  $T=180$  К.

Образцы: 1 — нелегированный, 2 — легированный 0.01 ат% иттербия.

Цель настоящей работы — исследование ЭС  $p$ - $\text{Ga}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{Sb}_{0.84}\text{As}_{0.16}$ , легированных иттербием. ЭС толщиной 2—3 мкм выращивались по стандартной технологии в графитовых кассетах при температуре 550 °С из исходных компонентов InAs, InSb, GaSb, In. Легирующая примесь (Yb) вводилась в шихту в виде навески, доля которой в расплаве составляла 0.005 и 0.01 ат %. В качестве подложки использовался  $n$ -GaSb : Te ( $n=10^{18}$  см<sup>-3</sup>,  $T=77$  К), на которой методом ЖФЭ из расплава (GaSb : Te+GaSb+Pb) наносился высокоомный буферный слой с целью уменьшения диффузии Te из подложки в ЭС.

Результаты измерений эффекта Холла показали, что наименьшая концентрация дырок в нелегированных образцах достигает  $2.5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> при 77 К, их подвижность составляла 740 см<sup>2</sup>/В·с. Это говорит о высокой степени компенсаций примесей. В образцах с Yb наблюдается увеличение концентрации дырок до  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> при 77 К, их подвижность возросла до 1700 см<sup>2</sup>/В·с, что свидетельствует об уменьшении степени компенсации примесей в ЭС.

На рис. 1 представлена теоретически рассчитанная зависимость подвижности носителей заряда от их концентрации в твердом растворе  $p$ -GaInSbAs при 77 К. Здесь же нанесены точки, характеризующие свойства некоторых образцов. Видно, что при введении Yb в раствор-расплав при ЖФЭ концентрация носителей заряда и их подвижность значительно выше, чем в нелегированных образцах.

Увеличение подвижности дырок в образцах с Yb можно объяснить уменьшением содержания в твердой фазе компенсирующих донорных примесей. Причиной этого является взаимодействие иттербия с примесями в растворе-расплаве с образованием химических соединений, не попадающих в твердую фазу.

На рис. 2 представлены спектральные зависимости напряжения фотопроводимости ( $V_{\text{ФП}} \sim \Delta\sigma$ ) для нелегированного образца (кривая 1) и образца с 0.01 ат % Yb (кривая 2) при 180 К. В нелегированном образце в диапазоне ~0.43 эВ виден максимум, обусловленный переходами электронов с акцепторного центра  $V_{\text{Ga}}-\text{Te}_{\text{Sb}}$  с энергией активации 0.1 эВ [4] в зону проводимости. Следовательно, несмотря на наличие буфера, в слоях все же образуются дефекты  $V_{\text{Ga}}-\text{Te}_{\text{Sb}}$  вследствие диффузии Te из подложки.

В образце с Yb в области  $\approx 0.5$  эВ проявляется ФП, связанная с фотоионизацией дефекта  $V_{\text{Ga}}-\text{Ga}_{\text{Sb}}$ . Можно предположить, что Yb взаимодействует с атомами Te в растворе-расплаве и выводит их в шлак.

Таким образом, введение Yb в раствор-расплав приводит к очистке слоев  $p$ - $\text{Ga}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{Sb}_{0.84}\text{As}_{0.16}$ , выращиваемых ЖФЭ на подложках  $n$ -GaSb : Te, от доноров (O, S, Si, Te), что обуславливает увеличение подвижности дырок и исчезновение уровня  $E_v+0.1$  эВ ( $V_{\text{Ga}}-\text{Te}_{\text{Sb}}$ ) в этих слоях.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность Т. С. Лагуновой и Ю. П. Яковлеву за обсуждение работы.

#### Список литературы

- [1] Баранов А. Н., Джуртанов Б. Е., Именкова А. Н., Шерстнев В. М., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 12. С. 2217—2221.
- [2] Андаспаева А., Баранов А. Н., Гусейнов А., Именков А. Н., Литвак А. М., Филаретова Г. М., Яковлев Ю. В. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 9. С. 845—849.
- [3] Андреев И. А., Афраимов М. А., Баранов А. Н., Демильченко В. Г., Мирсагатов М. А., Михайлова М. П., Яковлев Ю. П. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 11. С. 1311—1315.
- [4] Баранов А. Н., Воронина Т. И., Дахно А. Н., Джуртанов Б. Е., Лагунова Т. С., Сиповская М. А., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 5. С. 780—788.
- [5] Баранов А. Н., Дахно А. Н., Джуртанов Б. Е., Лагунова Т. С., Сиповская М. А., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 1. С. 98—103.
- [6] Гореленок А. Г., Груздев В. Г., Кумар Р., Мамутин В. В., Полянская Т. А., Савельев В. Г., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 35—43.
- [7] Воронина Т. И., Лагунова Т. С., Саморуков Б. Е., Стругов Н. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 147—150.
- [8] Баграев Н. Т., Баранов А. Н., Воронина Т. И., Толпаров Ю. Н., Яковлев Ю. П. // Письма ЖТФ. Т. 11. В. 1. С. 117—121.

Ленинградский

государственный технический университет

Получено 30.05.1991

Принято к печати 17.06.1991