

06.1;07;12

Разъединенный гетеропереход в системе $p\text{-GaSb}-n\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.18$)

© С.С. Кижаяев, С.С. Молчанов, Н.В. Зотова,
Е.А. Гребенщикова, Ю.П. Яковлев, Е. Hulicius, T. Simicek,
K. Melichar, J. Pangrac

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: serguie@mail.ru
Институт Физики, Академия Наук Чешской Республики,
18221 Прага 8, Чешская Республика
E-mail: hulicius@fzu.cz

Поступило в Редакцию 28 июня 2001 г.

На подложках $p\text{-GaSb}$ и $n\text{-InAs}$ методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений выращены слои InAsSb с содержанием Sb $0 \leq x \leq 0.18$. При $T = 77\text{ K}$ измерены спектры фотолюминесценции выращенных слоев. На основе экспериментальных данных, полученных из исследований спектров фотолюминесценции, проведен анализ зависимости ширины запрещенной зоны от состава твердого раствора InAsSb . Проведен расчет энергетического зазора между верхним краем валентной зоны GaSb и дном зоны проводимости $\text{InAs}_{0.82}\text{Sb}_{0.18}$. Установлено, что $\text{GaSb}/\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ — разъединенный гетеропереход II типа в области составов $0 \leq x \leq 0.18$.

В последнее время свойства разъединенных гетеропереходов II типа на основе твердых растворов арсенида индия и антимонида галлия широко используются при создании различных оптоэлектронных приборов. В частности, явление интерфейсной электролюминесценции нашло применение в туннельных светодиодах и лазерах [1]. Люминесцентные, фотоэлектрические, гальваномагнитные свойства изопериодной системы $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$, изготовленной методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), изучены достаточно подробно [2–3]. В работе [4] исследованы магнитотранспортные свойства в изопериодной системе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$ с различным содержанием In в твердом растворе ($x = 0.85\text{--}0.95$), созданной методом ЖФЭ. В то же время система $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{GaSb}$ представляет интерес, так как это гетеропереход

Образец	Температура роста, °C	H ₂ Через TMIIn, cm ³ /min	H ₂ Через TESb, cm ³ /min	H ₂ Через tBAsH ₂ , cm ³ /min	Sb В твердой фазе, %	$h\nu_m$, meV	$\Delta h\nu_{1/2}$, meV
859	500	292	113	25	18	325	47
860	600	292	113	25	4.2	390	35
861	600	292	180	23	7.1	351	33
862	600	292	248	21	9	345	33

II типа, являющийся в зависимости от содержания Sb в твердом растворе $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ разъединенным либо ступенчатым. Если в случае разъединенного $p-n$ -перехода мы всегда имеем омический контакт, то в случае ступенчатого перехода при прямом смещении — выпрямление и рекомбинацию по обе стороны гетерограницы [2].

Система $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{GaSb}$ слабо изучена. Особенно мало сведений о свойствах структур, синтезированных методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ); и задачей данной работы являлось выяснение типа $p-n$ -перехода $p\text{-GaSb}-n\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ при различном содержании Sb в твердом растворе ($0 \leq x \leq 0.18$).

Эпитаксиальные слои InAsSb были выращены методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений в горизонтальном реакторе AIXTRON 200. Подложки $p\text{-GaSb}$ были легированы Ge до уровня $\sim 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Перед эпитаксией подложки промывались в ацетоне, затем обрабатывались в травителе на основе окиси хрома. В качестве источников индия, мышьяка и сурьмы использовались соответственно триметилиндий TMIIn ($+16^\circ\text{C}$), трибутилларсин tBAsH₂ ($+5^\circ\text{C}$), триэтилантимонид TESb ($+16^\circ\text{C}$). Рост проводился при общем потоке водорода 4 стандартных литра в минуту и давлении в реакторе 150 mm Hg. Соотношения между элементами в газовой фазе, а также температура роста для каждого из образцов представлены в таблице.

Несколько слоев InAsSb были получены с помощью эпитаксиальной установки, работающей при атмосферном давлении, на подложках InAs ($n \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Условия роста будут сообщены позднее.

Элементный состав твердого раствора InAsSb определялся с помощью рентгеновского микроанализатора Camebax фирмы Camesa.

Пользуясь значениями параметров решетки для бинарных соединений GaSb — 6.0959 Å, InAs — 6.0584 Å, InSb — 6.4794 Å [5], был рассчитан состав твердого раствора InAsSb, изопериодный к подложке GaSb—Sb ~ 9%.

Были измерены спектры фотолюминесценции (ФЛ) выращенных слоев. ФЛ возбуждалась диодным лазером на основе GaAs (длина волны $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$, мощность излучения в импульсном режиме $P = 10 \text{ W}$, $\tau = 5 \mu\text{s}$, $f = 500 \text{ Hz}$). Исследуемый образец находился при температуре 77 К.

Для измерения вольт-амперных характеристик были изготовлены меза-диоды методом стандартной фотолитографии. Диаметр мезы составлял $300 \mu\text{m}$. Сплошной омический контакт создавался со стороны слоя $n\text{-InAsSb}$. Диаметр точечного контакта со стороны подложки составлял $100 \mu\text{m}$. Омические контакты создавались напылением золота с теллуром (на слой n -типа проводимости) и золота с цинком (на слой p -типа проводимости).

Перейдем к рассмотрению экспериментальных результатов. На рис. 1 представлена зависимость положения максимума спектра ФЛ от содержания Sb в твердом растворе InAsSb. На вставке 1 к рис. 1 показаны спектры ФЛ образцов 859 ($x = 0.18$) и 860 ($x = 4.2$), измеренные при $T = 77 \text{ K}$. Ширина спектра на половине максимума составляла 33 meV для образцов 861, 862, имеющих наименьшее рассогласование с подложкой GaSb. По мере увеличения рассогласования ширина спектров увеличивается (см. таблицу).

Если считать, что ФЛ осуществляется прямыми переходами из зоны проводимости в валентную зону, то значение ширины запрещенной зоны твердого раствора (E_g) без учета вырождения:

$$E_g = hv - 1/2kT. \quad (1)$$

При 77 К $E_g \cong hv$, поэтому, аппроксимируя полиномом второй степени зависимость положения максимума ФЛ от содержания Sb при $T = 77 \text{ K}$, используя коэффициент изменения E_g в InAs от температуры $\Delta E_g/\Delta T = 2.8 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$, можно получить выражение для ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0-0.18$) при комнатной температуре:

$$E_g[\text{eV}] = 0.36 - 0.77 \cdot X + 1.72 \cdot X^2. \quad (2)$$

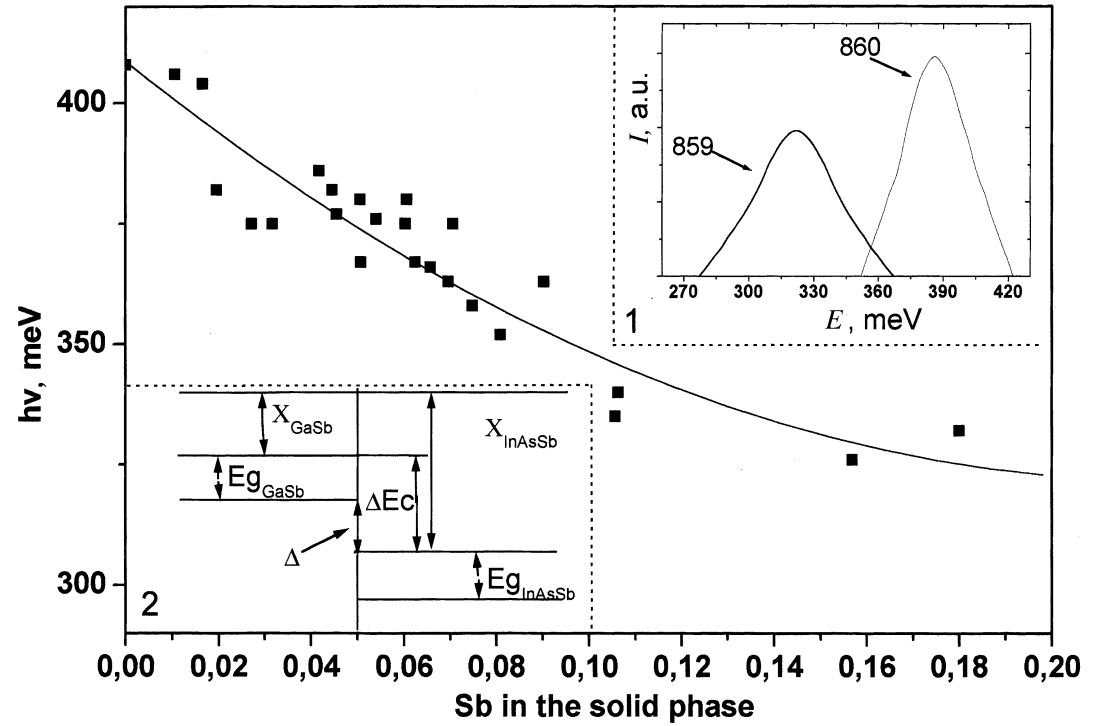


Рис. 1. Зависимость положения максимума спектра ФЛ от содержания Sb в твердом растворе InAsSb. $T = 77$ К. Вставка 1. Спектры фотолюминесценции образцов 859 и 860. Вставка 2. Схематическая диаграмма гетерограницы GaSb/InAs_{0,82}Sb_{0,18} до приведения полупроводников в контакт.

Зависимость (2) хорошо совпадает с моделью расчета ширины запрещенной зоны твердых растворов, предложенной в работе [5]. В частности, для твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ при комнатной температуре расчет производится по формуле:

$$E_{g \text{ InAsSb}} = X \cdot E_{g \text{ InSb}} + (1 - X) \cdot E_{g \text{ InAs}} + C \cdot X \cdot (X - 1), \quad (3)$$

где $E_{g \text{ InSb}} = 0.18 \text{ eV}$, $E_{g \text{ InAs}} = 0.36 \text{ eV}$ — значения ширины запрещенной зоны соответственно в InSb и InAs , $C = 0.58 \text{ eV}$ — параметр смешивания.

Чтобы определить тип гетероперехода, необходимо рассчитать его энергетическую диаграмму. Рассмотрим схематическую диаграмму гетерограницы $\text{GaSb}/\text{InAs}_{0.82}\text{Sb}_{0.18}$ до приведения полупроводников в контакт (вставка 2 к рис. 1). Энергетический зазор между уровнями дна зоны проводимости ΔE_c на гетерогранице рассчитывается из значений электронного сродства χ двух полупроводников $\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2$. Для GaSb при $T = 300 \text{ K}$ $\chi = 4.06 \text{ eV}$ [6]. Расчет электронного сродства твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ можно произвести по формуле:

$$\chi_{\text{InAsSb}} = X \cdot \chi_{\text{InSb}} + (1 - X) \cdot \chi_{\text{InAs}}, \quad (4)$$

где $\chi_{\text{InSb}} = 4.6 \text{ eV}$, $\chi_{\text{InAs}} = 4.9 \text{ eV}$ — значения электронного сродства соответственно InSb и InAs при $T = 300 \text{ K}$ [6].

Для твердого раствора InAsSb с содержанием Sb 18% вычисленное значение электронного сродства $\chi = 4.84 \text{ eV}$.

Энергетический зазор:

$$\Delta E_c = \chi_{\text{GaSb}} - \chi_{\text{InAs}_{0.82}\text{Sb}_{0.18}} = -0.78 \text{ eV}. \quad (5)$$

Ширина запрещенной зоны GaSb $E_{g \text{ GaSb}} = 0.72 \text{ eV}$ [5] меньше значения ΔE_c . В результате на гетерогранице энергетический зазор между верхним краем валентной зоны GaSb и дном зоны проводимости $\text{InAs}_{0.82}\text{Sb}_{0.18}$ (Δ):

$$\Delta = \Delta E_c + E_{g \text{ GaSb}} = -0.06 \text{ eV}. \quad (6)$$

Это означает, что мы имеем дело с разьединенным гетеропереходом II типа.

На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики диода на основе $p\text{-GaSb}/n\text{-InAs}_{0.82}\text{Sb}_{0.18}$. Из полученных данных следует, что

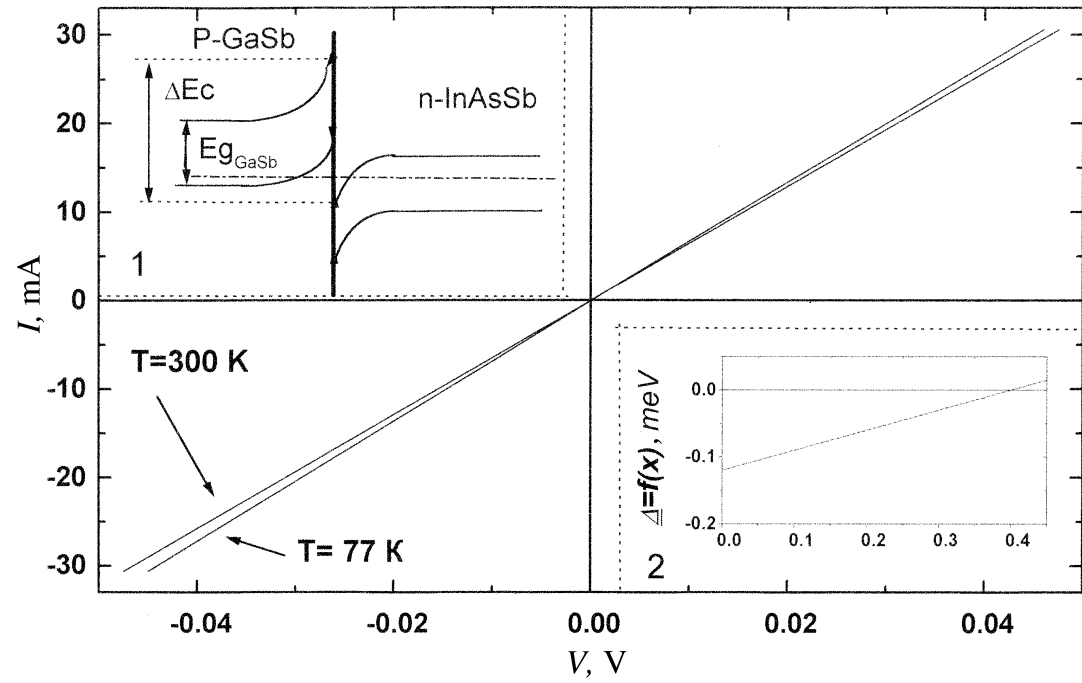


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов на основе гетероструктуры p -GaSb/ n -InAsSb при температурах $T = 77$ K, 300 K. Вставка 1. Энергетическая диаграмма разьединенного перехода p -GaSb- n -InAsSb в состоянии термодинамического равновесия. Вставка 2. Зависимость энергетического зазора $\Delta = f(x)$.

зависимость ток–напряжение имеет линейный характер как при комнатной температуре, так и при $T = 77$ К. Линейная вольт–амперная характеристика свидетельствует об омическом контакте двух полупроводников p -GaSb– n -InAs $_{1-x}$ Sb $_x$ ($0 \leq x \leq 0.18$). Если бы это был ступенчатый гетеропереход, то наблюдалась бы диодная вольт–амперная характеристика.

Отсутствие изломов на омической характеристике p – n –структуры при малых смещениях вплоть до 77 К свидетельствует о низкой плотности состояний на гетерогранице. Энергетическая диаграмма разъединенного перехода p -GaSb– n -InAsSb в состоянии термодинамического равновесия приведена на вставке 1 к рис. 2. Зависимость $\Delta = f(x)$ приведена на вставке 2 к рис. 2.

Таким образом, на подложках p -GaSb и n -InSb методом МОГФЭ выращены слои InAsSb с содержанием Sb ($0 \leq x \leq 0.18$). При $T = 77$ К измерены спектры ФЛ выращенных слоев. На основе экспериментальных данных, полученных из исследований спектров фотолюминесценции, проведен анализ зависимости E_g от состава твердого раствора InAsSb. Проведен расчет энергетического зазора Δ между верхним краем валентной зоны GaSb и дном зоны проводимости InAs $_{0.82}$ Sb $_{0.18}$. Омический характер зависимости ток–напряжение подтверждает расчет и прямо свидетельствует о типе гетероперехода.

С.С. Кижаев выражает благодарность фонду Роберта Хэйвмана (Robert Havemann Foundation) за поддержку во время проведения данной работы.

Список литературы

- [1] *Mikhailova M.P., Moiseev K.D., Berezovets Y.A., Parfeniev R.V., Bazhenov N.L., Smirnov V.A., Yakovlev Yu.P.* // IEE Proc.-Optoelectron. 1998. V. 145. (5). P. 268–274.
- [2] *Mikhailova M.P., Titkov A.N.* // Semicond. Sci. Technol. 1994. V. 9. P. 1279–1295.
- [3] *Moiseev K.D., Mikhailova M.P., Stoyanov N.D., Yakovlev Yu.P., Hulicius E., Simecek T., Oswald J., Pangrac J.* // J. Appl. Phys. V. 86. (11). P. 6264–6270.
- [4] *Воронина Т.И., Журтанов Б.Е., Лагунова Т.С., Михайлова М.П., Моисеев К.Д., Розов А.Е., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 2001. Т. 35. (3). С. 345–351.
- [5] *Adachi S.* // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. (10). P. 4869–4876.
- [6] *Nandbook of Physical Quantities.* Moscow, Russia, 1997.