

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ p -GaInSbAs

Баранов А. Н., Дахно А. Н., Джуртанов Б. Е.,
Лагунова Т. С., Сиповская М. А., Яковлев Ю. П.

Проведено совместное исследование электрических и фотоэлектрических свойств твердых растворов GaInSbAs с целью определения основных электрических параметров материала и энергетической структуры запрещенной зоны.

Установлено, что специально не легированные твердые растворы в области составов $0.1 \leq x \leq 0.22$ обладают дырочной проводимостью, при этом концентрация дырок уменьшается почти на порядок с увеличением x от 0 до ≈ 0.2 .

Показано, что доминирующую роль в дырочной проводимости играют мелкие примесные уровни с энергией активации $E_{A1} \leq 0.01$ эВ. Выявлены двухзарядные акцепторы с энергиями активации $E_{A2} = 0.03 - 0.035$ и $E_{A3} = 0.07$ эВ, обусловленные природными структурными дефектами $V_{Ga}Ga_{Sb}$ с концентрацией, на порядок меньшей, чем в p -GaSb. В твердых растворах в присутствии атомов теллура обнаружен глубокий структурный дефект с $E_{A4} = 0.1$ эВ, образованный, вероятно, вакансией галлия с теллуrom ($V_{Ga} - Te$).

В настоящее время твердые растворы GaInSbAs все шире применяются для создания оптоэлектронных приборов для области спектра 1.8—2.5 мкм, в том числе лазеров [1], светодиодов [2] и лавинных $p-i-n$ -фотодиодов [3, 4]. При разработке подобного рода приборов необходимо знать электрические параметры данных твердых растворов и зависимости их от химического состава. Однако сообщения о свойствах этих материалов практически отсутствуют.

В данной работе исследовались электрические и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных слоев $Ga_{1-x}In_xSb_{1-y}As_y$, изопериодичных с GaSb, в области составов $0 \leq x \leq 0.22$ с целью определения основных электрических параметров твердых растворов и энергетической структуры запрещенной зоны.

Эпитаксиальные слои GaInSbAs были получены методом жидкостной эпитаксии на подложках GaSb (100) при температуре около 600 °С. Несоответствие периодов кристаллической решетки с подложкой не превышало 0.05 %. Слои преднамеренно не легировались, толщина их была около 10 мкм.

Для того чтобы устранить влияние подложки на результаты измерений, использовались два способа изоляции слоя от подложки.

1) Слои, имевшие p -тип проводимости, выращивались на подложках n -GaSb : Te [$n = (5 \div 7) \cdot 10^{17}$ см⁻³]. При этом слой был изолирован от подложки областью объемного заряда $p-n$ -перехода, а качество этой изоляции контролировалось по вольтамперным характеристикам контактов к слою.

2) На подложках n -GaSb : Te предварительно выращивался эпитаксиальный слой p -GaSb из раствора-расплава в свинце по методике, описанной в [5], толщина слоя около 5 мкм. Концентрация нескомпенсированных примесей в таких слоях составляла $p_{77K} = (1 \div 10) \cdot 10^{13}$ см⁻³, а удельное сопротивление $\rho_{77K} > 10^3$ Ом·см, что позволяло считать такие слои полуизолирующими, и, таким образом, достигалась дополнительная изоляция слоя от подложки.

Для приготовления расплавов использовались галлий и сурьма чистой 99.9999 %, индий 99.999 % или нелегированные арсенид и антимонид индия и антимонид галлия. Анализ эпитаксиальных слоев, полученных из расплавов заданного состава, приготовленных из различных компонентов, позволяет по-

лучить дополнительную информацию о природе остаточных примесей. Способ приготовления расплавов, использованных при получении эпитаксиальных слоев, указан в таблице. При этом нужно отметить две группы образцов: эпитаксиальные слои (образцы 1—5) выращены на подложке с дополнительно изолирующим слоем p -GaSb (I), а образцы 6—8 — на подложке n -GaSb:Te без промежуточного изолирующего слоя (II).

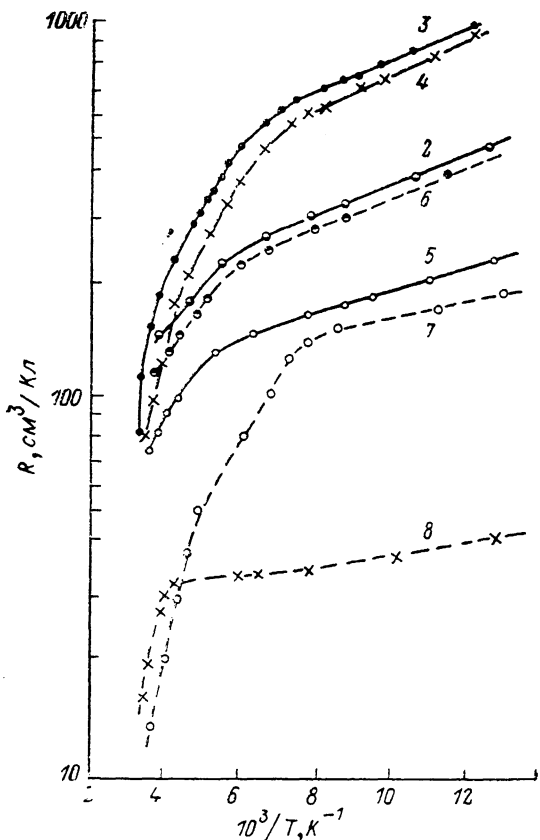


Рис. 1. Зависимость коэффициента Холла от температуры в образцах p -Ga $_{1-x}$ In $_x$ Sb $_{1-y}$ As $_y$ различного состава.

Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

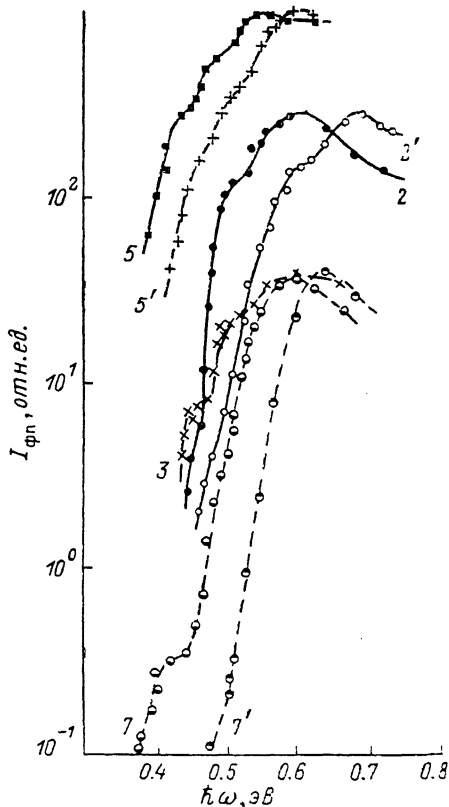


Рис. 2. Спектральные зависимости фотопроводимости ($I_{\text{фп}}$) в образцах p -Ga $_{1-x}$ In $_x$ Sb $_{1-y}$ As $_y$ различного состава.

Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице. T , К: 2, 3, 5 — 300, 2' — 260, 2', 5', 7' — 78.

Проведены совместные исследования коэффициента Холла R , электропроводности σ , подвижности $\mu = R\sigma$ и зависимости фототока $I_{\text{фп}}$ от энергии фотона указанных двух групп образцов. Образцы для исследования вырезались в форме прямоугольника размером $(2-3) \times (6-10)$ мм. Для нанесения контактов использовался In или In+Zn. Измерения параметров производились при токе 10—100 мкА, когда выполнялся закон Ома и полностью исключалось влияние подложки на проводимость.

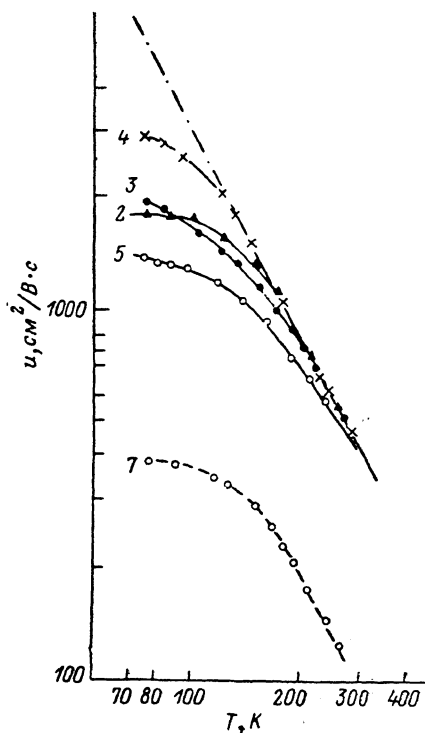
Вначале рассмотрим зависимость коэффициента Холла от температуры. На рис. 1 представлена зависимость R ($1/T$) для твердых растворов Ga $_{1-x}$ In $_x$ Sb $_{1-y}$ As $_y$ различного состава. Все образцы имели p -тип проводимости. Концентрация дырок $p_{77\text{K}}$ ниже, чем в слоях p -GaSb, и уменьшается почти на порядок при увеличении x от 0 до ≈ 0.2 (см. таблицу; образцы I группы). Хорошо видно, что в зависимости R ($1/T$) проявляется несколько наклонов, свидетельствующих о наличии акцепторных уровней: мелких — с энергией активации $E_{A1} = 0.002-0.01$ эВ и более глубоких — с $E_{A2} = 0.02-0.38$ эВ и $E_{A3} = 0.07-0.073$ эВ. В образцах II группы, т. е. выращенных на подложке n -GaSb:Te без промежуточного

№ образца	Состав, ат%/о		Исходные компоненты раствора-расплава	$\rho \cdot 10^{-10}$, см ⁻³		μ , см ² /В·с		E_A , эВ				$N_D, N_A \cdot 10^{-16}$, см ⁻³			E_g , эВ ($T = 77$ К)
	x	y		300 К	77 К	300 К	77 К	E_{A_1}	E_{A_2}	E_{A_3}	E_{A_4}	N_D	N_{A_1}	N_{A_2}	
1	0	0	Ga, GaSb	17	4	550	2250	—	0.03	—	—	0.1	1	20	0.79
2	11	93	In, Sb, GaSb, InAs	6.2	1.5	465	1870	0.008	0.03	—	—	1.7	4.4	2.5	0.65
3	15.5	86.3	In, Sb, GaSb, InAs	9.4	0.59	365	1950	0.008	0.035	0.073	—	3.3	4.3	1.3	0.605
4	22	81	InSb, GaSb, InAs	3	0.6	500	2850	0.01	0.03	0.07	—	1.4	2.5	1.9	0.565
5	21.7	83.6	In, InSb, GaSb, InAs	8.7	2.8	416	1390	0.008	0.02	0.07	—	5	9	2.3	0.54
6*	9.2	93	In, Sb, GaSb, InAs	6.6	1.2	370	1100	0.009	0.038	—	—	3	5.7	2.5	0.64
7*	15.6	86.4	In, Sb, GaSb, InAs	70	3.4	118	377	0.003	0.038	—	0.1	8.5	12	3	0.605
8*	21.7	83.6	In, Ga, Sb, InAs	30	17	187	304	0.0014	—	—	0.1	20	40	—	0.57

Примечание. * Подложка n-GaSb : Те без промежуточного изолирующего слоя.

ного изолирующего слоя, при $T > 190$ К проявляется уровень $E_{A_1} = 0.1$ эВ (кривые 7, 8). Переход к собственной проводимости наблюдается при $T \geq 300$ К.

На рис. 2 показаны спектральные зависимости примесной и собственной фотопроводимости образцов различного состава. Здесь же для сравнения представлен образец ($x = 15.6$ %, кривые 7, 7'),



выращенный в отличие от трех других на подложке n-GaSb : Те без промежуточного слоя. Кривые при различных температурах и одинаковых x приведены к одному максимуму. Ширина запрещенной зоны твердых растворов, определенная по полуспаду длинноволнового края собственной фотопроводимости, дана в таблице.

Можно видеть, что в длинноволновой области спектра для образцов I группы (кривые 2, 2', 3, 5, 5') наблюдаются ступеньки примесной фотопроводимости, которые связаны с фотоионизацией центров, расположенных в запрещенной зоне. Причем интенсивность фотоионизации возрастает при высоких T . По энер-

Рис. 3. Холловская подвижность в зависимости от температуры в образцах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$ различного состава.

Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице. Штрихпунктир — подвижность для рассеяния на колебаниях решетки.

гии фотонов $\hbar\omega$ (переход электронов в зону проводимости) они соответствуют положению уровней $E_g + (0.03-0.035)$ и $E_g + 0.07$ эВ, наблюдавшихся и в холловских измерениях. В образцах II группы, выращенных на подложках n-

GaSb : Te без промежуточного слоя (кривые 7, 7'), проявляется центр $E_c + (0.1-0.11)$ эВ (переход при $\hbar\omega \approx 0.41$ эВ, $E_g = 0.52$ эВ), который особенно отчетливо виден при высоких температурах ($T = 292$ К).

Температурные зависимости коэффициента Холла (рис. 1) и холловской подвижности $u = R\sigma$ (рис. 3) позволяют определить концентрации найденных примесных центров. Как видно на рис. 3, в образцах, выращенных на подложках с изолирующим слоем (образцы 2-5), при $T > 150$ К подвижность изменяется с температурой по закону $u \sim T^{-2}$, что характерно для решеточного рассеяния в $A^{1.1}B^V$ p -типа [6]. Принимая в качестве u_p максимальную экспериментальную подвижность (рис. 3, штрихпунктир) и считая, что в этих образцах изменение подвижности с температурой обусловлено только рассеянием на понах примеси и решетке

$$\frac{1}{u_s} = \frac{1}{f} \left(\frac{1}{u_I} + \frac{1}{u_p} \right),$$

где f — фактор, учитывающий вклад различных механизмов рассеяния в подвижность [7], можно определить подвижность u_I . Тогда по формуле Брукса—Херринга

$$u_I = 3.2 \cdot 10^{15} \left(\frac{m_0}{m^*} \right)^{1/2} \frac{\kappa^2 T^{3/2}}{N_I} \frac{1}{\ln(1+b) - \frac{b}{b+1}},$$

где

$$b = 1.3 \cdot 10^{14} \frac{T^2}{p_s} \kappa \frac{m^*}{m_0}, \quad p_s = p + p(N_D + p) \left(1 - \frac{N_D + p}{N_A} \right),$$

определяем концентрацию ионизованных примесей N_I (принимая, что в p -GaInSbAs, как и в p -GaSb, эффективная масса дырок $m^* = 0.4 m_0$, диэлектрическая проницаемость $\kappa = 15.7$). Для мелких примесных уровней число ионизованных центров $N_I = 2N_D + p^T$. Отсюда находим концентрацию компенсирующих доноров N_D . В частности, при температуре жидкого азота $N_I^{77} = 2N_D + p^{77}$. Концентрация мелких акцепторов N_{A1} находится из уравнения нейтральности $p_{вст} = N_{A1} - N_D$, где $p_{вст}$ — истощение мелких примесных уровней. Концентрация более глубоких уровней N_{A2} определяется из изменения концентрации p при более высоких температурах, при которых проявляется данный уровень. Значения N_D , N_{A1} , N_{A2} даны в таблице.

Образцы II группы, полученные на подложках n -GaAs : Te без изолирующего слоя, сохраняют такой же характер зависимости подвижности u от температуры, однако имеют более низкие значения подвижности при всех температурах (см. таблицу; рис. 3, кривая 7). Для этих образцов экспериментальная подвижность определяется помимо рассеяния на ионах примеси и решетке еще дополнительным механизмом рассеяния

$$\frac{1}{u_s} = \frac{1}{f} \left(\frac{1}{u_I} + \frac{1}{u_p} + \frac{1}{u_s} \right).$$

Определяем u_s при высоких температурах ($T \approx 300$ К) и, считая в соответствии с [8] $u_s \sim T^{-0.9}$, находим u_s при $T = 77$ К. С учетом трех механизмов рассеяния вычисляем u_I и находим N_I и N_D , N_{A1} в этих образцах. Эти данные приведены в таблице. Они свидетельствуют о том, что в образцах, выращенных на подложке n -GaSb : Te без промежуточного слоя, теллур продифундировал из подложки в эпитаксиальную пленку, что значительно увеличивает концентрацию ионизованных доноров в материале. Атомы теллура имеют прямое отношение к возникновению дополнительного механизма рассеяния носителей тока, природа которого будет рассмотрена в дальнейшей работе.

Анализируя природу выявленных центров, надо сказать, что проявившийся в температурной зависимости $R(1/T)$ фон мелких примесных уровней (E_{A1} , N_{A2}) зависит от навесок, используемых в расплаве. При этом наименьшим содержанием как доноров N_D , так и акцепторов N_{A1} характеризуются эпитаксиальные слои, выращенные из расплава, приготовленного из бинарных компо-

ментов (см. таблицу, образец 4). Относительно же более глубоких центров можно сказать следующее. В p -GaSb, полученном стандартной технологией, обычно проявляются двухзарядные акцепторные центры с концентрацией $N_{A_2} = N_{A_3} = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, обусловленные природными структурными дефектами $V_{\text{Ga}}\text{GaSb}$ [9]. В твердых растворах GaInSbAs выявленные из исследования электрических и фотоэлектрических свойств энергетические уровни $E_{A_2} = 0.02 - 0.038$ и $E_{A_3} = 0.07 - 0.073$ эВ, по-видимому, можно связать с наличием таких природных акцепторов. При этом оказывается, что их концентрация на порядок ниже, чем в p -GaSb, и примерно одинакова для всего интервала изменения x (см. таблицу; рис. 4, кривая 2). Что касается центра $E_{A_4} = 0.1$ эВ, то мы относим его к структурному дефекту, образованному вакансией галлия с атомами Te ($V_{\text{Ga}}\text{-Te}$), так как он наблюдается только в образцах, выращенных на подложках

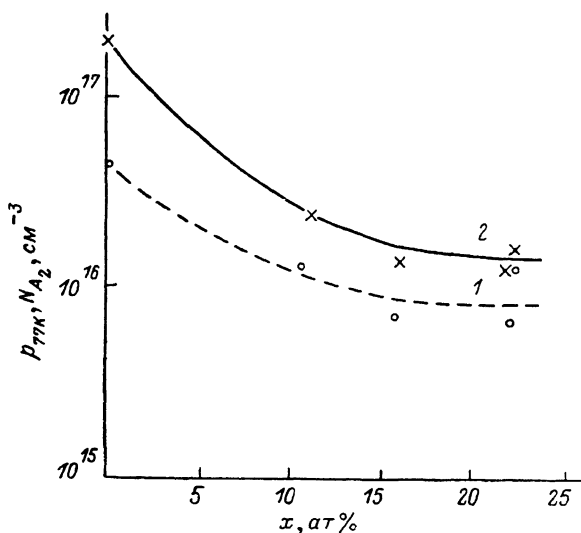


Рис. 4. Зависимость концентрации дырок p (1) и концентрации примесных центров N_{A_2} (2) от состава x в твердых растворах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$, выращенных на подложках с изолирующим слоем.

n -GaSb : Te без промежуточного слоя, когда возможна была диффузия Te в эпитаксиальный слой твердого раствора. Возможность существования центров такого типа в кристаллах GaSb проанализирована в [10], а в работе [11] такой уровень ($E_A = 0.105$ эВ) наблюдался в спектрах фотолуминесценции слоев GaSb, компенсированных теллуrom.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие заключения.

1. В твердых растворах $p\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$ наблюдаются акцепторные уровни с энергиями активации $E_{A_2} = 0.02 - 0.038$ и $E_{A_3} = 0.07 - 0.073$ эВ, которые, так же как в p -GaSb, связаны, по всей видимости, с двухзарядным структурным дефектом $V_{\text{Ga}}\text{GaSb}$. Концентрация этих структурных дефектов на порядок ниже, чем в p -GaSb.

2. В эпитаксиальных слоях при выращивании их на подложках n -GaSb : Te без промежуточного изолирующего слоя диффундирующий из подложки теллур оказывает двойное действие: во-первых, входит в решетку твердого раствора как компенсирующий донор, а во-вторых, образует с вакансией Ga глубокий структурный дефект $V_{\text{Ga}}\text{-Te}$ с энергией $E_{A_4} = 0.1$ эВ.

3. Концентрация дырок $p_{77к}$ в твердых растворах $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}_{1-y}\text{As}_y$, выращенных на подложках с дополнительным изолирующим слоем, ниже, чем в слоях p -GaSb, и уменьшается почти на порядок при увеличении x от 0 до ≈ 0.2 .

Список литературы

- [1] Баранов А. Н., Джуртанов Б. Е., Именков А. Н., Рогачев А. А., Шерняков Ю. М., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 12. С. 2217—2224.
- [2] Андаспаева А., Баранов А. Н., Гусейнов А., Именков А. Н., Литвак А. М., Филаретова Г. М., Яковлев Ю. П. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 9. С. 845—849.

- [3] Андреев И. А., Афраилов М. А., Баранов А. Н., Демильченко В. Г., Мирсагатов М. А., Михайлова М. П., Яковлев Ю. П. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 21. С. 1314—1315.
- [4] Андреев И. А., Афраилов М. А., Баранов А. Н., Мирсагатов М. А., Михайлова М. П., Яковлев Ю. П. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 11. С. 986—991.
- [5] Баранов А. Н., Воронина Т. И., Лагунова Т. С., Тимченко И. Н., Чугуева З. И., Шерстнев В. В., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 5. С. 780—786.
- [6] Kranzer P. // Phys. St. Sol. (a). 1974. V. 26. N 11. P. 11—52.
- [7] Ансельм А. И., Клячкин В. А. // ЖЭТФ. 1952. Т. 22. В. 3. С. 297—302.
- [8] Weisberg L. R. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. N 3. P. 1817—1827.
- [9] Nakashima K. // Jap. J. Appl. Phys. 1981. V. 20. N 6. P. 1085—1094.
- [10] Кюрегян А. С., Лазарева И. К., Стучебников В. М., Юнович А. Э. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 2. С. 242—247.
- [11] Баранов А. Н., Воронина Т. И., Зимогорова Н. С., Канская Л. М., Яковлев Ю. П. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 9. С. 1676—1679.

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

Получена 9.08.1989
Принята к печати 30.08.1989