

# Роль свинца при выращивании твердых растворов $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$ методом жидкофазной эпитаксии

© Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Е.В. Куницына, Я.А. Пархоменко, Д.А. Васюков, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 27 декабря 2000 г. Принята к печати 15 февраля 2001 г.)

Впервые проведено исследование электрофизических свойств твердых растворов  $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$  ( $X = 0.14-0.27$ ), выращенных из содержащих свинец растворов-расплавов. Установлено существование трех акцепторных уровней: мелкого уровня с энергией активацией  $E_{A1} \approx 0.008-0.015$  эВ и двух глубоких  $E_{A2} \approx 0.024-0.033$  эВ и  $E_{A3} \approx 0.07$  эВ. Показано, что использование свинца позволяет получить нелегированные твердые растворы с малым числом дефектов и примесей и высокой подвижностью.

## 1. Введение

В работе [1] сообщалось об использовании свинца в качестве нейтрального растворителя при выращивании эпитаксиальных слоев антимонида галлия методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Было показано, что свинец позволяет понизить температуру ликвидуса системы, изменить соотношение атомных долей сурьмы и галлия в растворе-расплаве и уменьшить на 2 порядка концентрацию природных структурных дефектов, присущих GaSb. При этом с ростом приведенной концентрации сурьмы в жидкой фазе  $X_{Sb}^*$  ( $X_{Sb}^* = X_{Sb}/(X_{Sb} + X_{Ga})$ , где  $X_i$  — атомная доля компонента  $i$  в жидкой фазе), концентрация дырок в GaSb уменьшалась, достигая минимума в области  $X_{Sb}^* = 0.76-0.8$ . При дальнейшем увеличении в жидкой фазе величины  $X_{Sb}^*$  в эпитаксиальных слоях появлялись новые дефекты, природа которых пока не ясна. Подвижность основных носителей была максимальна при  $X_{Sb}^* = 0.6$  и резко падала при  $X_{Sb}^* = 0.76-0.8$ . Таким образом, использование свинца при выращивании эпитаксиальных слоев GaSb позволило получить материал с низкой концентрацией носителей тока вплоть до  $p^{(77)} = N_A - N_D = 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 77 \text{ К}$  и с высокой степенью компенсации, который нашел широкое применение в качестве изолирующего слоя в технологической практике.

В работах [2,3] было показано, что основные свойства изопериодных с GaSb твердых растворов  $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$  ( $X \leq 0.22$ ,  $Y \leq 0.18$ ), полученных без свинца, во многом аналогичны свойствам GaSb. Нелегированные слои твердых растворов, как и эпитаксиальные слои GaSb всегда имели  $p$ -тип проводимости. Концентрация дырок определялась мелкими неконтролируемыми примесями, содержащимися в исходных компонентах, с энергией активации  $E_{A1} = 0.008-0.014$  эВ и двухзарядным акцепторным комплексом  $V_{Ga}Ga_{Sb}$  с энергией активации  $E_{A2} = 0.035$  эВ и  $E_{A3} = 0.07$  эВ. Концентрация глубоких акцепторов  $N_{A2}$  уменьшалась с ростом величины  $X$  в твердом растворе.

По аналогии с антимонидом галлия, полученным из свинцовых растворов-расплавов, представляется интересным исследовать роль свинца при выращивании четверных твердых растворов  $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$  на основе

GaSb с точки зрения снижения концентраций структурных дефектов и носителей тока в эпитаксиальных слоях.

Настоящая работа является продолжением начатых ранее исследований по получению твердых растворов  $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$  из содержащих свинец растворов-расплавов [4,5] и посвящена исследованию электрофизических свойств таких твердых растворов, а также изучению кинетики изменения концентрации и подвижности носителей тока и концентрации структурных дефектов в зависимости от условий выращивания, а также в выявлении возможности получения узкозонных твердых растворов ( $E_g \approx 0.4$  эВ) с высокой подвижностью носителей тока и с минимальным числом структурных дефектов.

## 2. Получение экспериментальных образцов

Эпитаксиальные слои твердых растворов  $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$  выращивались методом ЖФЭ при охлаждении содержащих свинец растворов-расплавов со скоростью 0.6 град/мин. В качестве подложек использовались монокристаллические пластины GaSb (100)  $n$ - и  $p$ -типа проводимости. В качестве компонентов шихты были выбраны бинарные соединения GaSb, InAs, а также In чистотой 99.999 мас%, Sb чистотой 99.999 мас%, Pb чистотой 99.9999 мас%. Методика получения эпитаксиальных слоев заключалась в следующем. По термодинамическому методу, предложенному в работе [6], для гетерогенной системы Ga-In-As-Sb-Pb, производился расчет равновесных значений мольных долей компонентов в сосуществующих жидкой и твердой (изопериодной к GaSb) фазах при фиксированном значении температуры ( $T$ ) и переохлаждения ( $\Delta T$ ). Первоначально на подложке  $n$ -GaSb из свинцовых растворов-расплавов выращивался буферный слой  $p$ -GaSb с низкой концентрацией носителей и высоким удельным сопротивлением ( $p = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 77 \text{ К}$ ,  $\rho \gtrsim 400 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Толщина буферного слоя составляла 4–5 мкм. Затем на основе данных теоретического расчета при  $T = 560^\circ\text{C}$  и переохлаждении  $\Delta T = (3-8)^\circ\text{C}$  на буферном слое  $p$ -GaSb из содержащих свинец

**Таблица 1.** Зависимость состава и ширины запрещенной зоны твердых растворов GaInAsSb от содержания свинца в жидкой фазе

Содержание Pb в жидкой фазе, атомные доли	Состав твердого раствора $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$ , атомные доли				Ширина запрещенной зоны $E_g$ , эВ	
	Расчет		Эксперимент		$T = 300$ К	$T = 77$ К
	$X$	$Y$	$X$	$Y$		
0.2360	0.0947	0.0800	0.148	0.129	0.51	0.61
0.1951	0.1155	0.0977	0.168	0.138	0.49	0.58
0.1534	0.1417	0.1200	0.205	0.192	0.45	0.54
0.1506	0.1437	0.1217	0.210	0.160	0.44	0.53
0.1374	0.1534	0.1300	0.223	0.175	0.43	0.53
0.1229	0.1651	0.1400	0.247	0.223	0.41	0.50
0.1096	0.1768	0.1500	0.267	0.206	0.39	0.49
0.0394	0.2697	0.2300	0.194	0.148	0.46	0.55

растворов–расплавов выращивался эпитаксиальный слой твердого раствора  $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$ . Величина рассогласования параметров решеток эпитаксиального слоя и подложки  $\Delta a/a$  измерялась методом двухкристальной рентгеновской дифрактометрии с помощью дифрактометра ТРС-1. Химический состав полученных твердых растворов определялся методом количественного рентгеноспектрального анализа с помощью рентгеновского микроанализатора JXA-5 CAMEBAX.

В результате проведенных экспериментов при  $T = (560 \pm 3)^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = (3-8)^\circ\text{C}$  и различном содержании свинца в жидкой фазе были получены изопериодные с подложкой GaSb (100) эпитаксиальные слои твердых растворов  $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$ , где  $X = 0.14-0.27$ ,  $Y = 0.12-0.22$ . Скорость роста, вычисленная как отношение толщины слоя ко времени роста, составляла 0.3–1.0 мкм/мин. Данные значения выше скорости роста эпитаксиальных слоев такого же состава, полученных при  $T = 560^\circ\text{C}$  из индиевых растворов–расплавов без использования свинца. Согласно данным рентгеноспектрального анализа, свинец не был обнаружен в твердой фазе ни в одном из образцов, хотя содержался в жидкой фазе на уровне 0.039–0.236 атомных долей.

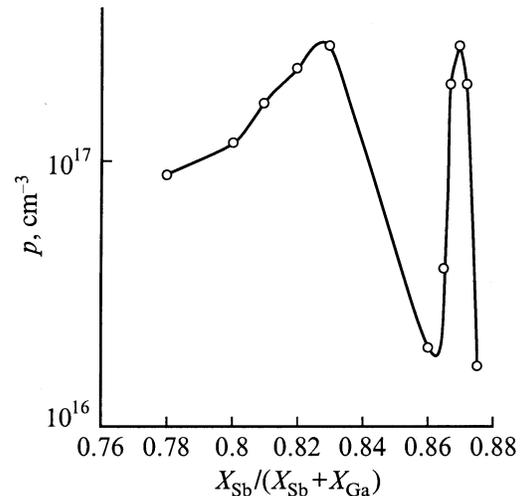
Состав твердой фазы, а также рассчитанные при помощи полуэмпирической формулы из работы [7] значения ширины запрещенной зоны  $E_g$  полученных твердых растворов  $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$  представлены в табл. 1. Как можно видеть из табл. 1, экспериментальная зависимость содержания индия в твердой фазе от содержания свинца в жидкой фазе имеет ярко выраженный экстремум: при увеличении содержания свинца до 0.11 атомных долей содержание индия в твердом растворе возрастает до  $X = 0.27$ . Однако при дальнейшем возрастании содержания свинца в жидкой фазе содержание индия в твердой фазе падает. Такой ход зависимости подтверждает результаты теоретических расчетов [4,5], показывающих, что для данной системы концентрации компонентов в твердой фазе также проходят через экстремум, хотя и при других значениях  $X$  и  $Y$ . Ранее при выращивании изопериодных с GaSb (100) эпитаксиальных слоев твердых растворов  $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$  методом ЖФЭ

без использования свинца не было получено пригодных для создания оптоэлектронных приборов эпитаксиальных слоев толщиной более 1 мкм с содержанием индия  $X > 0.22$ . В данной работе использование свинца позволило получить эпитаксиальные слои твердых растворов  $Ga_{1-X}In_XAs_YSb_{1-Y}$ , где  $X \approx 0.27$  ( $E_g \approx 0.4$  эВ), см. табл. 1, толщиной 1.5–2 мкм.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Образцы для измерения гальваномагнитных эффектов вырезались прямоугольной формы. Со стороны эпитаксиального слоя твердого раствора наносились 6 индиевых контактов, на которых измерялись электропроводность  $\sigma$ , коэффициент Холла  $R$ , подвижность  $\mu$  и магнитосопротивление  $\Delta\rho/\rho$  в интервале температур 77–300 К. Характеристики измеренных образцов приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, знак эдс Холла при  $T = 77$  К во всех образцах (кроме № 8) указывал на  $p$ -тип



**Рис. 1.** Концентрация дырок  $p$  при  $T = 77$  К в зависимости от приведенной концентрации сурьмы  $X_{Sb}^* = X_{Sb}/(X_{Sb} + X_{Ga})$ .

Таблица 2. Характеристики исследованных образцов

№ образца	Содержание In (X), атомные доли	$X_{Sb}^*$	$T = 300\text{ K}$			$T = 77\text{ K}$			$E_{A1}, E_{A2}, E_{A3}, \text{эВ}$	$N_{A1}, 10^{17}\text{ см}^{-3}$	$N_{A2}, 10^{17}\text{ см}^{-3}$	$N_D, 10^{16}\text{ см}^{-3}$
			Тип проводимости	$n, p, 10^{17}\text{ см}^{-3}$	$\mu, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Тип проводимости	$n, p, 10^{17}\text{ см}^{-3}$	$\mu, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$				
1	0.120	0.777	<i>p</i>	4	500	<i>p</i>	1	1200	0.008, A1 0.033, A2	2	1.4	7
2	0.148	0.820	<i>p</i>	7	560	<i>p</i>	1.5	2200	0.008, A1 0.033, A2 0.07, A3	2.8	1.2	2
3	0.173	0.838	<i>p</i>	12	560	<i>p</i>	3	2300	0.01, A1 0.025, A2	4.2	3	1
4	0.210	0.862	<i>p</i>	30	80	<i>p</i>	0.46	380	0.01, A1 0.027, A2	2.3	0.5	17
5	0.223	0.858	<i>n</i>	0.3	2700	<i>p</i>	0.22	200	0.01, A1 0.028, A2	4.3	0.13	40
6	0.247	0.869	<i>p</i>	14	600	<i>p</i>	4	2700	0.008, A1 0.024, A2	4.5	0.5	5
7	0.267	0.873	<i>p</i>	5.6	530	<i>p</i>	0.18	570	0.01, A1 0.027, A2	0.48	0.2	0.6
8*	0.223	0.858	<i>n</i>	3	3900	<i>n</i>	1	4000	–	–	–	–
9*	0.247	0.869	<i>n</i>	30	2000	<i>p</i>	1.5	1400	–	–	–	–

Примечание. \* — образцы, легированные теллуром;  $X_{Sb}^* = X_{Sb}/(X_{Sb} + X_{Ga})$ ; A1, A2, A3 — обозначения уровней акцепторов.

проводимости. Зависимость концентрации дырок при  $T = 77\text{ K}$  от содержания сурьмы в жидкой фазе  $X_{Sb}^* = X_{Sb}/(X_{Ga} + X_{Sb})$  представлена на рис. 1. Как и в GaSb(Pb) [1], наблюдается резкое уменьшение концентрации дырок с ростом  $X_{Sb}^*$ , достигая минимума при  $X_{Sb}^* \approx 0.86$ , что соответствует более высокому содержанию сурьмы в жидкой фазе, чем в случае GaSb(Pb), где минимум наблюдался при  $X_{Sb}^* = 0.76-0.8$ .

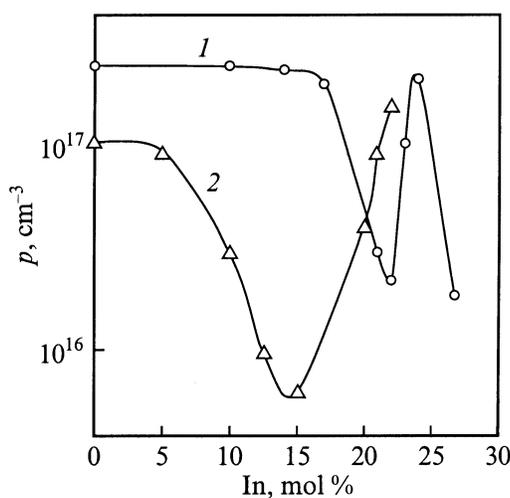


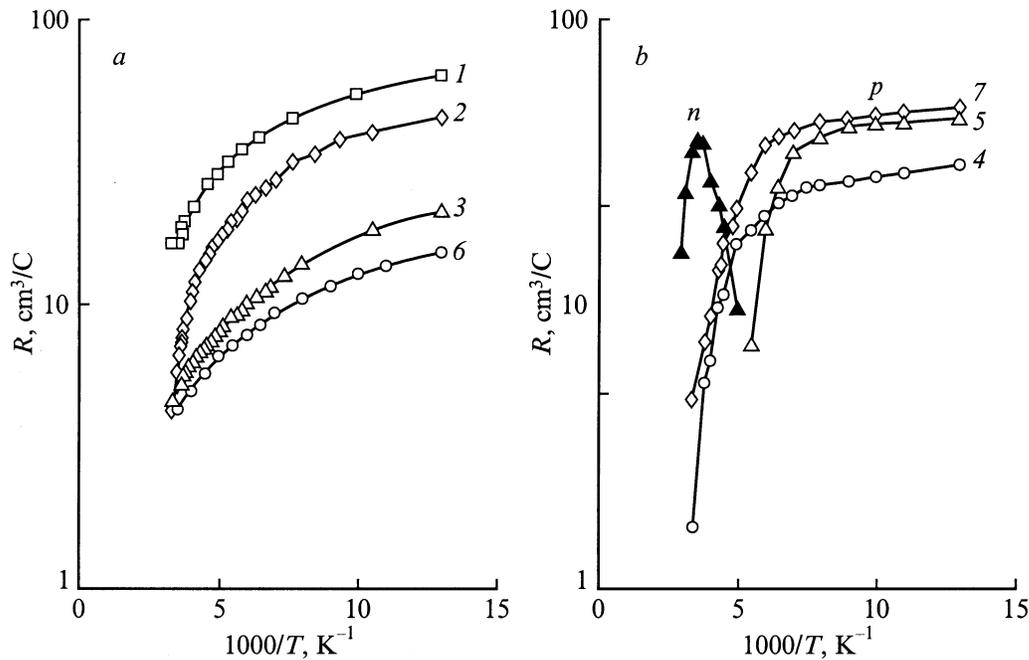
Рис. 2. Концентрация дырок  $p$  при  $T = 77\text{ K}$  в зависимости от содержания индия  $X$  в твердом растворе GaInAsSb; твердый раствор выращен: 1 — с использованием свинца, 2 — без использования свинца.

На рис. 2 представлены зависимости концентрации дырок от содержания индия в твердом растворе, выращенном в присутствии свинца (кривая 1) в сопоставлении с твердыми растворами, выращенными при тех же температурах, из таких же исходных компонентов, но без свинца (кривая 2). Видно, что если твердый раствор был получен без свинца, минимум концентрации дырок наблюдался при содержании индия около 0.15, а выше  $X = 0.22$  уже невозможно было получить твердый раствор, то при наличии свинца в растворе-расплаве минимум концентрации дырок наблюдается при содержании индия 0.22. Интересно, что при  $X = 0.267$  концентрация дырок снова падает. Во всех случаях при  $T = 77\text{ K}$  низким концентрациям дырок соответствуют и низкие подвижности (см. табл. 2).

Температурные зависимости коэффициента Холла, подвижности и магнитосопротивления в твердых растворах различного состава позволяют изучить энергетический спектр примесей и механизм рассеяния носителей тока и выявить роль свинца в изменении концентрации и характера распределения дырок и структурных дефектов при различном содержании индия в твердом растворе.

### 3.1. Энергетический спектр примесей

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента Холла от обратной температуры для образцов, представленных в табл. 2. В образцах с высокой по-



**Рис. 3.** Температурные зависимости коэффициента Холла  $R$  для образцов с различным содержанием индия  $X$  в твердом растворе GaInAsSb;  $a$  — образцы с высокой подвижностью при  $T = 77$  К,  $b$  — образцы с низкой подвижностью при  $T = 77$  К. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 2.

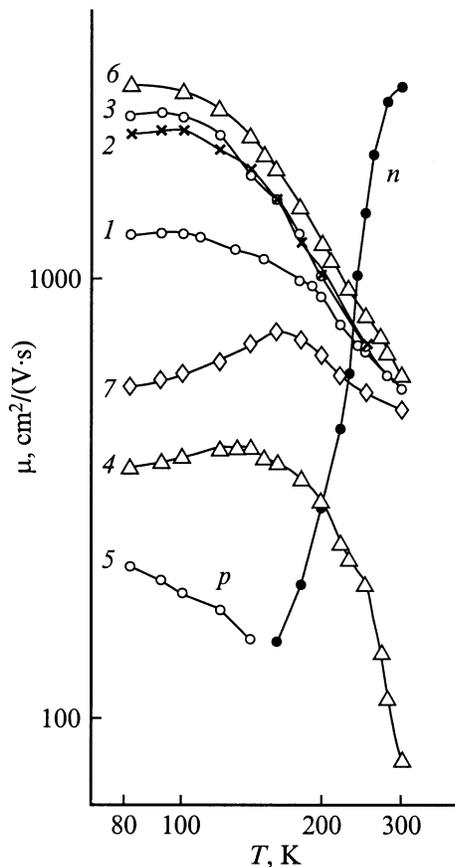
движностью при  $T = 77$  К (рис. 3,  $a$ ) и с содержанием индия  $X = 0.12$ – $0.17$  (образцы 1–3), а также в образце с содержанием индия 0.247 (образец 6) наблюдаются мелкие акцепторные уровни с энергиями активации  $E_{A1} = 0.008$ – $0.01$  эВ, определяемые неконтролируемыми примесями, входящими в исходные компоненты твердых растворов, более глубокие акцепторные уровни  $E_{A2} = 0.024$ – $0.033$  эВ и  $E_{A3} = 0.07$  эВ, определяемые так же, как и в GaSb, двухзарядным структурным дефектом  $V_{Ga}Ga_{Sb}$ . В образцах с низкой концентрацией и подвижностью дырок (рис. 3,  $b$ ) с содержанием индия 0.21–0.22 (образцы 4 и 5) и содержанием индия 0.267 (образец 7) при температурах  $T = 77$ – $100$  К также наблюдается мелкий акцепторный уровень  $E_{A1} \lesssim 0.01$  эВ, а с повышением температуры и более глубокий уровень с энергией активацией  $E_{A2} \approx 0.028$  эВ, но при температурах выше 150 К во всех образцах наблюдается резкое уменьшение коэффициента Холла, что указывает на начало перехода к собственной проводимости. В образце 7 при  $T = 150$  К происходит смена знака эдс Холла с дырочного на электронный. Измеряя эффект Холла в этом образце до температуры 400 К, можно явно видеть проявление собственной проводимости. Однако зависимость  $RT^{3/2}$  от обратной температуры не экспоненциальна и не позволяет определить ширину запрещенной зоны. Подобную зависимость можно объяснить сильной компенсацией примесей, вследствие чего возникают флуктуации потенциала и появляются "хвосты" плотности состояний в валентной зоне и в зоне проводимости [8].

### 3.2. Механизм рассеяния носителей тока

Подвижность  $\mu$  и магнитосопротивление  $\Delta\rho/\rho$  — эффекты, чувствительные к механизму рассеяния носителей тока, а также к характеру и виду рассеивающих центров. На рис. 4 представлены температурные зависимости подвижности. Как видно на рис. 4, в твердых растворах  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  с  $X = 0.14$ – $0.17$  и  $X = 0.24$  (образцы 1–3 и 6), в которых при  $T = 77$  К наблюдаются высокие значения подвижности (см. табл. 2), при  $T > 150$  К подвижность падает с температурой по закону, близкому к  $\mu \propto T^{-2}$ , что характерно для решеточного рассеяния в полупроводниках  $A^{III}B^V$   $p$ -типа [9]. При  $T = 77$ – $150$  К экспериментальная подвижность  $\mu_{\text{exp}}$  определяется рассеянием на ионах примесей  $\mu_i$  и колебаниях решетки  $\mu_L$

$$1/\mu_{\text{exp}} = 1/\mu_i + 1/\mu_L. \quad (1)$$

В образцах с  $X = 0.22$  и  $X = 0.267$  (образцы 4, 5 и 7), в которых при  $T = 77$  К наблюдается низкая концентрация и подвижность дырок, температурная зависимость подвижности при  $T < 150$ – $200$  К указывает на существование дополнительного механизма рассеяния помимо ионов примесей и колебаний решетки ( $1/\mu_{\text{exp}} = 1/\mu_i + 1/\mu_L + 1/\mu_S$ ). При более высоких температурах в этих образцах наблюдается резкое падение подвижности, а в образце 5 при  $T > 150$  К происходит смена типа проводимости с дырочной на электронную и рост холловской подвижности с ростом температуры. В обоих случаях и резкое падение подвижности



**Рис. 4.** Зависимости подвижности от температуры для образцов с различным содержанием индия в твердом растворе. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 2.

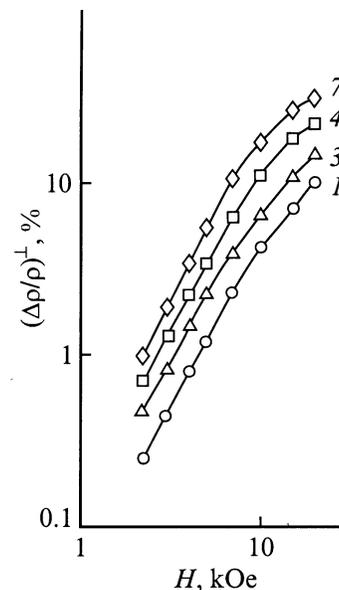
дырок, и появление электронной проводимости связано с переходом к собственной проводимости (появлением электронов с высокой подвижностью).

Для определения природы рассеивающих центров было исследовано магнитосопротивление. На рис. 5 представлено поперечное магнитосопротивление ( $\mathbf{I} \perp \mathbf{H}$ , где  $\mathbf{I}$  — направление тока через образец,  $\mathbf{H}$  — направление магнитного поля) при  $T = 77$  К. Во всех образцах поперечное магнитосопротивление изменяется пропорционально  $H^2$  до 10 кЭ. Коэффициент  $B_r^\perp = (\delta\rho/\rho)^\perp / (\mu H/c)^2$  в образцах с высокой подвижностью (образцы 1 и 3) близок к единице, что согласуется с рассеянием на ионах примеси с участием легких и тяжелых дырок. В образцах с низкой подвижностью (образцы 4 и 7)  $B_r^\perp > 40$ , что значительно выше теоретических значений, рассчитанных на основе теории классического (лоренцовского) магнитосопротивления.

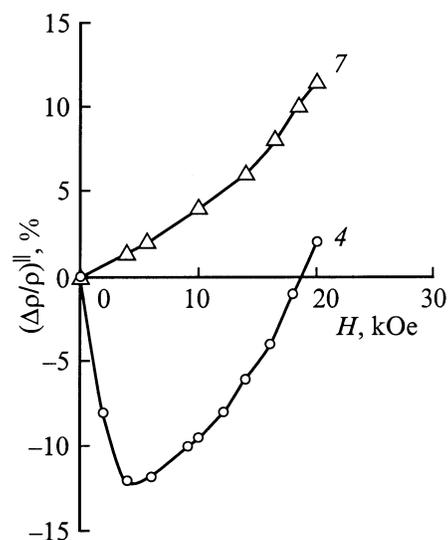
Для всех образцов при  $T = 77$  К было исследовано продольное магнитосопротивление ( $\mathbf{I} \parallel \mathbf{H}$ ):  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$ . При этом в образцах с высокой подвижностью (образцы 1–3 и 5) продольное магнитосопротивление отсутствовало, в то время как во всех образцах с низкой подвижностью дырок наблюдалось продольное магнитосопротивление, но оно было различным в зависимости

от содержания индия в твердом растворе. На рис. 6 видно, что в образцах с содержанием индия в твердом растворе 0.21 (образец 4) наблюдается отрицательное продольное магнитосопротивление (ОМС), а в образцах с содержанием индия 0.267 (образец 7) — положительное продольное магнитосопротивление (ПМС).

Явление ОМС характерно для квантового эффекта слабой локализации [10]. В то же время для полупроводников  $A^{IV}$  и  $A^{III}B^V$   $p$ -типа более характерен эффект так называемой квантовой антилокализации — эффект ПМС, который является проявлением сильного спин-орбитального рассеяния [11], характерного именно для



**Рис. 5.** Поперечное магнитосопротивление  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  в зависимости от напряженности магнитного поля  $H$  при  $T = 77$  К. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 2.



**Рис. 6.** Продольное магнитосопротивление  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$  в зависимости от напряженности магнитного поля  $H$  при  $T = 77$  К. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 2.

полупроводников  $A^{IV}$  и  $A^{III}B^V$  с дырочной проводимостью. Появление эффектов ПМС и ОМС для случая продольного магнитосопротивления (когда отсутствует лоренцовское магнитосопротивление) зависит от соотношения между частотами спин-орбитального рассеяния и сбоя фазы в конкретном образце, как на рис. 6 при  $T = 77$  К. При такой интерпретации в случае поперечного магнитосопротивления в образцах 4 и 7 большие значения коэффициента  $B_r^\perp > 40$  (рис. 5) могут быть связаны со сложением эффектов квантовой антилокализации (ПМС) и лоренцовского магнитосопротивления.

Существует и иное объяснение наблюдаемых эффектов в образцах с низкой подвижностью. В частности, аномально большой коэффициент поперечного магнитосопротивления  $B_r^\perp$  и появление продольного положительного магнитосопротивления (образец 7) могут быть связаны со скоплениями примесей, которые выступают не как центры рассеяния, а как области, искажающие пути протекания тока и приводящие к занижению подвижности. Теория эффективной среды [12], созданная для материала с такими скоплениями, определяет подвижность и магнитосопротивление следующими формулами:

$$\mu = \mu_0(1 - 3/2)/(1 - 3/4), \quad (2)$$

$$(\Delta\rho/\rho)^\perp = 0.3f(\mu_0 H/c)^2, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  — подвижность в однородной матрице,  $f$  — доля объема, занятая скоплениями. Используя экспериментальные данные  $\mu$  и  $\Delta\rho/\rho$  при  $T = 77$  К и исходя из формул (2) и (3), была определена подвижность в матрице  $\mu_0 = 4500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{см})$  и доля объема  $f = 0.6$ , занятая неоднородностями.

Сопоставляя значения подвижности  $\mu_1$  при  $T = 77$  К, определяемой рассеянием на ионах и выделенной из экспериментальной подвижности в соответствии с формулой (1), с теоретическими значениями, вычисленными по формуле Брукса–Херринга:

$$\mu_1 = 3.2 \cdot 10^{15} (m_0/m^*)^{1/2} \chi^2 T^{3/2} / N_1 f(b), \quad (4)$$

где

$$f(b) = \ln(1+b) - b/(b+1), \quad b = 1.3 \cdot 10^{14} T^2 / p(m^*/m_0),$$

можно определить концентрацию ионизованных примесей  $N_1$  (принимая, что в  $p$ -GaInAsSb, как и в  $p$ -GaSb, эффективная масса дырок  $m^* = 0.4m_0$ , диэлектрическая проницаемость  $\chi = 15.7$ ). Для мелких примесных уровней  $N_1^{(77)} = 2N_D + p^{(77)}$ , откуда находим концентрацию доноров  $N_D$ . Концентрацию мелких акцепторных уровней находим из уравнения нейтральности:  $p_{\text{depl}} = N_{A1} - N_D$ , где  $p_{\text{depl}}$  — концентрация дырок, соответствующая истощению мелких уровней. Концентрацию более глубоких акцепторных уровней  $N_{A2}$  находим из изменения концентрации  $p$  при более высоких температурах. Значения  $N_{A1}$ ,  $N_{A2}$ ,  $N_D$  даны в табл. 2.

Полученные результаты можно сравнить с результатами, полученными ранее [2,3] для твердых растворов

GaInAsSb, выращенных без свинца. Если без использования свинца твердые растворы с содержанием индия  $X \approx 0.15$  имели низкую концентрацию и подвижность дырок и были сильно компенсированы, то в присутствии свинца выращивается некомпенсированный материал. Если при содержании индия  $X = 0.22$  без свинца наблюдалось много дефектов, вероятно связанных с дислокациями несоответствия, то в присутствии свинца получается сильно компенсированный материал, аналогичный материалу с содержанием индия 0.15, полученному без свинца. Твердые растворы с содержанием индия свыше 0.22 могут быть получены только в присутствии свинца в растворе–расплаве. При этом твердые растворы с содержанием индия 0.24 представляли хороший некомпенсированный материал  $p$ -типа. При содержании индия 0.265 в твердых растворах наблюдалось много дефектов в виде больших скоплений.

#### 4. Твердые растворы $n$ -типа GaInAsSb

Для создания высокоэффективных быстродействующих фотодиодов в области длин волн  $\lambda = 2.5\text{--}3 \text{ мкм}$  с низкими обратными токами на основе твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  в активной области приборов используются эпитаксиальные слои  $n$ -типа с шириной запрещенной зоны  $E_g = 0.4\text{--}0.5 \text{ эВ}$ . Такие эпитаксиальные слои можно было получить путем легирования теллуром твердых растворов с содержанием индия 0.22 и 0.24.

Если в качестве исходных компонентов при выращивании твердых растворов использовать не  $p$ -GaSb, как это было описано выше, а  $n$ -GaSb:Te с концентрацией электронов  $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , то твердые растворы GaInSbAs изменяют тип проводимости с дырочного на

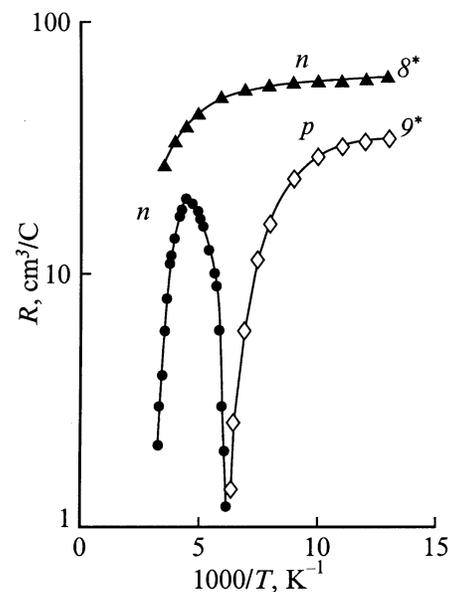


Рис. 7. Зависимости коэффициента Холла от температуры в твердых растворах, легированных теллуром. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 2.

электронный. Перекомпенсация материала зависит от концентрации дырок в образце (см. табл. 2). При содержании индия в твердом растворе в количестве 0.22 (образец 5), в котором концентрация дырок была меньше  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , происходит полная перекомпенсация и материал при  $T = 77 \text{ К}$  становится  $n$ -типа с концентрацией электронов  $n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и с подвижностью электронов  $\mu = 4000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  (см. образец 8\* в табл. 2). На температурной зависимости коэффициента Холла (рис. 7, кривая 8\*) выше 200 К наблюдается уменьшение коэффициента Холла, связанное, вероятно, с началом перехода к собственной проводимости. При содержании индия в твердом растворе в количестве 0.247, в котором концентрация дырок была больше  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  (образец 6, табл. 2), при таком же уровне легирования теллуром, как и образца 8\*, при температуре жидкого азота образец частично компенсирован и сохраняет  $p$ -тип проводимости (образец 9\* в табл. 2), но при  $T = 150 \text{ К}$  происходит смена знака эдс Холла и переход к собственной проводимости (рис. 7, кривая 9\*). Из наклона зависимости  $RT^{3/2}$  от обратной температуры при  $T > 200 \text{ К}$  была определена ширина запрещенной зоны  $E_g = 0.42 \text{ эВ}$ , что хорошо согласуется с рассчитанным значением (см. табл. 1).

## 5. Заключение

В настоящей работе впервые было проведено исследование электрофизических свойств твердых растворов  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ , выращенных из содержащих свинец растворов–расплавов на подложках GaSb (100) с промежуточным изолирующим слоем GaSb, также полученным с использованием свинца. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Использование свинца при выращивании твердых растворов  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  позволило впервые получить эпитаксиальные слои данных твердых растворов с содержанием индия в твердой фазе  $X = 0.24–0.27$  ( $E_g = 0.5–0.49 \text{ эВ}$  при  $T = 77 \text{ К}$ , см. табл. 1), толщиной 1.5–2 мкм, пригодных для создания оптоэлектронных приборов, что невозможно было достичь без использования свинца.

2. Нелегированные твердые растворы  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  с содержанием индия  $X = 0.22$  ( $E_g = 0.53 \text{ эВ}$  при  $T = 77 \text{ К}$ ), полученные из содержащих свинец растворов–расплавов, представляют собой сильно компенсированный материал, аналогичный полученному без использования свинца более широкозонному материалу с  $X = 0.15$  ( $E_g = 0.58 \text{ эВ}$  при  $T = 77 \text{ К}$ ).

3. Нелегированные твердые растворы  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  с содержанием индия  $X = 0.247$  ( $E_g = 0.5 \text{ эВ}$  при  $T = 77 \text{ К}$ ), полученные с использованием свинца, имеют малое число дефектов и компенсирующих примесей и обладают высокой подвижностью дырок  $\mu = 2700 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

4. Легирование теллуром полученных с использованием свинца твердых растворов  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  с

содержанием индия  $X = 0.22$  позволяет создать материал  $n$ -типа с высокой подвижностью электронов  $\mu = 4000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

5. Полученные твердые растворы могут быть использованы для создания высокоэффективных оптоэлектронных приборов (светодиодов, лазеров, фотодиодов) с рабочей длиной волны  $\lambda = 2.4–3 \text{ мкм}$ .

Авторы выражают благодарность Т.А. Полянской, Н.А. Чарыкову и Т.Б. Поповой за помощь в работе и обсуждение результатов.

## Список литературы

- [1] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, И.Н. Тимченко, З.И. Чугуева, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **23**, 780 (1989).
- [2] А.Н. Баранов, А.Н. Дахно, Б.Е. Джурганов, Т.С. Лагунова, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев. ФТП, **24**, 98 (1990).
- [3] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, А.Н. Дахно, Б.Е. Джурганов, Т.С. Лагунова, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев. ФТП, **24**, 1072 (1990).
- [4] И.А. Андреев, Е.В. Куницына, Ю.В. Соловьев, Н.А. Чарыков, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **25**, 77 (1999).
- [5] Е.А. Kunitsyna, I.A. Andreev, N.A. Charykov, Yu.V. Solovlev, Yu.P. Yakovlev. Appl. Surf. Sci., **142**, 371 (1999).
- [6] А.М. Литвак, Н.А. Чарыков. ЖХФ, **64**, 2331 (1990).
- [7] T.C. DeWinter, M.A. Pollack, A.K. Strivastava, J.I. Zuskind. J. Electron. Mater., **4**, 729 (1985).
- [8] Б.И. Шкловский, А.Н. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979).
- [9] D. Kranzer. Phys. St. Sol. (a), **26**, 11 (1974).
- [10] A. Kawabata. J. Phys. Soc. Japan, **42** (2), 628 (1980).
- [11] Б.Л. Альтшулер, А.Г. Аронов, А.И. Ларкин, Д.Е. Хмельницкий. ЖЭТФ, **81**, 768 (1981).
- [12] M.H. Cohen. Phys. Rev. Lett., **30**, 698 (1973).

Редактор Т.А. Полянская

## The role of lead in growing GaInAsSb solid solutions by LPE

T.I. Voronina, T.S. Lagunova, E.V. Kunitsyna,  
Ya.A. Parkhomenko, D.A. Vasukov, Yu.P. Yakovlev

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Science,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Electrical properties of  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  solid solutions ( $X = 0.14–0.27$ ) grown by LPE from the lead containing melts were investigated for the first time. Existence of three acceptor levels was established: a shallow level with the activation energy  $E_{A1} \approx 0.008–0.015 \text{ eV}$  and two deep levels  $E_{A2} \approx 0.024–0.035 \text{ eV}$  and  $E_{A3} \approx 0.07 \text{ eV}$ . It was shown, that the use of Pb for the GaInAsSb growth made it possible to obtain undoped solid solutions with a low density of defects and impurities and a high mobility of carriers.