

Влияние примеси теллура на свойства твердых растворов $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ ($X > 0.22$)

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

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

(Получена 18 декабря 2001 г. Принята к печати 20 декабря 2001 г.)

Проведено исследование влияния примеси теллура на электрофизические свойства твердых растворов $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ ($X = 0.22$ и $X = 0.24$), выращенных методом жидкофазной эпитаксии из содержащих свинец растворов–расплавов. Показано, что при невысоком уровне легирования теллуром ($X_{\text{Te}}^L < 2 \cdot 10^{-5}$ ат%) в неоднородных сильно компенсированных твердых растворах p -типа происходит „залечивание“ дефектов и появляется возможность получения слабо компенсированного материала с малым числом примесей и структурных дефектов. При высоком уровне легирования теллуром возможно получение материала n -типа с концентрацией электронов $n = 10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Исследование электролюминесценции гетероструктур $n\text{-GaInAsSb}/p\text{-GaSb}$ показывает возможность создания светодиодов с длиной волны $\lambda = 2.0 - 2.5 \text{ мкм}$.

1. Введение

Твердые растворы $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ ($X > 0.22$), имеющие ширину запрещенной зоны $E_g = 0.4 - 0.5 \text{ эВ}$, могут использоваться для создания оптоэлектронных приборов в области длин волн $\lambda = 2.5 - 3 \text{ мкм}$. При изготовлении таких приборов необходим материал как n -, так и p -типа с высокой подвижностью электронов и дырок. В работе [1] нами было показано, что эпитаксиальные слои твердых растворов $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ с высоким содержанием индия в твердой фазе $X = 0.22 - 0.27$ ($E_g = 0.5 - 0.49 \text{ эВ}$ при $T = 77 \text{ К}$) могут быть получены только благодаря использованию свинца в растворе–расплаве в качестве нейтрального растворителя. При этом так же, как и в твердых растворах $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ с меньшим содержанием индия, нелегированные слои всегда имели p -тип проводимости. Для получения слоев n -типа в качестве донорной примеси чаще всего используется теллур.

Теллур, как легирующая примесь, в твердых растворах $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ ($X = 0.10$) изучался нами в работе [2]. Благодаря высокой температуре эпитаксиального роста (650°C) была возможность получения твердых растворов на подложках $n\text{-GaSb:Te}$ толщиной около 100 мкм и для исследования гальваномагнитных явлений можно было удалить подложку. Было показано, что теллур хорошо растворяется в твердом растворе (коэффициент сегрегации $C = C_{\text{sol}}/C_{\text{liq}} = 0.7$) и создает два донорных уровня: мелкий водородоподобный $E_{D1} = 0.005 \text{ эВ}$, присущий примеси теллура, и более глубокий $E_{D2} = 0.04 - 0.05 \text{ эВ}$, природа которого оставалась неясной.

В работе [3] было показано, что в тонких нелегированных эпитаксиальных слоях твердых растворов толщиной $3 - 5 \text{ мкм}$, выращенных на подложках $n\text{-GaSb:Te}$, всегда происходила диффузия теллура из подложки. При этом теллур действовал двояко, создавая, с одной стороны, мелкие донорные уровни, а с другой стороны, взаимодействуя с присущими антимониду галлия природными

дефектами с энергией активации $E_{A2} = 0.035 \text{ эВ}$ и $E_{A3} = 0.07 \text{ эВ}$, Те создавал новые акцепторные уровни с энергией активации $E_{A4} = 0.1 \text{ эВ}$, связанные с образованием структурного дефекта (V_{Ga} -примесь Те).

Поскольку теллур способен взаимодействовать с вакансиями и дефектами, представляется интересным исследовать его поведение в твердых растворах $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ с $E_g = 0.4 - 0.5 \text{ эВ}$, которые могут найти широкое практическое применение. В настоящей работе изучаются транспортные и фотоэлектрические свойства твердых растворов $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ с $X = 0.22$ и $X = 0.24$, полученных из содержащих свинец растворов–расплавов при различном уровне легирования теллуром. Исследования электропроводности σ , коэффициента Холла R , холловской подвижности μ в твердых растворах в интервале температур $77 - 300 \text{ К}$, а также электролюминесценции в гетероструктурах с активным слоем $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ ($X = 0.22$ и $X = 0.24$) позволяют изучить энергетический спектр примесей, механизм рассеяния носителей тока и выявить влияние теллура на свойства таких твердых растворов.

2. Изготовление образцов для исследований

Эпитаксиальные слои твердых растворов $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ с содержанием индия $X > 0.22$ выращивались методом жидкофазной эпитаксии из содержащих свинец растворов–расплавов при температуре $T = (560 \pm 3)^\circ\text{C}$ [1]. В качестве подложек использовались монокристаллические пластины GaSb с ориентацией (100) n - и p -типа проводимости; в качестве компонентов шихты — бинарные соединения GaSb, InAs, In чистотой 99.999%, Sb чистотой 99.999%, а также Pb чистотой 99.999%.

В результате было создано два типа образцов: с буферным слоем GaSb для исследования транспортных свойств твердых растворов и без буферного слоя — для изучения электролюминесцентных свойств.

Таблица 1. Характеристики исследованных образцов твердых растворов $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ с $X = 0.22$

№ образца	X_{Te}^L , ат%	$T = 300 \text{ K}$				$T = 77 \text{ K}$			
		Тип проводимости	σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	n, p , 10^{17} см^{-3}	μ , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Тип проводимости	σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	n, p , 10^{17} см^{-3}	μ , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
1	–	n	13	0.3	3500	p	0.7	0.2	220
2	$1.31 \cdot 10^{-5}$	p	23	2.8	500	p	26	0.7	2200
3	$1.75 \cdot 10^{-5}$	p	50	6	520	p	27	0.46	3600
4	$2.2 \cdot 10^{-5}$	n	15	3	300	p	0.46	0.5	60
5	$1.09 \cdot 10^{-4}$	n	125	1.8	3500	n	60	20	180
6	$2.2 \cdot 10^{-4}$	n	130	3	3700	n	75	1.2	4000
7	$1.9 \cdot 10^{-2}$	n	2390	59	2526	n	1900	40	3050
8	$6.9 \cdot 10^{-2}$	n	4550	170	1650	n	6000	180	1900

Примечание. X_{Te}^L — концентрация примеси Te в расплаве.

2.1. Образцы с буферным слоем

Для того чтобы избежать диффузии теллура из подложки $n\text{-GaSb}:\text{Te}$ в эпитаксиальный слой твердого раствора и влияния этого процесса на электрофизические свойства материала, предварительно из содержащих свинец растворов–расплавов на подложке создавался дополнительный буферный слой высокоомного $p\text{-GaSb}$ с низкой концентрацией носителей тока и высоким удельным сопротивлением ($p = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\rho \gtrsim 400 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) [4]. Толщина буферного слоя GaSb составляла 4–5 мкм. Затем на данном буферном слое из содержащих свинец растворов–расплавов выращивались эпитаксиальные слои твердых растворов $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ с содержанием индия $X = 0.22$ и $X = 0.24$ толщиной 1–3 мкм. При легировании данных твердых растворов в качестве донорной примеси использовался теллур, который вводился в жидкую фазу как в элементарном виде ($X_{\text{Te}}^L < 10^{-2}$ ат%, где X_{Te}^L — концентрация теллура в расплаве), так и в виде навески $n\text{-GaSb}:\text{Te}$ ($X_{\text{Te}}^L < 2.5 \cdot 10^{-4}$ ат%).

2.2. Образцы без буферного слоя

Для изучения электролюминесцентных свойств твердые растворы $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ ($X = 0.22$ и $X = 0.24$) выращивались из содержащих свинец растворов–расплавов непосредственно на подложке $p\text{-GaSb}$ с ориентацией (100) и легировались теллуром до концентрации свободных электронов в слое $n = 1.2 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при $T = 77 \text{ K}$. На поверхности гетероструктур $n\text{-Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}/p\text{-GaSb}$ методом стандартной фотолитографии создавались мезы диаметром 300 мкм.

3. Исследование транспортных свойств твердых растворов $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$

На образцах прямоугольной формы с шестью индиевыми контактами измерялись электропроводность σ , коэффициент Холла R , подвижность $\mu = R\sigma$ в интер-

вале температур 77–300 К при напряженности магнитного поля 0–20 кЭ. Рассмотрим влияние легирования теллуром на гальваномагнитные явления в образцах с содержанием индия $X = 0.22$ и $X = 0.24$ отдельно.

3.1. Легированные теллуром образцы с содержанием индия $X = 0.22$

Характеристики исследованных образцов $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ ($X = 0.22$) в зависимости от уровня легирования теллуром приведены в табл. 1. Температурные зависимости коэффициента Холла R и подвижности μ даны на рис. 1 и 2 соответственно.

Как видно из табл. 1, нелегированный твердый раствор (образец 1) при температуре жидкого азота имеет p -тип проводимости с низкой концентрацией и подвижностью дырок. Температурные зависимости коэффициента Холла (рис. 1, а) и подвижности (рис. 2) при $T < 150 \text{ K}$ в образце № 1 указывают на проводимость по мелким акцепторным уровням. При $T > 150 \text{ K}$ наблюдается смена знака эдс Холла и резкое возрастание холловской подвижности, что может быть связано с началом перехода к собственной проводимости. При $T > 250 \text{ K}$ уменьшение коэффициента Холла R и большая величина подвижности $\mu > 2000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ полностью определяются электронной проводимостью, т.е. наступает собственная проводимость. Однако зависимость $RT^{3/2}$ от обратной температуры при $T > 250 \text{ K}$ не экспоненциальная и не соответствует ширине запрещенной зоны твердого раствора. Такая неэкспоненциальная зависимость в случае собственной проводимости так же, как и низкая температура перехода к собственной проводимости ($T \approx 150 \text{ K}$), могут указывать на существование глубоких „хвостов“ примесных состояний, искажающих валентную зону и зону проводимости. Появление таких хвостов характерно для сильно компенсированного материала с большим количеством неравномерно распределенных примесей и структурных дефектов [5]. Свойства таких твердых растворов при легировании теллуром резко изменяются в зависимости от уровня легирования.

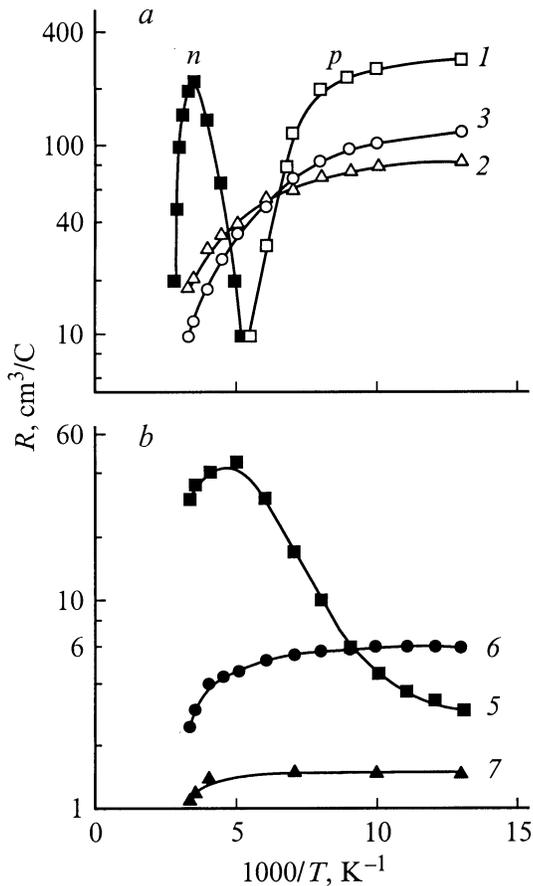


Рис. 1. Зависимости коэффициента Холла от обратной температуры в твердых растворах $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ с $X = 0.22$. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 1; *a* — образцы *p*-типа при $T \approx 77$ К, *b* — образцы *n*-типа. Данные, соответствующие *p*-типу проводимости, обозначены светлыми значками, *n*-типу — черными.

При слабом легировании теллуrom ($X_{Te}^L < 1.75 \cdot 10^{-5}$ ат%) наблюдалась некоторая неоднородность материала, но всегда получались образцы *p*-типа проводимости как при $T = 77$ К, так и при $T \approx 300$ К с низкой концентрацией и высокой подвижностью дырок (см. табл. 1, образцы 2 и 3). Температурная зависимость коэффициента Холла (рис. 1, *a*, образцы 2 и 3) определялась тремя энергетическими уровнями: мелким примесным уровнем $E_{A1} < 0.01$ эВ (при $T < 120$ К), связанным с неконтролируемыми примесями, и более глубокими уровнями $E_{A2} = 0.03$ эВ и $E_{A3} = 0.07$ эВ, которые можно приписать структурному дефекту $(V_{Ga}Ga_{Sb})^{++}$, присущему GaSb и твердым растворам, близким по составу к GaSb. Температурная зависимость подвижности в этих образцах (рис. 2, образцы 2 и 3) характерна для перехода к рассеянию на ионах примеси μ_i при $T < 100$ К, а при более высоких температурах — на колебаниях решетки μ_L . Полагая экспериментальные значения подвижности при $T \approx 77$ К $\mu_{77} = \mu_i$ и сопоставляя их с теоретическими значениями μ_i^t [6], можно оценить

концентрацию ионизированных мелких примесей:

$$N_I^{77} = \mu_i^t p_{77} / \mu_{77}.$$

Для мелких примесных уровней $N_I^{77} = 2N_D + p_{77}$, откуда находим концентрацию доноров N_D . Концентрацию дырок при $T \approx 77$ К полагаем равной $p_{77} = p_{depl} = N_{A1} - N_D$, где p_{depl} — концентрация дырок при истощении мелких уровней, и оцениваем величину N_{A1} .

В образце 2 с содержанием теллура $X_{Te}^L = 1.31 \cdot 10^{-5}$ ат% $N_{A1} = 1.5 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, $N_D = 10^{16}$ см $^{-3}$, степень компенсации $K = N_D/N_{A1} = 0.07$. В образце 3 с содержанием теллура $X_{Te}^L = 1.75 \cdot 10^{-5}$ ат% $N_{A1} = 8 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, $N_D = 10^{16}$ см $^{-3}$ и степень компенсации $K = 0.12$. Полученные значения N_{A1} и N_D указывают на то, что мы получили нормальный слабо компенсированный материал *p*-типа при легировании теллуrom в малых количествах. Объяснить это можно „залечиванием“ дефектов, когда теллур взаимодействует с заряженными скоплениями примесей и дефектов, нейтрализуя их. Флуктуации потенциала на дне валентной зоны уменьшаются, концентрация и подвижность в образце определяются в основном дырками на мелких примесных уровнях с энергией активации $E_{A1} = 0.01$ эВ и двухзарядными структурными дефектами с энергией активации $E_{A2} = 0.03$ эВ и $E_{A3} = 0.07$ эВ, концентрация которых на порядок меньше мелких примесных уровней ($N_{A2} = 10^{16}$ см $^{-3}$).

Таким образом, теллур, как легирующая примесь в небольших количествах, приводит к улучшению свойств твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ с $X = 0.22$ и при

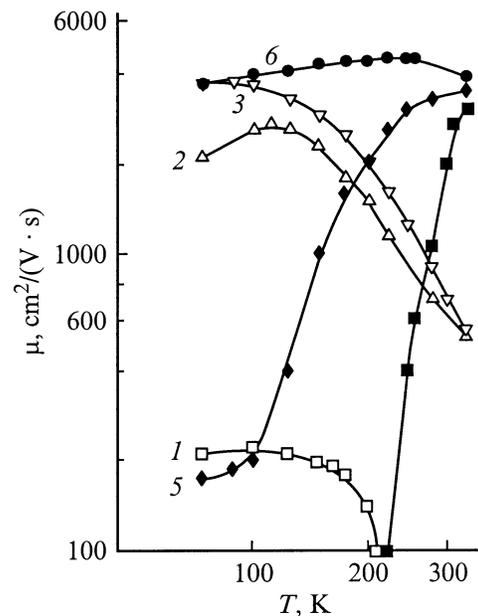


Рис. 2. Холловская подвижность в зависимости от температуры в твердых растворах $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ с $X = 0.22$. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 1. Данные, соответствующие *p*-типу проводимости, обозначены светлыми значками, *n*-типу — черными.

Таблица 2. Характеристики исследованных образцов твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ с $X = 0.24$

№ образца	X_{Te}^L , ат%	$T = 300 \text{ K}$				$T = 77 \text{ K}$			
		Тип проводимости	σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	n , p , 10^{17} см^{-3}	μ , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Тип проводимости	σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	n , p , 10^{17} см^{-3}	μ , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
9	–	p	140	14	550	p	190	4	2800
10	$9.9 \cdot 10^{-5}$	p	200	23	540	p	205	4.8	2680
11	$1.98 \cdot 10^{-4}$	n	950	30	2000	p	420	1.8	1460
12	$1.3 \cdot 10^{-2}$	n	550	13	2660	n	327	7.4	2760
13	$3.4 \cdot 10^{-2}$	n	1400	43	2000	n	1430	26	3300

Примечание. X_{Te}^L — концентрация примеси Те в расплаве.

сохранении дырочного типа проводимости позволяет создать материал с высокой подвижностью дырок и малым числом структурных дефектов.

При легировании теллуром в больших количествах ($X_{\text{Te}}^L > 2 \cdot 10^{-5}$ ат%) начинается перекомпенсация примесей в твердом растворе. Как видно из табл. 1, при содержании теллура $X_{\text{Te}}^L = 2.2 \cdot 10^{-5}$ ат% в образце 4 при $T = 77 \text{ K}$ еще сохраняется дырочный тип проводимости, но с очень низкой подвижностью, а при $T = 300 \text{ K}$ твердый раствор начинает проявлять электронные свойства. При $X_{\text{Te}}^L = 1.09 \cdot 10^{-4}$ ат% (образец 5) материал становится n -типа и при $T = 77 \text{ K}$, и при $T = 300 \text{ K}$. При этом подвижность электронов при $T = 77 \text{ K}$ очень низкая, что может быть связано с сильной компенсацией материала и наличием скоплений примесей. На температурных зависимостях $R(T)$ и $\mu(T)$ (рис. 1, б; 2, кривые 5) наблюдается резкий рост коэффициента Холла и подвижности с повышением температуры и появление максимумов при $T \approx 200 \text{ K}$. Такое поведение зависимостей $R(T)$ и $\mu(T)$ характерно для перехода к проводимости по примесной зоне при низких температурах. Аномально низкие значения коэффициента Холла R и подвижности μ при температуре жидкого азота можно объяснить сильной компенсацией материала, когда распределение примесей становится существенно неоднородным, что приводит к искажению дна зоны проводимости и появлению „хвоста“ плотности состояний в запрещенной зоне [5]. Электроны локализуются в наиболее глубоких местах потенциального рельефа, окруженных высокими потенциальными горбами. Коэффициент Холла определяется средней по объему концентрацией \bar{n} [7]. Проводимость σ в неоднородном образце определяется концентрацией на уровне протекания, которая при сильной компенсации активационно зависит от температуры

$$n_c \propto \exp\left(-\frac{E_p - E_F}{kT}\right),$$

где E_p — энергия на уровне протекания, E_F — энергия на уровне Ферми [8]. Эффективная холловская подвижность в неоднородном материале $\mu = R\sigma$ не отражает поведения истинной (дрейфовой) подвижности, а отличается от нее на множитель $n_c/n < 1$, резко падающий с понижением температуры. Очевидно, отличие холловской измеренной подвижности от дрейфовой будет тем

значительнее, чем больше амплитуда неоднородностей в образце.

При еще более высоком уровне легирования теллуром ($X_{\text{Te}}^L = 2.2 \cdot 10^{-4}$ ат%) концентрация электронов возрастает, степень компенсации уменьшается, потенциальный рельеф сглаживается. Коэффициент Холла отражает концентрацию электронов в зоне проводимости. Как видно из табл. 1 (образцы 6 и 7), твердый раствор как при $T = 77 \text{ K}$ так и $T = 300 \text{ K}$ всегда имеет n -тип проводимости и обладает высокой подвижностью. На температурной зависимости коэффициента Холла (рис. 1, б, образцы 6 и 7) наблюдается уменьшение R при $T > 250 \text{ K}$, указывающее на наличие донорного уровня с энергией активации $E_D = 0.05 \text{ эВ}$. Такой донорный уровень наблюдался ранее в твердых растворах $n\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($X = 0.10$) при низких концентрациях электронов [2], природа которого остается неясной.

Зависимость подвижности от температуры (рис. 2, образец 6) характерна для рассеяния на ионах примеси при $T < 200 \text{ K}$ и на колебаниях решетки при более высоких температурах. Из сопоставления экспериментальной подвижности при $T = 77 \text{ K}$ с теорией [6] в образцах 6 и 7 была оценена степень компенсации примесей $K = 0.2$.

При очень высоком уровне легирования теллуром ($X_{\text{Te}}^L = 6.9 \cdot 10^{-2}$ ат%, образец 8) можно получить концентрацию электронов выше 10^{19} см^{-3} . При этом, как видно из табл. 1, коэффициент Холла остается практически постоянным во всем интервале температур от 77 до 300 K, что характерно для сильного вырождения. Уровень Ферми составляет $E_F = 50 \text{ мэВ}$ при $T \rightarrow 0$.

Следует отметить, что в твердых растворах $n\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ с $X = 0.22$, в отличие от $n\text{-GaSb}$ и $n\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ с $X = 0.10$, ни при каких концентрациях не наблюдается возрастание коэффициента Холла с ростом температуры, что указывает на отсутствие второй подзоны проводимости типа (111), близко расположенной над минимумом (000) [6] ($E_c^{(111)} - E_c^{(000)} \approx 0.08 \text{ эВ}$ для GaSb).

Таким образом, используя теллур в качестве легирующей примеси в твердых растворах $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ с $X = 0.22$, имеется возможность при слабом легировании теллуром ($X_{\text{Te}}^L \lesssim 1.75 \cdot 10^{-5}$ ат%) „залечить“ существующие дефекты и получить материал p -типа с

низкой концентрацией и высокой подвижностью дырок $p_{77} \approx 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_{77} = 3600 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а при сильном легировании теллуrom ($X_{\text{Te}}^L > 2 \cdot 10^{-4} \text{ ат}\%$) получить материал n -типа в широком интервале концентраций от 10^{17} до 10^{19} см^{-3} с высокой подвижностью электронов.

3.2. Легированные теллуrom образцы с содержанием индия $X = 0.24$

Характеристики исследованных образцов даны в табл. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла и подвижности представлены на рис. 3 и 4.

Исходные нелегированные образцы твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ ($x = 0.24$) были p -типа проводимости при $T = 77$ и 300 К и имели более высокие концентрации и подвижности дырок (образец 9, табл. 2), чем в твердых растворах с $X = 0.22$ (образец 1, табл. 1). Высокие подвижности дырок при $T = 77$ и 300 К свидетельствовали о слабой компенсации примесей ($K \approx 0.1$) и об отсутствии скоплений примесей. Перекомпенсация этого материала происходила при большем содержании теллура. В частности, при содержании теллура в жидкой фазе $X_{\text{Te}}^L = 9.9 \cdot 10^{-5} \text{ ат}\%$ (образец 10) материал практически не изменялся, оставался p -типа при $T = 77$ и 300 К , в отличие от образца 5 с $X = 0.22$ при таком же уровне легирования теллуrom.

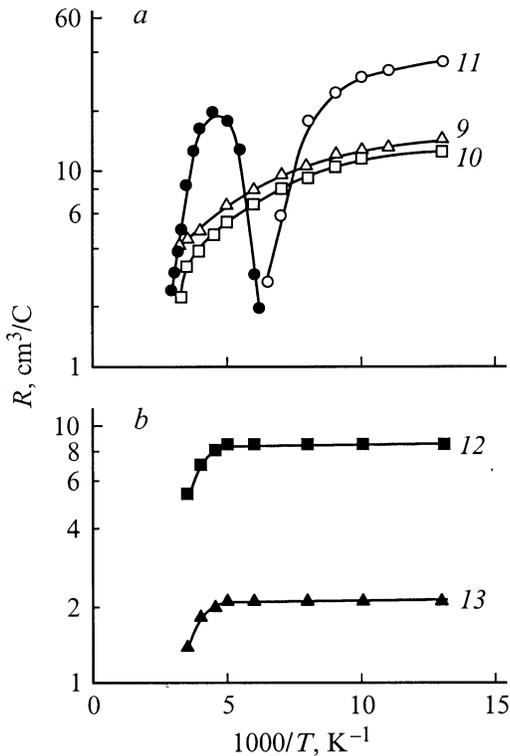


Рис. 3. Зависимости коэффициента Холла от обратной температуры в твердых растворах $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ с $X = 0.24$. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 2; *a* — образцы p -типа при $T \approx 77 \text{ К}$, *b* — образцы n -типа. Данные, соответствующие p -типу проводимости, обозначены светлыми значками, n -типу — черными.

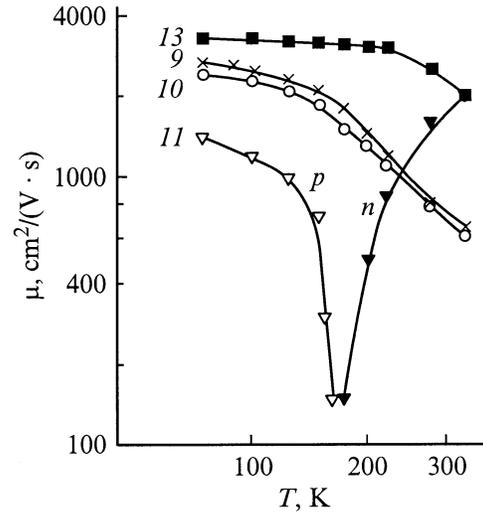


Рис. 4. Холловская подвижность в зависимости от температуры в твердых растворах $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ с $X = 0.24$. Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 2.

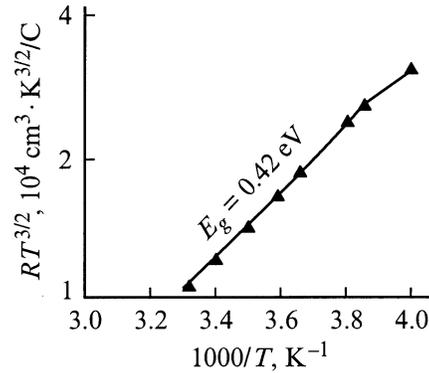


Рис. 5. Зависимость $RT^{3/2}$ от обратной температуры для образца 11 при $T > 250 \text{ К}$.

Из рис. 3, *a* видно, что в нелегированном образце 9 и в слабо легированном образце 10 на температурной зависимости коэффициента Холла проявляются наклоны, характерные для образцов p -типа с энергией активации 0.02 эВ . Подвижность в этих образцах (рис. 4) уменьшается с ростом температуры и определяется рассеянием на ионах примеси и колебаниях решетки. Высокие значения подвижности при $T = 77 \text{ К}$ свидетельствуют о низкой степени компенсации примесей в этих образцах ($K = N_D/N_A < 0.1$).

При легировании теллуrom в количестве $X_{\text{Te}} = 1.98 \cdot 10^{-4} \text{ ат}\%$ (образец 11) начинается перекомпенсация материала: на температурной зависимости коэффициента Холла (рис. 3, *a*) при $T = 100 \text{ К}$ происходит инверсия типа проводимости, характерная для перехода к собственной проводимости. Зависимости $RT^{3/2}$ от обратной температуры при $T > 250 \text{ К}$ экспоненциальна (рис. 5). Энергия активации, вычисленная из экспоненци-

альной зависимости, соответствует ширине запрещенной зоны $E_g = 0.42$ эВ, что находится в хорошем согласии с рассчитанными значениями [1]. Этот результат подтверждает отсутствие флуктуаций дна зоны проводимости и валентной зоны, в отличие от образца 1 с меньшим содержанием индия в твердом растворе.

В образцах 12 и 13 с содержанием теллура $X_{\text{Te}}^L = 1.3 \cdot 10^{-2}$ ат% и $X_{\text{Te}}^L = 3.4 \cdot 10^{-2}$ ат% наблюдается полная перекомпенсация материала. На температурной зависимости коэффициента Холла (рис. 3, *b*) в этих образцах, так же как и в образцах *n*-типа с меньшим содержанием индия в твердом растворе (образцы 7 и 8) при $T > 200$ К, наблюдаются наклоны с энергией активации $E_D = 0.05$ эВ. Зависимость подвижности электронов от температуры (рис. 4, образец 13) характерна для вырожденного материала при рассеянии на примесях и колебаниях решетки. Подвижность электронов при $T = 77$ К позволяет оценить степень компенсации мелких примесей $K = 0.1$.

Таким образом, в твердых растворах $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ с $X = 0.24$, в которых отсутствуют флуктуации валентной зоны и зоны проводимости, теллур действует как обычная донорная примесь, компенсирующая дырки, и позволяет получить материал *n*-типа в широком интервале концентраций.

4. Электролюминесценция гетероструктур $n\text{-Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}/p\text{-GaSb}$ ($X = 0.22$ и $X = 0.24$)

Изучались спектры электролюминесценции гетероструктур $n\text{-Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}/p\text{-GaSb}$ ($X = 0.22$ и $X = 0.24$), излучающих в области спектра 2–2.5 мкм, при $T = 77$ К и $T = 300$ К. Эпитаксиальные слои $n\text{-GaInAsSb:Te}$ выращивались из содержащего свинец раствора–расплава при различном уровне легирования теллуром. Исследовалась возможность создания светодиодов на их основе.

Изготовление образцов осуществлялось на основе твердых растворов $n\text{-Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}:\text{Te}$, выращенных на подложке $p\text{-GaSb}$ (100) с концентрацией дырок $p = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ без буферного слоя. Образец представлял собой мезу со сплошным контактом к $p\text{-GaSb}$ и точечным контактом к слою $n\text{-GaInAsSb}$. Спектральные характеристики светодиодов были получены на монохроматоре МДР-2 с использованием схемы синхронного детектирования. Измерения осуществлялись в квазинепрерывном режиме при подаче на $p\text{-}n$ -переход питания импульсами типа меандр с частотой следования 400 Гц.

Спектры наиболее интенсивных сигналов излучательной рекомбинации были получены для образцов, выращенных при содержании теллура в расплаве $X_{\text{Te}}^L \approx (2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2})$ ат% (рис. 6, *a-c*). Согласно выше изложенным данным, полученным из эффекта Холла, концентрация свободных электронов в слое

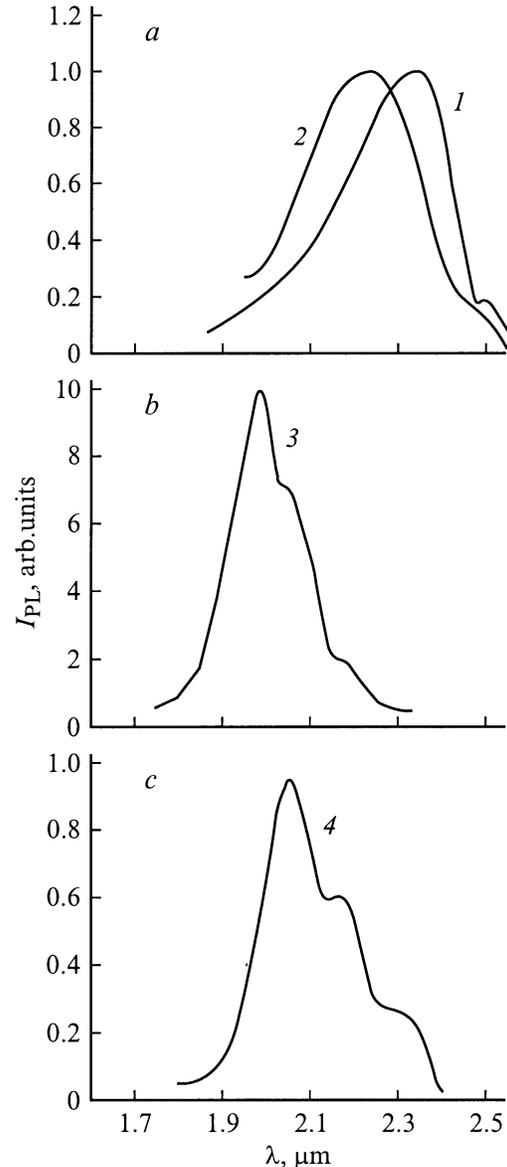


Рис. 6. Спектральные зависимости электролюминесценции светодиодов на основе $n\text{-Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}/p\text{-GaSb}$ с $X = 0.22$ (рис. *a* и *b*) и $X = 0.24$ (рис. *c*). Температура измерений T , К: *a* — 300, *b, c* — 77. X_{Te}^L , ат%: 1 — $2.2 \cdot 10^{-4}$, 2–4 — $1.9 \cdot 10^{-2}$.

при $T = 77$ К составляла $n = 1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (образец 6, табл. 1) и $n = 4.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (образец 7, табл. 1). На спектрах виден ряд максимумов, относящихся к рекомбинациям, связанным как с переходами между зонами, так и с проявлением различных уровней.

Проанализируем сначала спектры излучения светодиодов, созданных на основе материала с $X = 0.22$ (рис. 6, *a* и *b*). На рис. 6, *a* при $T = 300$ К приведены спектры для двух образцов с разной степенью легирования теллуром: $X_{\text{Te}}^L = 2.2 \cdot 10^{-4}$ ат% (кривая 1) и $X_{\text{Te}}^L = 1.9 \cdot 10^{-2}$ ат% (кривая 2). Пики излучения при длине волны $\lambda = 2.35$ мкм ($E_g = 0.525$ эВ, кривая 1) и $\lambda = 2.24$ мкм ($E_g = 0.55$ эВ, кривая 2) можно свя-

зять с межзонной рекомбинацией свободных носителей. Причем сдвиг максимума на кривой 2 объясняется более высоким положением уровня Ферми в зоне проводимости из-за более высокой степени легирования теллуrom. В менее легированном образце (кривая 1) при $\lambda = 2.5$ мкм наблюдается пик, связанный с рекомбинационным уровнем $E_{A2} = 0.035$ эВ. По-видимому, это первое зарядовое состояние, обусловленное природным структурным дефектом $V_{Ga}Ga_{Sb}$, отчетливо проявившимся в температурной зависимости коэффициента Холла на материале p -типа. На кривой 2 просматривается центр с энергией ионизации $E_{A3} = 0.07$ эВ. Это второе зарядовое состояние того же акцептора. Первое зарядовое состояние $E_{A2} = 0.035$ эВ на кривой не проявляется. Вероятно, с введением теллура порядка $X_{Te}^L = 2 \cdot 10^{-2}$ ат% изменяется зарядовое состояние двухзарядного акцептора и первый уровень исчезает. Такой эффект наблюдался в работе [9] при легировании теллуrom GaSb. При температуре жидкого азота для этого же образца (рис. 6, б) в соответствии с максимумом излучательной рекомбинации, наблюдающимся при $\lambda = 1.99$ мкм, ширина запрещенной зоны $E_g = 0.62$ эВ. За сигнал при $\lambda = 2.04$ мкм, наблюдаемый на этой же кривой, может быть ответствен донорный уровень $E_{D1} = 0.01-0.012$ эВ, который был обнаружен в работе [9], за сигнал при $\lambda = 2.18$ мкм — уровень $E_{D2} = 0.05$ эВ. Можно предположить, что при достаточно большом (для $T = 77$ К) токе 200 мА через $p-n$ -переход растет инжекция дырок в узкозонную область, акцепторные уровни E_{A1} и E_{A2} насыщаются и в рекомбинационный процесс вступают донорные центры 0.012 и 0.05 эВ. Такой же уровень с $E_{D2} = 0.05$ эВ наблюдался на температурной зависимости коэффициента Холла (рис. 1 и 3). Возможно участие и мелких акцепторных центров.

Теперь рассмотрим спектры излучения материала с $X = 0.24$ (рис. 6, в). Образец содержал теллур в расплаве $X_{Te}^L = 1.9 \cdot 10^{-2}$ ат%, как и в рассмотренном выше твердом растворе с $X = 0.22$. Ширина запрещенной зоны при $T = 77$ К составляла 0.6 эВ. На спектральной зависимости достаточно хорошо заметны два пика сигнала при длинах волн больше 2.1 мкм. В отличие от образца с $X = 0.22$ с такой же концентрацией (кривая 3 на рис. 6, б), здесь проявляются оба зарядовых состояния двухзарядного примесного акцептора. Это свидетельствует о том, что в исходном нелегированном материале с $X = 0.24$ общая концентрация акцепторов была выше, и для полной компенсации акцепторов требуется большая концентрация теллура, что согласуется с результатами холловских измерений.

Таким образом, спектры излучательной рекомбинации, полученные при исследовании электролюминесценции гетероструктур $n-Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/p-GaSb$ ($X = 0.22$ и $X = 0.24$), выявили уровни, идентичные тем, которые обнаружены в результате исследования транспортных свойств легированных теллуrom твердых

растворов n -типа, и показали возможность создания светодиодов на основе этих материалов.

5. Заключение

В работе впервые проведено исследование влияния примеси теллура на электрофизические свойства твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/p-GaSb$ ($X = 0.22$ и $X = 0.24$), выращенных из содержащих свинец растворов-расплавов, а также исследование спектров электролюминесценции гетероструктур на основе этих твердых растворов. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Нелегированный теллуrom твердый раствор $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ с $X = 0.22$ ($E_g = 0.5$ эВ) представляет собой компенсированный неоднородный материал p -типа с низкими концентрацией и подвижностью дырок при $T = 77$ К: $p_{77} = 2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, $\mu_{77} \approx 200$ см 2 /(В·с). При слабом легировании теллуrom ($X_{Te}^L \leq 1.75 \cdot 10^{-5}$ ат%) происходит „залечивание“ дефектов и появляется возможность получения слабо компенсированного материала p -типа с низкой концентрацией и высокой подвижностью дырок $p_{77} \approx 5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, $\mu_{77} \approx 3500$ см 2 /(В·с), содержащего малое число структурных дефектов.

2. В отличие от твердых растворов с $X = 0.22$, нелегированные твердые растворы с $X = 0.24$ всегда имеют более высокую концентрацию и подвижность дырок при $T = 77$ К: $p_{77} \approx 4 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, $\mu_{77} \approx 3000$ см 2 /(В·с), более однородны и не содержат больших флуктуаций примесей и дефектов. Поэтому слабое легирование теллуrom ($X_{Te}^L < 10^{-4}$ ат%) твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ ($X = 0.24$) не приводит к заметному изменению свойств материала.

3. При легировании теллуrom в больших количествах ($X_{Te}^L > 10^{-4}$ ат% для состава с $X = 0.24$ и $X_{Te}^L > 2 \cdot 10^{-4}$ ат% для состава с $X = 0.22$) в твердых растворах $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ происходит обычная перекомпенсация акцепторных уровней и появляется возможность получения эпитаксиальных слоев n -типа проводимости в широком интервале концентраций от $n = 10^{17}$ см $^{-3}$ до $n = 10^{19}$ см $^{-3}$ с высокой подвижностью электронов $\mu_{77} \approx 4000$ см 2 /(В·с).

4. В легированных теллуrom твердых растворах $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ ($X = 0.22$ и $X = 0.24$) n -типа, в отличие от $n-GaSb$, не наблюдается проявления второй подзоны проводимости типа (111) вплоть до концентраций $n \approx 10^{19}$ см $^{-3}$, т.е. эти твердые растворы могут быть использованы как прямозонные полупроводники в широком интервале концентраций.

5. Исследования электролюминесценции гетероструктур $n-Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/p-GaSb$ ($X = 0.22$ и $X = 0.24$) подтверждают результаты, полученные из гальваномагнитных эффектов, и показывают возможность создания светодиодов с длиной волны $\lambda = 2-2.5$ мкм.

Список литературы

- [1] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Е.В. Куницына, Я.А. Пархоменко, Д.А. Васюков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **35**, 55 (2001).
- [2] Т.И. Воронина, Б.Е. Джуртанов, Т.С. Лагунова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **25**, 283 (1991).
- [3] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, А.Н. Дахно, Б.Е. Джуртанов, Т.С. Лагунова, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев. ФТП, **24**, 1072 (1990).
- [4] 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).
- [5] Б.И. Шкловский, А.Н. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979).
- [6] О. Маделунг. *Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп* (М., Мир, 1967).
- [7] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. ЖЭТФ, **60**, 867 (1971).
- [8] М.К. Шейкман, А.Я. Шик. ФТП, **10**, 209 (1976).
- [9] А.С. Кюрегян, И.К. Лазарева, В.М. Стучебников, А.Ю. Юнович. ФТП, **6**, 242 (1972).

Редактор Т.А. Полянская

The influence of the Te impurity on $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ solid solution properties ($X > 0.22$)

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

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract The influence of the Te impurity on the electrical properties of $\text{Ga}_{1-X}\text{In}_X\text{As}_Y\text{Sb}_{1-Y}$ solid solutions ($X = 0.22$ and $X = 0.24$) grown by LPE from the lead containing melts is investigated. It has been shown that at a low level of Te doping ($X_{\text{Te}}^L < 2 \cdot 10^{-5}$ at%) the defect „healing“ occurs in nonuniform high-compensated p -type solid solutions thus permitting to obtain low-compensated p -type materials with a low density of impurities and structural defects. A high level of Te doping makes it possible to obtain n -type materials with the electron density of $n = 10^{17} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Investigations of the electroluminescence spectra indicate that n -GaInAsSb/ p -GaSb solid solutions are promising in creating light emitting diodes for the 2–2.5 μm spectral range.