

03

Выращивание и свойства изопериодных твердых растворов GaInPSbAs на подложках арсенида индия

© Д.Л. Алфимова¹, Л.С. Лунин¹, М.Л. Лунина¹, А.С. Пашенко¹, С.Н. Чеботарев^{1,2}

¹ Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

² Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова (НПИ), Новочеркасск, Россия

E-mail: lunin_ls@mail.ru

(Поступила в Редакцию 16 февраля 2016 г.)

Обсуждаются результаты выращивания изопериодных твердых растворов GaInPSbAs на подложках InAs из жидкой фазы в поле температурного градиента. В рамках модели регулярных растворов проведен анализ гетерофазных равновесий в системе Ga–In–P–Sb–As. Исследованы кинетика роста, состав, структурное совершенство и люминесцентные свойства изопериодных гетероструктур $Ga_z In_{1-z} P_x Sb_y As_{1-x-y} / InAs$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-38-60127, 16-08-01052, а также гранта Президента Российской Федерации МК-5115.2016.8.

1. Введение

Многокомпонентные твердые растворы на основе соединений A^3B^5 представляют интерес в качестве материалов для фотоприемных устройств в видимом и ИК-диапазонах спектра [1–6]. К таким материалам, в частности, относятся твердые растворы GaInPSbAs [7]. Однако получение этих твердых растворов сопряжено с рядом трудностей: наличие обширной области несмешиваемости, узкий коридор значений переохлаждения, необходимого для эпитаксиального роста из жидкой фазы, вероятность формирования нестехиометрических составов и т. д. [8,9]. Исследование гетероструктур на основе соединения A^3B^5 при создании лазеров и фотоприемников видимого и ИК диапазонов представляет повышенные требования к их структурному совершенству и стабильности [1–3]. По этой причине пятикомпонентные твердые растворы (ПТР) GaInPSbAs изопериодные InAs являются перспективными материалами для приборов ИК оптоэлектроники, так как достигается возможность независимого управления шириной запрещенной зоны, периодом кристаллической решетки и коэффициентом термического расширения (КТР) [4,6]. Целью данной работы является анализ фазовых равновесий гетеросистемы GaInPSbAs–InAs, выращивание изопериодных твердых растворов GaInPSbAs на подложках InAs и исследование их свойств.

2. Теоретический анализ

Расчет периодов кристаллических решеток $a(x, y, z)$, ширины запрещенной зоны (E_g) и условий изопериодического замещения для твердых растворов $A_x B_{1-x} C_y D_z E_{1-y-z}$ проводили по уравнениям работ [10–12]. Для расчета фазовых равновесий в гетеросистеме GaInPSbAs–InAs использованы уравнения

фазового равновесия „жидкость–твердое“ в приближении регулярных растворов [13,14] в интервале температур 773–973 К. При расчете фазовых равновесий в системе GaInPSbAs–InAs были использованы термодинамические параметры, оцененные в работах [15,16]. Результаты расчетов приведены на рис. 1. В гетероструктуре $Ga_z In_{1-z} P_x Sb_y As_{1-x-y} / InAs$ с увеличением концентрации фосфора в твердой фазе изопериодические линии смещаются в сторону больших концентраций сурьмы (y), как это видно из рис. 1, *a*. Отклонение от линейности функции $E_g(z)$ наблюдается в области составов с наибольшим упорядочением (рис. 1, *b*), хотя в данной системе оно не велико. Действительно, величины x_{Ga,P_x} и x_{In_{1-z},Sb_y} ненамного больше единицы.

Наиболее сильно упорядочение влияет на изменение ширины запрещенной зоны от состава (рис. 1, *c*) и в области максимума величины $\Delta a/a$ зависимость $E_g(z)$ меняет знак. При увеличении x соответствующие минимумы зависимости $E_g(z)$ смещаются в сторону меньших значений z . С ростом x величина E_g при фиксированном z увеличивается. В данной гетероструктуре имеются только прямозонные переходы. В табл. 1 приведены интервалы составов, в которых имеет место согласование КТР подложки и слоя (α) с различной точностью $\delta\alpha$. Анализ табл. 1 показывает, что согласование

Таблица 1. Области согласования по КТР твердого раствора $Ga_z In_{1-z} P_x Sb_y As_{1-x-y}$ с подложкой InAs (если $\delta\alpha = 20\%$, то $z_{min} = 0$ при всех x)

x	$\delta\alpha = 5\%$		$\delta\alpha = 20\%$	x	$\delta\alpha = 5\%$		$\delta\alpha = 20\%$
	z_{min}	z_{max}	z_{max}		z_{min}	z_{max}	z_{max}
0.0	0.0	0.15	0.87	0.5	0.0	0.40	1.0
0.2	0.0	0.25	1.0	0.6	0.05	0.45	1.0
0.3	0.0	0.30	1.0	0.7	0.10	0.52	1.0
0.4	0.0	0.35	1.0	0.8	0.15	0.65	1.0

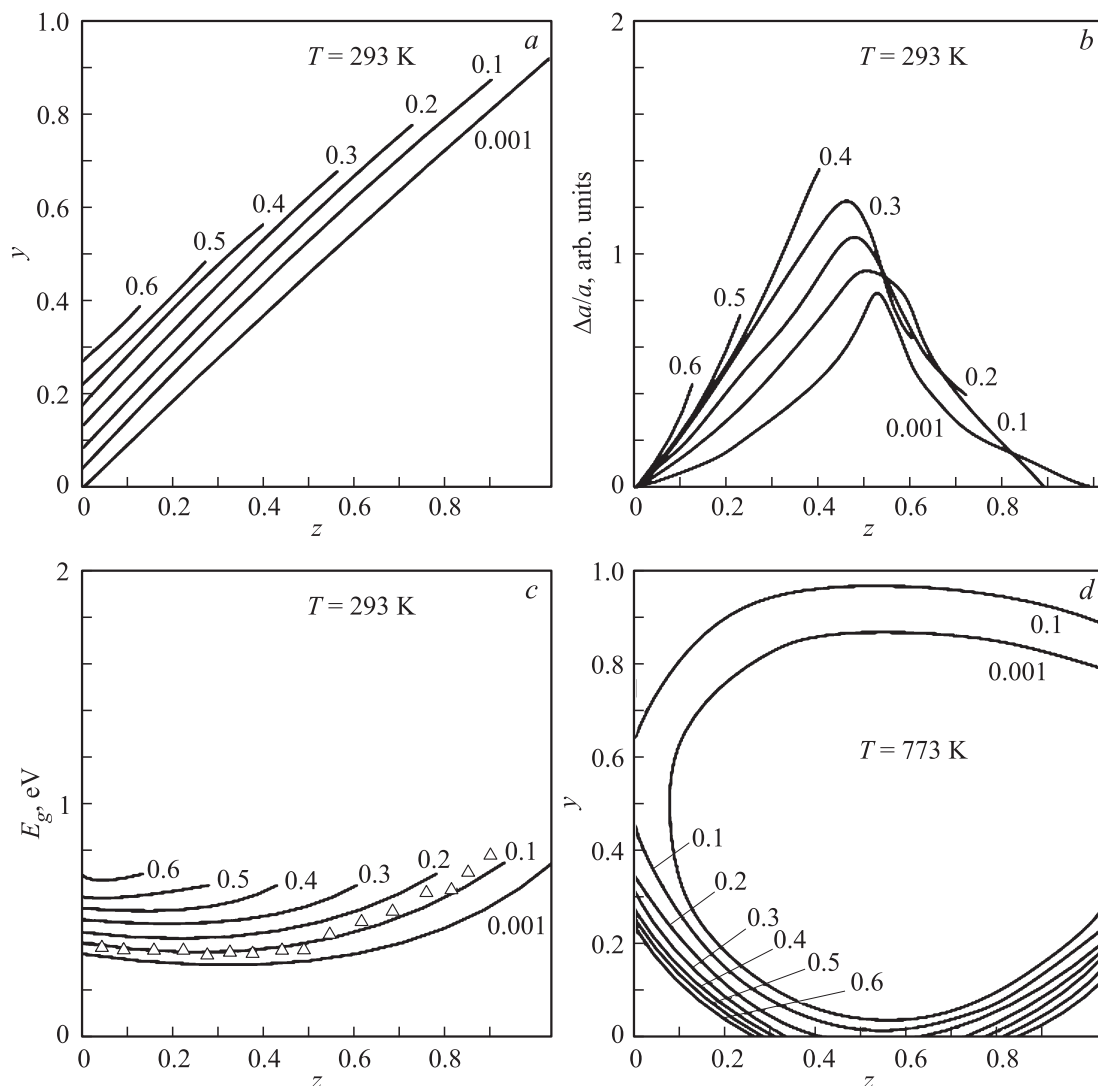


Рис. 1. Концентрационные зависимости изопериодических линий (а), эффекта упорядочения (б), ширины запрещенной зоны (с) и областей спиноподобного распада (д) в гетеросистеме $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{P}_x\text{Sb}_y\text{As}_{1-x-y}/\text{InAs}$. Точками обозначены экспериментальные данные. Значения x указаны на кривых.

по КТР проявляется в достаточно широких интервалах z и с ростом концентрации сурьмы улучшается. При малых z для этой системы разность КТР слоя и подложки практически равна нулю и в этом отношении данная гетероструктура является „идеальной“ [5].

На основе описанной нами ранее [4] методики был проведен расчет спиноподобных изотерм и областей несмешиваемости в гетероструктурах $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{P}_x\text{Sb}_y\text{As}_{1-x-y}/\text{InAs}$ (рис. 1, d). Область несмешиваемости существенно расширяется с ростом содержания сурьмы, и, следовательно, все больше изопериодических составов попадает в эту область.

Однако рассогласование параметров решетки и слоя на величину $\delta_\alpha = 0.1\%$ вызывает напряжение на гетерогранице, которые предотвращают спиноподобный распад и, следовательно, увеличивают область существования твердых растворов [7]. Расчеты показали, что при снижении температуры ширина области существования твер-

дых растворов GaInPSbAs уменьшается в соответствии со значениями молярных избыточных функций смешения компонентов в твердой фазе.

3. Экспериментальная часть

Выращивание твердых растворов GaInPSbAs осуществляется методом зонной перекристаллизации градиентом температуры (ЗПГТ) [17]. Подложкой служили пластины из арсенида индия, ориентированные в плоскости (100), n -типа проводимости с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, жидкая зона представляла собой раствор–расплавы (Ga , In , P , As , Sb). В качестве источника применяли предварительно синтезированные поликристаллы (для получения толстых $> 50 \mu\text{m}$ слоев) и пластины GaP и GaAs для тонких пленок. Толщина жидкой зоны изменялась от 10 до $200 \mu\text{m}$. Печь позво-

ляла изменять температуру от комнатной до 1000 К и градиент температуры в пределах 10–100 К/см. Камеру вначале откачивали до 10^{-3} Па, а затем наполняли водородом до 0.5 Па, и процесс ЗПГТ проводили в потоке водорода.

Процессу роста твердых растворов предшествовало экспериментальное исследование поверхности ликвидуса системы Ga–In–P–Sb–As методом визуального термического анализа „in situ“ по методике [15,16]. Изучение кинетики роста проводилось по методике, изложенной в работах [4,17].

Исследование топографии поверхности и состава гетероструктур GaInPSbAs/InAs проводили на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Solver HV и сканирующем раствором электронном микроскопе Quanta-200. Методом масс-спектропии вторичных нейтральных частиц [18] были получены концентрационные профили GaInPSbAs, выращенные на подложках InAs.

Оже-электронные спектры получены на спектрометре ЭСО-3 с энергоанализатором типа „цилиндрическое зеркало“. Энергетическое разрешение, измеренное по пику упруго отраженных электронов, составляло 0.25%. Измерения проводили при ускоряющем напряжении электронной пушки 3 кВ и токе пучка 3 мА, при этом диаметр пучка составлял 5 мкм. Давление остаточных газов в камере спектрометра при измерениях было 10^{-7} Па.

Измерения фотolumинесценции проводили в спектральном диапазоне от 950 до 1500 нм при температуре 300 К и в жидком азоте при 77 К в криостате с кварцевыми окнами. В качестве источника возбуждающего оптического излучения использовался инжекционный лазер с длиной волны 402 нм и мощностью излучения 8.5 мВт, фотодетектором служил германиевый фотодиод ФПУ ФДГ с рабочим спектральным диапазоном длин волн от 0.5 до 2 мкм. Возбуждение фотolumинесценции осуществлялось со стороны эпитаксиальных слоев.

Определение несоответствия параметров решеток подложки и слоя и оценка кристаллического совершенства гетероструктур осуществлялись методом регистрации рентгеновской дифракции. Съемка кривых дифракционного отражения (КДО) рентгеновского излучения проводилась на высоко разрешающем рентгеновском дифрактометре ТРС-1 в двухкристальной геометрии с использованием медного излучения. Помимо измерения $\Delta a/a$ определялись и анализировались полуширины КДО от эпитаксиального слоя и подложки. Учитывалась также форма дифракционных кривых и наличие (отсутствие) интерференционных максимумов, несущих информацию о качестве поверхности слоя и планарности границы раздела слой/подложка.

4. Результаты и их обсуждение

С целью проверки адекватности модели регулярных растворов, использованной нами при расчете фазовых

Таблица 2. Сопоставление экспериментальных данных с расчетными для гетеросистемы GaInAsSbP/InAs

Состав жидкой фазы, c_{at}				Состав слоя, λ			E_g , eV, 300 К
$x'_{As} \cdot 10^2$	x'_{Sb}	$x'_P \cdot 10^3$	$x'_{Ga} \cdot 10^3$	x_{Ga}	x_P	x_{Sb}	
$\frac{1.05^*}{1.02}$	$\frac{0.401}{0.402}$	$\frac{1.34}{1.10}$	$\frac{0.000}{0.000}$	0.00	0.297	0.141	0,482
$\frac{0.91}{0.97}$	$\frac{0.414}{0.398}$	$\frac{1.361}{1.14}$	$\frac{0.672}{0.35}$	0.03	0.281	0.154	0.470
$\frac{1.01}{1.05}$	$\frac{0.435}{0.416}$	$\frac{1.176}{1.02}$	$\frac{1.58}{0.61}$	0.08	0.256	0.158	0.485

Примечание. * В числителе — расчетные значения, в знаменателе — экспериментальные.

равновесий в системе Ga–In–P–Sb–As, экспериментальные исследования проводили для оптимальной температуры роста $T = 873$ К. Экспериментальную проверку расчетного ликвидуса пятикомпонентной системы проводили путем определения растворимости InAs в расплаве Ga–In–P–Sb–As по методу растворения подложки–источника. Составы жидкой фазы, необходимые для получения эпитаксиальных слоев твердых растворов с заданным содержанием компонентов, определяли, исходя из результатов расчета фазовой диаграммы. При этом концентрация сурьмы в жидкой фазе была неизменна и находилась на уровне $x'_{Sb} \approx 0.4$, а содержание фосфора и галлия варьировалась. Результаты теоретических расчетов и экспериментальных измерений представлены в табл. 2. Как видно, получено хорошее качественное и удовлетворительное количественное соответствие между расчетными и экспериментальными данными. Сравнивая экспериментальные и расчетные данные концентрации галлия в жидкой фазе, можно убедиться, что экспериментальные величины меньше расчетных. Это обстоятельство требует наличия в расплаве большей концентрации галлия, чем это следует из расчетных данных. Для мышьяка наблюдается достаточно хорошее совпадение расчета с экспериментальными данными. Все это позволяет считать корректным прогноз параметров взаимодействия и адекватности модели.

Скорость роста эпитаксиальных слоев в процессе ЗПГТ зависит от температуры, градиента температуры, состава и толщины жидкой зоны [4,7]. Результаты измерений скорости роста эпитаксиальных слоев GaInPSbAs на подложках InAs приведены на рис. 2. Зависимость $V(L)$ была исследована в интервале 10–200 мкм. При очень малых толщинах ($L < 10$ мкм) стабильного движения зоны достичь не удалось, она распалась на „капли“. Возмущение зоны, вызываемое микронеровностями поверхности подложки, приводит к ее разрыву. Эксперименты по движению зоны $L > 250$ мкм не проводились, поскольку это усложняет формирование гетерокомпозиций. Как и следовало ожидать, согласно современной теории ЗПГТ, на полученных зависимостях $V(L)$ наблюдается область роста скорости ($L < 80$ мкм)

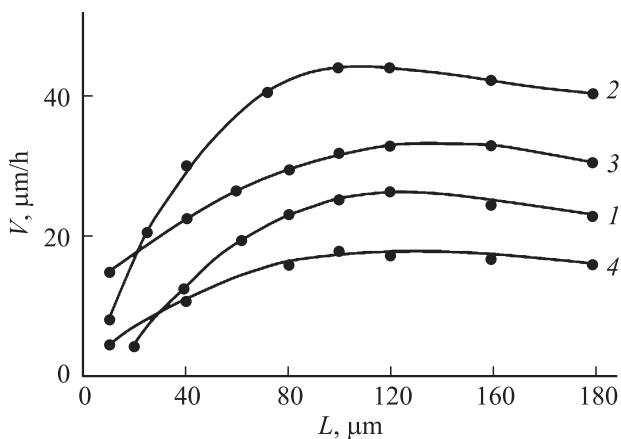


Рис. 2. Зависимость скорости роста твердого раствора $\text{Ga}_{0.08}\text{In}_{0.92}\text{As}_{0.58}\text{Sb}_{0.16}\text{Po}_{0.26}$ на подложках InAs (100) от толщины жидкой зоны L при градиенте температуры 20 K/cm (1), 60 K/cm (2) ($T = 873 \text{ K}$) и температуре 923 K (3), 773 K (4) ($G = 40 \text{ K/cm}$).

и область постепенного уменьшения V при больших толщинах зон ($L > 120 \mu\text{m}$). В 1-й области преобладает кинетический рост, в области спада скорости режим кристаллизации преимущественно диффузионный [4,17]. С увеличением температуры и градиента температуры во всем интервале толщин зон и одном составе компонентов наблюдается увеличение скорости роста (кривые 1–2, 3–4) рис. 2. Увеличение мышьяка в жидкой зоне снижает скорость роста во всем диапазоне толщин зон. При этом уменьшается диффузионный и кинетические параметры [4]. С ростом концентрации индия снижается скорость зоны в диффузионном режиме и увеличивается в кинетическом. Увеличение фосфора и сурьмы приводит к небольшому уменьшению скорости движения зоны в диффузионном режиме $L > 100 \mu\text{m}$ и к резкому сдвигу переходной области ($80\text{--}100 \mu\text{m}$) в сторону тонких зон. Следовательно, имеет место некоторое уменьшение диффузионного параметра и значительное увеличение кинетических коэффициентов [4]. Исследования показали, что значительный вклад в скорость роста эпитаксиальных слоев твердых растворов GaInPSbAs вносит температура, ее градиент и толщина зоны. Состав жидкой зоны хоть и влияет, но не в значительной степени.

Исследования состава толстых эпитаксиальных слоев $\text{GaInPSbAs}(\text{InAs})$ с помощью рентгеноспектрального микроанализатора показали однородное распределение компонентов по толщине, за исключением переходной области соответствующее составу блока–источника GaPAs [19]. Величина переходной области зависит от толщины жидкой зоны и начальной добавки сильно сегрегирующих компонентов. В случае отсутствия блока–источника в качестве подпитки компонентов с большим коэффициентом распределения, например $K_p > 100$, наблюдается значительный спад концентрации по толщине слоя. Анализ Оже-электронных спектров тонких пленок (рис. 3) показал, что на поверхности гетероструктуры присутствуют все компоненты твердого

раствора GaInPSbAs . С глубиной концентрация фосфора растет (от поверхности к гетерогранице), остальные компоненты Ga , In , Sb и As практически остаются постоянными. Соотношение атомных концентраций $\text{P}:\text{Ga}:\text{Sb}$ ($6.25:2.25:1$).

Качество поверхности и сколов гетероструктур зависело от согласования периодов решеток слоя и подложки [20]. Если периоды решеток слоя и подложки совпадают, то слои получаются с гладкой поверхностью, а граница гетероструктуры планарная, без дефектов. Если значения $\Delta a/a < 0$, то происходит подтравливание подложки и граница становится не планарной и дефектной. Если $\Delta a/a > 0$, то слои испытывают напряжения и сжатия. Исследования показали, что у всех изопериодных гетероструктур $\text{GaInPSbAs}/\text{InAs}$ полуширина КДО у слоев составляет не более $40''$, но не меньше чем у подложки. Типичная КДО от гладкой поверхности изопериодной гетероструктуры $\text{GaInPSbAs}/\text{InAs}$ приведена на рис. 4.

Результаты измерений полуширины линии качания дифракционного отражения $B''_{H/2}$ для изопериодных гетероструктур $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{P}_x\text{Sb}_y\text{As}_{1-x-y}/\text{InAs}$, выращенных

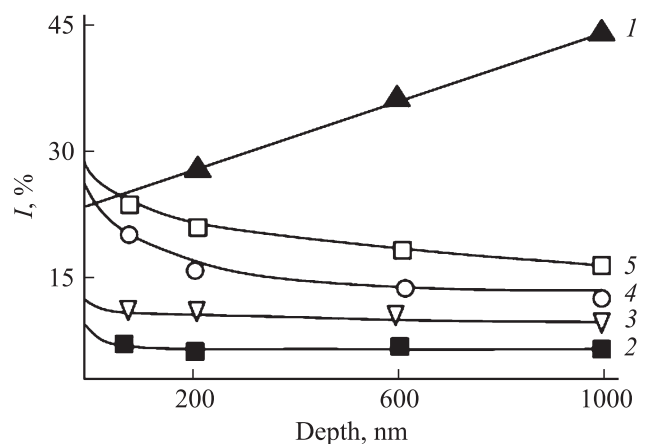


Рис. 3. Профиль распределения элемента по глубине эпитаксиального слоя твердого раствора $\text{GaInPSbAs}/\text{InAs}$: 1 — P , 2 — Sb , 3 — Ga , 4 — In , 5 — As .

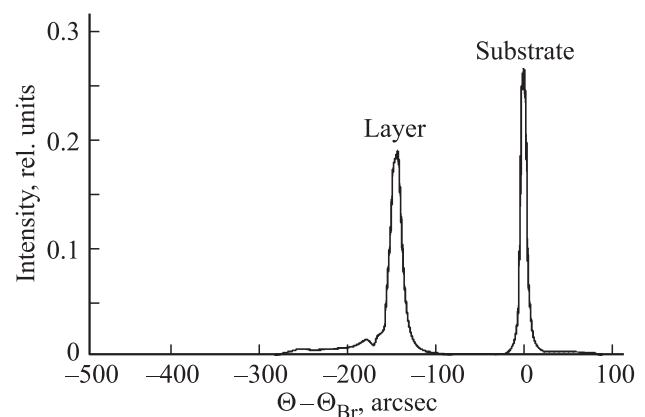


Рис. 4. Кривая дифракционного отражения гетероструктуры $\text{Ga}_{0.08}\text{In}_{0.92}\text{P}_{0.26}\text{Sb}_{0.16}\text{As}_{0.58}/\text{InAs}$ ($\Delta a/a = 1.4 \cdot 10^{-3}$).

при различных значениях градиента температуры и толщины зоны, представлены на рис. 5. Видно, что с увеличением градиента температуры, совершенство эпитаксиальных слоев ухудшается и $B''_{H/2}$ достигает значительных величин при $G > 60$ К/см. Этот результат обусловлен тем, что при $G > 60$ К/см нарушается тепловое и диффузионное равновесия, вследствие чего нарушается стабильность фронта кристаллизации и возникают микровключения на гетерогранице. Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что для гетероструктур с $\Delta a/a < 0$ при всех градиентах температуры полуширина кривых качания значительно выше, чем в случае $\Delta a/a = 0$.

Результаты исследования $B''_{H/2}$ от толщины жидкой зоны (рис. 5 кривая 3) показали, что для тонких зон (кривая 3) $L < 60 \mu\text{m}$ наблюдается значительное ухудшение качества эпитаксиальных слоев GaInSbAsPBi, особенно это проявляется для нанослоев ($\sim 30\text{--}100$ nm). При достаточно тонких зонах не происходит полного растворения зерен при перекристаллизации источника-поликристалла GaPAs с блоками до $30 \mu\text{m}$, в результате в эпитаксиальных нанослоях наблюдаются нановключения и соответственно нарушение планарности гетерограницы и однородности по составу. Для толщин зон $120 < L < 180 \mu\text{m}$ наблюдается наименьшее значение $B''_{H/2}$. Дальнейшее увеличение толщины зоны приводит к увеличению градиента температуры, вследствие чего нарушается стабильность фронта кристаллизации и возникают отклонения от стехиометрического состава из-за несоответствия скоростей кристаллизации растворения на границах жидкой зоны [7]. Этим и объясняется ухудшение качества гетероструктур, выраженное в уширении $B''_{H/2}$ (рис. 5, кривая 3).

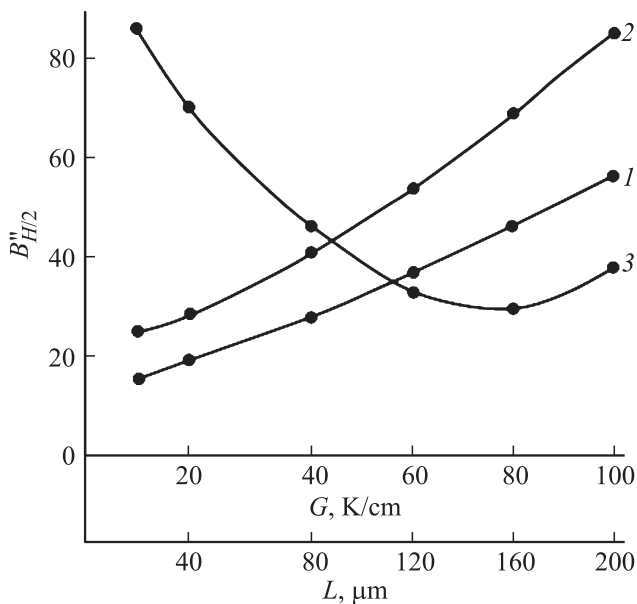


Рис. 5. Зависимость ширины линий качания на половине высоты $B''_{H/2}$ для гетероструктуры $\text{Ga}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{P}_{0.25}\text{Sb}_{0.15}\text{As}_{0.6}/\text{InAs}$ от градиента температуры: 1 — $L = 120 \mu\text{m}$, $\Delta a/a = 0$; 2 — $\Delta a/a < 0$; 3 — от толщины зоны при $G = 60$ К/см.

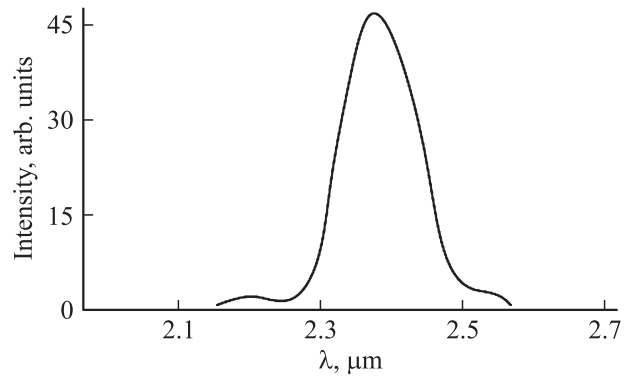


Рис. 6. Спектр фотолюминесценции гетероструктуры $\text{Ga}_{0.08}\text{In}_{0.92}\text{P}_{0.26}\text{Sb}_{0.16}\text{As}_{0.58}/\text{InAs}$ при $T = 77$ К.

Люминесцентные характеристики изопериодных гетероструктур GaInPSbAs/InAs определялись при 77 и 300 К. Типичный спектр фотолюминесценции, снятый с твердых растворов GaInPSbAs изопериодных с InAs, представлен на рис. 6. Длина волны фотолюминесценции твердых растворов, измеренная при 77 К, находилась в пределах $2.5\text{--}3.4 \mu\text{m}$. Для выполнения условия изопериодического замещения необходимо снижение содержания фосфора в твердой фазе, что уменьшает E_g . А увеличение концентрации Ga, In в твердом растворе при сохранении изопериодичности подложке InAs не приводит к изменению E_g в довольно широком диапазоне составов. Для твердых растворов GaInPSbAs экспериментальные значения E_g неплохо согласуются с расчетными в исследованном диапазоне составов (рис. 1, d). Максимум краевого излучения люминесценции (300 К) соответствовал максимуму расчетной кривой зависимости E_g от состава твердого раствора. Спектры люминесценции при 77 К имели несколько максимумов. Интенсивность высокоэнергетических типов не менялась при малых изменениях содержания арсенида галлия и арсенида индия в гетероструктуре GaInPSbAs/InAs. Полуширина пиков составляла $10\text{--}30$ meV. Низкоэнергетические пики, обусловленные комплексобразованием P и GaAs, P и InAs, имели относительную интенсивность не более 0.3.

5. Заключение

Изопериодные твердые растворы GaInPSbAs, контролируемые по толщине, составу и структурному совершенству, могут быть выращены на подложках InAs в поле температурного градиента из жидкой фазы. Однородное распределение компонентов по толщине достигается при использовании перекристаллизуемого источника GaPAs, жидких зон с толщиной более $80 \mu\text{m}$ и градиентом температуры меньше 60 К/см. Теоретический анализ фазовых равновесий показал удовлетворительное согласие с экспериментальными данными, что позволяет считать корректным прогноз параметров взаимодействия и адекватности модели расчета гетерофазных равновесий в системе GaInPSbAs–InAs.

Основными параметрами, определяющими качество поверхности, структурные и люминесцентные свойства изопериодных твердых растворов GaInPSbAs, выращенных на подложках InAs, являются состав раствора—расплава и источника, толщина жидкой зоны, температура и градиент температуры. Гладкая поверхность эпитаксиальных слоев твердых растворов GaInPSbAs(InAs) и планарная гетерограница без дефектов получаются в случае $G < 40 \text{ K/cm}$ и $\Delta a/a \approx 0$.

Список литературы

- [1] Л.М. Долгинов, П.Г. Елисеев, И. Исмаилов. Инжекционные излучательные приборы на основе многокомпонентных полупроводниковых твердых растворов. В кн.: Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника (1980). С. 3.
- [2] С. Ма, М. Dech, L. Tarof, I. Уп. IEEE Trans. Electron Devices В 42, 5, 810 (1995).
- [3] В.П. Хвостиков, Л.С. Лунин, В.В. Кузнецов. Письма в ЖТФ 29, 20, 33 (2003).
- [4] В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин. Пятикомпонентные твердые растворы соединений (новые материалы оптоэлектроники). СКНЦ ВШ, Ростов на/Д (1992). 193 с.
- [4] Ж.И. Алферов. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. ФТП 32, 1, 3 (1998).
- [5] В.В. Кузнецов, Л.С. Лунин, В.И. Ратушный. Гетероструктуры на основе четверных и пятерных твердых растворов соединений. СКНЦ ВШ, Ростов н/Д (2003). 376 с.
- [7] Д.Л. Алфимова, Л.С. Лунин, М.Л. Лунина. Неорган. материалы 50, 2, 127 (2014).
- [8] Л.С. Лунин, А.В. Благин, Д.Л. Алфимова. Физика градиентной эпитаксии многокомпонентных полупроводниковых гетероструктур. СКНЦ ВШ, Ростов н/Д (2008). 212 с.
- [9] Л.С. Лунин, Сысоев И.А. Техника градиентной эпитаксии полупроводниковых гетероструктур электронной техники. СКНЦ ВШ, Ростов н/Д (2008). 160 с.
- [10] В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, Т.А. Аскарян. Изв. вузов. Сер. физ. 7, 41 (1989).
- [11] В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, Т.А. Аскарян. Изв. вузов. Сер. физ. 7, 59 (1989).
- [12] В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, Т.А. Аскарян. Неорган. материалы 25, 4, 540 (1989).
- [13] В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, Т.А. Аскарян. Неорган. материалы 25, 11, 1778 (1989).
- [14] В.В. Кузнецов, П.П. Москвин, В.С. Сорокин. Неравновесные явления при жидкостной гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов. Металлургия, М. (1991). 176 с.
- [15] В.В. Кузнецов, Е.А. Когновицкая, М.Л. Лунина, Э.Р. Рубцов. Журн. физ. химии 85, 12, 1 (2011).
- [16] Б.М. Синельников, М.Л. Лунина. Неорган. материалы 48, 9, 995 (2012).
- [17] В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, В.П. Попов. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. Металлургия, М. (1987). 232 с.
- [18] А.В. Благин, Д.П. Валухов, Л.С. Лунин. Неорган. материалы 44, 8, 903 (2008).
- [19] В.И. Буддо, В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, И.Е. Марончук. Микроэлектроника АН СССР 7, 1, 70 (1978).
- [20] Д.Л. Алфимова, Л.С. Лунин, М.Л. Лунина. Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования 6, 103 (2014).