

## Эпитаксиальные слои InAsSbP с предельным содержанием фосфора, изоморфные с подложкой InAs

© В.В. Романов, М.В. Байдакова, К.Д. Моисеев<sup>†</sup>

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

(Получена 8 октября 2013 г. Принята к печати 21 октября 2013 г.)

Представлены экспериментальные результаты наращивания многокомпонентных твердых растворов  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$  для составов  $0.43 < x < 0.72$  методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений при низкой температуре осаждения ( $T < 520^\circ\text{C}$ ) с использованием металлорганического источника мышьяка. Предложена модель роста эпитаксиального слоя InAsSbP, изоморфного с подложкой InAs, при заданном значении соотношения концентрации фосфора и сурьмы в твердой фазе.

### 1. Введение

Четырехкомпонентные твердые растворы InAsSbP являются одним из базовых элементов при создании оптоэлектронных приборов, работающих в среднем инфракрасном диапазоне 2–5 мкм. Наиболее часто их используют как потенциальные барьеры для локализации носителей заряда в более узкозонной активной области светодиодов, лазеров и фотодиодов [1–5]. Согласно закону Вегарда [6], эпитаксиальные слои в системе твердых растворов In-As-Sb-P, изоморфные бинарному соединению арсенида индия, могут быть получены на подложке InAs в широком интервале составов (до 69% фосфора в твердой фазе). При этом могут быть использованы различные методы эпитаксиального наращивания, такие как жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ), газофазная эпитаксия из металлорганических соединений (МОГФЭ) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) [7–11]. Наиболее надежным и воспроизводимым методом получения изоморфных слоев  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$  является ЖФЭ, однако для данного метода эпитаксиального наращивания максимальное значение фосфора в твердой фазе  $x = 0.39$  ограничено областью существования составов, определенной по условиям молекулярности и спиноподобного распада твердого раствора при температуре  $540^\circ\text{C}$  [8]. Применяя метод МОГФЭ, удалось получить изоморфные слои с максимальным значением  $x = 0.44$  при температуре  $600^\circ\text{C}$  [9]. Понижение температуры эпитаксии позволило продвинуться до значений  $x = 0.70$ , однако структурные свойства гетероструктур и спектры фотолюминесценции указывали на сравнительно плохое качество полученных слоев [10]. Для технологии МОГФЭ область существования твердых растворов InAsSbP была ограничена достаточно высокой температурой эпитаксии при использовании гидридных газов в качестве источников элементов пятой группы (например, арсина как источника мышьяка) [12]. Методом МПЭ также были получены четырехкомпонентные твердые растворы в широком интервале составов ( $0 < x < 0.7$ ), однако исследования показали, что при

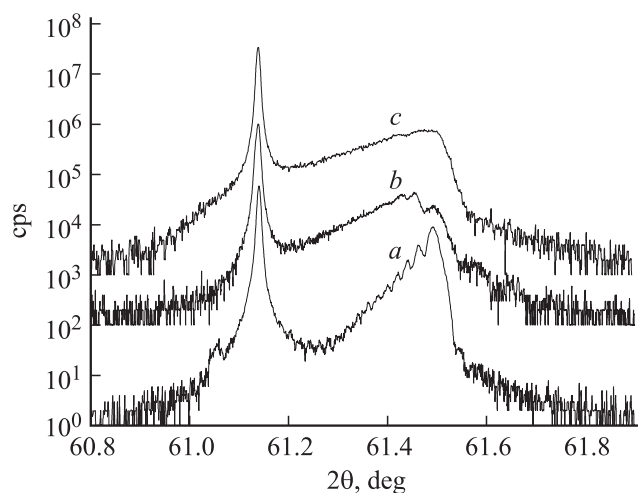
высоком содержании фосфора с уменьшением содержания мышьяка в осажденных слоях  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$  наблюдался распад твердой фазы [11]. Таким образом, получение качественных эпитаксиальных слоев с большим содержанием фосфора в твердой фазе до сих пор является актуальной технологической задачей. В данной работе представлены результаты наращивания многокомпонентных твердых растворов  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$  для составов  $0.43 < x < 0.72$  методом МОГФЭ при низкой температуре эпитаксии с использованием металлорганических источников мышьяка.

### 2. Технология изготовления структур и методика экспериментов

Эпитаксиальные слои четырехкомпонентного твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$  наращивались методом МОГФЭ в кварцевом реакторе горизонтального типа при атмосферном давлении на подложках InAs, ориентированных в плоскости (001). Источниками компонентов третьей и пятой групп для эпитаксиального роста являлись триметилиндий (TMIn), триметилстиббин (TMSb), третбутиларсин (tBAs) и фосфин ( $\text{PH}_3$ ), разбавленный до содержания 20% в водороде. Рост твердого раствора InAsSbP проводился при температуре  $510^\circ\text{C}$  при соотношении реагентов пятой к третьей группе  $V/III > 10$ . Величина соотношения  $\text{TMSb}/\text{PH}_3$  поддерживалась постоянной для всех составов газовой фазы. Следует отметить, что благодаря низкой температуре пиролиза применение третбутиларсина в качестве источника мышьяка при пониженных температурах эпитаксии более предпочтительно по сравнению с широко используемым арсином [13]. Кроме того, использование данного металлорганического соединения вместо арсина позволяет уменьшить число паразитных реакций гидридных газов с радикалами металлорганических соединений пятой и третьей групп в газовой фазе, что обеспечивает контролируемый рост четверного твердого раствора.

Измерения состава твердых растворов InAsSbP проводились методом рентгеноспектрального микроанализа на приборе Camebax фирмы Cameca (Франция).

<sup>†</sup> E-mail: mkd@iropt2.ioffe.ru



**Рис. 1.** Дифракционные кривые около отражения (004) InAs для эпитаксиального слоя в системе твердых растворов InAsSbP в зависимости от состава: *a* — InAs<sub>0.40</sub>Sb<sub>0.17</sub>P<sub>0.43</sub>, *b* — InAs<sub>0.20</sub>Sb<sub>0.26</sub>P<sub>0.56</sub>, *c* — InSb<sub>0.29</sub>P<sub>0.71</sub>.

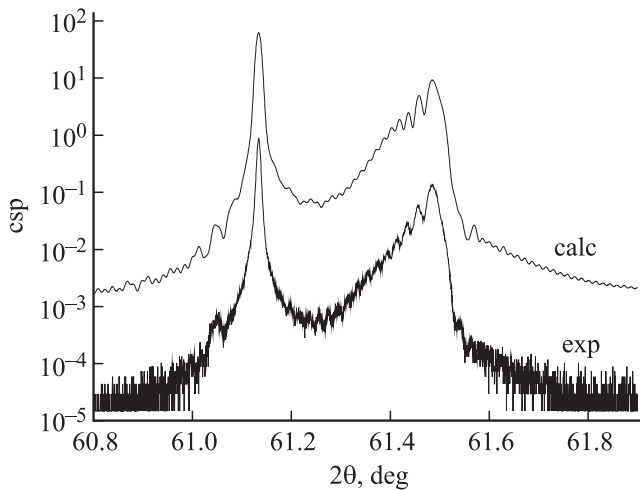
Рентгенодифракционные исследования полученных эпитаксиальных слоев производились на многофункциональном рентгеновском дифрактометре D8 Discover (Bruker-AXS, Германия) в параллельной геометрии пучка рентгеновского излучения. Источником рентгеновского излучения мощностью 6 кВт является трубка с вращающимся медным анодом ( $\lambda = 0.15406$  нм). Полуширина первичного пучка  $\Delta L$  не превышала  $12''$ , что обеспечивалось использованием четырехкратного Ge(220) прорезного кристалла-монокроматора. Детальный анализ рентгеновской дифракционной картины проводился путем построения модельных кривых в рамках программного пакета „Leptos“ фирмы Bruker. Алгоритм расчета дифракционных кривых основывался на применении рекурсивного матричного формализма (RMF) в рамках динамической теории рассеяния рентгеновских лучей [14]. Вариационными параметрами были выбраны толщина и состав эпитаксиального слоя, причем состав твердого раствора был ограничен значениями, полученными из анализа данных микроанализа. Расчет в рамках RMF, используемый в пакете „Leptos“, позволил ввести дополнительный параметр, описывающий некогерентность дифрагированного излучения вследствие различных несовершенств в кристаллической структуре образца, как то наличие объемных дефектов, деформаций в результате дефектов внедрения, мозаичности и т.д. Традиционно этот параметр называют степенью мозаичности ( $M$ ).

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Эпитаксиальные слои твердого раствора InAs<sub>1-x-y</sub>Sb<sub>y</sub>P<sub>x</sub> с высоким содержанием фосфора были получены в интервале составов  $0.4 < x < 0.72$ . Из

рис. 1 видно, что дифракционный максимум от эпитаксиального слоя располагается в области отрицательных значений рассогласования постоянной решетки, имеет пилообразную форму и достигает максимального значения по интенсивности около значения  $\Delta a/a = -0.0052$ . Постоянство углового положения максимума от слоя относительно максимума от подложки можно объяснить особенностью выбранного способа эпитаксиального наращивания при использовании третбутилларсина и поддержания постоянного соотношения компонент сурьмы и фосфора в газовой фазе. Наличие толщинных осцилляций свидетельствует о планарности гетерограниц эпитаксиального слоя, что позволяет предположить, что наращивание твердого раствора InAs<sub>0.40</sub>Sb<sub>0.17</sub>P<sub>0.43</sub> осуществлялось в планарном режиме (2D-рост). Данное предположение подтверждается тем, что полученные слои четырехкомпонентных твердых растворов InAsSbP демонстрировали зеркальную внешнюю поверхность без видимого присутствия протяженных дефектов и дислокаций несоответствия. При этом полуширина дифракционного пика от подложки InAs составляла  $\Delta L = 12-13''$  (рис. 1, кривые *a* и *b*). В случае трехкомпонентного твердого раствора InSb<sub>0.29</sub>P<sub>0.71</sub> (рис. 1, кривая *c*) наблюдалось уширение пика  $\Delta L > 20''$  и визуальное увеличение шероховатости поверхности эпитаксиального слоя, что может быть объяснено нарушением планарности гетерограницы подложка/слой и наличием дефектов на ней. Как показано на рисунке, дифракционный пик от эпитаксиального слоя как трехкомпонентного, так и четырехкомпонентного твердого раствора демонстрирует определенную асимметрию, вызванную наличием градиентной составляющей в направлении наращивания гетероструктуры. Отметим, что для четырехкомпонентных твердых растворов (рис. 1, кривые *a* и *b*) осцилляционная картина меняется в пределах небольших вариаций углов дифракции, демонстрируя явно выраженные максимумы на краях пика, затухающие к его середине. При этом меняется не только интенсивность осцилляционной картины, но и расстояние между осцилляционными максимумами. Известно, что подобный вид дифракционных кривых соответствует твердому раствору, например, с градиентно-изменяющимся параметром решетки [15].

Для выявления природы градиентного изменения параметра решетки в эпитаксиальных слоях было проведено моделирование дифракционных кривых в предположении изменяющегося состава в твердом растворе. Модели строились с учетом особенности ростового процесса и данных рентгеновского микроанализа. С целью минимизации количества варьируемых параметров и, следовательно, повышения достоверности их определения [16] была использована модель с линейным возрастанием концентрации фосфора и(или) понижением концентрации мышьяка вдоль направления роста в твердом растворе InAs<sub>1-x-y</sub>Sb<sub>y</sub>P<sub>x</sub> при неизменной концентрации остальных элементов. В результате была получена совокупность структурных параметров, как то толщина



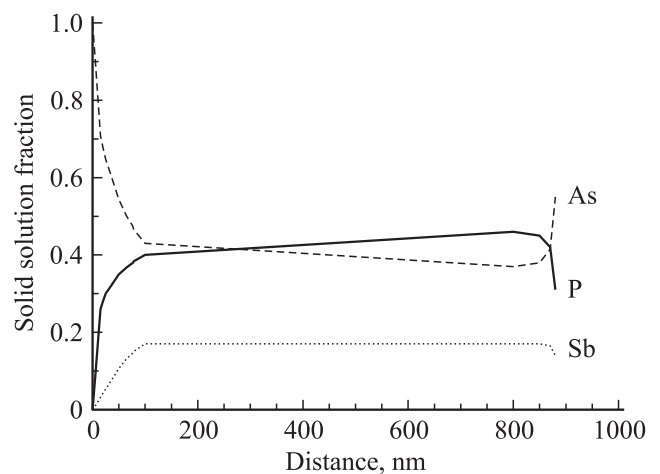
**Рис. 2.** Сравнение экспериментальной (exp) дифракционной кривой около отражения (004)  $\text{InAs}$  с модельной (calc) для эпитаксиального слоя твердого раствора  $\text{InAs}_{0.40}\text{Sb}_{0.17}\text{P}_{0.43}$ .

и состав эпитаксиального слоя, а также параметр  $M$ , описывающий его структурное совершенство. Наиболее достоверными считались такие параметры, на основе которых полученные модельные кривые наилучшим образом воспроизводили вид экспериментальных кривых, как по положению, так и интенсивности максимумов и основных особенностей (рис. 2).

Поскольку термодинамические условия эпитаксиальных процессов и режимы роста для всех образцов поддерживались одинаковыми, то для гетероструктур на основе как трехкомпонентного, так и четырехкомпонентного твердых растворов строилась единая структурная модель. Описание в рамках единой модели дифракционной кривой для слоя трехкомпонентного твердого раствора  $\text{InSb}_{0.29}\text{P}_{0.71}$ , характеризующегося отсутствием атомов мышьяка в кристаллической структуре, оказалось возможным при введении дополнительного параметра, в качестве которого был выбран параметр мозаичности  $M$ . При этом величина параметра  $M$  убывает линейно по направлению наращивания от нижней границы раздела слой/подложка к верхней гетерогранице, что свидетельствует об улучшении структурного совершенства изоморфного эпитаксиального слоя вследствие процесса самоорганизации твердого раствора. Из представленных на рис. 1 образцов трехкомпонентному твердому раствору соответствовало наибольшее значение параметра  $M$ , что выражалось в ухудшении кристаллического совершенства слоя, в большей ширине дифракционного пика подложки  $\Delta L$  и отсутствии толщинных осцилляций на дифракционной кривой. Ухудшение кристаллического совершенства может быть связано с преимущественным образованием связей  $\text{In}-\text{P}$  в начальный момент эпитаксиального наращивания  $\text{InSbP}$  на бинарной поверхности  $\text{InAs}$ . Увеличение доли мышьяка в твердой фазе четырехкомпонентного твердого раствора  $\text{InAsSbP}$  приводило к появлению градиента по составу

твердой фазы, при этом очевидно, что эпитаксиальный слой  $\text{InAs}_{0.40}\text{Sb}_{0.17}\text{P}_{0.43}$  обладал наибольшим градиентом по составу. Четкая картина толщинных осцилляций и малая полуширина пика от подложки указывали на преобладающее влияние градиента состава над параметром мозаичности. Появление градиента состава в твердом растворе  $\text{InAsSbP}$  при введении в газовую фазу третбутилларсина, по всей вероятности, связано с возникновением переходных процессов в начале роста твердого раствора и формированием диффузионно-десорбционных потоков элементов пятой группы.

По результатам моделирования слой четырехкомпонентного твердого раствора  $\text{InAs}_{0.40}\text{Sb}_{0.17}\text{P}_{0.43}$  можно схематически представить как структуру, состоящую как минимум из трех градиентных участков, считая переходные слои в начале и конце эпитаксиального процесса (рис. 3). Как видно из рисунка, переходные слои характеризуются достаточно сильным градиентом по составу твердой фазы, что связано с формированием потоков триметилиндия в реакторе. В начале эпитаксиального наращивания для препятствования осаждению элементарного индия на поверхность подложки  $\text{TMIIn}$  напускался в реактор с небольшой задержкой по времени (5–10 с) после напуска источников пятой группы. Это приводило к тому, что формирование потока элемента третьей группы к поверхности подложки происходило на фоне уже сформированных избыточных парциальных давлений элементов пятой группы над поверхностью подложки. В отсутствие атомов индия над поверхностью подложки в основном протекают абсорбционно-десорбционные процессы с участием элементов пятой группы. После напуска триметилиндия в реактор запускался процесс роста твердого раствора, при этом происходило обеднение элементами пятой группы приповерхностного слоя газовой фазы и начинали формироваться диффузионные потоки. Основная



**Рис. 3.** Профиль состава твердого раствора  $\text{InAsSbP}$  вдоль направления роста (перпендикулярности плоскости подложки  $\text{InAs}(001)$ ), полученный из расчетных данных после обработки кривой „calc“ из рис. 2.

часть слоя твердого раствора представляла собой структуру с плавным возрастанием концентрации фосфора вдоль направления роста, выходящим на насыщение при достижении определенной величины, определяемой условиями в газовой фазе. В конце эпитаксиального наращивания прекращение подачи реагентов в реактор происходило одновременно, что существенно уменьшало толщину переходного слоя вблизи поверхности образца.

Благодаря переходным процессам в начальный момент роста на подложке осаждается твердый раствор, обогащенный InAs. Поскольку переходные процессы влияют на формирование диффузионных потоков элементов пятой группы через приповерхностный слой в течение дальнейшего роста твердого раствора, то наращивание эпитаксиального слоя приводит к обеднению компонентами пятой группы приповерхностного слоя, и время доставки реагентов данной группы к рабочей поверхности образца возрастает. В начале роста в наращиваемый слой InAsSbP преимущественно встраивается мышьяк, и обеднение данным компонентом приповерхностного слоя начинается раньше. Более быстрое обеднение мышьяком приповерхностного слоя приводит к тому, что диффузионное расстояние для радикалов мышьяка в газовой фазе, а следовательно, и время диффузии в течение роста твердого раствора становятся больше, чем для других компонентов пятой группы. Различие по времени диффузии между реагентами приводит к уменьшению содержания мышьяка в твердой фазе, что в свою очередь приводит к возрастанию фосфора в четырехкомпонентном твердом растворе. Изменения содержания мышьяка и фосфора в направлении роста слоя происходят до тех пор, пока полностью не сформируются диффузионные потоки всех элементов пятой группы, и время доставки каждого из них станет практически постоянным. Начальный переходной слой играет роль буфера для дальнейшего наращивания четырехкомпонентного твердого раствора, что способствует планарному росту эпитаксиального слоя InAsSbP. При понижении концентрации третбутилларсина, напускаемого в газовую фазу, наряду с градиентом твердого раствора по составу проявляется вклад параметра мозаичности  $M$  из-за ухудшения кристаллического качества выращиваемой структуры. При отсутствии третбутилларсина в газовой фазе, когда осуществляется рост трехкомпонентного твердого раствора InSbP, переходные процессы, связанные с формированием потока TMIп в реакторе, не оказывают столь существенного влияния на состав твердого раствора. Это связано с тем, что равновесные парциальные давления фосфора и сурьмы над растущим слоем практически одинаковые [17].

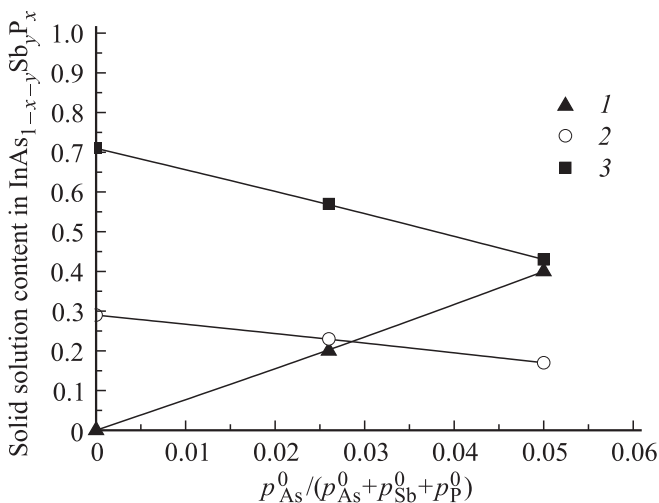
Результаты, полученные из анализа структурных особенностей выращенных гетероструктур, можно объяснить на основе данных о динамике газового потока в реакторе. Специфика роста твердого раствора в горизонтальном реакторе при атмосферном давлении заключается в том, что скорость доставки реагента к зоне

роста достаточно низкая, что ведет к размытию фронтов потоков реагентов. При этом концентрация адатомов у поверхности подложки в начале эпитаксиального процесса возрастает постепенно, что приводит к образованию относительно неподвижного слоя у поверхности подложки, так называемого пограничного слоя [18]. Разложение реагентов в основном происходит либо в горячем пограничном слое, либо на самой подложке. Толщина пограничного слоя растет вдоль направления потока реагентов. Поступающая над подложкой газовая фаза при температуре эпитаксии содержит большую концентрацию реагентов, чем в пограничном слое с подложкой, т. е. газ в реакторе сильно пересыщен, однако на границе газ–твердое тело за счет растущего слоя устанавливается равновесие. Данные условия приводят к тому, что реагенты, находящиеся относительно далеко от поверхности подложки, кинетически диффундируют сквозь пограничный слой к подложке. Диффундируя, реагенты разлагаются, высвобождая атомы веществ, необходимых для роста слоя. Если скорость диффузии через пограничный слой превышает скорость разложения реагентов, то заметное влияние на рост эпитаксиальной пленки оказывает кинетика поверхностных процессов (адсорбция на поверхности подложки или растущего слоя, поверхностные реакции реагентов, движение атомов, молекул или сегментов по поверхности подложки или растущего слоя, химические реакции на ступенях роста и др.). В диффузионном режиме скорость эпитаксиального роста определяется скоростью диффузии реагентов через пограничный слой. Если отношение в газовой фазе элементов пятой к третьей группе намного больше единицы ( $V/III = 10$ ), то все атомы третьей группы будут встраиваться в наращиваемый слой, следовательно, скорость диффузии через пограничный слой реагентов индия будет определять скорость роста эпитаксиального слоя твердого раствора.

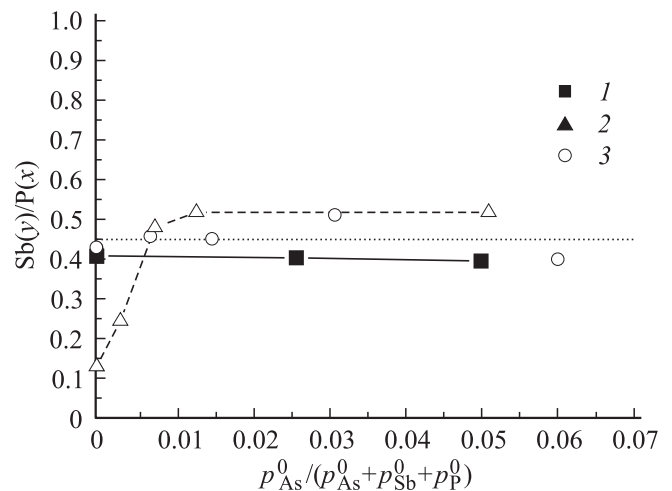
В условиях атмосферного давления, когда время доставки реагентов к зоне роста достаточно велико, фронт потока реагента индия достаточно сильно размывался, и концентрация адатомов индия у поверхности подложки в начале эпитаксиального процесса возрастала постепенно. Таким образом, на начальном этапе наращивания большую вероятность вхождения в твердую фазу имеет мышьяк, вследствие наименьшей величины равновесного парциального давления над рабочей поверхностью слоя среди компонентов пятой группы газовой фазы [17]. Кроме того, свободные связи на поверхности подложки InAs также способствуют тому, чтобы рост четырехкомпонентного твердого раствора начинался с формирования бинарного соединения арсенида индия. При последующем повышении концентрации индия на поверхности растущего слоя вероятность вхождения мышьяка уменьшается, и в твердую фазу начинает активно встраиваться фосфор вследствие наибольшего коэффициента сегрегации соединения InP по отношению к остальным бинарным соединениям на основе индия [19] с последующим вхождением сурьмы благодаря эффекту

самоорганизации изоморфных твердых растворов. Таким образом, во время переходных процессов, когда формируется поток источника индия над поверхностью подложки, в растущем слое содержание мышьяка резко падает, а фосфора растет. Поскольку при наращивании эпитаксиальных слоев соотношение между  $\text{TMSb}$  и  $\text{PH}_3$  в газовой фазе поддерживалось постоянным, составы начальной твердой фазы переходных слоев для исследуемых образцов будут одинаковы, что и определяет положение пика на дифракционной кривой от твердого раствора (см. рис. 1).

Как было упомянуто выше, изменение состава твердого раствора осуществлялось только за счет изменения количества третбутиларсина, которое влияло на содержание фосфина в газовой фазе, при этом соотношение между  $\text{TMSb}$  и  $\text{PH}_3$  в газовой фазе поддерживалось постоянным. Введение третбутиларсина производилось пропорционально, увеличиваясь равными долями для каждого последующего состава газовой фазы, который соответствовал определенному составу эпитаксиального слоя (рис. 4). Из рисунка видно, что все три компонента пятой группы в твердой фазе линейно зависят от количества третбутиларсина, вводимого в газовую фазу, что обеспечивает хорошую прогнозируемость заданного состава при наращивании твердого раствора  $\text{InAsSbP}$  с высоким содержанием фосфора ( $x > 0.5$ ) и контролируемое дозирование мышьяка при его достаточно низкой концентрации в твердой фазе. Наблюдаемый характер зависимостей объясняется отсутствием паразитных реакций с участием третбутиларсина и эффективным разложением данного металлоорганического соединения при низких температурах эпитаксии по сравнению с гидридными соединениями мышьяка (арсин) [12].



**Рис. 4.** Влияние содержания  $\text{SbAs}$  в газовой фазе на состав твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$  при температуре эпитаксии  $510^\circ\text{C}$  и фиксированных потоках реагентов  $\text{TMSb}$  и  $\text{PH}_3$ , напускаемых в реактор: 1 — содержание мышьяка в твердой фазе, 2 — содержание сурьмы в твердой фазе, 3 — содержание фосфора в твердой фазе.



**Рис. 5.** Зависимости соотношения мольных долей сурьмы и фосфора ( $y/x$ ) от содержания  $\text{tBAs}$  в газовой фазе: 1 — результаты данной работы, 2 — данные из работы [7], 3 — данные из работы [10].

Следует также отметить эффект самоорганизации твердой фазы в процессе наращивания эпитаксиального слоя  $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$ : соотношение компонентов сурьмы и фосфора в четверном твердом растворе сохранялось постоянным  $y/x = 0.4$  (рис. 5), что было обусловлено выбранной величиной соотношения  $\text{TMSb}/\text{PH}_3$ , которая поддерживалась постоянной для всех составов газовой фазы. Отметим, что пунктирной линией показано расчетное значение соотношения изопериодности твердого раствора  $\text{InAsSbP}$  с подложкой  $\text{InAs}$  ( $y/x = 0.46$ ), которое было оценено с учетом закона Вегарда [6]. Как видно из рисунка, твердые растворы с большим содержанием фосфора ( $x > 0.5$ ), полученные в работе [9], располагались вдоль границы области несмешиваемости и не отвечали условию изоморфности по параметру решетки с бинарным соединением арсенида индия [20]. В работе [10] авторам удалось приблизиться по параметру кристаллической решетки четверного твердого раствора к расчетной величине, однако сильное несоответствие экспериментальных результатов структурных и люминесцентных свойств с теоретически расчетными данными позволяет усомниться в изоморфности полученных слоев. В настоящей работе мы показали, что, используя металлоорганические источники вместо гидридных газов, можно получать изоморфные слои во всем интервале составов твердой фазы для эпитаксиальных слоев в системе твердых растворов  $\text{In-As-Sb-P}$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, при низких температурах ( $T < 520^\circ\text{C}$ ) для формирования твердого раствора  $\text{InAsSbP}$  с высоким содержанием фосфора при наращивании методом МОГФЭ применение металлоорганических соединений

является определяющим фактором по сравнению с вкладом гидридных соединений компонентов пятой группы. Было показано, что асимметрия дифракционного пика от слоя, вызванная градиентом состава, зависит от количества мышьяка в твердом растворе, и при отсутствии атомов мышьяка в кристаллической структуре слоя отмечен наименьший градиент. Управление химической структурой осажденных слоев в системе твердых растворов In-As-Sb-P при сохранении величины постоянной кристаллической решетки арсенида индия может быть использовано при формировании матричных слоев в наногетероструктурах на основе объектов с пониженной размерностью (квантовыми штрихами, квантовыми точками и др.) в системе InSb/InAs [21,22].

Авторы выражают благодарность Т.Б. Поповой за проведение измерений микроанализа. Данные рентгеновского микроанализа и рентгеновской дифракции были получены на оборудовании регионального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Работа выполнена в рамках программы Отделения физических наук РАН „Физика новых материалов и структур“ и частично поддержана грантом РФФИ (11-02-00234а).

## Список литературы

- [1] И.А. Андреев, А.Н. Баранов, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.В. Пенцов, Ю.П. Сморгачева, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **18**, 50 (1992).
- [2] Г.Г. Зегря, М.П. Михайлова, Т.И. Данилова, А.Н. Именков, К.Д. Моисеев, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **33**, 351 (1999).
- [3] А.С. Головин, А.А. Петухов, С.С. Кижасев, Ю.П. Яковлев. Письма в ЖТФ, **37**, 15 (2011).
- [4] Т.Н. Данилова, А.Н. Именков, К.Д. Моисеев, И.Н. Тимченко, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **20**, 20 (1994).
- [5] В.В. Романов, Э.В. Иванов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, К.Д. Моисеев, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **27**, 80 (2001).
- [6] L. Vegard. Zeitschrift Phys., **5**, 17 (1921).
- [7] E.R. Gertner, D.T. Cheung, A.M. Andrews, J.T. Longo. J. Electrochem. Soc., **6**, 163 (1977).
- [8] А.М. Литвак, К.Д. Моисеев, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ЖПХ, **67**, 1957 (1994).
- [9] T. Fukui, Y. Horikoshi. Jpn. J. Appl. Phys., **20**, 587 (1981).
- [10] W.J. Duncan, A.S.M. Ali, E.M. Marsh, P.C. Spurdens. J. Cryst. Growth, **143**, 155 (1994).
- [11] K.J. Cheetham, A. Krier, I.I. Patel, F.L. Martin, J.-S. Tzeng, C.-J. Wu, H.-H. Lin. J. Phys. D: Appl. Phys., **44**, 85405 (2011).
- [12] G.B. Stringfellow. Cryst. Growth, **137**, 212 (1994).
- [13] S.K. Haywood, R.W. Martin, N.J. Mason, P.J. Walker. J. Cryst. Growth, **97**, 489 (1989).
- [14] S.A. Stepanov, E.A. Kondrashkina, R. Kohler, D.V. Novikov, G. Materlik, S.M. Durbin. Phys. Rev. B, **57**, 4829 (1998).
- [15] Д.К. Боуэн, Б.К. Таннер. *Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография* (СПб., Наука, 2002).
- [16] A. Zhylyk, A. Benediktovitch, I. Feranchuk, K. Inaba, A. Mikhalychev, A. Ulyanenko. J. Appl. Cryst., **46**, 919 (2013).
- [17] A. Koukitu, H. Seki. J. Cryst. Growth, **76**, 233 (1986).
- [18] G.B. Stringfellow. Rep. Progr. Phys., **45**, 469 (1982).
- [19] А.М. Литвак, Н.А. Чарыков. ЖФХ, **64**, 2331 (1990).
- [20] А.Н. Баранов, А.М. Литвак, К.Д. Моисеев, Н.А. Чарыков, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ЖПХ, **63**, 976 (1990).
- [21] K. Moiseev, V. Romanov, P. Dement'ev, M. Mikhailova. J. Cryst. Growth, **318**, 379 (2011).
- [22] K.D. Moiseev, Ya.A. Parkhomenko, V.N. Nevedomsky. Thin Sol. Films, **543**, 74 (2013).

Редактор Т.А. Полянская

## InAsSbP epitaxial layers with ultimate phosphorus content isomorphic with InAs substrate

V.V. Romanov, M.V. Baidakova, K.D. Moiseev

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

**Abstract** Experimental results on an overgrowth of multicomponent InAs<sub>1-x-y</sub>Sb<sub>y</sub>P<sub>x</sub> solid solutions in the content range of 0.43 < x < 0.72 obtained by metalorganic vapor phase epitaxy at low temperature deposition (T < 520°C) under using of metalorganic source of arsenic have been presented. There was proposed a model of growing of the InAsSbP epitaxial layer, isomorphic with InAs substrate, at the given ratio between phosphorus and antimony content in the solid phase.