

01;05;06;12

Формирование многослойных упругонапряженных гетерокомпозиций методом жидкофазной эпитаксии

II. Моделирование процесса создания гетерокомпозиций на основе твердых растворов системы индий–мышьяк–сурьма–висмут

© Р.Х. Акчурина¹, Д.В. Комаров²

¹Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В.Ломоносова, 117571 Москва, Россия

²Институт химических проблем микроэлектроники, 117571 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 13 июля 1995 г. В окончательной редакции 14 мая 1996 г.)

Проведено моделирование процесса формирования упругонапряженных гетерокомпозиций типа $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}$ и $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_y\text{Bi}_y$ методом "капиллярной" ЖФЭ. Выявлены закономерности изменения ширины запрещенной зоны E_g и толщины d эпитаксиальных слоев от условий проведения процесса. Показано, что вследствие резкого возрастания скорости эпитаксиального осаждения с повышением температуры ЖФЭ успешный рост эпитаксиальных слоев докритической толщины возможен лишь до $T < 550$ К. Проанализировано влияния скорости ламинарного потока жидкости в ростовом канале при использовании релаксационного режима и режима непрерывной прокачки на однородность распределения E_g и d в эпитаксиальных гетерокомпозициях. Установлены рациональные сочетания параметров проведения процесса, обеспечивающие достижение значений $E_g \approx 0.1$ эВ (77 К) в активных слоях при минимальной протяженности варизонных слоев.

Введение

Твердые растворы на основе асенида–антимонида–висмутида индия ($\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y$) представляют значительный интерес в качестве материала фотоприемных устройств дальнего инфракрасного диапазона. Методом жидкофазной эпитаксии на подложках антимонида индия (InSb) получены эпитаксиальные слои (ЭС) $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y$ с длинноволновым краем собственного оптического поглощения 8.9 мкм при 77 К для состава $x = 0.82$ и $y = 0.0018$ [1]. По расчетным оценкам [2] создание упругонапряженных гетерокомпозиций типа $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}$ может способствовать существенному уменьшению ширины запрещенной зоны твердых растворов и смещению края собственного оптического поглощения при 77 К до 12–14 мкм.

Цель настоящей работы — на основе расчетной модели, описанной в [3], произвести оценку влияния основных явлений, сопровождающих процесс эпитаксии, а также технологических параметров процесса на выходные параметры эпитаксиальных гетерокомпозиций. Рассматриваются варианты гетерокомпозиций, включающих чередующиеся основные (активные) слои $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y$ и вспомогательные (растягивающие) слои InSb либо InSb_yBi_y .

Модель составлена в "прямой постановке задачи", т. е. задаваемыми величинами являются входные, что соответствует процессам в реальности. Решение обратной задачи, возможно, приблизило бы поиск наилучших параметров, но ввиду ее большей сложности такой подход не является оптимальным методом решения проблемы в целом. Это, однако, не исключает существования частотных обратных задач.

Задаваемыми параметрами процесса в целом являются: а) термодинамические: температура процесса, переохладение в системе, начальные концентрации компонентов в жидких фазах (растворах), материал подложки; б) гидродинамические: геометрия пространства роста и профиль скорости перемещения растворов в ростовом канале; в) временные времена конвективного массообмена и бесконвективного процесса релаксации для роста основных и вспомогательных слоев. Выходными данными является пространственное распределение интересующих нас физических параметров (в данном случае — толщины эпитаксиальных слоев и значения ширины запрещенной зоны твердых растворов) в многослойной гетерокомпозиции.

Исходные предпосылки и допущения

а) В процессе используются предварительно переохлажденные растворы. Величина исходного переохладения достаточна для превышения движущих сил кристаллизации над движущими силами растворения [4] на всей поверхности контакта жидкой и твердой фаз.

б) Лимитирующей стадией процесса эпитаксии является подвод компонентов к межфазной поверхности. Хотя граница кинетической области, в которой основную лимитирующую роль играют процессы на поверхности роста, может быть установлена лишь на основе экспериментальных исследований, основанием для такого допущения является использование в процессе растворов, имеющих достаточно высокую степень исходного пересыщения.

с) Диффузионный массоперенос осуществляется только в направлении, перпендикулярном подложкам. Другая его ортогональная компонента пренебрежимо мала во всем объеме канала эпитаксии, за исключением тонкой пристеночной области, где возможно различие диффузионных потоков по длине подложки. Поэтому учет продольной компоненты диффузии может быть сведен к сглаживанию расчетных данных. Коэффициенты диффузии концентрационно независимы и, следовательно, остаются постоянными в течение всего изотермического процесса.

д) Единственной составляющей молярного переноса в данной системе является перенос вещества вынужденной конвекцией, вектор скорости которой параллелен подложкам. Фактически это означает пренебрежение межфазной конвекцией и локальными явлениями, обусловленными неоднородностью и неполной симметрией канала эпитаксии: в частности, не рассматриваются явления, возникающие на краях подложки (считается, что стенки канала и рабочие поверхности подложек гладкие и попарно параллельные).

е) Расстояние между подложками не изменяется во времени, т. е. эпитаксиальный слой считается бесконечно тонким по отношению к толщине жидкой фазы. Следует отметить, что это допущение может быть не вполне корректным при необходимости создания большого количества эпитаксиальных слоев в гетерокомпозиции. В таком случае обязателен учет перемещения фазовой границы в диффузионном описании и соответствующего изменения профилей скорости, что достаточно просто сделать при допущении однородности толщины эпитаксиальных слоев по длине подложки.

ф) Поток раствора на входе ламинарен. Это условие выполняется всегда при разумных значениях скорости движения жидкой фазы [3].

г) Течение в канале стабилизированное, т. е. при поступлении раствора в пространство между подложками профиль скорости Пуазейля сформирован. Это не является ограничением расчета, ибо в модель заложены альтернативные алгоритмы распределения скорости [3], однако зависимость профиля от продольной координаты вызывает более высокую неоднородность в распределении выходных параметров по длине подложки, что нежелательно в случае роста тонких эпитаксиальных структур.

h) Процессы, происходящие в жидкой фазе, прошедшей ростовой канал, не влияют на выходные параметры осаждаемых слоев.

Выбор рабочей области параметров модели

Для выяснения характера зависимости выходных параметров эпитаксиальных слоев от входных необходимо выбрать рабочую область в многомерном пространстве данных на основе предварительных расчетов.

Рассматриваемый температурный интервал выбран в пределах от 523 до 573 К. Верхняя граница обусловлена сильным увеличением скорости роста основных и вспомогательных слоев с повышением температуры эпитаксии и, следовательно, адекватным уменьшением воспроизводимости метода. Нижняя граница определяется существенным снижением концентрации мышьяка в растворе, вызывающим те же последствия. Кроме того, при низких температурах возможно проявление кинетических ограничений на поверхности роста, а также ограничений, связанных с расширением области несмешиваемости в твердой фазе [5].

Выбор величины начального переохлаждения раствора сводится к определению его минимального значения, необходимого для предотвращения подрастворения подложки или предыдущего эпитаксиального слоя, когерентно сопряженного с растущим. Для составов твердой фазы, обеспечивающих нужные выходные параметры слоев, эта величина составляет около 10 К при $T = 673$ К и менее при более низких температурах [6]. Допустимое переохлаждение ограничивается сверху величиной порядка 15–20 К в связи с повышением вероятности спонтанной кристаллизации в объеме раствора, а также большими скоростями роста эпитаксиальных слоев.

Ориентация подложки (111) наиболее устойчива к случайным флуктуациям условий кристаллизации. При этом обеспечиваются малая нормальная и большая тангенциальная составляющие скорости роста, что благоприятно сказывается на качестве поверхности упругонапряженных слоев.

Размер подложки в направлении движения растворов (длина подложки) играет в данном процессе важную роль, поскольку вероятность возникновения неоднородности распределения выходных параметров эпитаксиальных слоев наиболее высока именно по длине подложки. Здесь в качестве модельной выбрана длина 1 см.

Толщина канала эпитаксии ограничивается сверху возможностью возникновения свободной конвекции [3] и принята равной 500 мкм. С уменьшением толщины при прочих постоянных параметрах увеличивается полезный объем раствора. Следовательно, технологически более выгодно вести процесс в узких капиллярах, однако при практической реализации в этом случае труднее обеспечить параллельность подложек. За нижний предел толщины капилляра взято значение 100 мкм, хотя в отдельных экспериментах описаны системы с величиной расстояния между подложками 70 [7] и даже 50 мкм [8].

Средняя скорость потока жидкой фазы на входе в ростовой канал формально ограничивается только сверху, а фактически только снизу. При больших скоростях набегающего потока происходит его турбулизация, возникают нежелательные инерционные явления. Однако значения таких критических скоростей очень велики: для каналов толщиной 500 мкм они составляют около 200 см/с, а с уменьшением толщины канала еще более возрастают [3]. Столь высокие скорости ведут к крайне низкой эффективности процесса и вряд ли могут быть

Таблица 1. Термодинамические параметры бинарных систем [5,9,10]

| Система | Температура плавления, К | Энтропия плавления, Дж/моль К | Параметры взаимодействия, Дж/моль |
|-----------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| In-As | 1215 | 60.80 | 1717–26.63T |
| In-Sb | 798 | 59.95 | 13565–49.45T |
| In-Bi | 383 | 37.67 | 8680–18.5T |
| As-Sb | – | – | 3140 |
| As-Bi | – | – | 6985 |
| Sb-Bi | – | – | 2700 |
| InAs-InSb | – | – | 6450 + 3.85T |
| InAs-InBi | – | – | 46515 |
| InSb-InBi | – | – | 12700 |

Таблица 2. Периоды кристаллической решетки (a), коэффициенты температурного расширения (α) и упругие константы (C_{11} , C_{12} и C_{44}) бинарных соединений [9,10]

| Соединение | a , нм | $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$ | C_{11} , ГПа | C_{12} , ГПа | C_{44} , ГПа |
|------------|----------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| InAs | 0.60584 | 5.04 | 83.3 | 45.3 | 39.6 |
| InSb | 0.647937 | 5.19 | 62.7 | 36.7 | 30.2 |
| InBi | 0.667* | – | – | – | – |

Примечание. *Использован период, приведенный к решетке сфалерита [2]. Значения упругих констант и периоды решетки даны для температуры эпитаксии 573 К.

использованы на практике. С другой стороны, как будет показано далее, скорость потока должна быть достаточной для обеспечения однородности распределения выходных параметров по длине подложки. В численных экспериментах использовались значения средних скоростей 2–100 см/с. Эффект неоднородности по длине подложки при малых скоростях и малая эффективность осаждения при больших скоростях показали, что диапазон оптимальных скоростей перекрывается полностью.

Время процесса эпитаксии ограничивается снизу точностью и воспроизводимостью отработки заданного временного интервала, инерцией аппаратуры, через связь соотношения толщины основных и вспомогательных слоев с требуемой шириной запрещенной зоны твердых растворов в активных областях гетерокомпозиции. Из практических соображений оно должно быть не менее 1 с. Ограничение сверху — необходимость роста тонких псевдоморфных эпитаксиальных слоев при сравнительно больших скоростях роста.

Использованные при расчете физико-химические данные приведены в табл. 1, 2.

Зависимости распределения выходных параметров эпитаксиальных слоев от условий жидкофазной эпитаксии

Для анализа зависимостей результатов эпитаксии от исходных данных и параметров процесса расчеты проводились по следующей схеме. В пространстве параметров

выбиралась некоторая промежуточная точка, для которой результаты расчета были по крайней мере приемлемыми в контексте поставленной задачи. Совокупность таких параметров определяла базовый вариант расчета. Затем при локальном изменении каждого параметра при постоянных других анализировались изменения на выходе задачи. На основе анализа данных о характере влияния каждого параметра находились их рациональные соотношения в контексте решения поставленной задачи.

Моделирование процесса формирования упругонапряженных гетерокомпозиций типа $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}$ и $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ было нацелено на достижение длинноволнового края собственного оптического поглощения активных слоев, соответствующего 12 мкм при 77 К. Заметим, что решение этой задачи обеспечивает возможность получения и более широкозонных материалов. При расчете использовались данные [2] по критическим толщинам эпитаксиальных слоев требуемого состава и зависимости ширины запрещенной зоны активных слоев от концентрационных и геометрических параметров гетерокомпозиций.

Задаваемые и вычисленные параметры базовых вариантов расчета для указанных гетерокомпозиций приведены в табл. 3. В обоих случаях рассматривались безрелаксационные режимы эпитаксии (режимы непрерывной

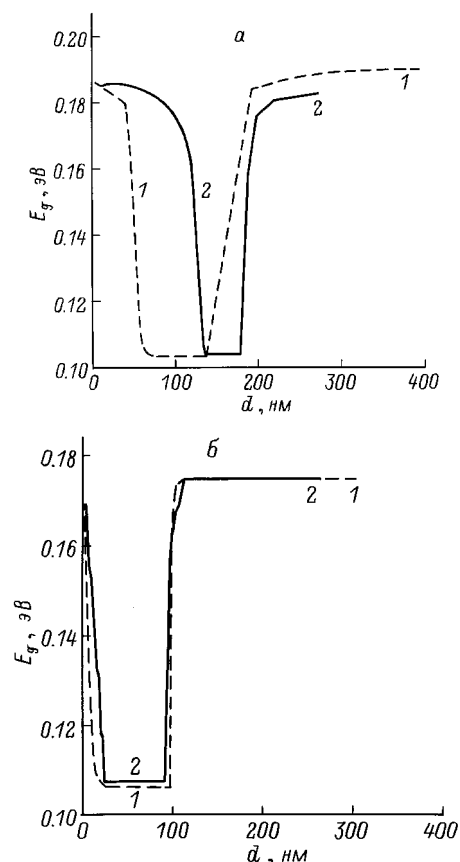


Рис. 1. Распределение E_g (77 К) по толщине гетероструктур $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}$ (а) и $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{Sb}_{1-y}\text{Bi}_y$ (б) для базовых вариантов расчета в начале (1) и в конце подложки (2).

Таблица 3. Данные базовых вариантов расчета

| Параметр | Система $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}$ | Система $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ |
|--|---|--|
| Температура процесса T, К | | 523 |
| Толщина ростового канала H_c , мкм | | 300 |
| Скорость потока на входе в канал U_0 , см/с | | 20 |
| Коэффициент диффузии D , $\text{см}^2/\text{с}$: | | |
| для As | | $1.0 \cdot 10^{-4}$ |
| для Sb и Bi | | $8.0 \cdot 10^{-5}$ |
| Отношение толщин основного и вспомогательного слоев | 0.32 | 0.52 |
| Время прокачки раствора при формировании основного слоя, с | | 1 |
| Время прокачки раствора при формировании вспомогательного слоя, с | 0.25 | 1.04 |
| Начальные концентрации в растворе, ат. доли: In-As-Sb-Bi: | | |
| As | | 0.00005 |
| Sb | | 0.00720 |
| Bi | | 0.49270 |
| In-Sb-[Bi]: | | |
| Sb | 0.0235 | 0.0092 |
| Bi | 0 | 0.4420 |
| Критическая толщина активного слоя, нм | | 140.2 |
| Схема результирующего распределения E_g по толщине d гетероструктуры | рис. 1, а | рис. 1, б |

прокачки растворов через ростовой канал). Распределение $E_g(d)$ для этих вариантов представлено на рис. 1.

В процессе расчета выявилось незначительное различие в распределении выходных параметров между первой и i -й гетеропарой многослойной композиции, поэтому результирующее распределение ширины запрещенной зоны по толщине эпитаксиальных слоев в начале и конце подложки показано только для одного цикла процесса.

Видно, что результаты расчетов для двух вариантов существенно различаются. В первом случае (рис. 1, а) наблюдается значительная неоднородность значений выходных параметров слоев по длине подложки. Изменение глубины залегания активного слоя на дальнем от входа в ростовой канал участка подложки объясняется малой приповерхностной продольной скоростью молярного переноса. Вследствие этого в конце подложки слой растет сначала исключительно за счет диффузии из центральной части канала, где скорость молярного переноса на несколько порядков больше. Соотношение толщины эпитаксиальных слоев на разных концах подложки составляет ≈ 0.6 , что может быть объяснено малой степенью релаксации жидкой фазы. По той же причине наблюдается некоторое различие значений E_g , обусловленное влиянием отношения толщин основных и вспомогательных слоев на изменение ширины запрещенной зоны за счет псевдоморфного эффекта.

Во втором случае (рис. 1, б) существенно возрастает однородность толщин основных эпитаксиальных слоев и снижается протяженность варизонных. Очевидной причиной этого является резкое уменьшение модуля градиента концентраций компонентов в жидкой фазе при смене растворов вследствие близости их состава (табл. 3). Следует отметить, что сохраняемые при этом практически неизменными физические параметры сменяемых растворов резко снижают и вероятность возникновения межфазной конвекции [3].

Расчеты показали, что повышение температуры процесса приводит к резкому возрастанию скорости роста эпитаксиальных слоев. Так, в случае получения структур $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}$ даже при минимальных временах контакта толщина основных слоев достигает критических значений уже при 550 К (рис. 2). При этом существенно возрастает неоднородность общей толщины эпитаксиальных слоев по длине подложки (рис. 3). В случае формирования гетерокомпозиций $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ однородность осаждения по длине подложки значительно выше, однако зависимость скорости роста от температуры остается практически неизменной.

Таким образом, из представленных расчетных данных очевидно, что формирование требуемых упругонапряженных гетерокомпозиций целесообразно осуществлять

при температурах не выше 530–550 К с использованием твердых растворов $\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ в качестве материала вспомогательных эпитаксиальных слоев. Поэтому при дальнейшем рассмотрении ограничимся указанным вариантом гетерокомпозиций. Следует отметить при этом, что снижение температуры процесса ниже 500 К вряд ли целесообразно как из-за возможности кинетического лимитирования эпитаксии [11], так и вследствие ухудшения смачивания подложки. К тому же отсутствие надежных данных по параметрам взаимодействия при низких температурах снижает достоверность результатов расчетов.

Зависимость толщины эпитаксиальных слоев от толщины ростового канала при использовании режима непрерывной прокатки иллюстрируется рис. 4. Причиной увеличения толщины слоев при уменьшении расстояния между подложками является изменение профиля скорости потока в канале. При уменьшении толщины капилляра увеличивается линейная скорость молярного переноса раствора при том же относительном расстоянии от поверхности раздела фаз, повышаются модули градиентов концентраций компонентов в жидкой фазе и, как следствие, возрастает скорость эпитаксиального осаждения. Закономерно уменьшение неоднородности

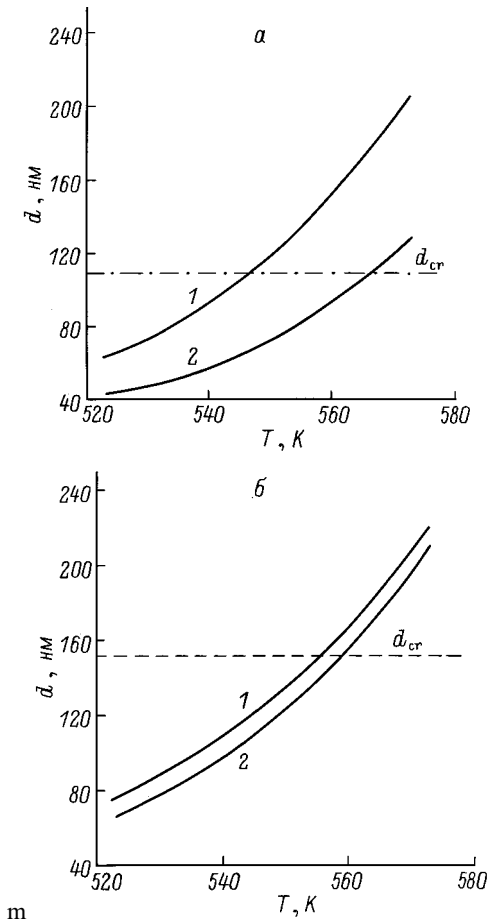


Рис. 2. Зависимость толщины активного слоя от температуры ЖФЭ для гетероструктур $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}$ (а) и $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ (б) в начале (1) и в конце (2) подложки.

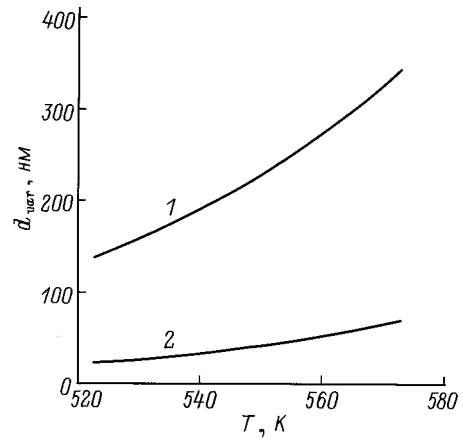


Рис. 3. Зависимость неоднородности толщины активного слоя по длине подложки от температуры процесса для гетероструктур $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}$ (1) и $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ (2).

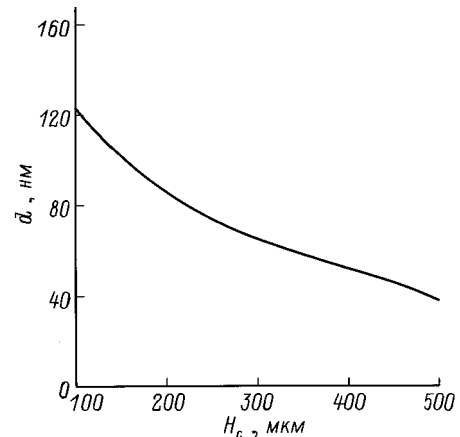


Рис. 4. Зависимость толщины активного слоя гетероструктуры $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ от толщины ростового канала.

толщины слоев по длине подложки, ибо причиной такой неоднородности и служат малые скорости молярного переноса вблизи поверхности кристаллизации. С практической точки зрения уменьшение толщины ростового канала способствует также увеличению полезного объема раствора, так как эпитаксиальный процесс при этом характеризуется большей эффективностью осаждения.

Изменение средней скорости потока на входе в ростовой канал также заметно отражается на толщине активных слоев (рис. 5, кривая 1) и на однородности ее распределения по длине подложки (рис. 5, кривая 2).

Следует отметить, что при высоких скоростях потока наблюдается более резкая форма распределения выходных параметров по толщине гетероструктур. Это обусловлено превалированием конвективного переноса над более слабым — диффузионным, приводящим в результате к сравнительно малым толщинам варизонных слоев. Вместе с тем при увеличении объемного расхода растворов, пропорционального средней скорости течения, толщина варизонных слоев изменяется незначительно.

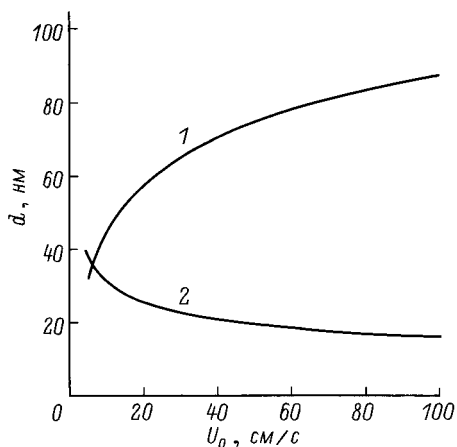


Рис. 5. Зависимость толщины активного слоя гетероструктуры $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ в конце подложки (1) и неоднородности его толщины по длине подложки (2) от скорости потока жидкой фазы на входе в ростовой канал.

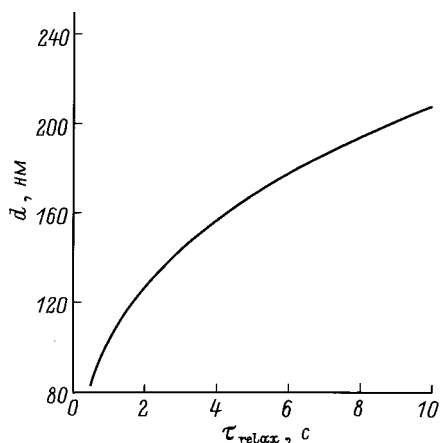


Рис. 6. Зависимость толщины активного слоя гетероструктуры $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ от времени релаксации τ_{relax} .

но. Поэтому в контексте рассматриваемой задачи следует выбирать наименьшую скорость потока, обеспечивающую заданную однородность распределения выходных параметров эпитаксиального слоя.

До сих пор рассматривались процессы, в которых эпитаксия протекает в режиме непрерывного течения растворов в канале. Моделирование безрелаксационных процессов как более простых помогает лучше представить характер изменения выходных параметров при варьировании входных. В то же время, как показали расчеты, указанным процессам свойствен ряд существенных недостатков. Для них, в частности, характерна довольно высокая неоднородность толщины основных и вспомогательных эпитаксиальных слоев по длине подложки и, как следствие, разброс значений E_g . Более сложные релаксационные процессы — с остановкой течения (паузой) после замены очередного раствора в ростовом канале для дополнительного снятия пересыщения имеют свои особенности. Рассмотрим некоторые из них, усло-

вившись называть продолжительность паузы временем релаксации.

Пусть условия процесса отличаются от базового варианта создания структур $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ только одним — наличием периода релаксации пересыщенного раствора после подачи его в ростовой канал. Общая картина зависимости толщины активного эпитаксиального слоя от времени релаксации показана на рис. 6. Из нее, в частности, следует, что в данном случае это время ограничивается сверху возможностью превышения критической толщины активного слоя. Распределения $E_g(d)$ для такого максимально допустимого времени релаксации (≈ 3 с) представлены на рис. 7 (кривые 1, 2). В случае роста активных слоев по схеме полной релаксации при условии сохранения в них упругих напряжений (с учетом приближенности расчетов d_{cr}) на расчетной зависимости $E_g(d)$ наблюдается характерная "ямка" (рис. 7, кривая 3). Видно, что в начальный момент релаксационного периода происходит некоторое уменьшение E_g в результате обогащения твердой фазы мышьяком за счет более высокой скорости диффузии его атомов в растворе из центральной области ростового канала. По мере истощения жидкой фазы по мышьяку уменьшаются его концентрация в твердой фазе, что приводит к росту E_g , и скорость роста слоя. В результате рост слоев по схеме полной релаксации приводит к образованию на зависимости $E_g(d)$ характерной "ямки".

Следует отметить, что использование релаксационных режимов обеспечивает значительно более однородное распределение выходных параметров по длине подложки даже при формировании структур типа

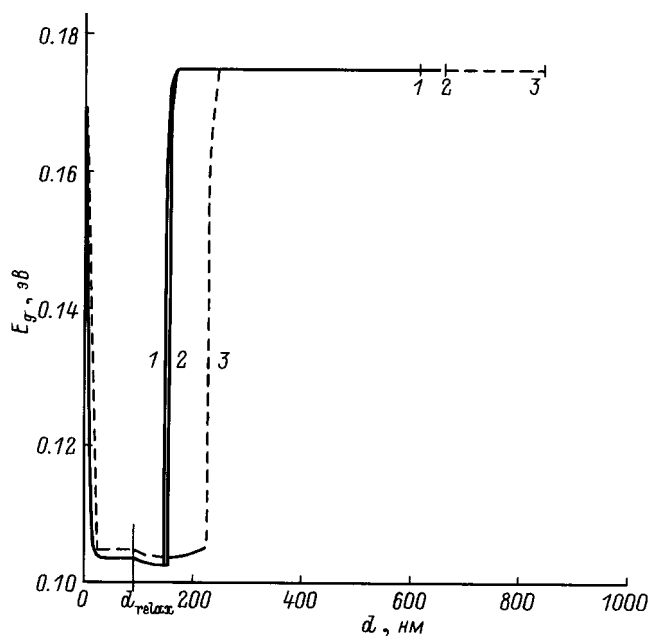


Рис. 7. Распределение E_g (77 К) по толщине гетероструктуры $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ при релаксационном режиме эпитаксии: $\tau_{\text{relax}} = 3$ с (1, 2) и $\tau_{\text{relax}} = 10$ с (3), кривые 1 и 2 относятся к концу и началу подложки соответственно; при $\tau_{\text{relax}} = 10$ с кривые для начала и конца подложки совпадают, d_{relax} — начало релаксационного периода.

$\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}$. Положительным качеством таких процессов является и их высокая эффективность по расходуемым материалам. Вместе с тем релаксационные процессы требуют увеличения времени контактирования жидкой фазы с поверхностью кристаллизации, что (с учетом ограничений по максимально допустимым толщинам эпитаксиальных слоев) может создавать определенные трудности в их практической реализации.

Одним из способов уменьшения толщины эпитаксиальных слоев в этом случае может быть снижение скорости потока на входе в канал. Возникающие при этом неоднородности толщин по длине подложки (рис. 5) в значительной мере сглаживаются в релаксационном варианте эпитаксии, а при использовании $\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ в качестве вспомогательных слоев неоднородность по длине подложки становится пренебрежимо малой. Целесообразно также проводить эпитаксию в режиме неполной релаксации, подбирая продолжительность паузы, обеспечивающую достижение слоем заданной толщины, меньшей критической.

Выводы

В результате моделирования процесса формирования упругонапряженных гетерокомпозиций типа $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}$ и $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ методом ЖФЭ выявлены и проанализированы закономерности изменения физических параметров эпитаксиальных слоев (E_g и d) от условий проведения процесса.

Показано, что вследствие резкого возрастания скорости эпитаксиального осаждения с повышением температуры эпитаксии успешный рост эпитаксиальных слоев докритической толщины возможен лишь до $T < 550$ К.

Увеличение скорости ламинарного потока жидкой фазы в ростовом канале и использование релаксационных вариантов эпитаксии способствуют более однородному распределению толщины эпитаксиальных слоев по длине подложки; при этом для увеличения эффективности использования растворов целесообразно ограничивать толщину ростового канала значениями 100–300 мкм.

Формирование гетерокомпозиций типа $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Bi}_y/\text{InSb}_{1-y}\text{Bi}_y$ предпочтительнее для достижения однородности распределения физических параметров активных слоев. В этом случае, равно как и при увеличении скорости ламинарного потока жидкости в ростовом канале, обеспечивается существенное снижение протяженности варизонных слоев.

В заключение следует отметить, что основные проблемы при практической реализации рассмотренного процесса — явления, связанные с плохой смачиваемостью поверхности подложки при низких температурах и необходимость прецизионного контроля ряда технологических параметров (концентрации растворенных компонентов в жидкой фазе, времена контакта с подложкой) из-за их малых абсолютных величин.

Авторы благодарят В.А. Жегалина и Т.В. Сахарову за помощь в составлении программ отдельных этапов расчета. Работа выполнена при поддержке Госкомитета РФ

по высшему образованию (грант № 460-6 1994 г. по направлению "Физико-химические исследования в области химических технологий").

Список литературы

- [1] Акчурина Р.Х., Сахарова Т.В. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 10. С. 16–20.
- [2] Акчурина Р.Х., Акимов О.В. // ФТП. 1995. Т. 29. Вып. 2. С. 362–369.
- [3] Акчурина Р.Х., Комаров Д.В. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 7. С. 000.
- [4] Акчурина Р.Х. // Физико-химические процессы в микроэлектронике. М.: МИТХТ, 1990. С. 318–342.
- [5] Акчурина Р.Х., Сахарова Т.В., Жегалин В.А. // Изв. вузов. Сер. Цветные металлы. 1994. Вып. 7. С. 23–27.
- [6] Акчурина Р.Х., Жегалин В.А., Сахарова Т.В. // Изв. РАН. Сер. Неорган. материалы. 1995 (в печати).
- [7] Айтиева Г.Т., Бессолов В.Н., Клименко С.Е. и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 8. С. 465–469.
- [8] Абдурахманов Ю.Ю., Клименко С.Е., Корсуков В.Е. и др. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 12. С. 762–765.
- [9] Стрельченко С.С., Лебедев В.В. Соединения $A^{III}B^V$ (справочник). М.: Металлургия, 1984. 144 с.
- [10] Физико-химические свойства полупроводниковых веществ (справочник) / Под ред. А.В. Новоселовой, В.Б. Лазарева. М.: Наука, 1979. 339 с.
- [11] Уфимцев В.Б., Акчурина Р.Х. Физико-химические основы жидкофазной эпитаксии. М.: Металлургия, 1983. 224 с.