

На правах рукописи

Емельянов Евгений Александрович

**Формирование состава в подрешётке пятой группы
твёрдых растворов $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}(001)$ и $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}(001)$
при молекулярно-лучевой эпитаксии**

Специальность

1.3.11 - Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН).

Научный руководитель:

Преображенский Валерий Владимирович, кандидат физико-математических наук, ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Официальные оппоненты:

Жуков Алексей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, НИУ ВШЭ, г. Санкт-Петербург

Мухин Иван Сергеевич, доктор физико-математических наук, СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск

Защита состоится «28» апреля 2026 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.134.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева 13, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова и на сайте <https://www.isp.nsc.ru/obrazovanie/dissertatsionnyj-sovet/zasedaniya/emelyanov-evgenij-aleksandrovich-2>

Автореферат разослан «___» марта 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

А.Г. Погосов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Твёрдые растворы $A^{III}B^V$ с замещением в подрешётке V группы являются перспективными материалами для создания приборных гетероструктур широкого круга научного и приборного применения. Большой интерес в настоящее время вызывают твёрдые растворы замещения в подрешётке пятой группы $A^{III}P_xAs_{1-x}$ [1,2] и $A^{III}As_xSb_{1-x}$ [3,4], которые используются для создания современных лазеров, фотоприёмников и приборов СВЧ техники. Качество работы таких приборов напрямую зависит от точности получаемого состава в подрешётке V группы при выращивании слоёв твёрдых растворов.

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) выступает одним из ключевых методов получения гетероструктур на основе твёрдых растворов соединений $A^{III}B^V$, предназначенных для приборного применения. Но задача получения твёрдых растворов с заданным составом в подрешётке V группы в процессе МЛЭ осложняется зависимостью анионного состава растущей плёнки твёрдого раствора от температуры подложки (T_s) и величины и соотношения молекулярных потоков элементов III и V групп. Отдельно следует выделить зависимость состава твёрдого раствора от молекулярной формы элементов V группы в потоке [5], а также от вицинальности поверхности подложки [6] и скорости роста (V_g) [7,8]. Свойства и качество эпитаксиальных слоёв и гетеропереходов определяются теми же параметрами. Следовательно, для создания технологии выращивания гетероструктур на основе твёрдых растворов замещения в подрешётке V группы методом МЛЭ, требуется одновременное решение двух взаимосвязанных задач. Где первая задача это определение условий роста, обеспечивающих требуемые структурные, электрофизические и оптические характеристики как отдельных слоёв твёрдых растворов, так и гетероструктур, сформированных на их основе. Ко второй задаче относится определение потоков молекул элементов V группы, необходимых для получения требуемого состава твёрдых растворов в выбранных условиях роста.

Решение второй задачи возможно посредством выращивания тестовых образцов, последующего анализа состава полученных плёнок твёрдого раствора и корректировки значений молекулярных потоков V группы при необходимости. Такой путь требует больших затрат времени и материалов. Предварительная оценка состава твёрдого раствора в зависимости от параметров роста позволяет минимизировать число тестовых экспериментов. Разработка соответствующей методики возможна посредством использования модельных подходов, описывающих зависимость анионного состава твёрдого раствора от условий роста. Следует также отметить, что до сих пор сосуществуют различающиеся представления о механизмах массопереноса при МЛЭ с участием молекул и хемосорбированных димеров элементов пятой группы. Сравнительный анализ экспериментальных данных и моделей, построенных с использованием тех или иных предположений о механизмах роста, выступает в качестве инструмента теоретического исследования процессов роста эпитаксиальных плёнок.

При построении моделей роста соединений $A^{III}B^V$ используются два подхода: кинетический [9-12] и термодинамический [13,14]. Термодинамический подход базируется на рассмотрении равновесной системы и опирается на уравнения действующих масс с учётом сохранения массы взаимодействующих компонентов. Однако, поскольку процесс МЛЭ носит неравновесный характер, более обоснованным выглядит применение кинетического подхода. Он даёт возможность анализировать формирование эпитаксиальных слоёв на уровне элементарных поверхностных событий, а сопоставление с экспериментальными данными позволяет оценить адекватность существующих представлений о механизме МЛЭ.

Кинетические модели роста твёрдых растворов $A^{III}P_xAs_{1-x}$ и $A^{III}As_xSb_{1-x}$, представленные в литературе, различаются по степени детализации механизмов роста, строения поверхности, по перечню и локализации процессов массопереноса на ней. Тем не менее, предлагаемые кинетические модели достаточно хорошо описывают поведение состава твёрдого раствора в рамках экспериментальных данных, на базе которых были построены модели. К сожалению,

сделать безусловное заключение о достоверности подходов и применимости этих моделей за пределами взятых в рассмотрение условий роста затруднительно по ряду причин. В частности, это объясняется фрагментарностью данных, отсутствием единой формы их представления, различающимися методами определения значений параметров роста и недоступностью детальной информации об особенностях конструкции и методик использования технологического и аналитического оборудования. В большинстве случаев модели учитывают лишь ограниченный набор входных параметров (как правило T_s , величину и соотношение III/V). Исключая такие параметры как молекулярная форма V группы в потоке, так и угол отклонения подложки от сингулярной грани (α), что не позволяет описать всю совокупность имеющихся экспериментальных данных. Для анализа оценки адекватности модельных подходов желательно использовать экспериментальные данные, полученные в широком диапазоне условий роста, с применением единых методологических подходов к обеспечению процесса МЛЭ. Наряду с практической значимостью такой анализ позволил бы уточнить достоверность и повысить уровень детализации некоторых теоретических представлений о процессе МЛЭ, т.е., моделирование помимо прикладного имеет также научное значение как инструмент теоретического исследования процесса МЛЭ.

Исходя из вышесказанного, разработка модели, описывающей формирование состава твёрдого раствора замещения в подрешётке V группы соединений $A^{III}B^V$ в процессе МЛЭ, представляет собой актуальную задачу, имеющую научное и прикладное значение.

Цель и задачи работы

Целью работы являлось развитие представлений о процессах роста твёрдых растворов замещения в подрешётке V группы соединений $A^{III}B^V$ при МЛЭ путём построения кинетической модели роста твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} (001) и $InAs_xSb_{1-x}$ (001).

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Анализ данных по МЛЭ твёрдых растворов замещения в подрешётке V группы соединений $A^{III}B^V$, с целью выявления закономерностей связи состава твёрдых растворов с условиями их выращивания и их теоретического описания на момент написания работы.
2. Изучение механизмов взаимодействия молекул As_4 , As_2 и Sb_4 с поверхностью $GaSb(001)$.
3. Изучение зависимости состава в подрешётке V группы твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} и $InAs_xSb_{1-x}$ от параметров роста: температуры роста, плотности молекулярных потоков и их отношения, а также величины угла отклонения подложки от грани (001).
4. Выявление новых и уточнения уже известных закономерностей, связывающих анионный состав твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} и $InAs_xSb_{1-x}$ с исследованными условиями роста.
5. Разработка и численная реализация кинетической модели формирования анионного состава твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} (001) и $InAs_xSb_{1-x}$ (001) на основе существующих представлений о процессе МЛЭ соединений $A^{III}B^V$, с учётом вновь выявленных закономерностей.

Научная новизна работы состоит в расширении известных ранее представлений о процессах формирования состава твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} (001) и $InAs_xSb_{1-x}$ (001) при МЛЭ на грани (001).

1. Впервые исследованы процессы замещения сурьмы мышьяком, протекающее на сингулярной и вицинальной поверхности $GaSb(001)$ в потоках молекул As_2 и As_4 . Предложены и теоретически обоснованы механизмы замещения сурьмы мышьяком при выдержке в потоке молекул As_2 и As_4 антимоидной поверхности. Экспериментально показано, что для молекул As_2 , эффективность процесса замещения слабо коррелирует с углом отклонения подложки, что обусловлено преобладанием механизма прямого замещения. Показано, что в случае молекул As_4 , эффективность процесса замещения возрастает с увеличением угла

отклонения подложки, что вызвано увеличением количества краёв террас, на поверхности которых происходит замещение по вакансионному механизму.

2. Впервые с использованием единого методологического подхода в широких диапазонах условий роста получены экспериментальные данные о зависимости состава твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} и $InAs_xSb_{1-x}$ от температуры роста, плотности потоков молекул *V* и атомов *III* групп и их отношений, скорости роста, и величины угла отклонения подложки от сингулярной грани (001). Обнаружено что:

- изменение скорости роста вызывает изменение состава в подрешётке пятой группы. В условиях постоянного отношения V/III наибольшая изменчивость состава твёрдого раствора в подрешётке *V* группы наблюдается при скоростях роста менее 1 МС/с — для обоих типов растворов GaP_xAs_{1-x} и $InAs_xSb_{1-x}$.

- увеличение угла отклонения подложки от сингулярной грани (001) приводит к возрастанию доли фосфора в твёрдых растворах GaP_xAs_{1-x} и возрастанию доли мышьяка в твёрдых растворах $InAs_xSb_{1-x}$.

3. Построена кинетическая модель формирования состава твёрдых растворов $GaP_xAs_{1-x}(001)$ и $InAs_xSb_{1-x}(001)$. В модели учтены процессы хемосорбции молекул пятой группы и десорбции хемосорбированных димеров вне областей роста на поверхности террас и их краях. На базе вычислительного эксперимента установлены основные явления и закономерности в формировании состава твёрдого раствора в подрешётке пятой группы:

- скорость роста, выступает самостоятельным параметром формирования состава в подрешётке пятой группы, за счёт лимитирования протекания процессов адсорбции/десорбции элементов пятой группы на поверхности террас между областями роста. При постоянном отношении V/III , V_g будет приводить к изменению состава твёрдого раствора при $V_g < 1$ МС/с. Если не поддерживать отношение V/III постоянным, то V_g будет приводить к изменению состава твёрдого на всём диапазоне изменяя значения потока *III* группы.

- зависимость состава твёрдого раствора в подрешётке *V* группы от угла отклонения подложки заключается в следующем: угол

определяет плотность заселённости адатомами III группы краёв террас. От этой плотности зависит частота следования областей роста вдоль ступеней, а значит — и динамика процессов адсорбции и десорбции элементов V группы на границах между областями роста.

- состав твёрдого раствора $InAs_xSb_{1-x}(001)$ зависит от поверхностной структуры (ПС). Так замещение димеров сурьмы на димеры мышьяка при хемосорбции молекул As_2 эффективно реализуется только в случае сверхструктуры поверхности со сверхмонослойным покрытием димерами сурьмы ПС(1x3). При сверхструктуре поверхности со степенью покрытия димерами элементов пятой группы меньше или равном единице (ПС (8x2)) преобладает механизм замещения по вакансиям.

Практическая и теоретическая значимость работы:

Для получения стабильных потоков молекул V группы модернизированы созданные в ИФП СО РАН двухзонные вентильные источники As и P. Разработана нестационарная кинетическая модель процесса роста твёрдых растворов $GaP_xAs_{1-x}(001)$ и $InAs_xSb_{1-x}(001)$. Предложенная кинетическая модель даёт возможность как прогнозировать состав твёрдого раствора в подрешётке V группы с учётом конкретных условий роста, так и решать обратную задачу: определять J_v , исходя из заданных условий роста и требуемого состава твёрдого раствора. Модель может быть адаптирована к решению подобных задач в случае других твёрдых растворов $A^{III}P_xAs_{1-x}(001)$ и $A^{III}As_xSb_{1-x}(001)$. Полученные в работе результаты важны для создания технологии роста перспективных полупроводниковых гетероструктур на основе твёрдых растворов замещения в подрешётке пятой группы.

Методология и методы исследования:

Объектом исследования являлись эпитаксиальные слои твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} , $InAs_xSb_{1-x}$, AlP_xAs_{1-x} , InP_xAs_{1-x} , $GaAs_xSb_{1-x}$ выращенные методом МЛЭ на сингулярных подложках $GaAs(001)$ и подложках $GaAs(001)$, отклонённых от грани (001) на 1° - 7° в направлении [110].

Для решения поставленных в работе задач использовались современные экспериментальные методы. Структурное состояние

поверхности выращиваемых плёнок (морфология и ПС) изучалось методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Скорость роста выращиваемых плёнок определялась из анализа осцилляций интенсивности зеркального рефлекса. Плотность потоков молекул V групп определялась по показаниям ионизационного преобразователя типа «Байярда - Альперта». Состав выращенных твёрдых растворов определялся методом рентгеноструктурного анализа (РСА).

Кинетические модели, описывающие формирование состава твёрдых растворов замещения в подрешётке V группы, строились в рамках приближения двумерно-слоевого механизма роста.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. При взаимодействии потока молекул As_2 и As_4 с поверхностью $GaSb(001)$ происходит изменение её состава за счёт обменных процессов в анионном слое. Встраивание молекул As_4 происходит в результате хемосорбции молекул на вакансиях. В случае молекул As_2 встраивание происходит преимущественно в результате хемосорбции с замещением димеров сурьмы.
2. Скорость роста является независимым параметром процесса формирования состава $GaP_xAs_{1-x}(001)$ и $InAs_xSb_{1-x}(001)$ в подрешётке V группы.
3. На процесс формирования состава твёрдого раствора $InAs_xSb_{1-x}(001)$ при МЛЭ с использованием потока молекул As_2 оказывает влияние поверхностная сверхструктура. В условиях существования сверхструктуры (1×3) основным механизмом изменения состава поверхности вне областей роста является прямое замещение димеров сурьмы димерами мышьяка, а в условиях существования сверхструктуры (8×2) — механизм замещения по вакансиям.
4. Зависимость состава твёрдых растворов $GaP_xAs_{1-x}(001)$ и $InAs_xSb_{1-x}(001)$ от величины угла отклонения подложки обусловлена изменением длительности формирования анионного состава поверхности на краях террас за счёт адсорбционных/десорбционных процессов.
5. При рассмотрении процесса формирования состава твёрдых растворов $GaP_xAs_{1-x}(001)$ и $InAs_xSb_{1-x}(001)$ необходимо учитывать

нестационарность процессов массопереноса на поверхности террас и их краях.

Личный вклад соискателя

Соискатель принимал непосредственное участие на всех этапах проведения работы. Им был проведён анализ отечественных и зарубежных литературных данных по теме диссертационной работы. Выполнена основная часть расчётных и экспериментальных работ: подготовка и проведение экспериментов; интерпретация картин ДБЭО; интерпретация данных рентгеноструктурного анализа; обработка совокупности всех полученных данных; построение и расчёт численной модели формирования твёрдого раствора замещения в подрешётке V группы проводились также при его непосредственном участии. Совместно с коллегами принимал участие в подготовке и публикации полученных результатов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных результатов базируется на применении современных и общепризнанных экспериментальных методов: МЛЭ, ДБЭО, РСА. Полученные в работе результаты и выводы не противоречат ранее известным данным, опубликованы в профильных научных отечественных и зарубежных изданиях, и апробированы на международных и российских конференциях: Международная конференция «Актуальные проблемы физика поверхности и наноструктур» (2010 – Ярославль), EDM (2010, 2011, 2013, 2014, 2019 – Эрлагол, Алтай), 3-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» АПР-2010 (2010 – Томск), Фотоника (2011, 2015, 2019, 2021 – Новосибирск), Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники» (2011, 2022, 2023 – Нижний Новгород; 2015 – Москва, Ершово; 2017 – Екатеринбург; 2019 – Новосибирск), Asia Priority in Advanced Materials «АРАМ-12» (2012 – Новосибирск), 7st China-Russia Joint Workshop on Advanced Semiconductors Materials and Devices (2012 – Hangzhou, China), ФТТ-2013 «Актуальные проблемы физики твёрдого тела» (2013 – Минск, Беларусь), XVIII Международный симпозиум «Нанозлектроника» (2014, 2016, 2017 – Нижний Новгород), E-MRS

2014 fall meeting (2014 – Warsaw, Poland), 2nd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (2015 – Санкт – Петербург), «XX Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектроники» (2018 – Санкт-Петербург).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликована 31 работа, из них 24 - в трудах международных и российских конференций, и 7 работ в реферируемых журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ.

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём работы 166 страниц машинописного текста, 58 рисунков, 24 таблицы. Список литературы содержит 166 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даётся обоснование актуальности темы исследований, представлены цель и задачи работы, указана её новизна, научная и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведён обзор литературы по проблеме выращивания методом МЛЭ плёнок твёрдых растворов замещения в подрешётке *V* группы соединений $A^{III}B^V$. Рассмотрены основные параметры роста определяющие состав твёрдых растворов $(A)^{III}P_xAs_{1-x}(001)$ и $(A)^{III}As_xSb_{1-x}(001)$ при МЛЭ, а именно: величины и соотношения молекулярных потоков элементов *III* и *V* групп, T_s , V_g и отклонения подложки от сингулярной грани. Рассмотрены теоретические подходы к описанию процесса формирования состав твёрдых растворов $(A)^{III}P_xAs_{1-x}(001)$ и $(A)^{III}As_xSb_{1-x}(001)$ при МЛЭ. Обсуждён метод исследования процессов адсорбции - десорбции происходящих на поверхности роста по изменению интенсивности зеркального рефлекса картины ДБЭО. Сформулированы основные задачи работы.

Во второй главе приведено описание использованного в работе технологического и аналитического оборудования, описаны методы выращивания структур, способы контроля процессов роста и состава выращенных образцов. В частности, дано описание установки МЛЭ «Штат», приведена конструкция дуэзонных источников мышьяка и фосфора для получения молекулярных потоков As_2/As_4 и P_2/P_4 [A1]. Описано применение метода ДБЭО для исследования структуры поверхности и процессов роста, методика определения плотности потока элементов *V* и *III* групп, температуры подложки. Описан метод исследования состава твёрдых растворов - рентгеноструктурный анализ.

Третья глава посвящена экспериментальному изучению зависимости анионного состава твёрдых растворов $GaP_xAs_{1-x}(001)$ и $InAs_xSb_{1-x}(001)$ от параметров роста. Слои всех твёрдых растворов выращивались как на сингулярных подложках $GaAs(001)$, так и на вицинальных поверхностях, отклонённых от грани (001) в направлении [110] на угол α от 1° до 7° . Из-за большой разницы постоянных решётки плёнки и подложки, эпитаксиальные плёнки были полностью релаксированными. Данные о зависимости доли фосфора в $GaP_xAs_{1-x}(001)$ от условий выращивания получены в диапазоне значений T_S от 400 до 600°C , V_g от 0.25 до 2.5 мкм/час, отношений J_{As_2}/J_{Ga} от 0.5 до 10 и J_{P_2}/J_{Ga} от 1 до 16. В случае $InAs_xSb_{1-x}(001)$ T_S менялась от 300 до 410°C , V_g от 0.25 до 2 мкм/час, отношения J_{As_2}/J_{In} от 0.35 до 3, J_{As_4}/J_{In} от 1.2 до 3 и $J_{Sb_4}/J_{In} \sim 0.7$.

В главе приведены результаты исследования процесса формирования анионного состава твёрдых растворов $GaP_xAs_{1-x}(001)$, [A3, A4, A5, B1-B8]. Показано, что с увеличением V_g и α , при одном и том же значении J_{As_2}/J_{P_2} , наблюдается рост доли *P* в твёрдом растворе [A4, A5, B4 - B8]. Продемонстрировано, что доля фосфора нелинейно снижается с ростом отношения J_{As_2}/J_{III} [A4, A5, B7, B8]. Приводятся также данные по составам твёрдых растворов $AlP_xAs_{1-x}(001)$ и $InP_xAs_{1-x}(001)$ [A4, A5, B7, B8].

Представлены результаты исследования методом ДБЭО процесса взаимодействия поверхности эпитаксиального слоя $GaSb$, выращенного на подложках с $\alpha = 8'$ и 5° , с потоками молекул As_2 , As_4 и Sb_4 и их комбинациями [A2, B9-B12]. На основе анализа полученных экспериментальных данных сделан вывод о том, что

молекулы As_2 взаимодействуют с поверхностью $GaSb(001)$ преимущественно по механизму прямого замещения, а молекулы As_4 – преимущественно по вакансионному механизму. Установлено, что процессы замещения на вицинальной поверхности протекают интенсивнее, чем на сингулярной.

Исследовано взаимодействие сингулярной и вицинальной ($\alpha = 5.4^\circ$) поверхностей $InAs(001)$ с потоками молекул As_4 и Sb_4 . Показано, что при прочих равных условиях, скорость изменения состава поверхности $InAs(001)$ при выдержке в потоке молекул Sb_4 , оказывается выше на вицинальной поверхности [B13, B14].

Представлены данные о зависимости состава твёрдых растворов $GaAs_xSb_{1-x}$ и $InAs_xSb_{1-x}$, выращенных с использованием потоков As_2 , As_4 и Sb_4 , от условий роста. Показано, что эффективность встраивания молекул As_2 , при прочих равных условиях, существенно выше, чем молекул As_4 . При этом эффективность встраивания As_4 , в большей степени зависит от T_S по сравнению с As_2 . Результаты исследований представлены в работах [A3, B1-B3, B15-B20].

Приведены данные о зависимости состава твёрдого раствора $InAs_xSb_{1-x}$ от T_S и α . Установлено, что с увеличением T_S и α , растёт доля As как в случае использования потока молекул As_2 , так и в случае As_4 [A6, B20, B23].

Исследована зависимость состава твёрдого раствора $InAs_xSb_{1-x}$ от V_g при МЛЭ с использованием потоков As_2 и Sb_4 . Показано, что доля As в твёрдом растворе уменьшилась в 1.6 раза при увеличении V_g от 0.25 до МС/с [A7].

Четвёртая глава посвящена моделированию процесса формирования состава твёрдых растворов замещения в подрешётке V группы соединений $A^{III}B^V$ при МЛЭ. Представлена нестационарная модель роста твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} и $InAs_xSb_{1-x}$ [A4, A5, A7, B20, B22, B23].

В основу модели положен двумерно-слоевой механизм роста соединений $A^{III}B^V$ на вицинальной грани (001), при котором бислойные террасы последовательно достраиваются в областях роста, локализованных в изломах ступеней. Принято, что поверхность террас имеет ПС, образованную из хемосорбированных димеров элементов пятой группы. Состав ПС складывается в

областях роста и в дальнейшем меняется в результате адсорбционно-десорбционных процессов. Изменение исходного состава ПС длится с момента его формирования и вплоть до прихода очередной области роста. Учтено, что константы элементарных процессов массопереноса на поверхности и краях террас могут отличаться. Состав твёрдого раствора формируется в процессе достраивания террас и складывается как из атомов, входящих в состав сложившейся к этому моменту времени ПС, таки и из атомов, поступающих в области роста в виде физ. адсорбированных молекул. На Рис.1. представлена схема процессов массопереноса при МЛЭ $GaP_xAs_{1-x}(001)$.

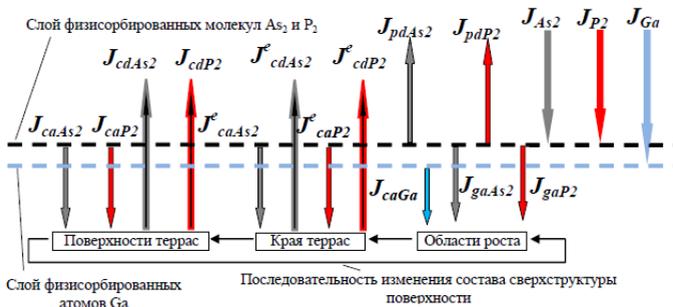


Рис. № 1 Схема массопереноса на модельной поверхности роста. Короткие стрелки, направленные вниз, обозначают процессы перехода молекул из физически связанного состояния в химически связанное состояние в структуре поверхности.

Процессы массопереноса (кроме процессов физисорбции) носят активационный характер и описываются выражениями вида.

$$J_d = n_d \cdot k_d - \text{процессы десорбции} \quad (1)$$

$$k_d = A_d \cdot \exp\left(\frac{-E_d}{R \cdot T_s}\right) - \text{константа скорости десорбции} \quad (2)$$

$$J_a = n_a \cdot \frac{v}{n} \cdot k_a - \text{процессы адсорбции} \quad (3)$$

$$k_a = A_a \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T_s}\right) - \text{константа скорости адсорбции} \quad (4)$$

где: n_d , n_a – слоевая концентрация частиц, принимающих участие в процессе десорбции и адсорбции, соответственно, v – концентрация центров физисорбции или хемосорбции, см^{-2} ; n – слоевая концентрация частиц при 100% заполнении адсорбционных

позиций на грани (001), см²; A – параметр с размерностью с⁻¹; E_d , E_a , – энергия активации процесса десорбции и хемосорбции соответственно, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/К/моль; T_s – температура подложки, К.

Доля фосфора x в GaP_xAs_{1-x} складывается в областях роста и описывается выражением:

$$x = \frac{(n_0 - n_{fp} - n_{fAs}) \cdot x_{a0} + n_{fp}}{n_0} \quad (5)$$

где: x_{a0} – доля, с которой атомы фосфора встраиваются из физисорбированных молекул на свободных анионных позициях в области роста; n_{fAs} и n_{fp} – концентрации димеров мышьяка и фосфора в составе ПС к моменту достижения фронтом роста рассматриваемого участка поверхности; n_0 – полная концентрация мест хемосорбции димеров пятой группы, численно равна 1/2 плотности узлов анионной подрешётки грани (001); $(n_0 - n_{fp} - n_{fAs})$ – суммарная концентрация свободных анионных позиций, обусловленных строением ПС и вакансиями, образующимися в результате десорбции димеров мышьяка и фосфора к моменту прихода области роста.

Значение x_{a0} рассчитывается в приближении хемосорбции физисорбированных молекул мышьяка и фосфора на анионных позициях, обусловленных поступлением атомов галлия, в отсутствие десорбции димеров пятой группы из хемосорбированного состояния:

$$\frac{\frac{J_{As2}}{1-x_{a0}} - 0.5 \cdot J_{Ga}}{x_{a0}} \cdot \frac{k_{pdP2}}{k_{pdAs2}} \cdot \frac{k_{gaAs2}}{k_{gaP2}} = 1 \quad (6)$$

где, k_{pdP2} и k_{pdAs2} – константы скорости десорбции молекул фосфора и мышьяка из физисорбированного слоя; k_{gaP2} и k_{gaAs2} – константы скорости хемосорбции в областях роста.

Концентрации n_{fAs} , n_{fp} формируются в результате адсорбционно-десорбционных процессов, протекающих вне областей роста. Изменение состава ПС во времени на краях террас описывается системой уравнений (7), а на их поверхности – (8).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(\theta \cdot n_0 - n_{cP}^e - n_{cAs}^e)}{n_0} \cdot n_{P_2} \cdot k_{cdP_2}^e - n_{cP}^e \cdot k_{cdP}^e = \frac{\partial n_{cP}^e}{\partial t} \\ \frac{(\theta \cdot n_0 - n_{cP}^e - n_{cAs}^e)}{n_0} \cdot n_{As_2} \cdot k_{caAs_2}^e - n_{cAs}^e \cdot k_{cdAs}^e = \frac{\partial n_{cAs}^e}{\partial t} \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(\theta \cdot n_0 - n_{cP} - n_{cAs})}{n_0} \cdot n_{P_2} \cdot k_{caP_2} - n_{cP} \cdot k_{cdP} = \frac{\partial n_{cP}}{\partial t} \\ \frac{(\theta \cdot n_0 - n_{cP} - n_{cAs})}{n_0} \cdot n_{As_2} \cdot k_{caAs_2} - n_{cAs} \cdot k_{cdAs} = \frac{\partial n_{cAs}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (8)$$

Где: n_{As_2} , n_{P_2} – слоевая концентрация молекул As_2 и P_2 в физисорбированном слое, соответственно; θ – степень покрытия поверхности террас димерами атомов пятой группы, соответствующая строению ПС; n_{cP} , n_{cAs} , n_{cP}^e , n_{cAs}^e – текущая концентрация димеров P и As в сверхструктуре поверхности на поверхности террас и их краях; k_{ca} , k_{cd} – константы скоростей хим. адсорбции молекул и десорбции хемосорбированных димеров пятой группы на поверхности террас и k_{ca}^e и k_{cd}^e – на их краях. Значения n_{fAs} , n_{fP} находились из согласованного решения систем уравнений (7) и (8) с учётом длительностей изменения состава ПС на краю и поверхности террас вне областей роста. Уравнения (7) и (8) решались численным методом.

Принято, что молекулы As_2 и P_2 имеют неограниченную подвижность и равномерно распределяются по поверхности в потенциальных ямах физисорбированного состояния, концентрация которых численно равна n_0 . Значения n_{As_2} и n_{P_2} вычислялись в стационарном приближении с учётом всех процессов, привязанных к областям роста и фазам состояния ПС на поверхности и краях террас.

Кинетические константы модели подбирались путём минимизации расхождения расчётных значений доли фосфора с экспериментальными [A5]. Согласование выполнялось по всему массиву экспериментальных данных.

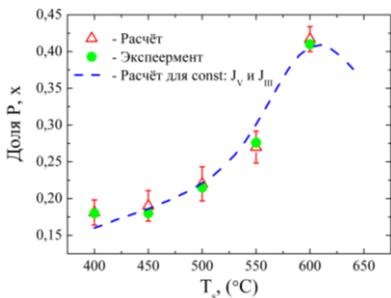


Рис. № 2 Зависимость доли фосфора в GaP_xAs_{1-x} от T_s при скорости роста ~ 1 монослой в секунду. Кружки – экспериментальные данные; треугольники – расчётные значения. Линия – расчётная зависимость при $J_{Ga} = 6,26 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$, $J_{As2} = 9,8 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$, $J_{P2} = 2,2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$.

обменных процессов возрастает. В области высоких T_s происходит снижение доли фосфора в твёрдом растворе из-за сближения значений констант скоростей процессов адсорбции/десорбции для мышьяка и фосфора. Следствием нестационарных процессов, протекающих на краях и поверхности террас, является зависимость анионного состава твёрдого раствора от скорости роста (V_g) как самостоятельного фактора. Для выявления вклада V_g в формирование анионного состав необходимо фиксировать не только отношение J_{P2}/J_{As2} и T_s , но и отношение $(J_{P2}+J_{As2})/J_{Ga}$. Это обусловлено тем, что с изменением плотности потока атомов галлия при прочих равных условиях меняется отношения V/III , что вызывает сдвиг состава растущей плёнки, необусловленный изменением скорости роста.

На Рис. 3 приведены зависимости доли фосфора x в GaP_xAs_{1-x} от V_g . Поведение линии II свидетельствует о том, что V_g выступает самостоятельным фактором, который приводит к изменению состава твёрдого раствора. В рамках модели механизм воздействия V_g на x обусловлен адсорбционно-десорбционными процессами на

На Рис. 2. представлены экспериментальные и расчётные значения доли фосфора x в GaP_xAs_{1-x} от T_s при $V_g \sim 1$ МС/с. Наблюдаемая зависимость объясняется экспоненциальной природой констант скорости процессов массопереноса, протекающих на поверхности и краях террас. При низких значениях T_s вклад адсорбционно-десорбционных процессов в формирование состава твёрдого раствора меняется незначительно.

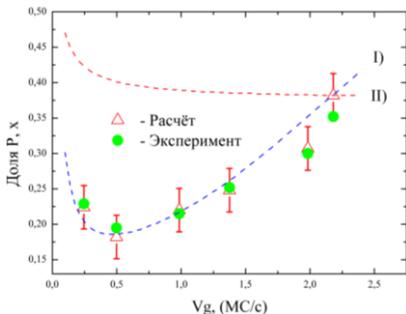


Рис. № 3 Зависимость доли фосфора x в GaP_xAs_{1-x} от V_g при $T_S=500^\circ C$. Кружки - эксперимент, треугольники - расчёт. Линии - расчётные зависимости: I) - $(J_{As_2}+J_{P_2})/J_{Ga} \neq const$ и $J_{P_2}/(J_{As_2}+J_{P_2}) \sim const$ при $J_{As_2} = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$, $J_{P_2} = 2,2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$; II) - $(J_{As_2}+J_{P_2})/J_{Ga} \sim const$, $J_{P_2}/(J_{As_2}+J_{P_2}) \sim const$.

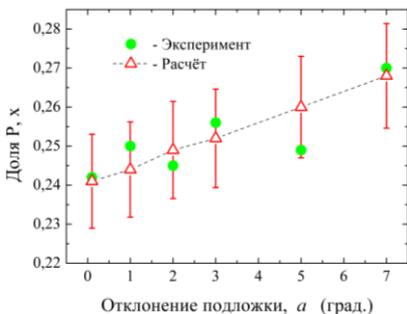


Рис. № 4 Зависимость доли фосфора x в GaP_xAs_{1-x} от α . Кружки - экспериментальные данные. Треугольники - расчётные значения. Линия - для облегчения восприятия рисунка.

краях и поверхности террас. V_g задаёт длительность изменения состава реконструкционного слоя в результате этих процессов. Мышьяк легче покидает поверхность, поэтому со снижением V_g доля фосфора возрастает.

На Рис. 4 представлены расчётные доли фосфора от α в сравнении с экспериментальными данными. Модель отражает тенденцию изменения x с ростом α .

Зависимость состава твёрдого раствора от угла α обусловлена изменением плотности ступеней при изменении его величины. От плотности ступеней зависит их заселённость адатомами третьей группы, и как следствие - частота следования областей роста вдоль ступеней. Указанным параметром определяется время изменение состава ПС на краях террас между областями роста.

С целью описания экспериментальных данных, полученных для $InAs_xSb_{1-x}$, в модель были внесены

изменения, учитывающие существование ПС со степенью покрытия атомами V группы как больше (ПС (1x3)), так и меньше 1 (ПС (8x2)). На Рис.5. представлена зависимость доли мышьяка x от T_S при МЛЭ из потоков молекул As_2 , Sb_4 и As_4 , Sb_4 в условиях существования ПС (1x3).

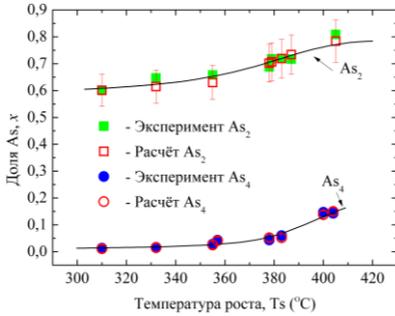


Рис. № 5 Зависимость доли мышьяка x в $InAs_xSb_{1-x}$ от T_S при МЛЭ из потоков молекул As_2 , Sb_4 и As_4 , Sb_4 . Закрашенные кружки и квадраты – экспериментальные данные. Не закрашенные кружки и квадраты – расчётные значения. Линии – расчётные зависимости при $J_{In} = 5,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$, $J_{As_2} = 5,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$, $J_{Sb_4} = 2,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ для As_2 , и $J_{In} = 5,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$, $J_{As_4} = 2,8 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$, $J_{Sb_4} = 2,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ для As_4 .

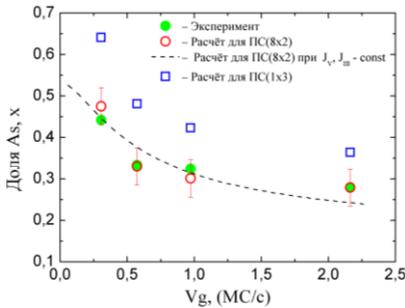


Рис. № 6 Зависимость доли мышьяка x в $InAs_xSb_{1-x}$ от V_g при МЛЭ из потоков молекул As_2 и Sb_4 . Закрашенные кружки – экспериментальные данные. Не закрашенные квадраты – расчётные значения для ПС (1x3). Не закрашенные кружки – расчётные значения для ПС (8x2). Линия – расчётная зависимость для ПС (8x2) при $2 \times J_{As_2} / (4 \times J_{Sb_4} + 2 \times J_{As_2}) = 0,26$, $(4 \times J_{Sb_4} + 2 \times J_{As_2}) / J_{In} = 1,4$, $T_S = 375 \text{ }^\circ\text{C}$

Расчётные значения получены с использованием модели для ПС(1x3). Наблюдаемая форма кривых аналогична кривой зависимости состава твёрдого раствора GaP_xAs_{1-x} . Что говорит об аналогичных процессах, протекающих на поверхности роста, но с другой экспоненциальной зависимостью констант скорости процессов массопереноса.

На Рис.6. приведена зависимость доли мышьяка x в $InAs_xSb_{1-x}$ от V_g при МЛЭ из потоков молекул As_2 и Sb_4 . в условиях существования ПС (8x2). Видно, что полученные экспериментальные данные не описываются с помощью модели для ПС (1x3). Для объяснения подобного поведения было учтено преобладание вакансионного механизма над механизмом замещения, которое наблюдается в случае ПС со степенью покрытия менее 1 (ПС (8x2)) и в модель для ПС (1x3) были внесены соответствующие изменения. В итоге получена модифицированная модель для ПС (8x2), в которой не учитывается процесс замещения димеров сурьмы на димеры мышьяка при хемосорбции As_2 . В модели для ПС (8x2) подбирались только константы для процессов

переходов димеров сурьмы и мышьяка в молекулярное состояние. Остальные константы были оставлены без изменений.

На Рис.7 представлены зависимости состава $InAs_xSb_{1-x}$ от величины угла отклонения подложки при МЛЭ из потоков молекул As_2 , Sb_4 и As_4 , Sb_4 , выращенных при ПС(1×3). С увеличением угла отклонения возрастает доля As , что характерно как для As_2 , так и для As_4 . Номинальные величины молекулярных потоков для всех образцов были одинаковы. Образцы отличаются только величиной α . Качественно модель хорошо описывает изменение доли мышьяка в зависимости от α .

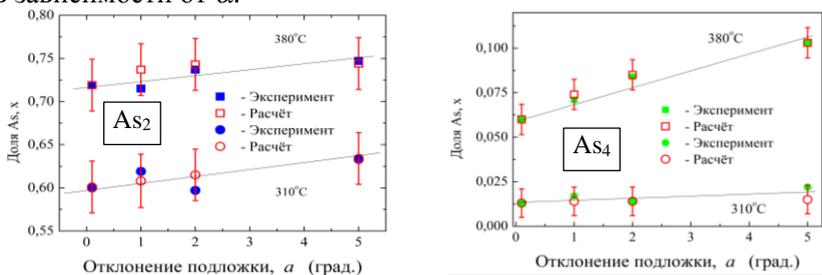


Рис. № 7 Зависимость доли мышьяка x в $InAs_xSb_{1-x}$ от величины угла α для МЛЭ из потоков молекул As_2 , Sb_4 и As_4 , Sb_4 . Закрашенные кружки и квадраты – экспериментальные данные. Открытые кружки и квадраты – расчётные значения.

Различие в зависимостях доли x от α для As_2 и As_4 объясняется разными механизмами взаимодействия этих молекул с поверхностью антимоноидов [А6].

Максимальная величина отклонения расчётных значений модели по всей совокупности полученных экспериментальных данных не превысила 11% для GaP_xAs_{1-x} , и 12% для $InAs_xSb_{1-x}$.

Результаты моделирования свидетельствует о правомерности включения в рассмотрение процесса формирования состава твёрдых растворов $A^III B^V$ замещения по пятой группе нестационарных процессов на поверхности роста. Представленные результаты опубликованы в работах. [А4 - А7, В22 - В24].

Модель позволяет проводить априори оценку состава твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} и $InAs_xSb_{1-x}$ в зависимости от условий роста, а также осуществлять подбор величин молекулярных потоков элементов пятой группы, обеспечивающих получение требуемого состава твёрдого раствора при выбранных значениях T_s , α и V_g , а также сверхструктурного состояния ростовой поверхности.

Апробация кинетической модели проведена на примере выращивания структуры для зеркала с пассивной синхронизацией мод, содержащей 20 периодов сверхрешётки $In_{0.88}Ga_{0.12}As_{0.26}P_{0.74}/InP$ 8 нм/3 нм на подложке $InP(001)$. Для выращивания гетероструктуры использовались потоки молекул As_2 и P_2 , значения плотности которых для данного состава были определены из модели. V_g составляла 1 МС/с, $T_S = 450^\circ\text{C}$. Методом РСА был определён состав выращенных слоёв. Отклонение доли фосфора от заданного не превысило 6%. Аналогично модель была использована для роста атимонидных твёрдых растворов $Al_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.56}Sb_{0.44}$ на установке МЛЭ «Катунь - Б». Данные РСА позволили определить состав выращенных антимонидных слоёв, который составил: $Al_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.61}Sb_{0.39}$, где отклонение по доле As не превысило 9% от заданного.

Основные результаты и выводы по диссертации

1. Изучено взаимодействие молекул As_2 , As_4 с поверхностью $GaSb(001)$ с реконструкцией (1×3). В процессе выдержки поверхности в потоке молекул мышьяка происходит формирование поверхностной структуры смешанного состава, включающего в себя как димеры мышьяка, так и димеры сурьмы. На основе анализа экспериментальных данных сделано заключение, что изменение состава поверхностной структуры в случае молекул молекулы As_2 происходит в результате замещения димеров сурьмы, а в случае As_4 – в результате диссоциативной хемосорбции на вакансиях.
2. Установлены зависимости состава твёрдых GaP_xAs_{1-x} , $InAs_xSb_{1-x}$ при МЛЭ от температуры роста, плотности молекулярных потоков, а также величины угла отклонения подложки от сингулярной грани (001).
3. На основе полученных экспериментальных данных предложена кинетическая модель роста твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} и $InAs_xSb_{1-x}$ при МЛЭ на вицинальной поверхности (001), учитывающая нестационарность процессов массопереноса на ростовой поверхности. В основу модели положен двумерно-слоевой механизм роста, при котором террасы, имеющие реконструированную поверхность, последовательно достраиваются в областях роста, локализованных в изломах ступеней. Модель с

хорошей точностью описывает весь массив полученных экспериментальных данных.

4. Анализ экспериментальных данных, выполненный с помощью предложенной модели, показал, что:

- Скорость роста является самостоятельным фактором, определяющим формирование состава твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} , $InAs_xSb_{1-x}$ при МЛЭ. Она задаёт длительность изменения состава реконструкционного слоя на поверхности террас и их краях вне областей роста.
- Увеличение угла отклонения подложки приводит к росту плотности вицинальных ступеней. Плотностью ступеней определяется скорость движения областей роста вдоль краёв террас и, как следствие, – длительность изменения состава реконструированного слоя на краях террас между областями роста.
- При росте плёнок твёрдых растворов $InAs_xSb_{1-x}$ с ПС (1×3) процесс изменения состава на поверхности происходит по механизму замещения в случае использования молекул As_2 , и по вакансионному механизму в случае As_4 .
- В случае эпитаксии плёнок твёрдых растворов $InAs_xSb_{1-x}$ с ПС (8×2), которые не содержат сверхмонослойных рядов димеров сурьмы, процесс изменения состава на поверхности происходит только в результате хемосорбции на вакансиях как в случае молекул As_2 , так и As_4 .

5. Предложенная модель позволяет проводить оценку состава твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} и $InAs_xSb_{1-x}$ в зависимости от условий роста, а также осуществлять подбор величин молекулярных потоков элементов пятой группы, обеспечивающих получение требуемого состава твёрдых растворов при выбранных значениях температуры, скорости роста, а также поверхностной структуры и угла ориентации поверхности подложки.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

Статьи

[A1] Putyato, M. A. A valved cracking phosphorus beam source using InP thermal decomposition and its application to MBE growth / Putyato M. A., Preobrazhenskii V. V., Semyagin B. R., Fklin D. F., Pakhanov N. A., Emelianov E. A., Chikichev S. I. // *Semiconductor Science and Technology* – 2009. – V. 24 – № 5, doi: 10.1088/0268-1242/24/5/055014.

[A2] Емельянов, Е. А. Формирование методом МЛЭ напряженных короткопериодных сверхрешеток InAs/GaSb II-типа для фотоприемников ИК диапазона / Е. А. Емельянов, Д. Ф. Феклин, А. В. Васев, М. А. Пустьято, Б. Р. Семягин, А. П. Василенко, О. П. Пчеляков, В. В. Преображенский // *Автометрия* – 2011. – Т. 47 – № 5 – С.43–51.

[A3] Емельянов, Е.А. Формирование состава твёрдых растворов GaP_xAs_{1-x} и GaSb_xAs_{1-x} при молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием потока молекул As₂ и As₄ / Е. А. Емельянов, М. А. Пустьято, Б. Р. Семягин, А. П. Василенко, В. В. Преображенский // *Изв. вузов. Физика* – 2010. – Т. 53 – № 9–2 – С.298–300.

[A4] Емельянов, Е.А. Молекулярно-лучевая эпитаксия твердых растворов A^{III}P_xAs_{1-x}: механизм формирования состава в подрешетке элементов V группы / Е. А. Емельянов, М. А. Пустьято, Б. Р. Семягин, Д. Ф. Феклин, В. В. Преображенский // *Физика и техника полупроводников* – 2015. – Т. 49 – № 2 – С.163–170.

[A5] Пустьято, М. А. Молекулярно-лучевая эпитаксия твёрдого раствора GaP_xAs_{1-x} на вицинальной поверхности (001): кинетическая модель формирования состава в анионной подрешётке / М. А. Пустьято, Е. А. Емельянов, М. О. Петрушков, А. В. Васев, Б. Р. Семягин, В. В. Преображенский // *ЖЭТФ* – 2024 – Т. 165 – 1 – С. 51–64, doi: 10.31857/S0044451024010061.

[A6] Емельянов, Е. А. Рост твердых растворов InAs_xSb_{1-x} на отклоненных подложках GaAs(001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии / Е. А. Емельянов, А. В. Васев, Б. Р. Семягин, М. Ю. Есин, И. Д. Лошкарев, А. П. Василенко, М. А. Пустьято, М. О. Петрушков, В. В. Преображенский // *Физика и техника полупроводников* – 2019. – Т. 53 – № 4 – С.512–519, doi: 10.21883/ФТР.2019.04.47451.8981.

[A7] – Емельянов, Е.А. Молекулярно-лучевая эпитаксия твёрдого раствора InAsSb: влияние скорости роста на состав эпитаксиальных слоёв / Е.А. Емельянов, М.О. Петрушков, М.А. Пустьято, И.Д. Лошкарев, А.В. Васев, Б.Р. Семягин, В.В. Преображенский // *Автометрия* – 2020. – Т. 56 – № 2 – С.58–63.

Тезисы и материалы конференций

[B1] Емельянов, Е. А. Формирование состава твёрдых растворов $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ и $\text{GaSb}_x\text{As}_{1-x}$ при молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием потока молекул As_2 и As_4 / Е. А. Емельянов, М. А. Пулято, Б. Р. Семягин, А. П. Василенко, В. В. Преображенский // 3-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиопизики, АПП-2010». – Томск, 2010.

[B2] Emelyanov, E. Effect of arsenic molecular form (As_2 or As_4) on the composition of solid solutions $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$, $\text{GaSb}_x\text{As}_{1-x}$ during the molecular-beam epitaxy / E. Emelyanov, M. Putyato, B. Semyagin, A. Vasilenko, V. Preobrazhenskii // International conference on modern problems in physics of surfaces and nanostructures. – Yaroslavl, Russia, 2010.

[B3] Emelyanov, E. MBE Growth of $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ and $\text{GaSb}_x\text{As}_{1-x}$ Solid Solutions with As_2 or As_4 Molecular Beam. / E. Emelyanov, M. Putyato, B. Semyagin, A. Vasilenko V. Preobrazhenskii // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2010 11th International Conference and Seminar of Young Specialists. – Erlagol, Russia, 2010. – PP. 109 – 110.

[B4] Emelyanov, E. A. Molecular-beam epitaxy of solid solutions $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$: effect of growth conditions on the composition in the sublattice of V group / E. A. Emelyanov, M. A. Putiato, B. P. Semyagin, D. F. Feklin, V. V. Preobrazhenskii // Asia Priority in Advanced Materials «АПАМ-12». – Новосибирск, 2012.

[B5] Емельянов, Е. А. Выращивание твёрдых растворов $\text{A}^{\text{III}}\text{P}_x\text{As}_{1-x}$ методом МЛЭ: механизм формирования состава в подрешётке V группы / Е. А. Емельянов, Д. Ф. Феклин, М. А. Пулято, Б. Р. Семягин, В. В. Преображенский // Актуальные проблемы физики твёрдого тела «ФТТ-2013». – Минск, Беларусь, 2012.

[B6] Emelyanov, E. A. Molecular Beam Epitaxy of Solid Solutions $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$: Effect of Growth Condition on the Composition of Group V Sublattice. / E. A. Emelyanov, M. A. Putyato, B. R. Semyagin, D. F. Feklin, V. V. Preobrazhenskii // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2013 14th International Conference and Seminar of Young Specialists. – Erlagol, Russia, 2013. – PP. 6 – 9.

[B7] Емельянов, Е. А. МЛЭ твердых растворов $\text{A}^{\text{III}}\text{P}_x\text{As}_{1-x}$: механизм формирования состава в подрешетке V группы / Е. А. Емельянов, М. А. Пулято, В. В. Преображенский, Б. Р. Семягин, Д. Ф. Феклин // XVIII Международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника». – Нижний Новгород, 2014.

[B8] Emelyanov, E. A. The Solid Solutions (A^{III}) $\text{P}_x\text{As}_{1-x}$: Mechanism of Formation the V Group Sublattice Composition / E. A. Emelyanov, M. A.

Putiato, B. P. Semyagin, D. F. Feklin, V. V. Preobrazhenskii // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2014 15th International Conference and Seminar of Young Specialists. – Erlagol, Russia, 2014. – PP. 7 – 9.

[B9] Emelyanov, E. A. Effect of As₂ and As₄ Fluxes on the Morphology of GaSb(001) Surface During Growth of GaSb/InAs Heterojunction by MBE / E. A. Emelyanov, M. A. Putyato, B. R. Semyagin, A. P. Vasilenko, D. F. Feklin, A. V. Vasev, V. V. Preobrazhenskii // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2011 International Conference and Seminar of Young Specialists. – Erlagol, Russia, 2011. – PP. 37 – 40.

[B10] Емельянов, Е. А. Формирование методом МЛЭ напряженных короткопериодных сверхрешеток InAs/GaSb II-типа для фотоприемников ИК диапазона / Е. А. Емельянов, Д. Ф. Феклин, А. В. Васев, М. А. Путьято, Б. Р. Семягин, А. П. Василенко, В. В. Преображенский // Российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоники «Фотоника 2011». – Новосибирск, 2011.

[B11] Емельянов, Е. А. Механизм замещения атомов Sb на As в анионной подрешетке при формировании гетерограницы InAs/GaSb методом МЛЭ / Е. А. Емельянов, Д. Ф. Феклин, А. В. Васев, М. А. Путьято, Б. Р. Семягин, А. П. Василенко, В. В. Преображенский // X Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники 2011». — Нижний Новгород, 2011.

[B12] Putyato, M. A. Formation of Type – II InAs/GaSb Strained Short-Period Superlattices for IR Photodetectors by molecular beam epitaxy: the substitution mechanism of Sb atoms by As in the anion sublattice. / M. A. Putyato, B. R. Semyagin, A. V. Vasev, E. A. Emelyanov, D. F. Feklin, O. P. Pchelyakov, V. V. Preobrazhenskii. 7st China-Russia Joint Workshop on Advanced Semiconductors Materials and Devices. – Hangzhou, China, 2012.

[B13] Vasev, A. V. The exchanging mechanisms in anion sublattice during formation of InAs/GaSb heterointerfaces by MBE /A. V. Vasev, E. A. Emelyanov, D. F. Feklin, M. A. Putyato, B. R. Semyagin, V. V. Preobrazhenskii // Thesis of E-MRS 2014 Fall meeting. – Warsaw, Poland, 2014.

[B14] Васев, А. В. Взаимодействие сурьмы с поверхностью InAs(001) при формировании гетерограниц InAs/GaSb методом МЛЭ / А. В. Васев, Е. А. Емельянов, М. А. Путьято, Б. Р. Семягин В. В. Преображенский // XII Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники 2015». – Ершово, 2015.

[B15] Емельянов, Е. А. МЛЭ твёрдых растворов InAsSb на GaAs (001): влияние молекулярной формы As на состав и кристаллическое совершенство эпитаксиальных слоёв / Е. А. Емельянов, А. В. Васев, Б. Р. Семягин, А. П. Василенко, А. А. Команов, А. К. Гутаковский, М. А. Путьято,

В.В. Преображенский // XII Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники 2015». – Ершово, 2015.

[B16] Емельянов, Е. А. Получение гетероструктур InAsSb методом МЛЭ с применением различных молекулярных форм As / Е. А. Емельянов, А. В. Васев, Б. Р. Семягин, А. П. Василенко, А. А. Команов А. К., Гутаковский, М. А. Путято В. В. Преображенский // Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника 2015». –Новосибирск, 2015.

[B17] Emel'yanov E.A. InAsSb on GaAs (001): Influence of the arsenic molecules form on composition and crystalline properties of MBE layers / E.A. Emel'yanov, A. V. Vasev, B. R. Semyagin, A. P. Vasilenko, A. A. Komanov, A. K. Gutakovskii, M. A. Putyato, V. V. Preobrazhenskii // Journal of Physics: Conference Series – 2015. – P.1–7.

[B18] Емельянов, Е. А. МЛЭ твёрдых растворов $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ на вицинальных подложках GaAs(001) с использованием потоков молекул As_2 и As_4 / Е. А. Емельянов, М. А. Путято, М. О. Петрушков, А. В. Васев, И. Д. Лошкарёв, Б. Р. Семягин // XIII Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники 2017». – Екатеринбург, 2017.

[B19] Емельянов, Е. А. Влияние условий роста на состав твердого раствора $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{GaAs}(001)$ при МЛЭ / Е. А. Емельянов, М. О. Петрушков, М. А. Путято, В. В. Преображенский, Б. Р. Семягин, А. В. Васев, И. Д. Лошкарёв // XXI Международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника». – Нижний Новгород, 2017.

[B20] Емельянов, Е. А. МЛЭ твердых растворов $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ на вицинальных подложках GaAs(001): влияние разориентации на состав твердого раствора / Е. А. Емельянов М. О. Петрушков И. Д. Лошкарёв М. А. Путято В. В. Преображенский Б. Р. Семягин А. В. Васев // Сборник трудов «XX Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и нанoeлектроники». – Санкт-Петербург, 2018.

[B21] Емельянов, Е. А. Влияние скорости роста на состав слоев в подрешетке пятой группы при МЛЭ твердых растворов InAsSb / Е. А. Емельянов, М. О. Петрушков, А. В. Васев, Б. Р. Семягин, М. А. Путято, И. Д. Лошкарёв, В. В. Преображенский. // Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника 2019». – Новосибирск, 2019.

[B22] Емельянов, Е. А. Кинетическая модель формирования состава твердых растворов $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$: влияние скорости роста / Е. А. Емельянов, М. А. Путято, В. В. Преображенский, М. О. Петрушков, Б. Р. Семягин, А. В. Васев // XIV Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники 2019». – Новосибирск, 2019.

[B23] Emelyanov, E. A. MBE of InAsSb Solid Solutions on Misoriented GaAs(100) Substrates: Experiment and Kinetic Analysis / E. A. Emelyanov, M. O. Petrushkov, M. A. Putyato, A. V. Vasev, B. R. Semyagin, V. V. Preobrazhenskii. // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2019 20th International Conference and Seminar of Young Specialists. – Erlagol, Russia, 2019. – PP. 3 – 6.

[B24] Емельянов, Е. А. МЛЭ твёрдых растворов $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ на вицинальных подложках: влияние отклонения на состав пленок / Емельянов Е.А., Петрушков М.О., Лошкарев И.Д., Васев А.В., Семягин Б.Р., Путьято М.А., Преображенский В.В. // В книге: Фотоника 2021. Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых). Новосибирск, 2021. С. 38.

Список цитируемой литературы

1. Левин Р.В. Фотоэлектрические преобразователи концентрированного солнечного излучения на основе InGaAsP (1.0 эВ) / InP-гетероструктур / Левин Р.В., Маричев А.Е., Шварц М.З., Марухина Е.П., Хвостиков В.П., Пушный Б.В. // Физика и техника полупроводников – 2015. – Т. 49 – № 5 – С.715–718.
2. Ozen Y. Characterization of Double-Junction GaAsP Two-Color LED Structure / Ozen Y., Sertel T., Cetin S.S., Ozcelik S. // Journal of Electronic Materials – 2018. – Т. 47 – № 12 – С.7129–7133.
3. Rogalski A. InAs / GaSb type-II superlattice infrared detectors: Future prospect / Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M. // Applied Physics Reviews – 2017. – Т. 4 – № 3 – С.031304.
4. Michalczewski K. Infrared Physics & Technology Demonstration of HOT LWIR T2SLs InAs / InAsSb photodetectors grown on GaAs substrate / Michalczewski K., Kubiszyn Ł., Martyniuk P., Wu C.H., Jureńczyk J., Grodecki K. // Infrared Physics & Technology – 2018. – Т. 95 – № June – С.222–226.
5. А.Н. Семенов, В.С. Сорокин, В.А. Соловьев, Б.Я. Мельцер С.В.И. Особенности встраивания молекул Sb_2 и Sb_4 при молекулярно-пучковой эпитаксии твёрдых растворов AlGaAsSb / А.Н. Семенов, В.С. Сорокин, В.А. Соловьев, Б.Я. Мельцер С.В.И. // Физика и техника полупроводников – 2004. – Т. 38 – № 3 – С.278–284.
6. Mochizuki K. MBE Growth of $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ and $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ and Application of BCF Theory to Study the Alloy Composition / Mochizuki K., Nishinaga T. // Japanese Journal of Applied Physics – 1988. – Т. 27 – № Part 1, No. 9 – С.1585–1592.

7. Zederbauer T. Incorporation of Sb and As in MBE grown GaAs_xSb_{1-x} layers / Zederbauer T., Andrews A.M., MacFarland D., Detz H., Schrenk W., Strasser G. // *APL Materials* – 2017. – T. 5 – № 3.
8. Sarney W.L. Flux dependent Sb-incorporation during molecular beam epitaxy of InAsSb / Sarney W.L., Svensson S.P. // *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena* – 2015. – T. 33 – № 6 – C.060604.
9. Nomura T. Composition control of GaAsP grown by molecular beam epitaxy / Nomura T., Ogasawara H., Miyao M., Hagino M. // *Journal of Crystal Growth* – 1991. – T. 111 – № 1-4 – C.61-64.
10. Ploog K. Molecular Beam Epitaxy of III-V Compounds: Technology and Growth Process / Ploog K. // *Annual Review of Materials Science* – 1981. – T. 11 – № 1 – C.171-210.
11. Tok E.S. Incorporation kinetics of As₂ and As₄ on GaAs(110) / Tok E.S., Neave J.H., Allegretti F.E., Zhang J., Jones T.S., Joyce B.A. // *Surface Science* – 1997. – T. 371 – № 2-3 – C.277-288.
12. Liang B.W. A kinetic model for As and P incorporation behaviors in GaAsP grown by gas-source molecular beam epitaxy / Liang B.W., Tu C.W. // *Journal of Applied Physics* – 1993. – T. 74 – № 1 – C.255-259.
13. Chatillon C. Thermodynamic analysis of GaAs growth by molecular beam epitaxy at the surface structure transition from 3 × 1 to 4 × 2 / Chatillon C., Harmand J.C., Alexandre F. // *Journal of Crystal Growth* – 1993. – T. 130 – № 3-4 – C.451-458.
14. Egorov A.Y. A thermodynamic analysis of the growth of III-V compounds with two volatile group V elements by molecular-beam epitaxy / Egorov A.Y., Kovsh A.R., Ustinov V.M., Zhukov A.E., Kop'ev P.S., Tu C.W. // *Journal of Crystal Growth* – 1998. – T. 188 – № 1-4 – C.69-74.