

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

СНИГИРЕВА ЛЕОНИДА АЛЕКСЕЕВИЧА

**«Формирование и кристаллография наночастиц AsSb при распаде
пересыщенного мышьяком твердого раствора GaAsSb»,**

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников»

Актуальность работы

Работа Л.А. Снигирева посвящена изучению процессов формирования наночастиц AsSb в низкотемпературных эпитаксиальных слоях GaAsSb – перспективном классе метаматериалов для оптоэлектроники и фотоники.

Развитие высокоскоростных оптических детекторов, модуляторов, сенсоров и источников ИК-излучения требует создания композитных сред с резонансным откликом в заданном спектральном диапазоне. Системы на основе полупроводниковых матриц с металлическими наночастицами (такими как AsSb) позволяют реализовать плазмонные резонансы в ближнем инфракрасном диапазоне – области, критически важной для телекоммуникационных приложений. Управление параметрами частиц (размером, составом, кристаллографией) открывает возможность тонкой настройки оптических характеристик метаматериала. При этом низкотемпературная молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) является одним из наиболее технологичных методов получения слоев с заданным содержанием избыточных компонентов, а процессы выделения избыточных фаз в пересыщенных твердых растворах лежат в основе многих технологий получения нанокомпозитов. Однако до настоящего времени оставались не до конца изученными механизмы совместной преципитации мышьяка и сурьмы, а также влияние технологических параметров, таких как температура отжига и промежуточный нагрев, на морфологию и кристаллографию формирующихся наночастиц. Без такого понимания невозможно целенаправленное создание ансамблей частиц с заданными свойствами.

Таким образом, работа Л.А. Снигирева находится на стыке актуальных направлений современной физики полупроводников, материаловедения и нанотехнологий, а ее результаты имеют как научное, так и прикладное значение для разработки нового поколения оптоэлектронных устройств.

Научная новизна

Научная значимость и новизна исследования определяются глубиной проработки процессов формирования наноструктур в системах LT-GaAsSb и LT-GaAsBi. В

отличие от хорошо исследованного LT-GaAs, материалы типа LT-GaAsSb и LT-GaAsBi остаются малоизученными, особенно в части кристаллографических превращений и переориентации частиц в процессе отжига. Выявление новых ориентационных соотношений и фазовых состояний в наночастицах расширяет фундаментальные представления о поведении наноразмерных объектов в матрицах и может привести к открытию новых функциональных свойств.

Существенным результатом является установление явления переориентации частиц при увеличении их размера, что позволяет по-новому взглянуть на механизмы стабилизации наноструктур в полупроводниковых матрицах. Выявленная зависимость ориентационных соотношений от размера частиц открывает новые возможности для управления свойствами материалов.

Важным научным достижением можно считать обнаружение различий в межплоскостных расстояниях, влияющих на формирование ориентационных соотношений. Это позволяет более точно прогнозировать поведение материала при различных условиях обработки.

В итоге выполнения диссертационного исследования Л.А. Снигиревым получен ряд новых результатов, из которых, на мой взгляд, следует выделить следующие:

1. Впервые показано, что энергия активации диффузии в LT-GaAsSb составляет 0.7 ± 0.1 эВ, что ниже, чем в LT-GaAs (0.87 эВ), и предложено объяснение этого явления – дополнительный междоузельный механизм диффузии Sb.
2. Обнаружено влияние промежуточного низкотемпературного нагрева (250 °C) на последующую преципитацию: показано, что такой нагрев активирует зародышеобразование, что приводит к формированию более крупных частиц при последующем отжиге.
3. Впервые выявлены неклассические ориентационные соотношения для наночастиц AsSb и Bi в матрице GaAs и установлено, что с ростом размера частиц происходит переход к классическим ориентациям.
4. Предложен механизм замещения Sb атомами As, объясняющий высокое содержание сурьмы (до 80%) в преципитатах при ее низкой исходной концентрации в матрице (3%).
5. Продемонстрирована возможность существования кубической фазы в наночастицах AsSb при определенных условиях, что расширяет представления о фазовой стабильности в наноразмерных системах.

Практическая значимость

Практическая ценность работы заключается в возможности использования полученных результатов для оптимизации технологических процессов и создания материалов с заданными характеристиками, что имеет важное значение для развития современной полупроводниковой техники, а также новых оптических материалов и

устройств. В частности, исследование кинетики и термодинамики преципитации в системе GaAs–Sb позволяет не только объяснить наблюдаемые эффекты (такие как аномально высокое содержание сурьмы в частицах), но и разработать практические рекомендации по управлению размерным распределением, концентрацией и стабильностью наночастиц. Это особенно важно при создании устройств с заданными оптическими характеристиками, например, при создании многослойных структур с упорядоченными массивами включений, применяемых в плазмонных волноводах и фотоприемных устройствах.

Важным практическим результатом является возможность управления ориентационными соотношениями наночастиц. Установленные зависимости между размером частиц и их ориентацией относительно матрицы позволяют варьировать кристаллографические характеристики ансамблей наночастиц. Поскольку оптические, электрические и механические свойства композитов зависят от взаимной ориентации фаз, открывается возможность создания материалов с заданной анизотропией и направленными характеристиками, что важно, например, при проектировании поляризационно-чувствительных элементов в нанопотонике.

Особую ценность представляет возможность использования установленных закономерностей для оптимизации процессов формирования плазмонного резонанса в разрабатываемых материалах. Это имеет прямое прикладное значение для разработки высокоэффективных оптических сенсоров, быстрых фотодетекторов с настраиваемой спектральной чувствительностью, элементов нелинейной оптики на основе локализованных плазмонов.

Кроме этого, определенные энергетические и кинетические параметры (энергия активации, критические размеры переориентации) могут быть использованы при моделировании процессов преципитации в других метаматериалах, а методики, разработанные в работе (комбинация ПЭМ, EDX, PCA, оптической спектроскопии) – для анализа других полупроводниковых нанокомпозитов.

Степень обоснованности научных положений и выводов в диссертации и их достоверность

Степень обоснованности научных положений диссертации подтверждается комплексным подходом к исследованию объектов и применением современных экспериментальных методов. Применение просвечивающей электронной микроскопии в различных режимах, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, рентгенодифракционного анализа и оптической спектроскопии позволило получить достоверные данные о структуре и свойствах образцов.

Достоверность результатов обеспечивается качественным температурным контролем при росте образцов, применением стандартизированных методик элементного анализа и корректной обработкой полученных данных с помощью специализированного программного обеспечения.

Статистическая обработка данных проведена на должном уровне, измерения размеров и концентраций наночастиц проводились на выборках, содержащих большое количество объектов, с оценкой погрешностей. Данные, полученные на сериях образцов, выращенных в идентичных условиях, воспроизводимы и не противоречат известным физическим закономерностям.

Оценка структуры и содержания работы

Анализ содержания работы показывает высокий уровень проработки материала и грамотную организацию исследования. Диссертация построена по классической схеме, включающей введение, три содержательные главы, заключение и список литературы.

Во введении сформулированы актуальность, цель, задачи, научная новизна, практическая значимость и методология исследования. Изложены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 (литературный обзор) демонстрирует глубокое понимание автором предметной области. Обзор представляет собой критический анализ эволюции научных представлений – от основ низкотемпературной эпитаксии GaAs до современных исследований родственных материалов (LT-AlGaAs, LT-GaAsSb, LT-GaAsBi). Выделены ключевые открытые вопросы, на которые направлено настоящее исследование.

Глава 2 (методы исследования) выполнена на высоком методическом уровне. Подробно и технически грамотно описаны:

- Процесс роста структур методом МПЭ с акцентом на технологические нюансы (промежуточный нагрев, защитные слои).
- Методика подготовки образцов для ПЭМ, что критически важно для оценки достоверности микроскопических данных.
- Принципы получения информации в ПЭМ (формирование контраста, дифракция, анализ в сходящемся пучке).
- Методы рентгеноструктурного анализа и оптической спектроскопии.

Глава 3 (экспериментальные результаты и их обсуждение) – центральная и наиболее содержательная часть работы. В этой главе последовательно отражено решение поставленных задач:

- Систематическое исследование влияния температуры отжига на параметры ансамбля частиц. Данные представлены в виде наглядных графиков и таблиц, сопровождаются расчетами энергии активации и элементного состава.
- Исследование влияния промежуточного нагрева – эффект, ранее не изученный в подобных системах. Предложено физическое объяснение влияния промежуточного нагрева на преципитацию наночастиц.
- Кристаллографический анализ. Автор использует комбинацию микродифракции и ВРЭМ для расшифровки сложных ориентационных

соотношений и их эволюции. Обнаружение новых ориентаций и явления переориентации является особенно интересным результатом.

- Сравнение поведения систем AsSb и Bi подчёркивает универсальность выявленных закономерностей и в то же время выявляет специфику, связанную с размером частиц и параметрами решётки.

Заключение резюмирует основные результаты, которые напрямую соотносятся с поставленными задачами и положениями, выносимыми на защиту.

Структура и содержание диссертации Л.А. Снигирева полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор демонстрирует владение как экспериментальной техникой, так и теоретическими основами физики полупроводников, фазовых превращений и кристаллографии. Материал изложен профессионально, с корректным использованием научной терминологии. Результаты представлены убедительно, с достаточным количеством подтверждающих данных. Список литературы репрезентативен, включает как классические, так и современные источники, в том числе работы автора по теме диссертации.

Замечания по диссертации

Наряду с несомненными достоинствами можно отметить некоторые замечания к работе.

1. Работа содержит лишь косвенные подтверждения наличия плазмонного резонанса нановключений AsSb и Bi в матрице GaAs, на спектрах экстинкции (Рис.20) плазмонный пик отсутствует. Возможно, это связано с тем, что плазмонный резонанс наночастиц AsSb находится вне окна прозрачности матрицы. Однако в этом случае непонятно, возможно ли использовать заявленные резонансные эффекты в практических приложениях? Делалась ли теоретическая оценка положения пика плазмонного резонанса для исследуемых систем? В частности, как будет изменяться положение пика при в зависимости от содержания сурьмы в наночастицах и их структуры кристаллографии? Чем определяется плечо в области 1100 нм на графике экстинкции неотожженных образцов (Рис.20)?
2. Проводилось ли исследование состава (доли сурьмы) в преципитатах AsSb в зависимости от их размера включений? Возможно, что переход от «неклассических» к «классическим» ориентационным соотношениям связан именно с составом преципитатов.
3. При рассмотрении особенностей преципитации на начальных этапах (п.3.2.2) в случае образцов $LT-GaAs_{0.97}Sb_{0.03}$ беспороговый характер нуклеации недостаточно аргументирован, особенно с учетом того, что доля сурьмы в преципитате значительно выше ее доли в начальном растворе. Этот раздел было бы полезно дополнить расчетом энергии активации нуклеации или количественной оценкой влияния упругих напряжений.

Высказанные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы соискателя.

Заключение

Диссертационная работа Снигирева Леонида Алексеевича представляет собой завершённое научное исследование, выполненное на высоком профессиональном уровне. Полученные в работе результаты и выводы являются достоверными и обоснованными. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Полученные результаты вносят значительный вклад в физику полупроводниковых наноматериалов и имеют важное практическое значение для разработки метаматериалов с управляемыми оптическими свойствами.

Считаю, что диссертационная работа Снигирева Леонида Алексеевича «Формирование и кристаллография наночастиц AsSb при распаде пересыщенного мышьяком твердого раствора GaAsSb» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 — "физика полупроводников" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Снигирев Леонид Алексеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук

(специальность 01.04.04 – «Физическая электроника»), доцент

профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»



Журихина Валентина Владимировна

10 декабря 2025 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,
телефон: (812) 552-65-08,
e-mail: zhurikhina_vv@spbstu.ru

