

ОТЗЫВ

**официального оппонента кандидата физико-математических наук,
доцента Васильева Александра Леонидовича о диссертации на
соискании ученой степени кандидата физико-математических наук
Снигирева Леонида Алексеевича
на тему «Формирование и кристаллография наночастиц AsSb при
распаде пересыщенного мышьяком твердого раствора GaAsSb»
по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.**

Актуальность работы

Актуальность представленной диссертационной работы обусловлена предметом исследования – новыми композитными материалами, уникальные свойства которых определяются не их химическим составом, а целенаправленно спроектированной внутренней структурой на микро- или наноуровне – метаматериалами. Очень важной особенностью защищаемой работы является возможность интеграции разработанных и исследованных метаматериалов, в том, что они основаны на GaAs, что позволяет относительно легко интегрировать их в современную полупроводниковую промышленность. Можно также подчеркнуть, что формировались и определялись свойства систем на основе GaAsSb, где реализуется плазмонный резонанс в окне прозрачности матрицы, поэтому такие системы открывают перспективы создания высокоэффективных оптических детекторов и насыщающих поглотителей.

Автор акцентирует внимание на технологической значимости метода низкотемпературной эпитаксии, позволяющего контролировать параметры наноструктур, что представляется исключительно важным моментом диссертационной работы. В тоже время следует отметить, что практическая реализация метаматериалов требует детального понимания процессов преципитации, особенно в системах с совместным присутствием As и Sb, что

также определяет актуальность исследования влияния условий роста и термообработки на характеристики наночастиц.

Особую ценность работе придает изучение кристаллографических особенностей формирующихся структур, что необходимо для понимания механизмов формирования метастабильных состояний и их эволюции при термообработке.

Научная новизна

Научная значимость работы определяется полученными результатами исследования процессов преципитации в системах LT-GaAsSb и LT-GaAsBi. Важным достижением является установление усиленного характера диффузионных процессов в LT-GaAsSb по сравнению с LT-GaAs, что расширяет понимание механизмов формирования наноструктур в сложных полупроводниковых системах. Определение энергии активации совместной преципитации As и Sb позволяет более точно прогнозировать поведение материала при различных условиях обработки.

Существенный научный вклад - обнаружение эффекта низкотемпературной термообработки (250°C), которая стимулирует формирование более крупных частиц. Фактически это открытие, которое дополняет существующие представления о механизмах зародышеобразования в полупроводниковых системах. Внимание заслуживает ряд важных результатов, полученных методами просвечивающей электронной микроскопии и электронной дифракции: выявление ромбоэдрической фазы включений AsSb, обнаружение ранее неизвестных ориентационных соотношений при 400°C , что вносит существенный вклад в определение структурных особенностей полупроводниковых систем.

Практическая значимость

Очень важное практическое достижение – установление зависимостей параметров нановключений от температуры отжига, что позволяет целенаправленно формировать ансамбли частиц с заданными характеристиками при серийном производстве. Также необходимо отметить

ценность результатов определения энергии активации диффузии, которая может быть использована как базовый параметр при моделировании технологических процессов и оптимизации режимов производства. Значимый для технологий результат – определение влияния промежуточного низкотемпературного нагрева. Это открывает дополнительные возможности контроля параметров наночастиц. Кроме этого, установление кристаллической фазы частиц необходимо для прогнозирования оптических свойств материалов при их использовании в реальных устройствах.

Степень обоснованности научных положений и выводов в диссертации и их достоверность

Обоснованность научных положений диссертации базируется на тщательной проработке методологической базы и комплексной проверке полученных результатов. Методы исследования, примененные в работе, полностью можно считать каноническими, поэтому выводы диссертации абсолютно достоверны. Использование современного оборудования ведущих производителей обеспечило высокую точность измерений и надежность результатов. Верификация результатов проведена путем сравнительного анализа данных, полученных различными методами, статистической обработкой результатов. В частности, проверка результатов анализа материалов диссертационной работы, полученных методами электронной микроскопии и электронной дифракции, подтвердила полное соответствие выводов полученным результатам.

Оценка структуры и содержания работы

Содержание работы построено логично и последовательно, каждая глава имеет чёткую структуру и цель.

Первая глава представляет собой подробный обзор литературы по теме исследования. Автор грамотно систематизировал существующие знания о свойствах LT-GaAs и родственных материалов, уделил должное внимание механизмам преципитации и особенностям кристаллической структуры.

Вторая глава детально описывает методологическую базу исследования. Подробно описаны методики подготовки образцов и проведения измерений. Представленные методы исследования адекватны поставленным задачам и обеспечивают достоверность полученных результатов.

Третья глава содержит основной экспериментальный материал. Структура главы позволяет проследить логику исследования от простых задач к сложным. Результаты представлены последовательно и убедительно, с достаточным количеством иллюстративного материала.

Общая структура работы соответствует требованиям к диссертационным исследованиям, главы логично связаны между собой, материал изложен научно обоснованно.

Вопросы по результатам работы:

1. Глава 1. В обзоре нет разъяснений к рисункам 1, 2, 3. Так, на Рис. 3 непонятно что обозначают квадраты, кресты и т.п.
2. Стр. 23. Объяснение «Запись (xxxx) – обозначает конкретную плоскость, {xxxx} – семейство эквивалентных плоскостей, <xxxx> – семейство эквивалентных направлений» не соответствует признанным кристаллографами обозначениям: (hkl) – индексы кристаллической плоскости для гексагональных осей (индексы Браве–Миллера) и т.д.
3. Стр. 23 «...когда преципитат мышьяка имеет именно ромбоэдрическую фазу $R\bar{3}m$...». Речь идет о пространственной группе – фаза с ромбоэдрической симметрией и пространственной группой $R\bar{3}m$.
4. Рис. 6 «Симметрия фаз высокого давления мышьяка...». Обсуждаются пространственные группы.
5. Стр 56 «а также две «серии образцов, содержащих висмут: LT-GaAsBi и LT-GaAs δ Bi. Вероятно опечатка, δ Bi?»
6. Стр. 59. « продемонстрированы профили рентгеноструктурного анализа (РСА) от образцов...».

Здесь и в сопутствующем тексте речь идет не о рентгеноструктурном анализе в кристаллографическом понимании, а о рентгенодифракционных

исследованиях. Профили рентгеноструктурного анализа было бы корректнее назвать «кривыми дифракционного отражения». Кроме этого отсутствует описание эксперимента: какая установка, в каких условиях были проведены измерения, нет описания моделирования.

7. Стр. 63-64. Непонятно, как проверяли, нет ли преципитатов As LT-GaAsSb?

8. Непонятно, как проводились измерения размеров преципитатов, вручную?

9. Стр. 89. Фраза «Два других можно получить, путем отражения рефлексов от преципитатов относительно оси матрицы $\langle 002 \rangle$ ». Отражение относительно оси, наверно, правильнее было бы заменить на «поворот относительно оси».

10. Рис. 36. «Картины электронной микродифракции» - видимо электронной дифракции от выделенной области, микродифракция предполагает несколько другую технику.

11. Стр. 92. «Рис. 38 состоит из 6 рисунков, хотя обсуждение идет только о трех – это вносит путаницу при чтении.

12. Стр. 108. На рисунке 46 приведены результаты исследования методом ПЭМ типичного преципитата, содержащего Вi из этой работы. На Рис. изображение ПРЭМ. Почему в результатах работы? Хотя это и укладывается в логику представления результатов

13. Стр. 112. «оценивалась с помощью метода дисперсионной рентгеновской спектроскопии» Каким из двух?

14. Стр. 112. «Верхняя группа слоев значительно корругирована, относительно других» Что значит корругирована?

Несколько стилистических погрешностей.

15. Стр. 90. «Картины дифракции, полученные с различных мест» - от различных областей.

16. Стр. 90 «на картине дифракции, полученной со среднего слоя» - от среднего слоя.

17. Стр. 101. «На рисунке 43(b) ВРЭМ изображение преципитата, чья кристаллическая решетка развернута на 90 градусов».

18. Стр. 10.5 «Это доказывает, развитие преципитатов определяется не температурой отжига, а их средним размеров».

Заключение

Считаю, что диссертационная работа Снигирева Леонида Алексеевича "Формирование и кристаллография наночастиц AsSb при распаде пересыщенного мышьяком твердого раствора GaAsSb" полностью 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(ей) ученой степени кандидата физико-математических наук».

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией электронной микроскопии Курчатовского Комплекса Кристаллография и Фотоника, в.н.с. НИЦ «Курчатовский институт»
ВАСИЛЬЕВ Александр Леонидович

Контактные данные
Тел. +7(910) 4130115
e-mail a.vasiliev56@gmail.com

Специальность, по которой
официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.04.07 «Физика
конденсированного состояния.»

Подпись руки Васильева А.Л.
удостоверяю.

Первый заместитель главного
ученого секретаря-руководитель
службы главного ученого секретаря

БОРИСОВ К.Е.

