

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.02.25  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. А.Ф. ИОФФЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета № 2 от 25 декабря 2025г.

О присуждении Снигиреву Леониду Алексеевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Формирование и кристаллография наночастиц AsSb при распаде пересыщенного мышьяком твердого раствора GaAsSb» по специальности 1.3.11. Физика полупроводников принята к защите 20 октября 2025 г., протокол №1, диссертационным советом ФТИ 34.01.02.25 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утвержденным 15.07.2025 приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 02.01-02-153.

Соискатель Снигирев Леонид Алексеевич, 17 февраля 1997 года рождения, в 2014 году поступил в Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и окончил в 2018 году бакалавриат по направлению «Электроника и микроэлектроника». В 2020 году окончил магистратуру в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Национальный исследовательский университет ИТМО» по направлению «Техническая физика». В 2025 году окончил аспирантуру в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, где ему была присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь» по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия». В конце 2017 года начал стажировку в лаборатории диагностики материалов и структур твердотельной электроники. В октябре 2019 года принят на работу на должность и.о. м.н.с. в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, в лабораторию диагностики материалов и структур твердотельной электроники, где работает по настоящее время.

Диссертационная работа выполнена в ФГБУН Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

**Научный руководитель** – Берт Николай Алексеевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник – зам. руководителя центра физики наногетероструктур, ФТИ им. А.Ф. Иоффе

### **Официальные оппоненты:**

1. Журихина Валентина Владимировна, д.ф.-м.н., профессор, Высшая школа фундаментальных физических исследований, Физико-механический институт, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» дала положительный отзыв на диссертацию.

В отзыве содержится 3 вопроса/замечания:

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<sub>0.97</sub>Sb<sub>0.03</sub> беспороговый характер нуклеации недостаточно аргументирован, особенно с учётом того, что доля сурьмы в преципитате значительно выше её доли в начальном растворе. Этот раздел было бы полезно дополнить расчётом энергии активации нуклеации или количественной оценкой влияния упругих напряжений.

В отзыве отмечено, что замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы соискателя.

2. **Васильев Александр Леонидович** к.ф.-м.н., зав. лабораторией электронной микроскопии Курчатовского комплекса "Кристаллография и фотоника" НИЦ Курчатовский институт, доцент Физического факультета МГУ, доцент МФТИ, ведущий научный сотрудник НИЦ "Курчатовский институт" дал положительный отзыв на диссертацию.

В отзыве содержится 18 замечаний:

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 δBi. Вероятно опечатка, δBi?
6. Стр. 59. «продемонстрированы профили рентгеноструктурного анализа (РСА) от образцов...».
7. 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.
8. Стр. 63-64. Непонятно, как проверяли, нет ли преципитатов As в LT-GaAsSb?
9. Непонятно, как проводились измерения размеров преципитатов, вручную?
10. Стр. 89. Фраза «Два других можно получить, путем отражения рефлексов от преципитатов относительно оси матрицы <002>». Отражение относительно оси, наверно, правильное было бы заменить на «поворот относительно оси».
11. Рис. 36. «Картины электронной микродифракции» - видимо электронной дифракции от выделенной области, микродифракция предполагает несколько другую технику.
12. Стр. 92. «Рис. 38 состоит из 6 рисунков, хотя обсуждение идет только о трех – это вносит путаницу при чтении.
13. Стр. 108. На рисунке 46 приведены результаты исследования методом ПЭМ типичного преципитата, содержащего Bi из этой работы. На Рис. изображение ПЭМ. Почему в результатах работы? Хотя это и укладывается в логику представления результатов
14. Стр. 112. «оценивалась с помощью метода дисперсионной рентгеновской спектроскопии» Каким из двух?
15. Стр.112. «Верхняя группа слоев значительно корругирована, относительно других» Что значит корругирована?
16. Несколько стилистических погрешностей.
17. Стр. 90. «Картины дифракции, полученные с различных мест» - от различных областей.

18. Стр. 90 «на картине дифракции, полученной со среднего слоя» - от среднего слоя.
19. Стр. 101. «На рисунке 43(b) ВРЭМ изображение преципитата, чья кристаллическая решетка развернута на 90 градусов».
20. Стр. 10.5 «Это доказывает, развитие преципитатов определяется не температурой отжига, а их средним размерами».

В отзыве сказано, что 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.

**Ведущая организация** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург.

Ведущая организация предоставила положительный отзыв, составленный Кремлевой Ариной Валерьевной, кандидатом физико-математических наук, доцентом, старшим научным сотрудником лаборатории оптоэлектронного обеспечения киберфизических систем Университета ИТМО. Отзыв был рассмотрен и одобрен на заседании комиссии по предварительному рассмотрению диссертаций, допуску к ГИА и подготовке заключений организации при Институте перспективных систем передачи данных Университета ИТМО, протокол №01/12-2025 от 03 декабря 2025 г. Председатель комиссии: Панов Дмитрий Юрьевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией лабораторий ростовых технологий перспективных материалов Института перспективных систем передачи данных Университета ИТМО. Заключение ведущей организации утверждено проректором по научной работе Университета ИТМО В.О. Никифоровым, доктором технических наук, профессором. В заключении указано, что диссертационная работа Снигирева Л. А. представляет собой законченное научное исследование, в котором решены важные задачи по исследованию формирования и свойств наночастиц AsSb в матрице GaAsSb. В диссертации получены результаты, характеризующиеся научной новизной и практической значимостью. Автором детально исследованы процессы преципитации в системах на основе GaAsSb, определены ключевые параметры формирования наноструктур, установлены закономерности их эволюции при термической обработке. Материалы диссертации изложены логично и последовательно, экспериментальные данные достоверны и подтверждены комплексом современных методов исследования. Полученные результаты имеют важное значение для развития технологий создания перспективных полупроводниковых материалов и могут найти применение в электронике и оптоэлектронике.

Также в отзыве, помимо замечаний к оформлению, указано 4 замечания по материалам работы:

1. При низких температурах As накапливается в слое при росте. Не ясно, можно ли уменьшением потока мышьяка подавить этот эффект;
  2. В работе рост происходит при пониженных температурах, что делает слой более дефектным. В диссертации не обсуждается насколько снижается кристаллическое качество слоя, и сведения о дефектности слоев не приводятся;
  3. Использование термина «созревание» в контексте выполненных исследований должно быть пояснено;
  4. В диссертации не обсуждается строение поверхности раздела наночастица/матрица; является ли эта граница когерентной, или она содержит дислокации несоответствия.
- Отмечено, что замечания не снижают качество полученных результатов рассматриваемого диссертационного исследования.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обуславливался их высоким научным авторитетом, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. В ходе защиты на все замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

**На автореферат поступило 5 отзывов:**

1) Отзыв д.ф.-м.н. Липовского А.А., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой функциональных микро- и наноматериалов Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук». Адрес: 194021, Санкт-Петербург, улица Хлопина, дом 8, корпус 3, литер А.

Отзыв положительный, содержит одно замечание: незначительным недостатком автореферата является отсутствие комментариев к результатам определения концентрации антиструктурных дефектов при использовании различающихся методов диагностики и отсутствие сопоставления данных о трансформации ансамбля наночастиц при отжиге (стр. 13 автореферата) с соотношением (1) на стр. 14 автореферата. Это соотношение ничего не добавляет к результатам исследования и, по сути, просто лишний раз говорит о хорошо известном увеличении среднего размера наночастиц при коалесценции.

Отмечено, что на основании автореферата можно заключить, что диссертационная работа Л.А. Снигирева представляет собой выполненное на высоком научном уровне полноценное экспериментальное исследование, результаты которого имеют существенное значение для развития физики полупроводников и разработки новых функциональных материалов.

2) Отзыв д.ф.-м.н. Вывенко О. Ф., д.ф.-м.н., профессора кафедры электроники твердого тела Санкт-Петербургского государственного университета. Адрес: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец Ульяновская, д. 1.

Отзыв положительный, содержит одно замечание: в качестве замечания следует указать отсутствие информации о скорости охлаждения образцов после проведения низкотемпературного отжига, величина которой, в общем случае, может влиять на процесс образования зародышей другой фазы.

В отзыве сказано, что автореферат написан грамотным научным языком, материал изложен логично и последовательно, выводы обоснованы и достоверны, что позволяет получить достаточно полное представление о диссертационной работе в целом. Выполненная работа демонстрирует обстоятельное понимание автором предмета исследования и высокий уровень профессиональной подготовки.

3) Отзыв Соломонова А.В., д.ф.-м.н., профессора кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» и Панова М.Ф., к.ф.-м.н.с, доцента кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ». Адрес: 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Отзыв положительный, содержит два замечания к оформлению и одно по материалам работы: на страницах 11-12 в качестве фактора отличия в поглощении образцов, отожженных при разных температурах, фигурирует «хвост пика поглощения плазмонного резонанса», что требует особых пояснений, так как плазмонный резонанс определяется продольными колебаниями коллектива электронов, которые не могут взаимодействовать с излучением.

Указано, что при выполнении работы автором продемонстрировано основательное понимание предмета исследования, умение применять современные методы эксперимента и анализа результатов.

4) Отзыв Гутаковского А.К., к.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН. Адрес: 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Отзыв положительный, одно замечание: к содержанию работы, отраженном в автореферате, имеется следующее замечание, не затрагивающее основных выводов диссертации. Автором исследовалось влияние условий отжига на концентрацию частиц AsSb. Для определения концентрации необходимо знать толщину электронно-прозрачного образца в области измерения. Каким образом определялась эта толщина из автореферата не ясно.

Отмечено, что, судя по автореферату, диссертация является актуальной и практически значимой. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

5) Отзыв Преображенского В.В., к.ф.-м.н., заведующего лабораторией физических основ эпитаксии полупроводниковых гетероструктур ИФП СО РАН, с.н.с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики

полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН. Адрес: 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Отзыв положительный, без замечаний.

В отзыве указано, что при выполнении работы был проведен большой объем исследований и, несмотря на ограниченный объем автореферата, Л.А. Снигиреву удалось ясно изложить методическую и содержательную часть работы.

Основные результаты по теме диссертации были опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах. Их список с описанием личного вклада соискателя приводится ниже:

1. Bert N., Ushanov V, **Snigirev L.**, Kirilenko D., Ulin V., Yagovkina M., Preobrazhenskii V., Putyato M., Semyagin B., Kasatkin I., Chaldyshev V., Metal-Semiconductor AsSb- $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}$  Metamaterial// Materials, v.15, 21 (2022)
2. **Снигирев Л. А.**, Ушанов В. И., Иванов А. А., Берт Н. А., Кириленко Д. А., Яговкина М.А., Преображенский В. В., Путятю М. А., Семягин Б. Р., Касаткин И. А., Чалдышев В.В. Структура и оптические свойства композитного метаматериала AsSb- $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}$ // ФТП, т.57, 1, с. 71 – 76 (2023)
3. **Снигирев Л. А.**, Берт Н. А., Преображенский В. В., Путятю М. А., Семягин Б. Р., Чалдышев В. В. Влияние промежуточного низкотемпературного нагрева на преципитацию в нестехиометрическом GaAs// ФТП, т.57, 6, с. 507 – 512 (2023)
4. **Снигирев Л. А.**, Мясоедов А. В., Берт Н. А., Преображенский В. В., Путятю М. А., Семягин Б.Р., Чалдышев В.В. Особенности микроструктуры наноразмерных преципитатов AsSb в LT-GaAsSb// ФТТ, т.65, 12, с. 2309 – 2316 (2023)
5. Поленок Е.Д.; Берт Н.А., Иванов А.А., **Снигирев Л.А.**, Ушанов В.И., Преображенский В.В., Путятю М.А., Семягин Б.Р., Яговкина М.А., Чалдышев В.В. Формирование квазидвумерных слоев наночастиц висмута в эпитаксиальных пленках арсенида галлия// ФТТ, т.66, 9, с. 1514 – 1519 (2024)

Личный вклад автора заключается в подготовке исследуемых образцов, в самостоятельной постановке отдельных задач либо во включенном участии при постановке задач. Также вклад автора заключается в самостоятельном решении поставленных задач, включая постановку и проведение эксперимента, получения результатов и их обработке. Автор был активно включен в обсуждение полученных результатов, а также принимал активное участие в написании публикаций.

Результаты диссертационного исследования докладывались лично автором на следующих конференциях:

1. Снигирев Л.А., Берт Н.А., Преображенский В.В., Путятю М.А., Семягин Б.Р., Чалдышев В.В. Особенности преципитации в LT GaAs после предварительного низкотемпературного нагрева, Вторая объединенная конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в

микроэлектронике». Черноголовка, Российская Федерация, 13–16 ноября 2023, устный доклад

2. Снигирев Л.А. Микроструктура преципитатов AsSb в LT-GaAs по данным электронной микроскопии, 18-ый международный симпозиум «Нанозифика и нанозлектроника», Нижний Новгород, Российская Федерация, 11-15 марта 2024, устный доклад

Диссертационный совет отмечает, что научная значимость работы заключается в том, что в ходе исследования изучено влияние условий постростового отжига (400–800 °C) на формирование и кристаллографию преципитатов AsSb в LT-GaAsSb, что выявило усиленную диффузию в LT-GaAsSb по сравнению с LT-GaAs и позволило определить энергию активации совместной преципитации As и Sb, а также предложить механизм диффузии, объясняющий высокую долю сурьмы в преципитатах. Также установлено, что промежуточная низкотемпературная термообработка (250 °C) стимулирует образование зародышей, приводя к формированию более крупных частиц при последующем отжиге. Кристаллографический анализ, результаты которого приведены в работе, показал, что включения AsSb обладают обычной ромбоэдрической фазой, характерной для объёмных As и Sb, однако при 400 °C обнаруживаются ранее не наблюдавшиеся ориентационные соотношения  $\{\bar{1}012\}_p \parallel \{111\}_m$  и  $\langle \bar{2}20\bar{1} \rangle_p \parallel \langle 1\bar{1}0 \rangle_m$  с матрицей; кроме того, получены данные, допускающие интерпретацию наличия преципитатов AsSb с кубической фазой. Важным результатом является обнаружение явления переориентации частиц AsSb и Bi при увеличении их размера — переход от специфических соотношений  $\{\bar{1}012\}_p \parallel \{111\}_m$  и  $\langle \bar{2}20\bar{1} \rangle_p \parallel \langle 1\bar{1}0 \rangle_m$  к симметрично-согласованным  $(0003)_p \parallel \{111\}_m$  и  $\langle 11\bar{2}0 \rangle_p \parallel \langle 1\bar{1}0 \rangle_m$ , что обусловлено различием межплоскостных расстояний плоскостей (0003) и {1120} преципитатов относительно плоскостей типа {111} матрицы.

Полученные результаты обладают существенной практической значимостью: экспериментальные зависимости параметров нановключений AsSb от температуры отжига позволяют целенаправленно формировать ансамбли частиц с заданными размером и концентрацией для оптоэлектроники. Определённая энергия активации диффузии в LT-GaAsSb может служить входным параметром в моделях для прогнозирования эволюции наноструктур и оптимизации режимов синтеза. Обнаруженный эффект промежуточного низкотемпературного нагрева (250 °C) может использоваться в качестве дополнительного технологического приема для управления параметрами формируемых наночастиц. Установленная стабильность ромбоэдрической фазы частиц AsSb обеспечивает корректную интерпретацию данных оптических исследований (в том числе плазмонного резонанса) и прогнозирование спектральных свойств материалов. Выявленное явление переориентации наночастиц при увеличении их размера расширяет имеющиеся представления о кристаллографическом поведении нановключений в полупроводниковой матрице и может использоваться для управления



ориентационными соотношениями, например, в целях воздействия на прочностные свойства материала.

Достоверность и объективность полученных результатов подтверждается использованием современного высокоточного оборудования, комплексного применения независимых методов для получения экспериментальных данных, привлечением современных методов обработки информации и статистического анализа полученных результатов.

Все приведенные в тексте диссертации результаты были получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Выбор темы и общего направления исследования, обсуждение и постановка задач осуществлялись совместно с научным руководителем.

Диссертационный совет отмечает, что рассмотренная диссертация является законченной работой, полученные соискателем результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение, и на своем заседании 25 декабря 2025 г. принял решение присудить Снигиреву Леониду Алексеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

При проведении очного голосования диссертационного совета в количестве 18 человек из 25 членов совета, из них в заседании участвовали 13 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, проголосовали:

За присуждение Снигиреву Леониду Алексеевичу ученой степени кандидата физико-математических наук – 17,  
против – нет,  
недействительных бюллетеней – 1.

Председатель диссертационного совета

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Глазов Михаил Михайлович

Ученый секретарь диссертационного совета

к. ф.-м. н.

Котова Любовь Викторовна

25 декабря 2025 г.