

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Субботина Евгения Юрьевича

«Формирование и свойства кремниевых наноструктур на основе  
антимонида галлия»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.11– Физика  
полупроводников.

Рецензируемая диссертация посвящена изучению закономерностей формирования кремниевых многослойных гетероструктур, содержащих нановключения антимонида галлия и определению влияния встроенных в матрицу кремния нановключений GaSb, на термоэлектрические свойства таких гетероструктур. Несмотря на то, что изучение особенностей гетероэпитаксии соединений  $A_3B_5$  на Si вот уже более 50 лет является предметом интенсивных исследований во всем мире, интерес к ним продолжает поддерживаться на чрезвычайно высоком уровне. Растет число публикаций по этой тематике, организуются конференции и издаются новые журналы. Причины этого совершенно очевидны: с одной стороны, изучение гетероэпитаксального роста наноструктур позволило открыть множество качественно новых явлений, представляющих общенаучный интерес, а с другой стороны, оно генерирует идеи для совершенствования уже имеющихся и создания новых типов приборов, таких как: лазера, светоизлучающие диоды, фотоприемники и низкотемпературные термопреобразователи, а так же стимулирует развитие новых технологий.

Из сказанного ясно, что тема диссертации, избранная соискателем, безусловно, является **актуальной**, а поскольку, несмотря на прогресс в области формирования гетероструктур с нановключениями в матрице

кремния, механизмы, определяющие эффективность термопреобразования этих объектов, изучены еще отнюдь не исчерпывающе, то **новизна** полученных в работе результатов также не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из **введения, четырех глав, заключения и списка литературы**. Во **введении** сформулирована и обоснована цель исследований.

В **первой главе** автор приводит обзор литературы, посвященной исследованию термоэлектрических явлений. Анализируются факторы, влияющие на эффективность термоэлектрического преобразования, технологии создания перспективных термоэлектрических гетероструктур и способы управления параметрами структур, влияющими на эффективность преобразования. В целом, обзор литературных данных производит впечатление строгого и последовательного изложения и свидетельствует о достаточно высоком уровне теоретической подготовки диссертанта.

Во **второй главе**, посвященной методическим вопросам проводимых исследований, описаны условия эпитаксиального роста образцов. Дано подробное описание методик, использовавшихся для характеристики параметров гетероструктур. Обсуждаются условия проведения экспериментов и обработки полученных результатов для определения параметров, определяющих эффективность термоэлектрического преобразования.

В оригинальной части диссертации, **Главы 3 и 4**, рассматриваются три основные задачи. **Первая** из них заключалась в изучении оптимальных ростовых параметров для формирования nanoостровков GaSb на кремнии и определении условий их стабильного существования. Для решения этой задачи на поверхность кремния наносился тонкий слой стехиометрической смеси галлия и сурьмы и методом твердофазной эпитаксии при комнатной

температуре формировались наноостровки GaSb. Установлено, что устойчивость наноостровков к заращиванию кремнием зависит от толщины слоя стехиометрической смеси. Уменьшение толщины этого слоя до 3 Å приводит к разложению наноостровков. Показано, что дополнительный отжиг при температуре 450 °С в течение 20 минут, приводит к разложению наноостровков с образованием на поверхности роста капель галлия и слоя сурьмы с различными реконструкциями. Проведенные исследования позволили увеличить устойчивость сформированных наноостровков GaSb к повышению температуры за счет предварительного формирования на ростовой поверхности структурированного слоя сурьмы. **Вторая задача диссертации** заключалась в синтезе совершенных кремниевых гетероструктур с нановключениями GaSb, встроенными в матрицу кремния с различным типом легирования. В рамках решения этой задачи проведены исследования по влиянию условий роста на кристаллическое совершенство выращенных образцов. Методом просвечивающей электронной микроскопии было установлено, что кристаллические GaSb нановключения, образующиеся в кремниевой матрице при заращивании сформированных на ростовой поверхности наноостровков GaSb, характеризуются бимодальным распределением по размерам. Определены кристаллографические направления и величины деформаций кристаллической решетки в этих нановключениях. И, наконец, **третья из упомянутых задач**, заключалась в исследовании термоэлектрических свойств сформированных гетероструктур Si/нановключение-GaSb/Si. При решении этой задачи проводилось сравнение коэффициента Зеебека, фактора мощности и удельной электропроводности гетероструктур с нановключениями и контрольных образцов содержащих нелегированные и легированные слои кремния. Было установлено, что встраивание нановключений GaSb в матрицу кремния может приводить к уменьшению теплопроводности в несколько раз, а выбор

типа и уровня легирования, позволяет увеличить эффективность термоэлектрического преобразования при низких температурах.

Переходя к оценке диссертации в целом, необходимо отметить, что соискателю в своей диссертационной работе удалось получить совокупность новых результатов, которые, с одной стороны, дают ясную физическую картину исследовавшихся явлений, а с другой стороны, инициируют проведение последующих экспериментальных и теоретических работ, направленных на обнаружение новых эффектов. Таким образом, можно утверждать, что совокупность полученных в работе результатов и сделанные на их основе выводы значительно расширяют существующие представления о получении гетероструктур на основе кремния с нановключениями GaSb, а также методах их после ростового структурирования, позволяющих снизить теплопроводность при одновременном сохранении высокой электропроводности, что необходимо для повышения эффективности термоэлектрического преобразования.

По результатам проводимых исследований созданы предпосылки для создания низкотемпературных термоэлектрических преобразователей, на основе эпитаксиальных кремниевых гетероструктур с нановключениями GaSb, что, безусловно, имеет важное **прикладное значение**.

Говоря о недостатках работы, необходимо отметить следующее:

1. Для расчета зонных диаграмм гетероструктур с нановключениями GaSb использовалась модель Андерсона, которая, на мой взгляд, дает лишь качественное объяснение формирования энергетического спектра на гетерогранице, сложившееся в 60-х годах прошлого века. В тоже время, для того чтобы рассчитать энергетический спектр гетероперехода полупроводниковых материалов, необходимо учитывать множество обстоятельств, таких как: неоднородные в реальном пространстве

механические напряжения (с учетом их частичной релаксации) и деформации элементарных ячеек материалов, сильную анизотропию величин и знаков деформационных потенциалов, сложную структуру валентных зон, многодолинность зон проводимости и пр. (см. , например, C. G. Van de Walle, Phys.Rev.B 39, 1871 (1989)). Было бы уместно сравнить результаты расчетов энергетических спектров для изучаемых гетеропереходов, полученных в рамках упрощенной модели Андерсона и моделей, учитывающих хотя бы механические напряжения и сложную структуру зон кремния и антимонида галлия.

2. На рисунках 54 и 56 приводятся измеренные и теоретически рассчитанные температурные зависимости удельной проводимости подложек кремния и выращенных структур, с встроенными нанокристаллами GaSb. Можно отметить хорошее совпадение экспериментальных данных и расчетов для кремниевых подложек и отклонение рассчитанных значений удельной проводимости от измеренных на изучаемых структурах на *три порядка величины*. Автор обсуждает в тексте работы согласование немонотонностей в температурной зависимости для экспериментальных данных и теоретических расчетов. Однако гигантское различие в абсолютной величине измеренных и рассчитанных величин удельной проводимости никак не обсуждается.
3. В четверной главе обсуждается влияние атомного строения кремниевых гетероструктур с нановключениями GaSb на фононную теплопроводность. Концентрация свободных носителей заряда из-за ненамеренного легирования в этих структурах достигает  $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При столь высоких концентрациях свободных носителей заряда их вклад в теплопроводность может оказаться весьма значительным. Между тем я не нашел в работе



обсуждения относительных вкладов электронной и фононной теплопроводности в изучаемых гетероструктурах.

В целом, текст диссертации и автореферата написан ясным языком, рисунки хорошо оформлены, однако, местами автор злоупотребляет неудачными формулировками. По тексту диссертации механические напряжения в кристалле называются «упругими напряжениями».

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Из проведенного анализа работы следует, что диссертация Е.Ю. Субботина представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для получения кремниевых гетероструктур с нановключениями, обладающих пониженной теплопроводностью, что, безусловно, будет способствовать созданию перспективных термоэлектрических преобразователей.

Достоверность и обоснованность результатов определяется тщательно проработанной методикой изучения исследуемых процессов, согласием расчетов с результатами экспериментальных измерений, корреляцией результатов, полученных различными экспериментальными методами. Основные результаты диссертации опубликованы в российских и международных научных журналах, доложены на ведущих российских и международных научных конференциях. Автореферат правильно передает содержание диссертации. По содержанию, объему, новизне, научной и практической значимости результатов, полученных в работе, диссертация отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11 сентября 2021 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Название и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности,

а её автор, Е.Ю. Субботин, безусловно, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11– Физика полупроводников.

Официальный оппонент,

ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии гетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН

д.ф.-м.н.,

доцент по специальности 01.04.10 - физика полупроводников



Тимур Сезгирович Шамирзаев

« 24 » декабря 2021 г.

Тел. (383) 330-44-75, e-mail: tim@isp.nsc.ru

630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Подпись и фамилию сотрудника ИФП СО РАН

Т.С. Шамирзаева удостоверяю

Ученый секретарь ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.



С.А. Аржанникова