

Отзыв

официального оппонента на диссертацию

Малина Тимура Валерьевича

на тему: «Эпитаксиальные слои GaN на кремниевых подложках для AlGaN/GaN гетероструктур с высокой подвижностью электронов»,
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников

Диссертационная работа Малина Т.В. является результатом его исследований и разработок в области эпитаксиального роста гетероструктур на основе широкозонных нитридных соединений в системе (Al,Ga)N. Такие гетероструктуры востребованы для реализации приборов нового поколения СВЧ- и силовой электроники с существенно более высокими физическими и потребительскими характеристиками по сравнению с приборами на основе кремния, карбида кремния и обычных соединений A^3B^5 . Хотя это направление развивается во всем мире уже более двадцати лет, в нем до сих пор остается целый ряд нерешенных проблем, среди которых одной из главных является развитие методов эпитаксиального роста нитридных гетероструктур на подложках кремния. Согласно целому ряду авторитетных обзоров данная задача рассматривается в качестве основной на ближайшее десятилетие в силу возможностей реализации новых приборных конструкций с логическими и силовыми модулями на одной подложке с относительно высокой теплопроводностью. Кроме того, ожидается существенный экономический выигрыш от перехода на более дешевые кремниевые подложки.

Однако, разрабатываемые гетероструктуры (Al,Ga)N/Si(111) характеризуются значительным рассогласованием кристаллографических параметров решеток и сложностями в достижении необходимых двумерных механизмов эпитаксиального роста в условиях ограниченной поверхностной подвижности адатомов, что приводит к высоким концентрации различных объемных и точечных дефектов во всех слоях гетероструктур. Особенностью (Al,Ga)N гетероструктур на кремнии является не только повышенная концентрация прорастающих дислокаций ($>10^9 \text{ см}^{-2}$), но и часто наблюдаемое во время и после роста трещинообразование в гетероструктурах, исключающее их дальнейшее использование в приборных конструкциях. Первопричиной большинства типов дефектов служит упругая энергия механических напряжений различной природы, возникающих и эволюционирующих на всех этапах эпитаксиального роста гетероструктур. Несмотря на длительный период исследований процессов генерации и развития механических напряжений в гетероструктурах (Al,Ga)N/Si, множество вопросов в этой области до сих пор остаются малоисследованными или сведения о них имеют противоречивый характер.

В диссертационной работе Малина Т.В. исследования эпитаксиального роста (Al,Ga)N гетероструктур проводились с использованием аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии (NH_3 -МПЭ), которая обладает целым рядом уникальных возможностей. В первую очередь необходимо отметить в ней существенно более низкие температуры эпитаксии ($<800^\circ\text{C}$) по сравнению с теми, что используются в газофазных эпитаксиальных технологиях ($>1000^\circ\text{C}$). Эта температурная разница наряду с положительным влиянием на структурное качество интерфейсов в активной области приборов с двумерным электронным газом, приводит и к

меньшим значениям термонапряжений, которые возникают при постростовом охлаждении (AlGa)N гетероструктур на кремниевых подложках и зачастую являются основной причиной растрескивания гетероструктур. Кроме того, данная сверхвысоковакуумная технология обладает широкими возможностями *in situ* диагностики эпитаксиального роста на атомном уровне. Хотя исследования по данной тематике ведутся несколькими группами во всем мире, для России такие исследования в настоящее время уникальны.

Таким образом, можно говорить об актуальности и востребованности результатов исследований, описанных в диссертации.

В диссертационной работе развита многостадийная технология NH₃-МПЭ для изготовления приборных гетероструктур (Al,Ga)N на различных подложках, но основное внимание уделяется исследованиям роста на подложках Si(111). Важно отметить целостный характер работы, в которой последовательно решаются как технические, так и научно-технологические задачи. Среди первых заслуживает внимания оригинальный метод точного контроля температуры подложки в сложных условиях NH₃-МПЭ с помощью оптической спектроскопии. Среди задач фундаментального характера, в первую очередь следует отметить впервые обнаруженную автором возможность решения проблемы растрескивания (Al,Ga)N/Si гетероструктур за счет оптимизации условий нитридации подложки. В ходе решения этой задачи автором впервые было обнаружено влияние островков аморфной фазы SiN на интерфейсе AlN/Si на генерацию упругих напряжений гетероструктуре, что позволило существенно снизить остаточные растягивающие напряжения за счет оптимизации процесса нитридации подложки.

Важным результатом работы являют разработанные конструкции буферных слоев AlN/Si(111), позволившие снизить концентрации прорастающих дислокаций до уровня $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$, что соответствует лучшим результатам других групп, работающих в этой области. Несомненным достижением автора является определение оптимальных условий NH₃-МПЭ для перехода из трехмерного режима роста слоев GaN в спиральный ступенчато-слоевой режим эпитаксиального роста, обеспечивающий наиболее гладкую и однородную топографию этих слоев, которая необходима для дальнейшего формирования на интерфейсе GaN/AlGaSi канала с двумерным (2D) электронным газом с высокой подвижностью.

Демонстрируемые для тестовых гетероструктур AlGaN/GaN/AlN/Si(111) удовлетворительные значения подвижности на уровне $1244 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для двумерного электронного газа, которые сопоставимы со значениями, полученными в аналогичных гетероструктурах на *c*-сапфировых подложках, подтверждают высокое структурное качество всех областей в этих гетероструктурах и позволяют сделать вывод о возможности изготовления на их основе СВЧ транзисторов. Таким образом, можно говорить о практической значимости диссертационной работы.

Все вышеописанные результаты основаны на подробных и тщательных исследованиях структурных, оптических и электрофизических свойств слоев и гетероструктур с использованием широкого набора взаимодополняющих аналитических методов. Высокая достоверность результатов обеспечивается квалифицированным применением различных экспериментальных и теоретических методов к проведению исследований вместе с глубоким анализом научной литературы по различным темам физики эпитаксиального роста и анализа сложных приборных гетероструктур. Профессиональный уровень автора в полной мере

соответствует требованиям проведения самостоятельных научно-технологических исследований.

По материалам диссертации опубликовано 4 научные работы в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных *Web of Science*, *Scopus* и две работы в рецензируемых журналах из списка ВАК. Практическая значимость диссертации подтверждается подачей автором заявки на патент на изобретение. Таким образом, диссертационная работа соответствует установленным требованиям Положения о присуждении ученой степени кандидата технических наук в части полноты опубликования основных результатов.

Качество текста диссертации заслуживает самых высоких оценок в отношении как грамматико-стилистической правильности изложения, так и уровня владения диссертантом научной терминологией.

Краткая характеристика основного содержания диссертации.

Во введении обосновывается актуальность проведенных в работе исследований, формулируется их цель, ставятся задачи, излагается научная новизна и практическая значимость.

Первая глава носит обзорный характер. В ней обсуждаются основные научные и технологические проблемы в области технологий формирования нитридных гетероструктур на подложках кремния. После общего рассмотрения задачи получения структурно совершенных гетероструктур (Al,Ga)N/Si(111), обеспечивающих необходимые электрофизические параметры двумерного электронного газа, автор основное внимание уделяет анализу уже имеющегося опыта применения аммиачной МПЭ для решения этой задачи. Детальный анализ известных данных позволил автору сформулировать несколько наиболее перспективных подходов к решению центральной проблемы трещинообразования при эпитаксиальном росте (Al,Ga)N гетероструктур на кремнии. Важно, что кроме широко известных методов исключения первопричины образования трещин за счет снижения средних растягивающих напряжений в гетероструктуре с помощью контролируемого введения в нее компенсирующих (сжимающих) напряжений диссертант выдвигает гипотезу о возможном решении этой задачи путем оптимизации процесса нитридизации подложки. Кроме того, на основании обзора формулируются требования к структурному совершенству интерфейсных областей AlGaIn/GaN с 2D-электронным газом, выполнение которых необходимо для изготовления СВЧ-транзисторов.

Вторая глава включает не только описание технологии NH₃-МПЭ и конкретных деталей ее реализации в использовавшейся в работе установке Compact 21T, но и описывает разработанный диссертантом оригинальный метод контроля температуры подложки с необходимым уровнем достоверности $\pm 5^\circ\text{C}$. Решение этой сложной метрологической проблемы заслуживает самой высокой оценки. Автор также кратко описывает широкий набор использовавшихся методов характеризации структурных, оптических и электрофизических свойств гетероструктур.

Третья глава посвящена в первую очередь решению ключевой задачи работы по подавлению растрескивания слоев GaN, выращенных с помощью NH₃-МПЭ на кремниевых подложках. В этой главе подробно описывается предложенный диссертантом новый подход к подавлению трещинообразования в гетероструктурах за счет существенного снижения

температуры кремниевой подложки во время ее предэпитаксиальной нитридации. Простота этого нового и далеко не очевидного метода подавления растрескивания является его важным достоинством. Более того, на мой взгляд, в основе обнаруженного влияния лежат фундаментальные особенности генерации упругих растягивающих напряжений в гетероструктурах на начальных стадиях роста A^3N слоев на кремнии, что будет рассмотрено ниже в замечаниях. Поэтому я уверен, что в этой главе заложен хороший базис для будущих оригинальных исследований диссертанта.

Кроме того, в данной главе детально описана оптимизация условий NH_3 -МПЭ GaN слоев с использованием буферных AlN слоев, что позволило определить узкий диапазон параметров, обеспечивающих необходимый 2D-механизм роста GaN.

В четвертой главе представлены результаты сравнительных исследований эпитаксиальных слоев GaN, выращенных на одной установке NH_3 -МПЭ как на стандартных подложках $c-Al_2O_3$, так и на подложках Si(111). Сопоставимые результаты структурной и оптической характеристики слоев, а также удовлетворительные данные по подвижностям 2D электронного газа в гетероструктурах, выращенных на обоих подложках, позволяют сделать вывод о решении основных задач работы.

Однако, при чтении диссертационной работы у меня возникли некоторые **замечания**:

1. В качестве замечания по раскрытию одной из главных тем работы, а именно – анализу процессов трещинообразования в гетероструктурах (Al,Ga)N на кремниевых подложках, следует отметить отсутствие, как в обзорной, так и в оригинальных главах каких-либо упоминаний о генерации растягивающих напряжений в островковых пленках при начальной коалесценции зерен по механизму *Hoffman-Nix-Clemens*. Определяющая роль этих напряжений во время роста AlN эпитаксиальных слоев методом ГФЭ МО на подложках кремния и сапфира была обнаружена в начале 2000-х годов в работах группы *Prof. J. Redwing [Raghavan et al. 96, 2995 (2004)]*. В настоящее время генерация растягивающих напряжений по этому механизму учитывается при анализе роста множества эпитаксиальных и поликристаллических слоев, включая слои A^3N , выращенных с помощью разных технологий. На мой взгляд, учет данного механизма в диссертационной работе, возможно, позволил бы дать более глубокое физическое обоснование предложенного автором перспективного метода подавления растрескивания в гетероструктурах (Al,Ga)N/Si за счет оптимизации нитридации подложки.
2. Предыдущее замечание во многом обусловлено отсутствием в работе применения анализатора механических инкрементальных и средних напряжений на основе *in situ* измерений кривизны подложки с помощью многолучевой оптической рефлектометрии. Данная экспериментальная методика, развитая в конце 90-х годов, относительно проста в реализации и используется в настоящее время в различных технологических установках для *in situ* оценки эволюции механических напряжений в процессе роста слоев в гетероструктурах. Отсутствие таких измерений в диссертационной работе снижает ее уровень.

Указанные замечания не снижают значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Т.В. Малина.

Общее заключение.

В целом диссертация Малина Т.В. является законченным исследованием, решающим актуальные задачи современной физики полупроводников и подтверждающим высокую квалификацию диссертанта.

Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, характеризуют результаты проведённых исследований.

Уровень решаемых задач соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Таким образом, диссертационная работа Малина Тимура Валерьевича «Эпитаксиальные слои GaN на кремниевых подложках для AlGaN/GaN гетероструктур с высокой подвижностью электронов» является законченной научно-квалификационной работой, которая по критериям актуальности, научной новизны, обоснованности и достоверности выводов соответствует с 9 по 14-ый пунктам «Положения о присуждении учёных степеней». Диссертант Малин Тимур Валерьевич заслуживает степени кандидата технических по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник лаборатории оптики кристаллов

и гетероструктур с экстремальной двумерностью,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Жмерик Валентин Николаевич

Санкт-Петербург “07” марта 2025 г.

Почтовый адрес:

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Телефон: (812) 297-2124

jmerik@pls.ioffe.ru

Ученый секретарь

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

кандидат физик

Поступил в совет 28.03.2025
Ознакомлен 28.03.2025