

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу **Майбороды Ивана Олеговича**
**«Механизмы формирования высокотемпературных слоев AlN и AlGaN в аммиачной
молекулярно-лучевой эпитаксии»,**
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность исследования

Нитриды третьей группы, их твердые растворы и гетероструктуры на их основе (AlN, GaN, AlGaN, InGaN) имеют неоспоримое значение в современной полупроводниковой промышленности. Благодаря уникальному сочетанию физических и химических свойств они востребованы в широком спектре применений. Некоторые приборы на их основе уже давно находятся в массовом производстве, другие осваиваются промышленностью в настоящее время. Однако, при всех успехах, достигнутых в области практических применений, несомненной является необходимость более глубокого научного исследования как свойств III-N полупроводников и структур на их основе, так и механизмов их формирования. Во многих направлениях дальнейшие успехи невозможны без развития новых подходов как к конструкциям приборов, так и к методам их создания.

В представленной работе изложено исследование роста эпитаксиальных слоев и гетероструктур на основе AlN/AlGaN/GaN методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии. Данная технология представляется весьма перспективной, однако требующей дальнейших исследований.

Тема представленной работы является актуальной как минимум по следующим причинам:

– Полупроводники III-N сами по себе представляют актуальный предмет исследования, поскольку нитридная микроэлектроника – это бурно развивающаяся научно-техническая область, характеризующаяся одновременно практической востребованностью результатов и наличием нерешенных фундаментальных научных вопросов;

– Актуальными являются изученные в диссертации вопросы. В работе решаются как проблемы, имеющие фундаментальный характер, связанные с пониманием механизмов эпитаксиального роста нитридов, так и вопросы, непосредственно связанные с практическими приложениями нитридов в микроэлектронике.

Работа изложена на 149 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 134 наименований.

Глава 1 представляет собой литературный обзор. Данная глава с одной стороны широко освещает нитридную электронику в ее текущем виде и в исторической перспективе, а с другой – предоставляет подготовленному читателю, не являющемуся специалистом в данной области, достаточно полную информацию для понимания целей и задач работы, а так же их значения и актуальности.

Глава 2 – методическая. Она разбита на два основных раздела. Первая часть главы посвящена описанию экспериментальных методик и оборудования, применявшихся в работе. Вторая часть главы содержит описание аналитического аппарата, которым автор пользовался для теоретического описания исследуемых систем.

Глава 3 посвящена росту эпитаксиальных слоев AlN. Центральным вопросом главы является изучение механизмов и факторов, влияющих на формирование инвертированных доменов в слоях AlN, выращиваемых методом аммиачной МЛЭ на подложках сапфира. В главе экспериментально показано, что на плотность инвертированных доменов влияют степень нитридации подложки, температура подложки и величина потока аммиака в процессе осаждения пленки. Экспериментально установлена связь между технологическими параметрами, кинетикой зародышеобразования AlN и плотностью инвертированных доменов: автор показывает, что плотность инвертированных доменов взаимосвязана с плотностью покрытия поверхности подложки зародышевыми островками AlN на начальном этапе роста. Подавлению формирования инвертированных доменов способствует такое изменение технологических параметров, которое приводит к увеличению плотности и сплошности покрытия поверхности подложки зародышами AlN. В след за экспериментальными данными приводится теоретический анализ кинетики зародышеобразования AlN, который объясняет наблюдаемые в эксперименте зависимости плотности зародышевых островков AlN от технологических параметров. На основе полученных результатов автор предлагает и реализует на практике двухстадийный подход к росту эпитаксиальных слоев AlN, который позволяет снизить плотность инвертированных доменов без ухудшения кристаллического совершенства слоев.

В **Главе 4** изложены исследования роста эпитаксиальных слоев AlGaIn в условиях термически стимулированной десорбции галлия методом аммиачной МЛЭ. Для анализа

влияния галлия на формирование слоев автор использует сопоставление экспериментально изученных свойств слоев AlN и AlGaN (морфология поверхности, состав, кристаллическая структура, эволюция рельефа в процессе роста), полученных при одинаковых (за исключением наличия или отсутствия галлия) технологических режимах. Представленные результаты показывают, что участие галлия в росте оказывает положительное влияние на кинетику роста, рельеф и структуру эпитаксиальных слоев. С помощью данных, полученных методами рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии, автор показывает наличие неопisanного ранее эффекта усиления латеральной компоненты роста, возникающего за счет селективного формирования фазы AlGaN, обогащенной галлием. Используя экспериментальные данные, автор строит аналитическую модель для количественного и качественного описания эпитаксиального роста слоев AlGaN в условиях десорбции галлия, а затем использует ее для определения энергий связи атомов галлия с поверхностью AlN на участках с различной морфологией. Достоверность модели подтверждается независимыми квантово-механическими расчетами из первых принципов. Как применение предложенной автором модели, так и квантово-механические расчеты, дают практически одинаковые значения разницы энергий связи атомов галлия с гладкими и развитыми участками поверхности.

В завершении главы предлагается и описывается практическая реализация нового подхода роста пленок AlN с использованием галлия в качестве активной добавки. Добавление галлия позволяет достичь низкой среднеквадратичной шероховатости пленок AlN (0,2 нм) и вдвое снизить плотность винтовых дислокаций в них.

Глава 5 посвящена созданию и анализу свойств нитридных гетероструктур с двумерным электронным газом. Автор экспериментально показывает, что использование начальных слоев со сниженной плотностью инвертированных доменов, уменьшенной шероховатостью и меньшей плотностью проникающих дислокаций, позволяет получить гетероструктуры, которые ранее удавалось вырастить только с использованием темплейтов – квазиподложек, выращенных другими ростовыми методами. Путем анализа морфологии поверхности гетероструктур на различных стадиях роста и сравнения гетероструктур, выращенных с использованием разных начальных слоев, показано, что инвертированные домены наследуются от буферных слоев AlN всей структурой и, кроме того, выступают в качестве каналов паразитной проводимости. В итоге, за счет использования результатов исследования механизмов роста высокотемпературных слоев AlN и AlGaN, автору удастся добиться существенных улучшений свойств гетероструктур

с двумерным электронным газом. Наиболее значимым можно считать устранение объемных утечек, связанных с инвертированными доменами, а также получение гетероструктур с морфологией поверхности, для достижения которой ранее требовалось использование темплейтов.

В заключении кратко излагаются наиболее значимые по мнению автора выводы.

Автореферат диссертации в полной мере соответствует содержанию диссертации.

Степень обоснованности научных положений и выводов

Защищаемые положения и выводы работы полно отражены в основном тексте работы и убедительно обоснованы экспериментальными и теоретическими результатами.

Достоверность результатов

Достоверность результатов работы обеспечивается и подтверждается использованием взаимодополняющих теоретических и экспериментальных методик, воспроизводимостью экспериментальных результатов и отсутствием противоречий с фундаментальными физическими законами. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых российских и международных журналах.

Научная новизна и практическая значимость

Представленные исследования обладают несомненной научной новизной и практической значимостью. Результаты и выводы, выделенные в работе как новые, ранее не появлялись в открытых источниках. Значимость работы состоит в том, что в ней представлены новые данные и модели, необходимые для понимания механизмов формирования полупроводников III-N и влияния их свойств на характеристики микроэлектронных устройств. Практическая применимость полученных результатов демонстрируется непосредственно в диссертации.

К работе имеются следующие замечания:

1. В работе убедительно показано, что условия, при которых на начальном этапе роста AlN на подложках сапфира формируется много инверсионных доменов, соответствуют условиям, когда начальные зародыши редки, а условия, когда инверсионные домены редки, совпадают с условиями, когда начальные зародыши расположены густо. Не установлена, однако, причинно-следственная связь между высокой плотностью начальных зародышей и подавлением формирования инверсионных доменов. Возможно, оба эти явления – следствие некоторой неопределенной в работе общей

причины. Альтернативно, высокая плотность начальных зародышей облегчает процесс захоранивания зародышей инверсионных доменов.

2. В работе описан механизм усиления латеральной компоненты скорости роста AlN при подаче на поверхность растущего слоя потока галлия, причем галлий в эпитаксиальный слой встраивается крайне незначительно. Предложенный механизм – селективное формирование относительно обогащенной галлием фазы AlGaN в районе атомарной ступени – выглядит привлекательно, непротиворечиво, и хорошо описывает наблюдавшиеся экспериментальные результаты. Однако, в самом конце соответствующего параграфа (4.5, стр. 116) соискатель несколько оптимистично, на мой взгляд, предлагает распространить развитую модель на случай МОС-гидридной эпитаксии. Диссертация бы выиграла, если бы автор попробовал оценить, при какой величине покрытия поверхности адатомами галлия из-за разрыва связей галлий-азот в присутствии водорода, описанный в диссертации механизм перестает быть определяющим.
3. К сожалению, ни экспериментально, ни теоретически не исследовано влияние угла и направления разориентации сапфировых подложек на описанные в диссертации явления и эффекты: усиление латеральной компоненты роста и снижение плотности винтовых дислокаций при добавке галлия.

Отмеченные в замечаниях недостатки не снижают значимости представленной диссертации.

Заключение

Диссертация Майбороды И.О. на тему «Механизмы формирования высокотемпературных слоев AlN и AlGaN в аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии» является завершенным научным исследованием, выполненном на высоком научном уровне. Тема работы является актуальной, научные положения, выводы, сформулированные в диссертации, обоснованы, достоверны и обладают научной новизной и практической значимостью. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК. Автореферат диссертации в полной мере соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Майбороды И.О. на тему «Механизмы формирования высокотемпературных слоев AlN и AlGaN в аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии»

соответствует паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния по физико-математическим наукам, а именно: п.1, п.3, п.5, п.6.

Представленная к защите диссертационная работа Майбороды Ивана Олеговича отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (от. 24.09.2013 №842), а её автор Майборода Иван Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,

Лундин Всеволод Владимирович,
старший научный сотрудник лаборатории
Физики полупроводниковых гетероструктур
Физико-технического институт имени
А.Ф. Иоффе, Россия, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 26

Кандидат физико-математических наук
по специальности 01.04.10 – Физика
полупроводников и диэлектриков

Тел.: +7 921 948 15 36

Эл. почта: lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru

07.02.2019

Подпись Лундина В.В. заверяю
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф.Иоффе,
д.ф.-м.н., проф.
Шергин А.П.

