

Заключение

диссертационного совета Д 520.009.01 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по диссертации Майборода И.О. «**Механизмы формирования высокотемпературных слоев AlN и AlGaN в аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Диссертационный совет на основании выполненных соискателем исследований отмечает, что:

1) **Установлены** закономерности формирования пленок AlN на подложках сапфира методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), которые позволяют эффективно подавлять формирование инвертированных доменов (ИД) и снижать их плотность до 10^6 см^{-2} . Этот результат является значимым, поскольку при изучении связи свойств слоев AlN и гетероструктур на их основе было установлено, что увеличение числа ИД приводит к значительному росту токов утечек. Это подтверждает высказывавшееся в других работах предположение о связи ИД с токами утечек в нитридных гетероструктурах.

2) **Обнаружен** механизм усиления латеральной компоненты роста за счет селективного формирования фазы AlGa_xN, обогащенной галлием, при росте AlGa_xN в условиях сильной десорбции галлия. Данный механизм стимулирует двумерный рост и позволяет получать пленки AlN с более гладкой поверхностью и меньшим количеством проникающих винтовых дислокаций.

3) **Показано**, что основное воздействие механизма усиления латерального роста происходит на стадии сращивания трехмерных островков, на которой поверхность имеет наиболее развитый рельеф и предоставляет большое количество дефектов, удерживающих атомы галлия. После перехода к двумерному росту поверхность сглаживается, и концентрация галлия в пленке резко падает.

4) **Показано**, что и зависимость скорости роста AlGa_xN, и эффект усиления латеральной компоненты роста за счет добавления галлия могут быть описаны достаточно простой кинетической моделью, представленной в работе, что дает возможность предсказания и контроля силы эффекта. Модель была использована для оценки разности энергий связи галлия с поверхностью AlN на гладких участках и на дефектах поверхности, которая составила порядка 0,3 эВ. Полученное значение совпадает с результатами расчетов из первых принципов.

5) **Разработана** методика роста гетероструктур с двумерным электронным газом для GaN–транзисторов с высокой подвижностью электронов, в которых достигнуты значения удельных токов насыщения более 1,5 А/мм при значениях слоевого сопротивления 220–240 Ом, что соответствует лучшим значениям, достигнутым путем роста на подложках сапфира методом MOCVD. За счет снижения плотности инвертированных доменов токи утечки по межприборной изоляции в полученных структурах не превосходят 10 мкА/мм при напряжениях до 80 В. Продемонстрирована пригодность таких гетероструктур для создания СВЧ усилителей мощности для частот до 100 ГГц.

6) **Научная и практическая значимость** диссертации заключается в том, что в ходе исследования были установлены новые важные физические закономерности, формирования пленок AlN и AlGaN при росте методом аммиачной МЛЭ. В частности, обнаружены новые механизмы и закономерности, управляющие формированием структурных дефектов в эпитаксиальных пленках нитридов галлия и алюминия, а на их основе предложены новые подходы создания гетероструктур с двумерным электронным газом для транзисторов с высокой подвижностью электронов. Полученные в работе результаты существенно расширяют возможности метода аммиачной МЛЭ и могут быть непосредственно применены для постановки технологий производства гетероструктур для микроэлектронных устройств.

7) **Достоверность результатов и выводов** диссертационной работы подтверждаются использованием взаимодополняющих экспериментальных методик и многократной воспроизводимостью экспериментов. Сформулированные в диссертационной работе научные положения и выводы непротиворечивы и согласуются с фундаментальными физическими принципами. Достоверность предложенных в работе теоретических моделей подтверждается согласием расчетов, проведенных на их основе, с экспериментальными данными. Достоверность моделей роста AlGaN в условиях сильной десорбции галлия дополнительно подтверждена совпадением результатов расчетов с результатами численного моделирования из первых принципов.

8) **Личный вклад автора** состоит в планировании и проведении экспериментальных исследований, создании представленных в работе теоретических моделей, анализе полученных результатов и разработке предложенных в работе подходов. Автор принимал непосредственное участие в подготовке всех публикаций по выполненной работе.

* * *

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертационная работа Майбороды И.О. «Механизмы формирования высокотемпературных слоев AlN и AlGaN в аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842.

На заседании **14 марта 2019 г.** Диссертационный совет принял решение присудить **Майбороде Ивану Олеговичу** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовал:

за присуждение ученой степени – 16,
против присуждения ученой степени – 0,
недействительных бюллетеней – 0.

Протокол счетной комиссии утвержден открытым голосованием **единогласно**.