

О Т З Ы В

о ф и ц и а л ь н о г о о п п о н е н т а

д.ф.-м.н. Константина Сергеевича Журавлева

на диссертационную работу Рожавской Марии Михайловны

"СИНТЕЗ III-N МИКРО- И НАНОСТРУКТУР МЕТОДОМ МОГФЭ НА ПОДЛОЖКАХ САПФИРА И КРЕМНИЯ", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10-физика полупроводников.

В технологии III-N соединений выбор подложек для эпитаксиального роста является существенной проблемой. Из-за высокой температуры плавления нитрида галлия и высокого равновесного давления паров азота синтез нитрид-галлиевых подложек существенно затруднен, а сами такие подложки имеют малый размер и коммерчески недоступны. При этом очень малое количество материалов не разрушается в условиях высоких температур в характерных условиях синтеза нитрида галлия. Наиболее распространенными подложками для синтеза III-N структур являются сапфировые подложки. Наиболее перспективными, однако, считаются кремниевые подложки, что связано с такими их преимуществами как относительно низкая стоимость, доступность подложек большого диаметра, высокая тепло- и электропроводность. Основной проблемой синтеза III-N структур на кремнии являются механические напряжения, возникающие из-за несоответствия параметров кристаллической решетки и коэффициентов термического расширения подложки и растущего слоя. Существующие технологии роста на кремниевых подложках чрезвычайно сложны и к тому же запатентованы. Вышеизложенное свидетельствует о несомненной **актуальности** темы представленной к защите диссертационной работы, нацеленной на поиск нестандартных методов роста III-N соединений и наноструктур на сапфире и кремнии.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения со списком основных результатов, списка литературы. Общий объем диссертации 179 страниц, в том числе 7 таблиц, 63 рисунка, список литературы из 168 наименований.

В оригинальной части работы (главы с 3 по 5) автор экспериментально исследует процессы синтеза методом МОГФЭ III-N слоев, гетероструктур и наноструктур на различных подложках и изучает структурные и люминесцентные свойства полученных структур.

В третьей главе диссертации приведены результаты исследования процесса селективной эпитаксии кристаллитов GaN, сформированных с использованием частичного маскирования поверхности подложки сапфира или неполярного α -GaN диэлектриком. Для управления огранкой, скоростями роста различных кристаллических граней и морфологией поверхности кристаллитов варьировались условия в ростовом реакторе, изменялась атмосфера роста (соотношение потоков водорода и азота), скорость потока несущего газа. Обнаружено изменение соотношения скоростей роста граней с различной кристаллографической ориентацией со временем роста. Изучено влияние ориентации окон в диэлектрической маске на характер роста кристаллитов. Показано, что при помощи выбора направления окна в маске можно управлять скоростью латерального роста и направлением быстрого роста. Установлено, что малая разориентация полоска на 7.5-15 градусов относительно точной низкоиндексной приводит к принципиальному изменению характера роста кристаллита. Продемонстрирована возможность одинарного ELOG процесса на таких подложках для всех ориентаций окна в маске за исключением точного c -направления. Для полосков, ориентированных под углом 45° к направлению (0001), реализована оригинальная концепция двойного перекрестного ELOG-процесса, которая заключается в том, что второй слой полосков располагается под углом к первому, что позволяет снизить долю дефектного материала в конечном планарном слое без необходимости совмещения при фотолитографии. Данная методика роста позволила получить светодиодные структуры зеленого диапазона, имеющие эффективность люминесценции выше, чем у аналогичных структур, выращенных без использования ELOG процессов.

В четвертой главе представлены результаты исследования процессов синтеза нитевидных нанокристаллов GaN/ InGaN на подложках AlN/Si (111), а также на подложках сапфира, покрытых сплошной титановой пленкой. Исследована возможность использования различных катализаторов (золото, ин-

дий-золото, индий), при которых реализуется стандартный рост по механизму пар-жидкость-кристалл, для обеспечения селективности роста (In)GaN нитевидных нанокристаллов на подложках AlN/Si. Исследовано влияние условий в реакторе (температура, потоки реагентов, несущий газ, продолжительность цикла при пульсирующей МОГФЭ) на характер роста нитевидных нанокристаллов. Установлено, что соотношение потоков реагентов и времен экспозиции значительно влияет на характер роста нанокристаллов и диапазон допустимых значений этих параметров крайне узок. Определены условия получения нанокристаллов с высотой до 300 нм и диаметром от 10 нм до 100 нм. Обнаружено, что на вершинах нанокристаллов, выращиваемых на пленке титана, не наблюдаются металлические капли, что означает, что в данном случае рост нанокристаллов происходит не по хорошо известному механизму пар-жидкость-кристалл. Синтез на пленке титана позволил получать нитевидные нанокристаллы диаметром от 30 нм до 2 мкм.

В пятой главе диссертации автором успешно развита технология синтеза эпитаксиальных слоев GaN и светодиодных структур на кремниевых подложках с нанослоем карбида кремния, имеющим меньшую разницу в коэффициентах термического расширения с нитридом галлия. Основными параметрами подложек, определяющими характер роста слоев GaN, оказались рельеф поверхности и размер зерен слоя карбида кремния. В работе проведена оптимизация буферных слоев, исследована возможность использования таких буферных слоев как $Al_{0,3}Ga_{0,7}N$, AlN и слоев AlGaN с переменным содержанием алюминия. По результатам экспериментов была выбрана конструкция буферного слоя, позволившая получить на подложках SiC/Si эпитаксиальные слои GaN без выраженного рельефа. Дальнейшая оптимизация условий роста буферных слоев и слоев SiC позволила практически полностью подавить образование структурных ν -дефектов в слоях GaN. Установлено, что буферный слой SiC способствует снижению механических напряжений во время роста структур, являющихся причиной введения трещин и структурных дефектов. С использованием разработанной технологии на подложках SiC/Si были выращены и исследованы светодиодные гетероструктуры, излучающие в синем диапазоне, с активной областью на основе квантовых ям InGaN/GaN.

Основные новые научные результаты, полученные автором, сформулированы в заключении и являются основой для трех защищаемых положений.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов подтверждается большим объемом экспериментальной работы, самосогласованностью результатов, отсутствием противоречий с ранее установленными закономерностями, широкой апробацией работы на отечественных и международных конференциях, публикацией результатов в рецензируемых журналах.

Диссертационная работа написана хорошим четким языком, содержание и результаты исследований изложены ясно и понятно. Рассмотренный в диссертации круг вопросов представляет собой цельное исследование, выполненное с единых позиций и в рамках одного фундаментального метода. Сформулированные выводы экспериментально обоснованы.

Детальное исследование влияния условий в реакторе на характер роста, разработка ряда принципиально новых подходов к росту различных типов эпитаксиальных структур, демонстрация перспективности развитых подходов для получения приборных структур несомненно имеют большую **практическую значимость**.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание диссертации.

Сама диссертационная работа, однако, имеет ряд недостатков:

- Основным недостатком работы является слабое использование расчетных моделей, описывающих полученные экспериментальные результаты и позволяющих получать информацию о ключевых параметрах, определяющих эти процессы. Используемые в работе модели не всегда достаточно полно описаны, так непонятно, каким образом в 4.2.2 (с.119) получена скорость роста нитевидных нанокристаллов, равная 24 мкм/час, не ясно, является ли эта скорость максимально возможной скорости роста нанокристаллов.
- В работе не обсуждается механизм действия титановой пленки, приводящий к формированию нитевидных нанокристаллов.

- Нет пояснения, каким образом рассчитывались энергии особенностей в спектрах люминесценции, обусловленные модами шепчущей галереи (с.127).
- Часть графиков содержит надписи на английском языке.
- Встречаются грамматические и синтаксические ошибки и опечатки, например слово «ининдий» на с.107

Отмеченные недостатки ни в коем случае не снижают ценность представленной работы.

Оценивая диссертацию в целом можно сказать, что диссертация М.М. Рожавской является широкомасштабной экспериментальной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном и методическом уровне, содержит новые важные научные результаты, которые имеют значительную ценность для понимания процессов синтеза III-N наноструктур и могут быть использованы при практической разработке гетероструктур для светоизлучающих приборов с повышенными характеристиками. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 01.04.10 «Физика полупроводников». По актуальности темы, новизне и достоверности полученных результатов работа соответствует критериям, предъявляемым к кандидатской диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным Постановлением Правительства «о порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 года №842. Автор диссертации, Рожавская Мария Михайловна, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «физика полупроводников».

Ведущий научный сотрудник ИФП СО РАН
д.ф.-м.н.

 К.С. Журавлёв

630090, г.Новосибирск

пр.Лаврентьева, 13

тел. 8(383) 3304475, e-mail zhur@isp.nsc.ru

26 марта 2014 года

Подпись Журавлёва К.С. заверяю

ученый секретарь ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.





А.В. Каламейцев