

На правах рукописи



РОЖАВСКАЯ Мария Михайловна

СИНТЕЗ III-N МИКРО- И НАНОСТРУКТУР МЕТОДОМ МОГФЭ НА
ПОДЛОЖКАХ САПФИРА И КРЕМНИЯ

Специальность:

01.04.10 — физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и в Санкт-Петербургском Академическом университете — научно-образовательном центре нанотехнологий РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Всеволод Владимирович Лундин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник
Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Константин Сергеевич Журавлев

кандидат физико-математических наук,
руководитель отдела ООО «Софт-Импакт»
Марк Спиридонович Рамм

Ведущая организация: ЗАО «Элма-Малахит»

Защита состоится 10 апреля 2014 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д002.205.02 при Физико-Техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-Технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан 3 марта 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Благодаря уникальным физико-химическим свойствам, обеспечивающим широкий спектр приборных применений, нитриды III группы вызывают большой интерес исследователей. Решение таких серьезных технологических проблем, как синтез высококачественных GaN слоев на чужеродных, в первую очередь сапфировых, подложках [1], а также синтез слоев нитрида галлия с дырочной проводимостью [2] позволило продемонстрировать в системе III-N синие, зеленые и белые светодиоды [3, 4, 5], солнечно-слепые фотодетекторы [6], транзисторы с высокой подвижностью электронов [7], многие из этих типов приборов успешно коммерциализированы. Однако на сегодняшний день подходы к синтезу приборных структур на основе нитрида галлия сильно ограничены. Так, большинство структур растится планарной эпитаксией на сапфировых подложках в полярном направлении (0001). Дальнейшее развитие технологии III-N соединений требует разработки новых подходов к эпитаксиальному синтезу. При этом наиболее перспективными направлениями, которым посвящено большое количество публикаций последних лет, являются: использование альтернативных подложек, использование отличных от планарного способов организации материала, а также рост в неполярных и полуполярных кристаллографических ориентациях.

Наиболее привлекательной альтернативой сапфировым подложкам с точки зрения удешевления конечных приборных структур является кремний. При этом отдельной перспективной задачей является возможность интеграции нитридной и кремниевой технологий. Основной проблемой при росте нитрида галлия на кремниевых подложках является значительная разница постоянных кристаллической решетки и коэффициентов термического расширения, что приводит к высокой плотности дислокаций в эпитаксиальных слоях нитрида галлия, а также возникновению растягивающих напряжений в эпитаксиальной

структуре и, как следствие, образованию трещин при ее остывании.

Одним из возможных решений данной проблемы является использование предварительно осажденных буферных слоев SiC, что позволяет совместить преимущества кремниевых подложек и низкое рассогласование постоянных решетки карбида кремния и III-нитридов, в особенности нитрида алюминия (1%). Первые результаты по синтезу таких структур были опубликованы в работе [8]. Однако до сих пор не удавалось получить на таких подложках эпитаксиальные слои нитрида галлия хорошего качества и приборные структуры. Поэтому развитие технологии синтеза подложек SiC/Si и одновременно с этим технологии синтеза эпитаксиальных слоев нитрида галлия и приборов на их основе на таких подложках представляет большой интерес.

Трехмерная организация материала включает в себя рост нитевидных микро- и нанокристаллов (ННК) с помощью каталитических методов [9], самоорганизацию ННК [10] за счет релаксации упругих напряжений между растущим слоем и подложкой, а также методы селективной эпитаксии, когда подложка частично маскируется диэлектриком и рост происходит только на немаскированных участках подложки. Селективная эпитаксия позволяет получать как ННК, так и структуры отличной от ННК геометрии, например, полосковой.

Основными преимуществами непланарных структур на основе III-N соединений являются относительно легкая возможность роста на боковых полярных и полуполярных гранях и более низкая чувствительность к механическим напряжениям, возникающим в планарных слоях из-за рассогласования параметров подложки и растущего слоя. Кроме того, для ННК новой интересной областью применений является их использование в пьезотронных и пьезофотонных приборах, чей принцип работы основан на использовании встроенных пьезоэлектрических полей. В таких устройствах использование ННК вместо тонких пленок гораздо предпочтительнее, так как

они выдерживают большую деформацию без образования трещин. Наконец, ННК могут обладать большими пьезоэлектрическими коэффициентами [11]. Поэтому развитие методов непланарного роста нитрида галлия является чрезвычайно перспективной и актуальной задачей.

Основная цель:

разработка новых подходов к эпитаксиальному росту III-N соединений и исследование свойств выращенных слоев и гетероструктур.

Научная новизна

1. Показана возможность использования индия и расплава индий-золото в качестве катализатора для синтеза ННК методом газофазной эпитаксии из металл-органических соединений (МОГФЭ) по механизму пар-жидкость-кристалл на подложках кремния (111). Показано, что добавка индия в капли золота позволяет увеличить диаметр ННК с 10 до 100 нм, а использование индия в качестве самостоятельного катализатора позволяет обеспечить высокую селективность в процессе роста.
2. Предложен новый способ синтеза GaN ННК на подложках сапфира и сапфира с предварительно осажденным слоем нитрида галлия с использованием нанопленки титана толщиной 30-100 нм. С помощью данного метода могут быть синтезированы ННК высокого качества, обладающие правильной гексагональной формой, диаметром 30-2000 нм, ориентированные строго вдоль направления (0001).
3. Впервые проведено систематическое исследование особенностей процесса селективной эпитаксии нитрида галлия на подложках различной ориентации. В частности, определено влияние атмосферы реактора, потока триметилгаллия, ориентации окна в маске на характер роста формирующихся мезаструктур, изучена динамика развития процесса.
4. Показано, что для получения ELOG-структур (планарных структур, полученных в результате латерального разраствивания мезаполосков) при

росте на α -GaN окна в маске могут быть ориентированы не только по точным кристаллографическим ориентациям. Для полосков, ориентированных под углом 45° к оси (0001) реализована концепция двойного перекрестного ELOG-процесса (эпитаксиальный процесс получения ELOG-структур).

5. На боковых гранях (11-20) мезаполосковых структур прямоугольного сечения сформирована светодиодная структура с активной областью на основе квантовых ям InGaN/GaN. Созданы прототипы светодиодов на свободных полосках GaN, отделенных от подложки.
6. Впервые синтезирована светодиодная структура с активной областью на основе квантовых ям InGaN/GaN на подложках кремния (111) с нанослоем карбида кремния.
7. Разработанный метод формирования ННК с использованием титановой пленки позволил достичь рекордной скорости ННК в условиях МОГФЭ 800 мкм/час.

Положения, выносимые на защиту

1. При селективной МОС-гидридной эпитаксии GaN разориентация полосковых окон на 7.5 - 15 градусов от низкоиндексных направлений качественно изменяет огранку и анизотропию скоростей роста; при точной ориентации вдоль низкоиндексных направлений анизотропия скоростей роста может изменяться в процессе эпитаксиального роста.
2. При синтезе нитевидных нанокристаллов GaN методом МОГФЭ по механизму пар-жидкость-кристалл с использованием золота в качестве катализатора введение триметилиндия в атмосферу реактора позволяет увеличить диаметр нанокристаллов с 10 до 100 нм за счет накопления индия в металлических каплях на вершинах нанокристаллов.
3. Конструкция и технологические режимы роста методом МОС-гидридной эпитаксии буферных слоев AlN/AlGaIn, позволяющих сформировать на подложках Si (111) с нанослоем SiC светодиодные структуры с активной

областью на основе квантовых ям InGaN/GaN.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на 8-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия, алюминия — структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 2011 г.), 4-м Международном симпозиуме по росту нитридов третьей группы (Санкт-Петербург, 2011 г.), Российской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика. СПб» (Санкт-Петербург, 2013 г.), 16-й международной конференции ICMOVPE-XVI, (Busan, Korea, 2012 г.), 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» (Москва, 2008 г.), 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» (Москва, 2013 г.), а также на научных семинарах.

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах и 8 статей в материалах конференций

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 179 страницах. Диссертация включает в себя 63 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 168 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, направленных на разработку новых подходов к эпитаксиальному синтезу III-N соединений, сформулирована цель диссертационной работы, изложены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору имеющейся литературы по теме диссертации. В начале главы описаны основные структурные свойства III-N соединений, а также характерные для таких соединений физические эффекты, возникающие

из-за низкой симметрии кристаллической решетки, отсутствия согласованных подложек и различия параметров кристаллической решетки самих бинарных III-N соединений. Далее в этой главе рассмотрены основы процесса газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, проанализированы преимущества и недостатки основных гетероэпитаксиальных подложек (Al_2O_3 , SiC, Si), а также технологические особенности эпитаксиального роста на таких подложках. Отдельно рассмотрена роль дислокаций в слоях и гетероструктурах на основе нитрида галлия. В конце главы представлен обзор публикаций последних лет, посвященных синтезу нитевидных нанокристаллов GaN и селективной эпитаксии GaN, рассмотрены существующие технологические приемы, позволяющие организовать непланарный рост материала, а также представлены результаты по эпитаксиальному росту в неполярных и полуполярных направлениях.

Во **второй главе** приведено описание использованного в ходе диссертационной работы эпитаксиального оборудования, описаны методики, применявшиеся для изучения оптических и структурных свойств исследуемых образцов, а также морфологии поверхности: спектроскопия электро- и фотолюминесценции, атомно-силовая микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, растровая электронная микроскопия, рамановская спектроскопия, спектроскопия катодолюминесценции.

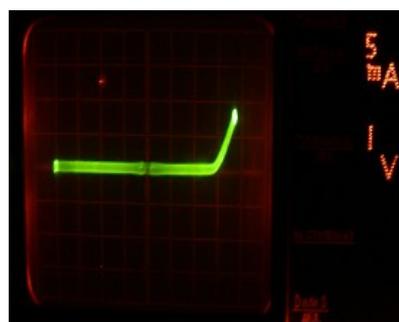
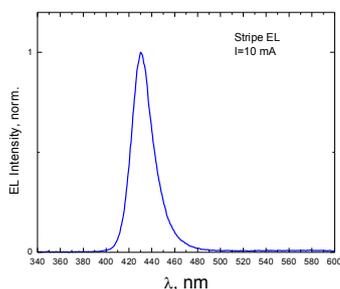
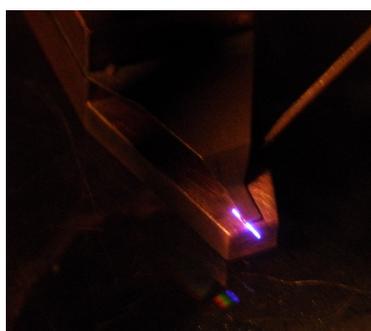
В **третьей главе** приведены результаты исследования процесса селективной эпитаксии GaN. Для формирования трехмерных приборных структур необходимо, прежде всего, уметь управлять такими параметрами формирующихся мезоструктур, как огранка, морфология поверхности, скорость роста различных кристаллических граней, вхождение легирующих примесей. С этой целью было проведено систематическое исследование влияния условий в реакторе на характер роста формирующихся мезоструктур с использованием различных фотошаблонов. Было показано, что важным параметром,

позволяющим управлять огранкой полосков, является атмосфера реактора. Так, при ориентации полосков вдоль $\langle 1-100 \rangle$ при использовании водорода в качестве несущего газа, формируются полоски с вертикальными боковыми стенками и низкой латеральной скоростью роста. Снижение потока водорода или добавление потока азота в атмосферу реактора приводит к изменению боковых стенок полосков на наклонные и увеличению латеральной скорости роста. Показано также, что атмосфера реактора значительно влияет на эффективность диффузии атомов галлия по поверхности нитрида галлия. Обнаружена корреляция между эффективностью диффузии и скоростью латерального роста полосков.

В ходе экспериментов по изучению начальной стадии роста было обнаружено, что огранка полосков в общем случае может существенно зависеть от времени. Так, при использовании азот-водородной смеси в качестве газаносителя в соотношении 6:1 и малом расстоянии между полосками (5 мкм) в начале эпитаксиального процесса (первые 5 минут роста) наклонная боковая грань значительно превосходила по площади вертикальную боковую, тогда как в конце процесса (15 минут от начала роста) полосок имел прямоугольное сечение. Таким образом, анизотропия скоростей роста может существенно изменяться в процессе эпитаксиального роста.

Найденные в результате проведенного исследования способы управления огранкой и скоростями роста верхней и боковых граней позволили разработать технологию формирования светодиодных структур на боковых гранях мезаполосков GaN с вертикальными стенками (рис. 1). Для этого использовались пары близкорасположенных окон, таких, что расстояние между полосками в такой паре было больше расстояния между парами. В режиме роста, обеспечивающем высокую скорость вертикального роста, были синтезированы полоски прямоугольного сечения высотой до 100 мкм и шириной до 30 мкм, которые срастались между собой у вершины, до вершины между полосками сохранялась щель. Далее на такой паре полосков

выращивалась активная область на основе квантовых ям InGaN/GaN, слой GaN р-типа и напылялись контакты к нему. За счет того, что между полосками сохранялась щель, а сами полоски соединялись с подложкой в узкой полосе порядка 10 мкм, их можно было легко расщеплять и отделять от подложки, что позволило организовать вывод п-контакта. На рисунке 1 приведены фотография, спектр электролюминесценции и ВАХ сформированной светодиодной структуры на таком отделенном GaN полосковом кристалле.



а) б) в)
 Рис. 1 а) фотография светодиодной структуры, сформированной на гранях мезаполоска (11-20), под приложенным напряжением б) спектр электролюминесценции светодиодной структуры, сформированной на гранях мезаполоска (11-20) в) вольт-амперная характеристика светодиодной структуры, сформированной на гранях мезаполоска (11-20)

В этой главе также приведены результаты исследования селективной эпитаксии GaN в полосковых окнах на неполярном α -GaN. Для ELOG-процесса на α -GaN обычно используются полосковые окна, ориентированные вдоль кристаллографического m направления (перпендикулярно направлению $\langle 0001 \rangle$). При ориентации полосков вдоль c -направления латеральный рост происходит крайне медленно. В настоящей работе изучалось влияние промежуточных ориентаций на характер роста полосков.

Показано, что при помощи выбора направления окна в маске можно управлять такими параметрами, как скорость латерального роста, направление быстрого роста, характер срастания полосков. При этом малая разориентация полоска на 7.5-15 градусов относительно точной низкоиндексной приводит к

принципиальному изменению характера роста. На рисунке 2 а приведена РЭМ-фотография полоска, ориентированного вдоль направления m , а на рисунке 2 б — ориентированного под углом 7.5° к этому направлению. Хорошо видно, что в случае 2а полосок имеет прямоугольное сечение, латеральный рост происходит в направлении (0001) , в противоположном направлении рост подавлен. Для полоска на рисунке 2б огранка меняется на трапециевидную, а латеральный рост становится примерно одинаковым в обоих направлениях. Такое изменение характера роста можно объяснить увеличением плотности атомных ступеней на боковых гранях полоска. Если при точной ориентации вдоль направления m разница в скоростях роста (0001) и (-0001) граней обусловлена разницей в их свойствах, то при малой разориентации резко возрастающая плотность ступеней на гранях (0001) и $(000-1)$ настолько увеличивает эффективность встраивания материала, что скорости роста становятся одинаковыми.



Рис. 2 РЭМ изображения полосков, синтезированных на a -GaN а) ориентация полоска вдоль m -направления б) ориентация полоска под углом 7.5° к m -направлению.

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 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. Для

сравнения, при традиционной ориентации полосков точно поперек оси c для проведения второго ELOG-процесса требуется прецизионное совмещение масок первого и второго слоев.

С использованием данной методики были выращены светодиодные структуры зеленого диапазона (500-510 nm) (рис. 2). Данные структуры имели эффективность фото- и электролюминесценции существенно выше, чем у аналогичных структур, выращенных без использования ELOG-процессов.

В первой части **четвертой главы** представлены результаты исследования процесса синтеза методом МОГФЭ нитевидных нанокристаллов GaN/ InGaN на подложках AlN/Si (111). ННК были выращены по механизму пар-жидкость-кристалл, когда атомы III и V группы растворяются в капле металла-катализатора, достигается пересыщение раствора и затем происходит кристаллизация под каплей. Использовалась циклическая альтернативная подача прекурсоров III и V группы.

Исследована возможность использования различных катализаторов (золото, индий-золото, индий) для обеспечения селективности роста (In)GaN ННК. С использованием золота в качестве катализатора синтезирован ансамбль GaN ННК высотой порядка 300 нм, диаметром порядка 10 нм и плотностью $>100/\mu\text{м}^2$.

Добавка индия в капли золота за счет введения триметилиндия в атмосферу реактора позволяет увеличить диаметр ННК с 10 нм до 100 нм (рис. 3а). Также возможно использование индия в качестве самостоятельного катализатора. В этом случае образуются одинаковые круглые двухфазные объекты (рис. 3б), подложка между ними остается чистой. В кривой рентгеновской дифракции таких структур присутствует пик $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ и не наблюдаются пики от металлического галлия. Таким образом, весь осаждаемый на подложку галлий встраивается в твердый раствор InGaN.

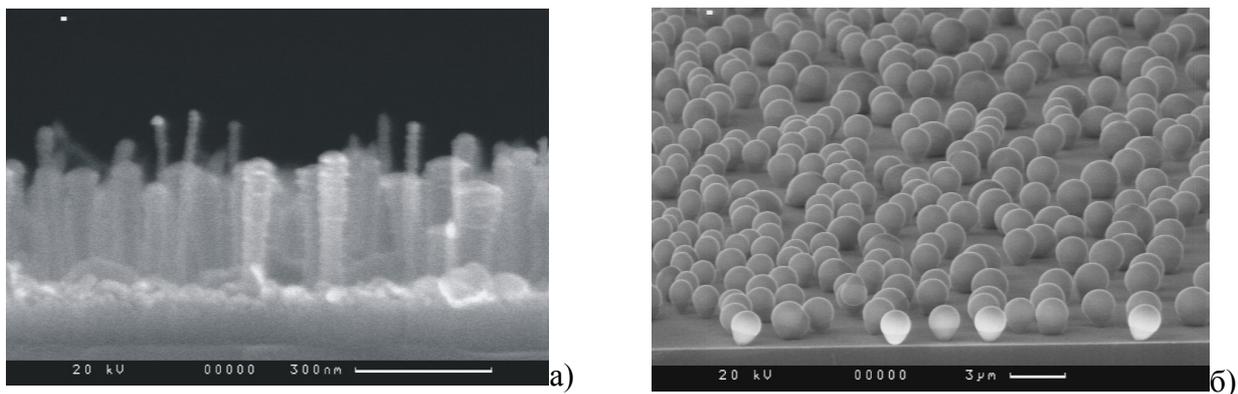


Рис. 3 а) GaN ННК, сформированные на подложке кремния (111) с использованием катализатора In-Au б) GaN ННК, сформированные на подложке кремния (111) с использованием катализатора In

Исследовано влияние условий в реакторе (температура, потоки реагентов, несущий газ, продолжительность цикла) на характер роста ННК, синтезированных методом пульсирующей МОГФЭ с использованием золота в качестве катализатора. Показано, что диапазон допустимых температур, при которых возможен рост ННК, оказывается довольно широк (750-840С). Увеличение потока аммиака или времени экспозиции к аммиаку приводит к тому, что избыток аммиака индуцирует образование нежелательных депозитов в верхней части ННК и подавлению вертикального роста. Увеличение потока триметилгаллия (ТМГ) приводит к нежелательному росту в нижней части ННК, в этом случае избыточные атомы галлия не собираются в капли катализатора и рост происходит между отдельными ННК. Увеличение времени экспозиции к ТМГ приводит к тому, что галлий начинает собираться в крупные редкие капли, что может быть связано с увеличением диффузионной длины атомов галлия в отсутствие аммиака. При этом одновременное увеличение потоков аммиака и ТМГ не привело к каким-либо заметным изменениям в характере роста. Таким образом, именно соотношение потоков реагентов и времен экспозиции к ним значительно влияет на характер роста ННК и диапазон допустимых значений этих параметров крайне узок.

Снижение давления с 600 до 200 мбар для ННК, выращенных через

катализатор индий-золото, приводит к увеличению различия в диаметре отдельных ННК в ансамбле. При этом с увеличением давления увеличивается максимальная высота ННК в ансамбле. Селективность роста сохраняется во всем исследуемом диапазоне давлений. Увеличение максимальной высоты ННК нелинейно зависит от количества циклов, кроме того, с увеличением высоты ННК увеличивается паразитная кристаллизация в верхней части ННК. Данный эффект может быть связан с локальным изменением V/III соотношения у вершины ННК, в частности, снижением концентрации галлия или увеличением концентрации аммиака.

Во второй половине главы представлены результаты исследования процесса синтеза GaN ННК на подложках сапфира, индуцированного сплошной титановой пленкой толщиной 30-100 нм. Все ННК имели правильную гексагональную форму (рис. 4). Диаметр ННК в ансамбле находился в диапазоне 30 нм - 2 мкм, при этом ННК с диаметром более 100 нм были строго ориентированы в направлении оси *c* сапфира. На вершинах ННК не наблюдаются металлические капли, что означает, что в данном случае рост ННК происходит не по хорошо известному механизму пар-жидкость-кристалл.

В спектре микрофотолюминесценции (рис. 5), измеренном при 79К на одиночном ННК, разрешаются спектральные линии, соответствующие свободным и связанному экситонам, что говорит о высоком качестве материала. На рисунке для сравнения также приведен спектр микрофотолюминесценции эпитаксиального слоя нитрида галлия высокого качества.

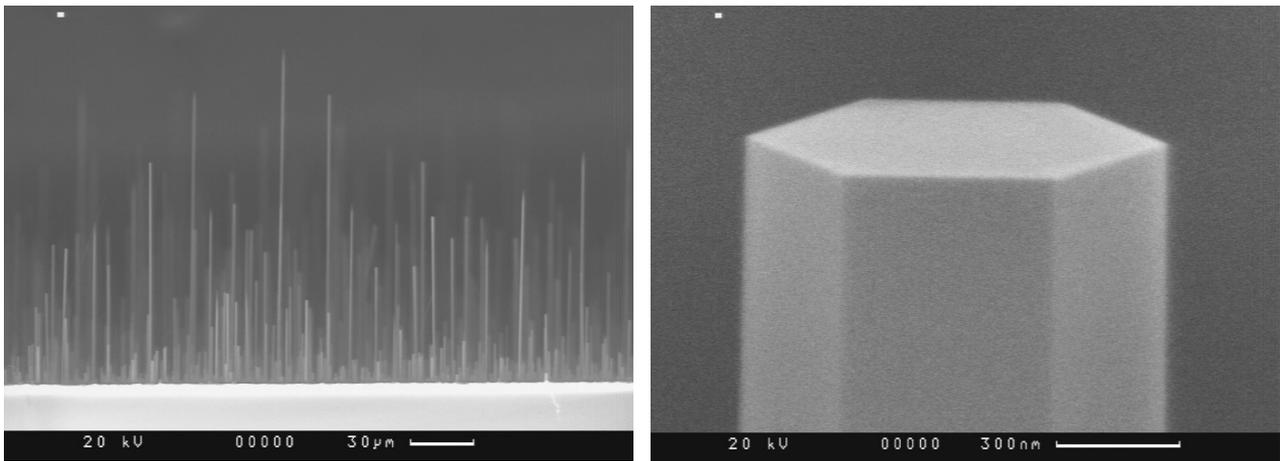


Рис. 4 а) РЭМ изображение ансамбля GaN ННК, сформированного на подложке сапфира (0001) с использованием титановой пленки б) РЭМ изображения единичного ННК

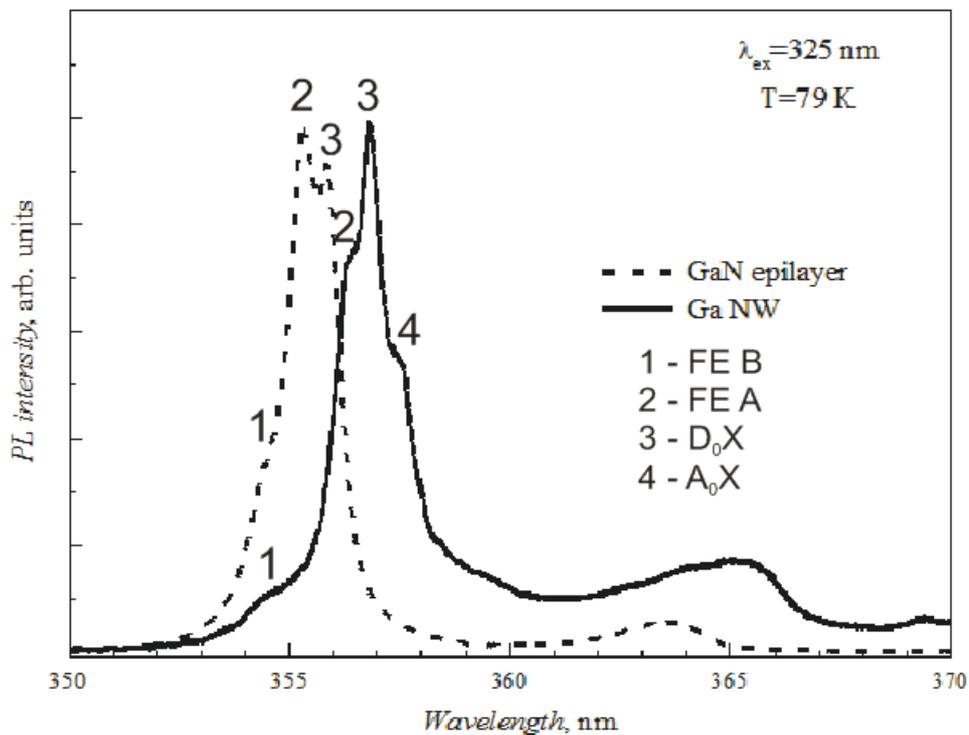


Рис. 5 _Спектры микро-ФЛ одиночного GaN ННК (сплошная линия) и эпитаксиального слоя GaN высокого качества (пунктирная линия), измеренные при температуре 79К

Были синтезированы образцы с 4 квантовыми ямами InGaN, разделенными барьерами GaN, расположенными на боковых гранях ННК. В спектре КЛ доминирует полоса, соответствующая излучению из квантовых ям

InGaN. Квантовые ямы формируются вдоль всего ННК.

В пятой главе приведены результаты исследований синтеза эпитаксиальных слоев GaN и светодиодных структур на кремниевых подложках с нанослоем карбида кремния. Слои SiC были синтезированы методом твердофазной эпитаксии, под слоем SiC при этом располагался слой нанопор, формирующийся в процессе синтеза SiC, который должен был дополнительно способствовать релаксации напряжений в эпитаксиальных структурах. В ходе работы было исследовано влияние условий синтеза, а также ориентации исходной подложки кремния, на свойства слоев SiC с точки зрения последующего эпитаксиального роста слоев GaN на таких подложках. Основными параметрами подложек, влияющими на характер роста слоев нитрида галлия, оказался рельеф поверхности и размер зерен слоя карбида кремния. Далее в главе приводятся результаты по оптимизации буферных слоев при росте на подложках SiC/Si. Исследована возможность использования таких буферных слоев как $Al_{0,3}Ga_{0,7}N$, AlN, различных слоев AlGaN с переменным содержанием алюминия. По результатам экспериментов была выбрана структура, буферный слой которой состоял из слоя AlN и AlGaN переменного состава с линейным изменением условий роста в реакторе. Такая последовательность слоев позволила получить на подложках SiC/Si эпитаксиальные слои нитрида галлия без выраженного рельефа. Основной проблемой при этом являлись v-дефекты в эпитаксиальном слое нитрида галлия. Оптимизация условий синтеза слоев SiC и дальнейшая оптимизация буферных слоев позволила практически полностью подавить образование таких дефектов. Эксперименты, проведенные на эпитаксиальной установке, оснащенной оптической системой *in-situ* контроля кривизны поверхности, показали, что во время эпитаксиального процесса и в процессе остывания диапазон изменения кривизны структур на SiC/Si подложке значительно меньше, чем у аналогичных, выращенных на кремнии. Таким образом, буферный слой карбида кремния действительно способствует снижению

механических напряжений во время роста.

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. Таким образом, показана принципиальная возможность использования буферных слоев карбида кремния при росте на кремниевых подложках для синтеза приборных структур на основе III-N соединений. Показано, что буферный слой карбида кремния приводит к снижению механических напряжений во время эпитаксиального роста и при остывании структуры.

В **заключении** приводятся основные результаты работы:

1. По механизму пар-жидкость-кристалл методом пульсирующей МОГФЭ с использованием золота и расплава индий-золото на подложках кремния синтезированы GaN ННК.
2. Изучено влияние условий в реакторе (давление, потоки реагентов, времена экспозиции, температура подложкодержателя, состав несущего газа, количество циклов, длина цикла) на характер роста ННК.
3. Предложен и реализован новый метод синтеза GaN ННК на сапфировых подложках с использованием пленок титана толщиной 30-100 нм. Получаемые таким методом ННК имеют высокое кристаллическое совершенство, что подтверждается данными спектроскопии фотолюминесценции и рамановского рассеяния.
4. На боковых гранях GaN ННК синтезированы и исследованы гетероструктуры со множественными квантовыми ямами InGaN/GaN.
5. Исследовано влияние условий в реакторе на процесс селективной эпитаксии GaN. Определены режимы роста, позволяющие управлять огранкой формирующихся кристаллитов. Установлено влияние атмосферы в реакторе на эффективность диффузии атомов галлия по поверхности нитрида галлия вдоль различных кристаллографических

направлений.

6. С применением методики двойного перекрестного ELOG на α -GaN синтезирована светодиодная гетероструктура с активной областью InGaN/GaN. Показано, что эффективность электролюминесценции из таких структур выше, чем у структур, синтезированных на аналогичных подложках без использования двойного перекрестного ELOG.
7. На боковых гранях (11-20) мезаполосковых структур прямоугольного сечения сформирована светодиодная структура с активной областью на основе квантовых ям InGaN/GaN. Созданы прототипы светодиодов на свободных полосках GaN, отделенных от подложки.
8. Разработана методика роста на подложках кремния (111) с нанослоями карбида кремния, синтезированного методом твердофазной эпитаксии. Оптимизирована последовательность и толщина буферных слоев, синтезированы и исследованы светодиодные структуры с активной областью на основе InGaN/GaN.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- [1] Кукушкин, С.А. Светодиод на основе III-нитридов на кремниевой подложке с эпитаксиальным нанослоем карбида кремния / С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, С.Г. Жуков, Е.Е. Заварин, В.В. Лундин, М.А. Сеницын, М.М. Рожавская, А.Ф. Цацульников, С.И. Трошков, Н.А. Феоктистов // Письма в журнал технической физики. — 2012. — №38(6) — С. 90
- [2] Лундин, В.В. Двойное перекрестное эпитаксиальное разращивание неполярных эпитаксиальных слоев нитрида галлия / В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, М.М. Рожавская, А.Е. Николаев, А.В. Сахаров, С.И. Трошков, М.А. Сеницын, Д.В. Давыдов, М.М. Кулагина, П.Н. Брунков, А.Ф. Цацульников // Письма в журнал технической физики — 2012. — №38(6) — С. 22
- [3] Лундин, В.В. Особенности селективной эпитаксии GaN в круглых окнах /

- В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, М.М. Рожавская, С.И. Трошков, А.Ф. Цацульников // Письма в журнал технической физики — 2011. — №37(15) — С. 95
- [4] Рожавская, М.М. Влияние газа-носителя, потока триметилгаллия и времени роста на характер селективной эпитаксии GaN / М.М. Рожавская, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, С.И. Трошков, П.Н. Брунков, А.Ф. Цацульников // Физика и техника полупроводников — 2013. — №47(3) — С. 414
- [5] Rozhavskaaya, M.M. Various types of GaN/InGaN nanostructures grown by MOCVD on Si(111) substrate / M.M. Rozhavskaaya, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, E.Yu. Lundina, S.I. Troshkov, V.Yu. Davydov, M.A. Yagovkina, P.N. Brunkov A.F. Tsatsulnikov // Physica status solidi C — 2013. — №10(3) — P. 441
- [6] Rozhavskaaya, M.M. Selective area growth of GaN on r-plane sapphire by MOCVD. / M.M. Rozhavskaaya, W.V. Lundin, E.E. Zavarin, S.I. Troshlov, A.F. Tsatsulnikov // Physica status solidi C — 2013. — №10(3) — P. 373
- [7] Рожавская, М.М. Особенности селективной эпитаксии GaN в полосковых окнах. / М.М. Рожавская, Е.Е. Заварин, В.В. Лундин, С.И. Трошков, А.Ф. Цацульников // Тезисы 8-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия, алюминия – структуры и приборы» — 2011. — С. 117
- [8] Рожавская, М.М. Синтез светодиодной структуры на гранях (11-20) и (0001) мезаполосков, выращенных методом селективной эпитаксии / М.М. Рожавская, В.В. Лундин, А.В. Сахаров // Письма в журнал технической физики — 2014. — №40(1) — С. 37
- [9] Кукушкин, С.А. Светодиод на основе III-нитридов на кремниевой подложке с подслоем нанокарбида кремния / С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, С.Г. Жуков, Е.Е. Заварин, В.В. Лундин, М.М. Рожавская, Н.А. Феоктистов, С.И. Трошков, А.Ф. Цацульников // Тезисы 8-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия, алюминия –

- структуры и приборы» — 2011. — С. 25
- [10] Sorokin, L.M. Strains and defects in GaN epilayers on Si (111) substrates with SiC buffer layers received by solid phase epitaxy: X-ray and XTEM investigation / L.M. Sorokin, V.V. Ratnikov, A.E. Kalmykov, A.V. Myasoedov, M.M. Rozhavskaaya, A.F. Tsatsulnikov, A.V. Osipov, S.A. Kukushkin // abstracts of Youth International School-Conference "Modern Methods of Diffraction Data Analysis and Topical Problems of X-ray Optics. — 2012. — P. 230
- [11] Рожавская, М.М. Синтез GaN ННК на подложках сапфира методом МОГФЭ через нанопленку титана с рекордной скоростью / М.М. Рожавская, В.В. Лундин, Е.Ю. Лундина, С.И. Трошков // тезисы Российской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика. Спб» — 2013. — С. 127
- [12] Рожавская, М.М. Экспериментальное исследование диффузии атомов галлия по кристаллографическим плоскостям (0001) и (11-20) GaN в условиях МОГФЭ / М.М. Рожавская, В.В. Лундин, С.И. Трошков // тезисы Российской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика. Спб» — 2013. — С. 124
- [13] Lundin, W. a-GaN grown by double-cross ELOG process / Wsevolod Lundin, Evgeniy Zavarin, Andrey Nikolaev, Mikhail Sinitsyn, Alexey Sakharov, Sergey Usov, Sergey Troshkov, Pavel Brunkov, Maria Rozhavskaaya, Alexander Smirnov, Valery Davidov, Andrey Tsatsulnikov // abstracts of ICMOVPE-XVI — 2012. — P. 82
- [14] Lundin, W.V. High growth rate MOVPE of Al(Ga)N in planetary reactor / W.V. Lundin, A.E. Nikolaev, M.A. Yagovkina, P.N. Brunkov, M.M. Rozhavskaaya, B. Ya. Ber, D. Yu. Kazanysev, A.F. Tsatsulnikov, A.V. Lobanova, R.A. Talalaev // Journal of crystal growth — 2012 — 352 — p. 209
- [15] Lundin, W.V. Fast AlGa_N growth in a whole composition range in planetary reactor / W.V. Lundin, A.E. Nikolaev, M.M. Rozhavskaaya, E.E.

Zavarin, A.V. Sakharov, S.I. Troshkov, M.A. Yagovkina, A.F. Tsatsulnikov // Journal of crystal growth — 2013 — 370 — p. 7

- [16] Мясоедов, А.Е. Характеризация гетероструктур III-N на кремниевых подложках методами электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии / А.В. Мясоедов, А.Е. Калмыков, Л.М. Сорокин, В.В. Ратников, М.П. Щеглов, А.В. Сахаров, А.Е. Николаев, М.М. Рожавская, В.В. Лундин // тезисы 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия, алюминия – структуры и приборы» — 2013 — с. 149
- [17] Рожавская, М.М. Гетероструктуры InGaN/AlGaN для светодиодов ближнего ультрафиолетового диапазона / М.М. Рожавская, В.С. Сизов, Е.Е. Заварин, В.В. Лундин // тезисы 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия, алюминия – структуры и приборы» — 2010 — с. 159

Список используемой литературы

1. Amano, H. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer / H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki Y. Toyoda / Applied Physics Letters — 1986. — №48 — P. 353
2. Amano, H. P-Type conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation / H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, I. Akasaki // Japan Journal of Applied Physics — 1989. — №28 — P. 2112
3. Nakamura, S. InGaN/AlGaN blue-light-emitting diodes / S. Nakamura // The journal of vacuum science and technology A — 1995. — №13 — P. 705
4. Nakamura, S. High-Brightness InGaN Blue, Green and Yellow Light-Emitting Diodes with Quantum Well Structures / Shuji Nakamura, Masayuki Senoh, Naruhito Iwasa, Shin-ichi Nagahama // Japan Journal of Applied Physics .— 1995. — №34 —P. 797
5. Yamada, M. Phosphor Free High-Luminous-Efficiency White Light-Emitting Diodes Composed of InGaN Multi-Quantum Well / M. Yamada, Y. Narukawa,

- T. Mukai // Japan Journal of Applied Physics — 2002. — №41 — P. 246
6. Khan, M. A. Photoconductive ultraviolet sensor using Mg-doped GaN on Si(111) / M.A. Khan , J.N. Kuzina, D.T. Olson , J.M. Van Hove, M. Blasingame, L.F. Reitz // Applied Physic Letters — 1992. — №60 — P. 2917
 7. Wu, Y-F. Very high breakdown voltage and large transconductance realized on GaN field effect transistors / Y-F. Wu , B.P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, P. Kozodoy, S.P. DenBaars, U.K. Mishra// Applied Physic Letters — 1996. — №69 — P. 1438
 8. Takeuchi, T. Growth of single crystalline GaN film on Si substrate using 3C-SiC as an intermediate layer / T. Takeuchi, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki, I. Akasaki // Journal of crystal growth — 1991. — №115 — P. 634
 9. Tang, Y.-B. Controllable Synthesis of Vertically Aligned p-Type GaN Nanorod Arrays on n-Type Si Substrates for Heterojunction Diodes / Yong-Bing Tang, Xiang-Hui Bo, Chun-Sing Lee, Hong-Tao Cong, Hui- Ming Cheng, Zhen-Hua Chen, Wen-Jun Zhang, Igor Bello, Shuit-Tong Lee // Advanced Functional Materials — 2008 — №18 — 3515
 10. Consonni, V. Nucleation mechanisms of epitaxial GaN nanowires: Origin of their self-induced formation and initial radius / V. Consonni, M. Knelangen, L. Geelhaar, A. Trampert, H. Riechert // Physical review B — 2010. — 81 — P. 085310
 11. Zhao, M.H. Piezoelectric characterization of individual zinc oxide nanobelt probed by piezoresponse force microscope / M.H. Zhao, Z.L. Wang, S.X. Mao // Nano Letters — 2004 — №4 — P. 587