

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

---

На правах рукописи

Заварин Евгений Евгеньевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ГАЗОФАЗНОЙ  
ЭПИТАКСИИ СЛОЕВ GaN И AlGaN ИЗ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ  
СОЕДИНЕНИЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ РОСТА НА ПОДЛОЖКАХ САПФИРА И  
SiC ДЛЯ ПРИБОРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ.

Специальность: 01.04.10 - Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2008

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, с.н.с. Лундин В.В.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Лебедев А.А.

доктор физико-математических наук, профессор Сидоров В.Г.

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук  
Институт аналитического приборостроения РАН

Защита состоится “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2008 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д.ф.-м.н., с.н.с.

Сорокин Л.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

### Актуальность темы.

Нитриды элементов III группы прекрасно подходят для создания на их основе светоизлучающих приборов для длин волн излучения от 200 до 600 нм. Используя эти полупроводники, можно получить полноцветные RGB источники света, повысить плотность записи на цифровых носителях информации, получить высокомошные и эффективные источники белого света. Электронные свойства этих полупроводников позволяют создавать на их основе мощные и высокочастотные транзисторы и другие электронные приборы, конкурирующие по своим характеристикам с приборами на основе SiC. Однако, технология получения приборных структур на основе нитридов имеет значительные трудности. Это, прежде всего, связано с отсутствием нитридных подложек и легированием для получения p-типа проводимости. Эти технологические проблемы потребовали разработки новых методов и подходов к гетероэпитаксиальному росту, что, в свою очередь, позволило значительно улучшить качество материала и эффективность структур.

Современное производство полупроводниковых приборов на основе нитридов элементов III группы осуществляется методом эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ), который включает в себя большое количество физико-химических процессов. Общая теория метода пока не разработана, и процесс синтеза осуществляется, в основном, эмпирически и случайно. В свою очередь, несовершенство существующей технологии тормозит разработку теории. Поэтому, находя эмпирически рецепты и получая результат, исследователи двигаются дальше, не получив понимания процессов, происходящих с использованием данных рецептов. В данной работе делается попытка анализа процессов, происходящих при синтезе нитридов в условиях МОГФЭ, и их влияния на формирование структур. Сложилось так, что получение слоев III-N высокого кристаллического совершенства на инородных

подложках происходит с использованием различных зародышевых и буферных слоев. При этом процессы, происходящие при трансформации этих слоев во время процесса, имеют несколько стадий и связаны с начальными стадиями роста эпитаксиального слоя на них. Исследование влияния множества условий роста на каждую стадию многостадийного процесса, когда результаты роста на предыдущей стадии могут значительно влиять на характер роста на следующей, практически невозможно. Для понимания закономерностей развития этого многостадийного процесса необходимо понимание процессов при росте уже сформированного кристалла GaN – влияние условий роста, соответствующих различным стадиям многостадийного процесса, на рост уже планарно растущего эпитаксиального слоя GaN. Кроме того, более глубокое понимание процессов эпитаксиального роста GaN приведет к сознательному управлению его параметрами при исследовании новых методик роста активных областей приборов или получению новых подходов для роста нитридов.

**Основной целью работы** являлось исследование особенностей процесса эпитаксии GaN и AlGaN из металлоорганических соединений, влияние этих особенностей на формирование эпитаксиальных слоев GaN на подложках сапфира ((0001), (11-20)) и 6H-SiC, а так же разработка новых методик эпитаксиального роста GaN и исследование их влияния на характеристики выращиваемых слоев.

#### **Научная новизна работы.**

1. Обнаружено, что в водород-содержащей атмосфере одновременно с эпитаксиальным ростом слоев GaN методом МОГФЭ при температурах более 1000<sup>0</sup>С, наблюдается разложение GaN, которое не зависит от подачи триметилгаллия (TMGa) в реактор и определяется парциальными давлениями водорода, аммиака и температурой. Предложена согласующаяся с экспериментом модель процесса разложения GaN, из которой следует, что разложение приводит к формированию на

поверхности подвижного слоя адсорбированного галлия, находящегося в квазиравновесии с кристаллом. Обнаружено, что разложение нитрида галлия в азотной атмосфере практически полностью подавляется аммиаком.

2. Обнаружено, что разложение GaN в водород-содержащей атмосфере является ключевым фактором на начальных стадиях формирования эпитаксиального слоя GaN на сапфировых подложках с использованием зародышевых слоев GaN. Отжиг зародышевого слоя в водород-содержащей атмосфере приводит к трехмерному росту на начальных стадиях роста эпитаксиального слоя, в то время как отжиг в отсутствие водорода позволяет изменять характер роста на начальных стадиях с трехмерного на квазидвумерный.
3. Обнаружено, что скорости разложения GaN в водород-содержащей атмосфере для *a* и *c* ориентаций кристалла близки не только качественно, но и количественно.
4. Обнаружено, что при росте твердых растворов AlGaN в водород-содержащей атмосфере увеличение концентрации TMAI в реакторе повышает скорость вхождения Ga в твердый раствор, что приводит к нелинейной зависимости состава твердого раствора от отношения мольных потоков TMAI/(TMAI+TMGa), подающихся в реактор.
5. Обнаружено, что при росте GaN на подложках 6H-SiC с использованием буферных слоев AlGaN, уменьшение содержания Al в буферных слоях от 17.5% до 4% приводит к монотонному изменению характера роста на начальных стадиях с квазидвумерного на трехмерный.
6. Обнаружено, что при селективном росте *a*-GaN на частично маскированной подложке *a*-GaN/*r*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, наличие водорода в атмосфере реактора приводит к анизотропии скоростей роста в направлениях *a* и *c*.

### **Практическая ценность работы.**

В результате проведенных исследований были предложены новые методики, позволяющие выращивать приборные структуры с высокими рабочими характеристиками: предложена и разработана методика роста буферного слоя GaN с высоким сопротивлением для использования в полевых транзисторах на основе гетероструктур AlGaN/GaN с двумерным электронным газом; разработана методика роста слоев GaN на подложках 6H-SiC, имеющих высокое кристаллическое совершенство и электрофизические характеристики для применения в буферных слоях приборных структур; предложена и разработана методика горизонтального выращивания *a*-GaN, позволяющая понизить плотность прорастающих дефектов в слое для выращивания на нем неполярных светоизлучающих приборов.

### **Положения выносимые на защиту.**

1. Концентрация водорода в атмосфере реактора при эпитаксии *c*- и *a*-GaN методом МОГФЭ определяет степень неравновесности процесса роста эпитаксиальных слоев GaN.
2. Отжиг зародышевого слоя GaN в азот-аммиачной атмосфере при эпитаксии на сапфировой подложке позволяет исключить фазу трехмерного роста GaN, приводящую к возникновению проводимости по дефектным каналам вблизи подложки, и получить высокоомный буферный слой для использования в полевых транзисторах на основе гетероструктур AlGaN/GaN.
3. При выращивании эпитаксиальных слоев GaN на подложках 6H-SiC с использованием буферных слоев AlGaN, содержание Al в буферном слое 6-8% приводит к трехмерному характеру роста на начальных стадиях и наилучшему кристаллическому совершенству эпитаксиальных слоев.
4. При росте *a*-GaN на частично маскированной подложке в атмосфере водорода, использование объемной концентрации TMGa более  $2 \cdot 10^{-4}$  и аммиака менее  $5 \cdot 10^{-2}$  приводит к значительной анизотропии скоростей

роста вдоль  $c$  и  $a$  направлений GaN, что позволяет получить высокие горизонтальные скорости роста (вдоль направления  $c$  GaN) эпитаксиальных слоев над маской и реализовать процесс горизонтального разращивания  $a$ -GaN.

### **Аппробация работы.**

Результаты диссертационной работы докладывались на

- 14th International Conference of Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, 1-6 June, 2008, Metz, France.
- 6-я Всероссийская конференция “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”, 18–20 июня, 2008, Санкт-Петербург.
- 7th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-7), 16-21 september, 2007, Las Vegas, Nevada, USA
- 12<sup>th</sup> European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy, 3-6 June 2007, Bratislava, Slovakia
- 5-я Всероссийская конференция “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”, 31 января–2 февраля, 2007, Москва.
- 4-я Всероссийская Конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», Санкт-Петербург, 3-5 июля, 2005.
- EUROCVT-15, 4 – 9 september, 2005, Bochum, Germany
- 11<sup>th</sup> European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy, 5-8 June 2005, Lausanne, Switzerland,
- 3-я Всероссийская Конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», Москва, 7-9 июня, 2004.
- VI Российской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 27-31 октября, 2003.
- 2-я Всероссийская Конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», Санкт-Петербург, 3-4 февраля, 2003

Основное содержание диссертации опубликовано в двадцати печатных работах.

### **Структура и объем.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Материал изложен на 184 страницах, включая 131 страницу текста, 71 рисунок и 5 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 132 наименования.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит обзор литературных данных о свойствах нитридов элементов III группы (GaN, InN, AlN) и их сравнение с другими полупроводниками для приборных применений, описываются пиро- и пьезоэлектрические свойства нитридов, которые оказывают влияние на характеристики приборных структур. Рассматриваются методы синтеза и легирования нитридов, описываются трудности, связанные с отсутствием нитридных подложек, описываются подложки, используемые для гетероэпитаксии нитридов. Описаны многостадийные методики роста на сапфировых и SiC подложках, используемые для получения эпитаксиальных слоев GaN методом МОГФЭ. Приведены данные о видах дефектов в нитриде галлия и способах их уменьшения в растущих слоях, таких как горизонтальное разращивание и других методов, связанных с изменением начальных стадий роста эпитаксиального слоя GaN. Рассмотрены актуальные вопросы по стабильности нитридов в условиях их синтеза. В конце главы сформулированы основные выводы.

**Вторая глава** содержит подробное описание технологической установки, созданной на базе узлов установки Epiquip VP-50RP, позволяющей выращивать эпитаксиальные слои нитридов элементов III группы методом МОГФЭ при пониженном давлении, а также методик эпитаксиального роста и



применявшихся подложек, методов исследования полученных структур и эпитаксиальных слоев. В качестве источников элементов III группы применялись металлоорганические соединения: триметилгаллий (TMGa), триметилиндий (TMIn) и триметилалюминий (TMAI), источником азота был аммиак ( $\text{NH}_3$ ). Для исследования особенностей процесса МОГФЭ уже сформированных эпитаксиальных слоев GaN или твердых растворов AlGaN использовались квазиподложки *c*-GaN и *a*-GaN, представляющие собой слои GaN (~1.5-2мкм), выращенные на *c*- и *r*- сапфире, соответственно. Методика выращивания состояла в продолжении роста слоя GaN с последующей сменой режимов и наблюдении изменения толщины и/или морфологии во времени. Для исследования начальных стадий формирования эпитаксиального слоя GaN использовались подложки  $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ , имеющие одностороннюю полировку, и 6H-SiC(0001) с двухсторонней полировкой. В случае  $\text{Al}_2\text{O}_3$  использовались 4 типа зародышевых слоев: низкотемпературный зародышевый слой GaN с отжигом в водород-аммиачной атмосфере; низкотемпературный зародышевый слой GaN с отжигом в азот-аммиачной атмосфере; низкотемпературный зародышевый слой AlN с отжигом в водород-аммиачной атмосфере; высокотемпературный зародышевый слой AlN. В случае SiC на начальных стадиях роста использовались буферные слои  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с различной мольной долей AlN. В работе также использовались подложки для исследования селективного роста неполярного *a*-GaN. Это были слои *a*-GaN (~2мкм) высокого кристаллического совершенства, выращенные методом МОГФЭ на *r*- $\text{Al}_2\text{O}_3$  с нанесенной на них с помощью литографии маской  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в виде чередующихся полосков (7мкм) и окон (5мкм) между ними, ориентированных перпендикулярно оси *c* слоя GaN. Методикой in-situ оценки скоростей роста и травления, оценки морфологии была лазерная рефлектометрия. В главе подробно описана система рефлектометрии, принцип ее действия, приведены расчетные рефлектограммы для случаев близких к реальным изменениям морфологии поверхности растущего слоя. Исследование морфологии

поверхности проводилось с использованием растрового электронного микроскопа CAMSCAN. Определение кристаллического качества слоев, а также составов твердых растворов осуществлялось с помощью дифракции рентгеновских лучей на двухкристальном дифрактометре ДРОН-3 с гониометром ГУР-8 или высокочувствительном однокристальном рентгеновском дифрактометре с вращающимся анодом RIGAKU D/MAX-B. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) снимались на установке, собранной на базе монохроматора МДР-23 и охлаждаемого фотоэлектронного умножителя ФЭУ-83, работающего в режиме счета фотонов или режиме синхронного детектирования. Фотолюминесценция возбуждалась непрерывным He-Cd лазером ( $\lambda=325\text{нм}$ , плотность мощности  $\sim 0.5\text{Вт/см}^2$ ) или импульсным азотным лазером ( $\lambda=337.1\text{нм}$ ), для которого плотность мощности регулировалась в пределах от  $\sim 300\text{ Вт/см}^2$  до  $\sim 1.5\text{МВт/см}^2$  изменением фокусировки и использованием фильтров. В работе представлены результаты исследования эпитаксиальных слоев с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Jeol 2010 с разгонным потенциалом 200кВ. Образцы для исследования подготавливались в геометрии поперечного сечения вдоль направлений  $\langle 2-1-10 \rangle$  и  $\langle 10-10 \rangle$  стандартным способом (механическая обработка с последующим травлением ионами до толщин прозрачности для электронов).

**Третья глава** посвящена исследованию особенностей роста GaN и твердых растворов AlGaN в условиях МОГФЭ. Исторически сложилось, что в МОГФЭ III-V материалов в качестве несущего газа использовался водород. Однако GaN и InN не стабильны в водороде и разрушаются (травятся) при температурах, характерных для роста этих кристаллов. Поэтому водород, как несущий газ при эпитаксии нитридов, является активным участником процесса, происходящего на поверхности растущего слоя. Так как в большинстве случаев для роста III-N методом МОГФЭ в качестве источника азота используется аммиак, и он подается в реактор в больших количествах, то долгое время считалось, что аммиак подавляет разложение растущей пленки и эффект водорода будет

пренебрежимо мал. Однако, это оказалось не соответствующим действительности и влияние водорода на процесс роста нитридов имеет существенное значение. В качестве альтернативы водороду в качестве газ-носителя в МОГФЭ нитридов используется азот.

При температурах 1020-1160<sup>0</sup>С GaN разлагается как в азоте, так и в водороде. Скорость разложения в чистом водороде при этих температурах составляет более 10нм/с, что хорошо описано в литературе. При разложении в азоте на поверхности GaN наблюдается образование металлических капель галлия и ямок травления. Скорость разложения в этом случае составляет 0.05 до

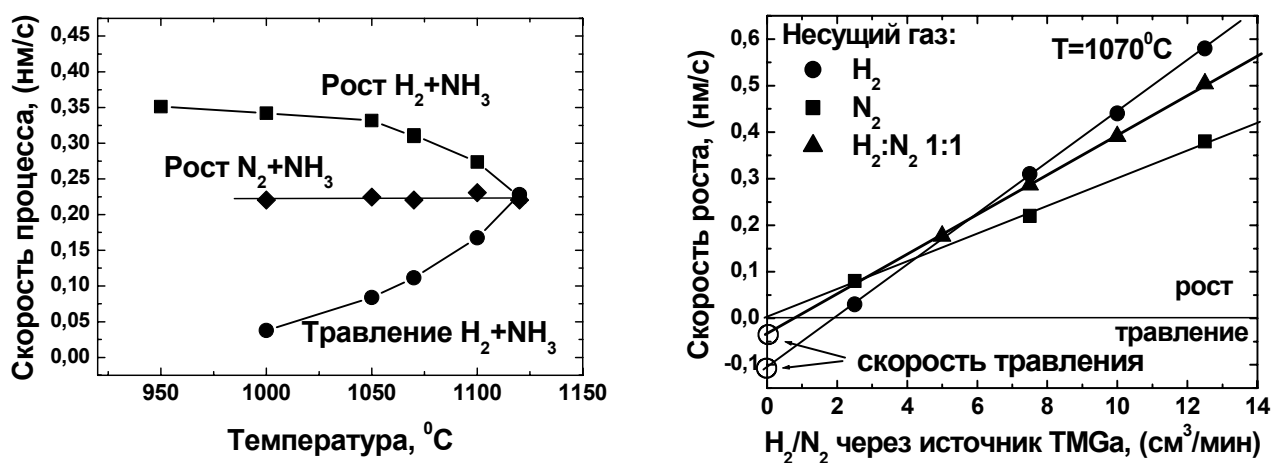


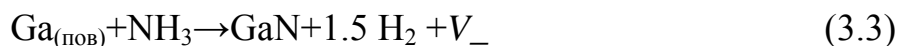
Рис.1 Зависимости скоростей травления и роста GaN от температуры (слева) и потока TMGa (справа) для различных составов несущего газа.

1.5нм/с в интервале температур 1020-1160<sup>0</sup>С, соответственно, с энергией активации процесса  $2.87 \pm 0.12$ эВ. В случае азот-аммиачной атмосферы изменение скорости роста в исследуемом диапазоне температур не наблюдалось (рис.1). Скорость роста линейно зависела от потока TMGa и при прекращении подачи его в реактор, травления GaN не наблюдалось (рис.1). В азот-аммиачной смеси разложение GaN компенсируется образованием GaN из аммиака и освободившегося галлия на поверхности эпитаксиального слоя, поэтому результирующая скорость травления в этом случае близка к нулю. В водород-аммиачной атмосфере при прекращении подачи TMGa в реактор

наблюдалось обратимое планарное травление эпитаксиального слоя  $c$ -GaN. Скорость роста линейно зависела от потока TMGa (рис.1) и нулевой скорости роста соответствовал не нулевой поток TMGa. При этом измеренные скорости травления совпадают с полученными из аппроксимации зависимостей скоростей роста на нулевой поток TMGa. Это оказалось верно и для азот-водород-аммиачной атмосферы. Зависимость скорости роста  $c$ -GaN от потока TMGa в водород-аммиачной и азот-водород-аммиачной атмосфере можно представить в виде:

$$Gr = A \cdot F - ER, \quad (3.1)$$

где  $Gr$  - скорость роста,  $F$  – поток TMGa подающийся реактор,  $ER$ -скорость травления. Для объяснения процессов происходящих на поверхности растущего слоя была предложена модель травления  $c$ -GaN в водород-аммиачной атмосфере (рис.2):



где  $V_-$  – свободные места для адсорбции,  $\text{Ga}_{(\text{пов})}$  – адсорбированный галлий. Эта модель, объединенная с моделью течения, массопереноса и распределения температуры имеющегося в реальном реакторе, дала хорошее согласие с экспериментальными зависимостями скорости травления от температуры и парциального давления водорода в смеси (рис.2), парциального давления аммиака, а также общего давления в реакторе. Из представленной модели роста-травления следует, что в присутствии водорода эпитаксия GaN – квазиравновесный процесс. Упорядочение кристалла, анизотропные эффекты при селективном росте, формирование дефектов в значительной степени определяются миграцией атомов галлия и их встраиванием в энергетически предпочтительные позиции.

В присутствии водорода в результате обратимого процесса, описываемого реакциями (3.2) и (3.3), на поверхности формируется подвижный

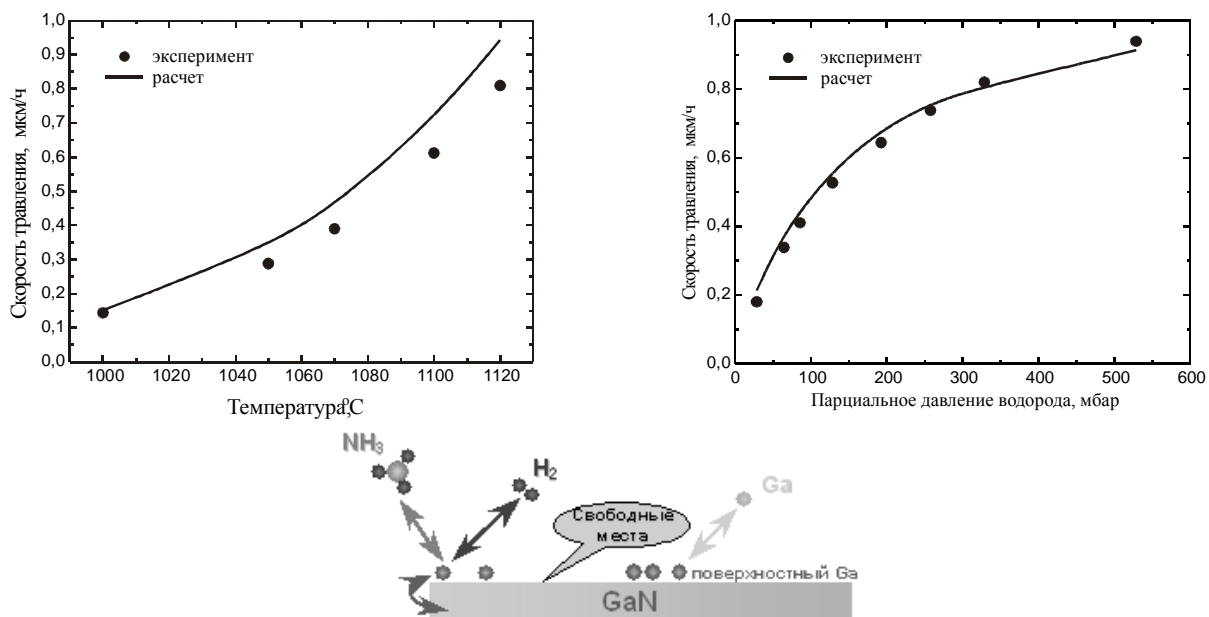


Рис.2 Сравнение экспериментальных и расчетных данных для зависимостей скорости травления от температуры (слева) и парциального давления водорода (справа) и схематическое представление процесса травления *c*-GaN в водород-аммиачной атмосфере.

слой адсорбированных атомов галлия, находящийся в квазиравновесии с кристаллом GaN (перенос галлия при упорядочении растущего кристалла – поверхностная диффузия адсорбированных атомов). При повышении температуры начинает играть важную роль десорбция атомов галлия из этого адсорбционного слоя. При низких давлениях в реакторе испарившийся галлий диффундирует от поверхности растущего слоя и теряется для эпитаксиального процесса. При повышении давления диффузия испарившегося с поверхности галлия подавляется, и процесс, описываемый реакциями (3.4) и (3.5), также становится квазиравновесным (перенос галлия при упорядочении растущего кристалла – диффузия в газовой фазе). Таким образом, изменением температуры, парциальных давлений аммиака и водорода и общего давления в реакторе (которое становится независимым от парциальных давлений

водорода и аммиака при наличии третьего компонента газовой фазы, например азота) можно менять механизм роста от практически необратимого до квазиравновесного.

При исследовании особенностей роста твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  было показано, что в азот-аммиачной атмосфере состав твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  линейно зависит от отношения мольных потоков  $\text{TMAI}/(\text{TMAI}+\text{TMGa})$ . В водород-аммиачной атмосфере, наблюдается нелинейное изменение состава от этого отношения. Сопоставляя зависимости парциальных скоростей роста  $\text{AlN}$  и  $\text{GaN}$  при росте твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  от потока  $\text{TMAI}$ , а также определив зависимость скорости разложения бинарной компоненты твердого раствора  $\text{GaN}$  от потока  $\text{TMAI}$ , можно утверждать, что во время роста твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  в водород-аммиачной атмосфере происходит разложение бинарной компоненты  $\text{GaN}$ , скорость которого уменьшается с увеличением потока  $\text{TMAI}$  (увеличение скорости вхождения  $\text{Ga}$  в твердый раствор с увеличением потока  $\text{TMAI}$ ), что приводит к нелинейному изменению состава  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . В азот-аммиачной атмосфере разложения  $\text{GaN}$  при росте  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  не наблюдается.

Сопоставление зависимостей скоростей травления от температуры и потоков аммиака, а так же скоростей роста от потоков  $\text{TMGa}$  и аммиака для ориентаций растущего слоя  $a$ - $\text{GaN}$  и  $c$ - $\text{GaN}$  позволяют сделать вывод, что влияние водорода на рост и травление различных ориентаций кристалла  $\text{GaN}$  ( $c$  и  $a$ ) имеет сходный характер как качественно, так и количественно.

**В четвертой главе** описывается формирование эпитаксиальных слоев  $\text{GaN}$  на сапфировых подложках и подложках  $6\text{H-SiC}$ , рассматривается влияние состава атмосферы реактора на начальные стадии роста на сапфировых подложках, определяется, как характер начальной стадии роста (трехмерный или квазидвумерный рост) связан с особенностями структуры и свойств эпитаксиальных слоев  $\text{GaN}$ . Показано, что отжиг в водород-содержащей атмосфере приводит к разложению зародышевого слоя  $\text{GaN}$  и формированию

на поверхности подложки отдельных кристаллических островков, которые при дальнейшем росте срастаются друг с другом, формируя эпитаксиальный слой GaN. При этом на стадиях их разрастания наблюдается ярко выраженный островковый (трехмерный) рост (рис.3). В результате такого роста вблизи подложки возникает область с большой плотностью дефектов толщиной  $\sim 0.6 \mu\text{м}$ . Это приводит к возникновению проводимости вблизи подложки по дефектным каналам. Благодаря длительной фазе трехмерного роста плотность прорастающих дефектов вблизи поверхности слоя составляет  $\sim 6-7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ . Использование зародышевых слоев стабильных в водород-содержащей атмосфере (AlN) или отжиг зародышевого слоя GaN в безводородной атмосфере позволяют получать квазидвумерный характер роста эпитаксиального слоя GaN практически с самого начала его роста (рис.3).

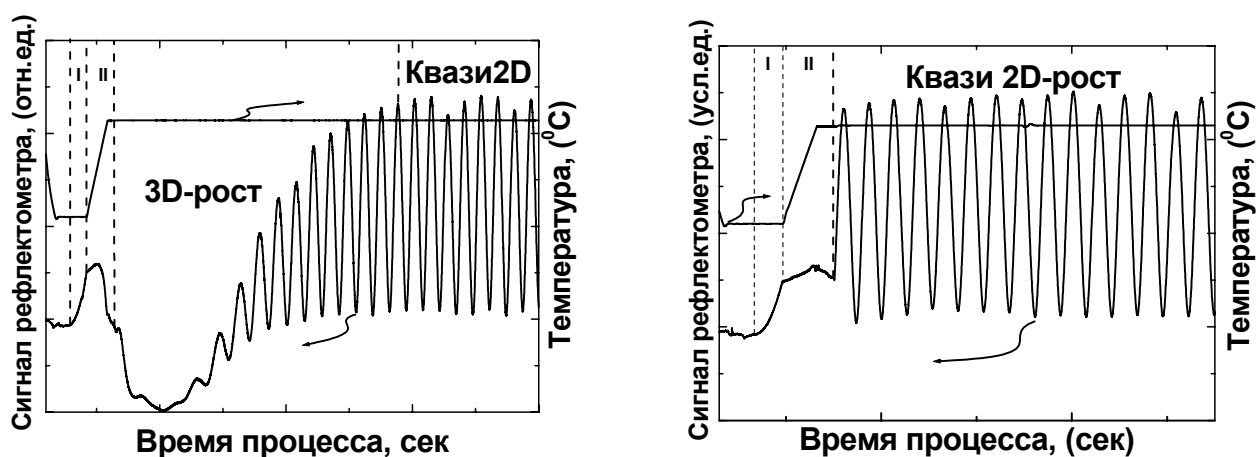


Рис.3. Рефлектограммы процессов с использованием зародышевого слоя GaN и его отжигом в водород-аммиачной (слева) и безводородной атмосфере (справа).

В случае отсутствия стадии островкового роста толщина дефектной области на границе подложка-слой, по данным ПЭМ, сокращается, и проводящие каналы в ней не формируются. Однако, в этих высокоомных слоях плотность дислокаций вблизи поверхности слоя оказывается в  $3 \div 10$  раз выше, чем в слоях, при росте которых имелась стадия трехмерного роста. Тем не менее, на этих высокоомных слоях выращены гетероструктуры AlGaIn/GaN и созданы

полевые транзисторы с высокими рабочими характеристиками. При исследовании формирования эпитаксиальных слоев GaN на подложках 6H-SiC с использованием буферного слоя AlGaN было показано, что рост GaN на начальных стадиях может носить как квазидвумерный, так и трехмерный характер. При этом, длительность стадии трехмерного роста GaN уменьшается с увеличением содержания Al в буферном слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . Эпитаксиальный слой GaN имеет наилучшее кристаллическое совершенство при содержании Al в буферном слое 6-8%. В этом случае, на начальной стадии роста наблюдается трехмерный рост, также как на сапфировой подложке.

Исследование селективного роста *a*-GaN на частично маскированной подложке показало, что при наличии водорода в атмосфере реактора наблюдается анизотропия скоростей роста в направлениях *a* и *c* GaN (рис.4).

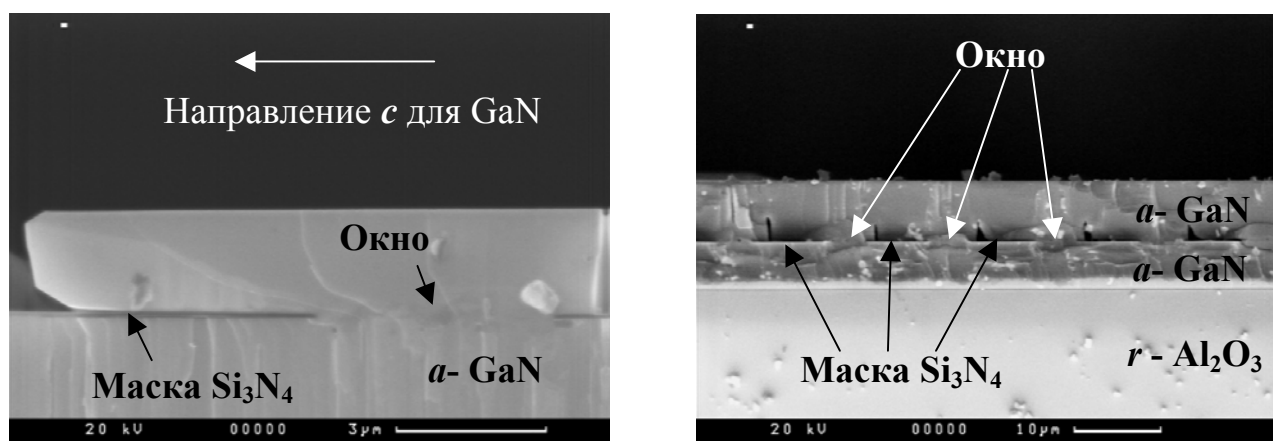


Рис.4. Скол структуры при селективном росте *a*-GaN в водород-содержащей атмосфере (слева) и реализация горизонтального разращивания *a*-GaN (справа).

Причем анизотропия увеличивается в условиях, приводящих к большим покрытиям поверхности металлическим галлием (высокие потоки триметилгаллия и большие отношения парциального давления водорода к парциальному давлению аммиака). Условия с высокой анизотропией скоростей роста *a* и *c* граней позволяют реализовать процесс горизонтального разращивания *a*-GaN (рис.4) с формированием на полученных слоях активных областей светодиодов на основе неполярных InGaN/GaN структур с многими квантовыми ямами.



**В заключении** приводятся основные результаты работы:

1. Было показано, что в водород-содержащей атмосфере одновременно с эпитаксиальным ростом слоев GaN методом МОГФЭ происходит разложение GaN при этом концентрация водорода в атмосфере реактора определяет степень неравновесности процесса роста эпитаксиальных слоев GaN. Показано, что скорости разложения GaN для *c* и *a* ориентации кристалла близки качественно и количественно.
2. Определено, что при росте твердых растворов AlGaN в водород-содержащей атмосфере увеличение концентрации TMAI в реакторе повышает скорость вхождения Ga в твердый раствор.
3. Было показано, что фаза трехмерного роста эпитаксиального слоя GaN на сапфировой подложке является следствием отжига зародышевого слоя GaN в водород-содержащей атмосфере. Отжиг его в азот-аммиачной атмосфере позволяет исключить фазу трехмерного роста GaN, приводящую к возникновению проводимости по дефектным каналам вблизи подложки и получить высокоомный буферный слой GaN для использования его в полевых транзисторах на основе гетероструктур AlGaN/GaN.
4. Рост эпитаксиальных слоев GaN на подложках 6H-SiC с использованием буферных слоев AlGaN может иметь на начальных стадиях как трехмерный, так и квазидвумерный характер, который определяется содержанием Al в буферном слое. При содержании Al в буферном слое 6-8%, получены слои GaN наилучшего кристаллического совершенства.
5. При росте *a*-GaN на частично маскированной подложке *a*-GaN/*r*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в атмосфере водорода, наблюдается анизотропия скоростей роста вдоль *a* и *c* направлений GaN, что позволило реализовать процесс горизонтального разращивания *a*-GaN.
6. Созданы методики роста буферных слоев GaN на различных подложках для использования в приборных структурах (светодиодах, транзисторах, неполярных структурах).

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Effect of Metallic Surface Coverage on Material Quality in III-Nitride MOVPE. A.Kondratyev, R.Talalaev, A.Segal, E.Yakovlev, W.Lundin, E.Zavarin, M.Sinitsyn, A.Tsatsulnikov, Phys.Stat.Sol.(c), V.5(6)(2008), p.1691
2. Hydrogen effects in III-nitride MOVPE. E.V.Yakovlev, R.A.Talalaev, A.V.Kondratyev, A.S.Segal, A.V.Lobanova, W.V.Lundin, E.E.Zavarin, M.A.Sinitsyn, A.F.Tsatsulnikov, A.E.Nikolaev, 14th International Conference of MOVPE, Metz (France), 1-6 June 2008, Abstracts, pp.21-23
3. Влияние водорода на рост нитридов методом МОГФЭ. Е.В.Яковлев, Р.А.Талалаев, А.С.Сегаль, А.В.Лобанова, В.В.Лундин, Е.Е.Заварин, М.А.Синицын, А.Ф.Цацульников, А.Е.Николаев, Тезисы 6-й Всероссийской конференции нитриды галлия, индия и алюминия—структуры и приборы, 18–20 июня, 2008, стр.61-63
4. О роли водорода в формировании эпитаксиальных слоев GaN. Е.Е.Заварин, В.В.Лундин, М.А.Синицын, Н.А.Черкашин, А.Ф.Цацульников, Тезисы докладов 6-й Всероссийской конференции нитриды галлия, индия и алюминия—структуры и приборы, 18–20 июня, 2008, стр.65-67
5. Non-polar a-(In)GaN heterostructures. W.V.Lundin, E.E.Zavarin, A.E.Nikolaev, M.A.Sinitsyn, A.V.Sakharov, D.S.Sizov, R.A. Talalaev , A.V. Lobanova, and A.F.Tsatsulnikov, 12<sup>th</sup> European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy, Bratislava(Slovakia), 3-6 June 2007, Abstracts, pp.57-60
6. MOVPE growth of III-N heterostructures for optoelectronic and electronic applications on SiC substrates. W.V.Lundin, A.E.Nikolaev, E.E.Zavarin, M.A.Sinitsyn, A.V.Sakharov, and A.F.Tsatsulnikov, 12<sup>th</sup> European Workshop on MOVPE Bratislava(Slovakia), 3-6 June 2007, Abstracts, pp.147-149
7. Гетероструктуры InGaAlN для НЕМТ-транзисторов. А.В.Сахаров, В.В.Лундин, Е.Е.Заварин, М.А.Синицын, А.Ф.Цацульников Тезисы 5-й Всероссийской конференции нитриды галлия, индия и алюминия—структуры и приборы, 31 января–2 февраля 2007, стр.20-21

8. Неполярные  $a$ -(In)GaN гетероструктуры. Е.Е.Заварин, В.В.Лундин, М.А.Синицын, А.Е.Николаев, А.В.Сахаров, Д.С.Сизов, М.М.Кулагина, А.Ф.Цацульников. Тезисы 5-й Всероссийской конференции нитриды галлия, индия и алюминия–структуры и приборы, 31.01–2.02 2007, Москва, с.46-47
9. Разработка технологии выращивания эпитаксиальных III-N структур на SiC подложках для синих светодиодов методом MOCVD. В.В.Лундин, А.Е.Николаев, Е.Е.Заварин, М.А.Синицын, А.В.Сахаров, С.О.Усов, А.Ф.Цацульников. Тезисы 5-й Всероссийской конференции нитриды галлия, индия и алюминия–структуры и приборы, 31.01–2.02 2007, Москва с.14-15
10. Effects of reactor pressure and residence time on GaN MOVPE growth efficiency W.V.Lundin, E.E.Zavarin, D.S.Sizov, M.A.Sinitsin, A.F.Tsatsul'nikov, A.V.Kondratyev, E.V.Yakovlev, R.A.Talalaev, J. of Crystal Growth, V.287(2)(2006), p.605-609
11. Влияние газа-носителя на процесс газотранспортной эпитаксии нитрида галлия из металлоорганических соединений. В.В.Лундин, Е.Е.Заварин, Д.С.Сизов, Письма в ЖТФ 31(7), 52-56 (2005)
12. Влияние водорода на процесс роста GaN и AlGaN методом ГФЭ МOC. В.В.Лундин, Р.А.Талалаев, Е.Е.Заварин, Д.С.Сизов, М.А.Синицын, А.Ф.Цацульников, Тезисы IV Всероссийской Конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия–структуры и приборы», С-Петербург, 3-5 июля 2005, стр.50-51
13. Effect of Hydrogen on GaN and AlGaN Growth by MOVPE. W.V.Lundin, R.A.Talalaev, E.E.Zavarin, D.S.Sizov, M.A.Sinitsyn, A.F.Tsatsulnikov, 11<sup>th</sup> European Workshop on MOVPE, Lausanne (Switzerland), 5-8 June 2005, Abstracts, p.331
14. *In-situ* investigations of GaN chemical instability during MOCVD. Zavarin E.E., Sizov D.S., Lundin W.V., Tsatsulnikov A.F., Talalaev, R.A., Kondratyev A.V., Bord O.V. Electrochemical Society Proceedings Vol. 2005-09(2005), pp. 299-305
15. Гетероструктуры AlGaIn/GaN с высокой подвижностью электронов, выращенные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. В.В.Лундин, Е.Е.Заварин, А.И.Бесюлькин, А.Г.Гладышев,

- А.В.Сахаров, М.Ф.Кокорев, Н.М.Шмидт, А.Ф.Цацульников, Н.Н.Леденцов, Ж.И.Алферов, Р.Каканаков, ФТП, 2004, том 38, выпуск 11 стр.1364-1367
16. Aluminum incorporation control in AlGaN MOVPE: experimental and modeling study. A.V. Kondratyev, R.A. Talalaev, W.V. Lundin, A.V. Sakharov, A.V. Tsatsul'nikov, E.E. Zavarin, A.V. Fomin and D.S. Sizov. Journal of Crystal Growth, Volume 272(2004), Issues 1-4, pp.420-425
17. Химическая нестабильность GaN в водород – азот - аммиачных смесях и ее влияние на процесс роста при эпитаксии из металло- органических соединений. Е.Е.Заварин, В.В.Лундин, Д.С.Сизов, Тезисы III Всероссийской Конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия–структуры и приборы», Москва, 7-9 июня 2004 г., стр. 47-48
18. Исследование влияния начальной стадии роста на структурные и оптические свойства GaN. Е.Е. Заварин, Д.С. Сизов, А.И. Бесюлькин, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, В.С. Сизов, А.Ф. Цацульников Тезисы VI Российской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 27-31 октября 2003 г., стр. 45-46
19. Начальные стадии роста GaN с использованием низкотемпературных слоев (Al)GaN и AlN. Е.Е. Заварин, А.В. Сахаров, А.И. Бесюлькин, Д.С. Сизов, В.В. Лундин, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов Тезисы докладов II Всероссийской Конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия–структуры и приборы», Санкт-Петербург, 3-4 февраля 2003 г., стр.91-92
20. Гетероструктуры с высокой подвижностью электронов на основе III-N, выращенные методом ГФЭ МОС. В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, А.И. Бесюлькин, А.Г. Гладышев, А.В. Сахаров, Н.М. Шмидт, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов., М.Ф. Кокорев, Тезисы II Всероссийской Конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия–структуры и приборы», Санкт-Петербург, 3-4 февраля 2003 г., стр.103-104