

**Всероссийская Конференция  
«НИТРИДЫ ГАЛЛИЯ, ИНДИЯ И АЛЮМИНИЯ -  
СТРУКТУРЫ И ПРИБОРЫ»**

**Тезисы докладов**

**Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова,  
Физико-Технический Институт им. А.Ф.Иоффе РАН,**

**при финансовой поддержке**

**Министерства Промышленности, Науки и Технологий РФ,  
Агентства Технологических исследований «ЮниСаф»,  
Центра по Исследованию Роста Кристаллов (С.-Петербург),  
ООО «Корвет-Лайтс».**

**Москва, 01-02 ноября 2001 г.**

# 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ. ГОМОЭПИТАКСИЯ И РОСТ ОБЪЕМНЫХ КРИСТАЛЛОВ.

Председатель – *П.С.Копьев.*

## 1.1. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЛОЕВ GaN, AlGaN И ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/GaN, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МОГФЭ НА ПОДЛОЖКАХ GaN

*А.С.Усиков\** (А), *В.В. Лундин* (А), *Е.Е.Заварин* (А), *А.И.Бесюлькин* (А), *А.В.Сахаров* (А), *А.И.Печников* (С), *И.П.Никитина* (В), *А.В.Фомин* (А), *В.В.Третьяков* (А), *В.А.Дмитриев* (С)

(а) ФТИ им.А.Ф.Иоффе, 194021, С.-Петербург, ул. Политехническая, д.26.

\*) *usikov.vpegroup@pop.ioffe.rssi.ru*

(b) Центр иссл. роста кристаллов, 193036, С.-Петербург, Лиговский пр., д.12-Н

(c) TDI, Inc., 8660 Dakota Dr., Gaithersburg, MD, 20877 USA.

Исследовались структурные и оптические свойства нелегированных и легированных Si одиночных слоев GaN и AlGaN, а также сверхрешеток GaN/AlGaN, выращенных методом МОГФЭ на GaN/сапфировых подложках, полученных методом ХГФЭ. Метод дифракции рентгеновских лучей, катодлюминесцентные измерения, рентгено-спектральный микроанализ и исследование морфологии поверхности показали, что объемный AlGaN толщиной 1 мкм (содержание Al ~13%) ненапряжен и покрыт сеткой трещин. На короткопериодной сверхрешетке GaN/AlGaN толщиной 1 мкм (средний состав AlN ~ 12-15%) наблюдалась релаксация напряжений и заметное уменьшение плотности трещин.

## 1.2. GaN и AlGaN ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ ПРОДУКТ

*Ю.Мельник, А.И.Печников, Д.Цветков, В.А.Дмитриев*

TDI, Inc. 8660 Dakota Dr., Gaithersburg, 20877 MD, USA

E-mail: [yuvm@tdii.com](mailto:yuvm@tdii.com)

*и А.Давыдов*

Metallurgy Division, NIST, 100 Bureau Dr., Gaithersburg, 20899 MD, USA

Последние достижения в исследовании материалов в системе AlN-GaN привели к значительному улучшению характеристик светоизлучающих и силовых приборов.

Из-за отсутствия подложек GaN, при изготовлении этих приборов были использованы подложки сапфира и SiC. Дальнейшее улучшение характеристик данных приборов может быть получено, если в качестве подложек использовать эпитаксиальный продукт, представляющий из себя подложку сапфира или SiC покрытую тонким эпитаксиальным слоем GaN или AlGaN. В этом случае структура прибора может быть выращена на поверхности нитрида, имеющего лучшее согласование по параметру кристаллической решетки со структурой прибора.

В данном сообщении, мы описываем структурные, электрические и оптические свойства эпитаксиального продукта, выращенного HVPE методом в TDI, Inc.

### 1.3. ПОЛУЧЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ СЛОЕВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

*Ю.В.Жиляев\**, *А.В.Насонов*, *С.Д.Раевский*, *С.Н.Родин*, *М.П.Щеглов*,  
*В.Ю.Давыдов*

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26,  
(812)-247-93-16, e-mail: [Zhilyaev@jyuv.ioffe.rssi.ru](mailto:Zhilyaev@jyuv.ioffe.rssi.ru)

Разработан метод получения объемных слоев GaN на сапфировых подложках методом газотранспортной эпитаксии (ГФЭ) в открытой хлоридной системе. Определены условия получения прозрачных слоев нитрида галлия с зеркально-гладкой поверхностью толщиной до 1000 мкм, площадью до 2х3 см<sup>2</sup>, получены также образцы прозрачного GaN на сапфировых подложках диаметром 50 мм. Полуширина кривой качания дифракции рентгеновских лучей (FWHM) для лучших слоев составила  $\omega_0=3,5^\circ$ . Фотолуминесценция образцов однородна по площади и отличается большой интенсивностью. ФЛ при температуре 77К показала расщепление основного пика «зона-зона» на линии, соответствующие связанному и свободному экситону. Концентрация свободных носителей в лучших образцах оценивается на уровне  $<10^{17}$  см<sup>-3</sup>, плотность дислокаций  $<10^7$  см<sup>-3</sup>.

### 1.4. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ZnO ВЫРАЩЕННЫХ НА GaN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

*М.В. Чукичев*

Физический факультет МГУ им. Ломоносова, Москва,  
*Б.М. Атаев, В.В. Мамедов*

Институт физики Дагестанского НЦ РАН, Махачкала,  
*Я.И. Аливов, И.И. Ходос*

ИПТМ РАН, п. Черноголовка, Московская обл.,  
*Е.Е. Заварин*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург

Оксид цинка, с шириной запрещенной зоны около 3.3 эВ, рассматривается, наряду с GaN, как один из перспективных материалов для создания светоизлучающих приборов для синей и ультрафиолетовой области спектра. Для создания приборов необходимо иметь пленки с малым содержанием дефектов, ответственных за центры безызлучательной рекомбинации. Основную долю таких дефектов представляют дислокации, возникающие из-за несоответствия параметров кристаллических решеток подложки и пленки. Для получения совершенных пленок ZnO нужны подложки с малым рассогласованием параметров решетки. Одним из таких материалов с близкими к ZnO параметрами решетки является GaN (несоответствие 1.8%). Получены гетероэпитаксиальные структуры ZnO/GaN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и исследована их катодолуминесценция (КЛ). Эпитаксиальный рост пленок (0001)ZnO на (0001)GaN/(0001) $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> проводился методом химических транспортных реакций в проточном реакторе пониженного давления (ПРПД). Слои GaN толщиной 0.5 мкм выращивались методом газофазной эпитаксии из металорганических соединений (МОГФЭ). Для сравнения в одинаковых условиях выращивались также структуры ZnO/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> без буферного слоя GaN. Спектры КЛ снимались на спектрометре ДФС-12 при температурах 78 и 300 К. Кристаллические свойства переходного слоя ZnO-GaN исследовались на просвечивающем электронном микроскопе JEOL-2000. Результаты показали высокое совершенство оптических свойств пленок ZnO на GaN. Обнаружена сверхлинейная, почти кубическая зависимость интенсивности экситонной полосы КЛ

от уровня возбуждения, однородность пленки по толщине до самой границы с GaN и высокая термостойкость свойств к отжигу (при  $T=1050$  К в течение 5, 20 и 40 часов).

### 1.5.С. НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ РОСТА GaN НА КРЕМНИИ

***В.Н.Бессолов, Ю.В.Жиляев, Е.В.Коненкова, С.А.Кукушкин<sup>\*</sup>, А.В.Лукьянов<sup>\*\*</sup>,  
С. Д.Раевский, В.А.Федирко<sup>\*\*\*</sup>***

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup>Институт проблем машиноведения РАН  
199178 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*\*</sup> Фонд поддержки науки и образования  
192007 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*\*\*</sup>Московский государственный технологический университет “Станкин”, 101472,  
Москва, Россия

Методом атомно-силовой микроскопии изучались начальные стадии роста GaN слоя на оксидированной кремниевой подложке. Рост осуществлялся методом HVPE при температуре  $520^{\circ}\text{C}$ . Установлено, что:

- рост островков GaN контролируется поверхностной диффузией;
- распределение зародышей по размерам на поверхности существенно меняется при изменении времени роста от 10 до 200 мин.: средний размер увеличивается от 15 нм до 400 нм, а разброс по размерам возрастает в 20 раз.
- Показано, что экспериментально определенная скорость роста зародышей и функция распределения их по размерам находятся в хорошем согласии с теорией роста GaN на начальных стадиях.

### 1.6.С. ПРЕДРОСТОВАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ НИТРИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ ГОМОЭПИТАКСИИ

***А.В.Фомин<sup>\*1,2</sup>, А.Е.Николаев<sup>1,2</sup>, И.Р.Никитина<sup>1,2</sup>, Г.А.Онушкин<sup>2</sup>***

1. ФТИ им.Иоффе РАН, 194021, С-Петербург, Политехническая ул.д.26

2. Центр по исследованию роста кристаллов, 193036,С-Петербург,  
Лиговский пр 12-Н,29

***А.В.Печников, В.А. Дмитриев,***

TDI, Inc., 8660 Dakota Dr., Gaithersburg, MD, 20877 USA

Использование выращенных на сапфире толстых слоев GaN в качестве подложек для последующего роста приборных структур позволяет улучшить приборные характеристики, а так же упростить и удешевить эпитаксиальный процесс. В работе исследовано влияние предростовой обработки поверхности подложек GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на морфологию поверхности гомоэпитаксиальных слоев GaN и AlGaN. Подложки GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были выращены методом хлорид-гидридной эпитаксии (HVPE) в диапазоне толщин GaN от 2 до 9 микрон. На подложках осаждались гомоэпитаксиальные слои GaN и AlGaN методом HVPE. Сравниваются результаты различных предростовых обработок подложек GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Исследованы структурные и электрические характеристики полученных гомоэпитаксиальных слоев.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ. ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РОСТА.

Председатель – *В.Г.Мокеров.*

### 2.1. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЦЕССЫ И КИНЕТИКА ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА НИТРИДОВ III ГРУППЫ

*С.Ю. Карнов*

ООО “Софт-Импакт”, С.-Петербург, Россия

В отличие от других соединений  $A^3B^5$  нитриды III группы обнаруживают сильное влияние поверхностной кинетики на эпитаксиальный рост этих материалов. За счет кинетического подавления скорости адсорбции и десорбции молекулярного азота GaN и InN могут существовать при температурах выше 400°C в метастабильном состоянии – без разложения на жидкую и газовую фазу. Этот факт определяет специфику выращивания нитридов методом молекулярно-пучковой эпитаксии, с помощью МОС-гидридного осаждения, а также сублимационного роста объемных кристаллов. Другой класс кинетических эффектов связан с блокировкой узлов адсорбции  $NH_3$  адатомами III группы. В случае многокомпонентных твердых растворов существенное влияние на свойства эпитаксиальных слоев оказывают упругие напряжения, вызванные рассогласованием постоянных решетки гетерокомпозиции. В частности, они ответственны за один из механизмов флуктуаций состава InGaN, используемого в качестве активных областей голубых светодиодов и лазеров, а также за сегрегационные эффекты при выращивании квантовых ям.

### 2.2. МЕХАНИЗМЫ РОСТА MOVPE НИТРИДОВ III-й ГРУППЫ

*Р.А.Талалаев, Е.В.Яковлев, Ю.А.Шполянский, С.Ю.Карнов, Ю.Н.Макаров<sup>1</sup>*

ООО “Софт-Импакт”, С.-Петербург, Россия

<sup>1</sup> STR, Inc., Richmond, VA, USA

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в разработке оптоэлектронных и электронных приборов на основе нитридов III-й группы, контроль состава твердых растворов и рост высококачественного материала все еще вызывают значительные проблемы. В данной работе теоретически анализируются газофазные и поверхностные процессы, протекающие при выращивании GaN, AlGaN и InGaN методом MOVPE. Газофазные химические реакции, гомогенная конденсация продуктов реакций, кинетика адсорбции и десорбции включены в глобальные модели MOVPE роста вышеперечисленных материалов. Результаты моделирования находятся в хорошем количественном совпадении с опубликованными экспериментальными данными в широком диапазоне условий роста. Совпадение достигнуто без подгонки каких-либо параметров моделей к эксперименту.

### 2.3. P-T-x ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА СИСТЕМЫ ГАЛЛИЙ - АЗОТ

***А.Давыдов, W.Boettinger, U.Kattner***

Metallurgy Division, NIST, 100 Bureau Dr., Gaithersburg, MD 20899, USA

E-mail: albert.davydov@nist.gov

***А.Николаев***

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург,  
Политехническая ул. 26

***Ю.Мельник***

TDI, Inc., 8660 Dakota Dr., Gaithersburg, 20877 MD, USA

Знание фазовых диаграмм нитридов третьей группы в координатах давление-температура-состав (P-T-x) важно для выбора оптимальных условий получения и обработки тонких пленок и объемных кристаллов нитридов. В докладе будет представлена критическая оценка термодинамических данных и данных по фазовым равновесиям в системе Ga-N. Термодинамическая экстра- и интер-поляция литературных данных позволила оценить параметры плавления и сублимации нитрида галлия. При атмосферном давлении азота GaN должен термически разлагаться при температуре  $\sim 780^\circ\text{C}$  на газовую фазу (преимущественно – азот) и на расплав (преимущественно – галлий). При повышенном давлении азота ( $P(\text{N}_2) > 48,000 \text{ atm}$ ) GaN должен плавиться конгруэнтно. Расчетные данные по термической стабильности нитрида галлия сравниваются с экспериментальными результатами по термическому распаду объемных образцов и тонких пленок нитрида галлия.

### 2.4. ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫХ СЛОЕВ: РОЛЬ НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЙ В ФОРМИРОВАНИИ ПЛЕНКИ

***С.А.Кукушкин, В.Н.Бессолов<sup>\*</sup>, А.В.Осипов, А.В.Лукьянов<sup>\*\*</sup>***

Институт проблем машиноведения РАН

199178 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup>Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*\*</sup> Фонд поддержки науки и образования

192007 Санкт-Петербург, Россия

Теоретически исследован процесс зарождения и последующей эволюции островков GaN на поверхности подложек, покрытых буферными слоями AlN. Вычислены значения потоков зародышей, функции распределения островков по размерам при температурах  $T > 480^\circ\text{C}$ . Показано, что при  $T = 480^\circ\text{C}$  в начале зарождаются островки жидкого Ga. Затем на поверхности подложки происходят химические реакции между Ga и N с образованием GaN. При  $800^\circ\text{C} > T > 600^\circ\text{C}$  зарождается только GaN. При  $T > 600^\circ\text{C}$  островки GaN растут за счет поверхностной диффузии Ga и N, а лимитирующей стадией этого процесса является скорость встраивания N и Ga в кристаллическую поверхность GaN. Исследован процесс Оствальдовского созревания ансамбля островков GaN и построена фазовая диаграмма состояния ансамбля островков.

## 2.5. СТМ ИССЛЕДОВАНИЕ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК GaN

***Р.З. Бахтизин<sup>1)</sup>, Ч.-Ж. Шые<sup>2)</sup>, Ч.-К. Шые<sup>2)</sup> и Т. Сакурай<sup>2)</sup>***

<sup>1)</sup>Башкирский государственный университет, Уфа 450074, Россия;  
Тел./Факс: +7 (3472) 236-347; E-mail: [raouf@bsu.bashedu.ru](mailto:raouf@bsu.bashedu.ru)

<sup>2)</sup>Институт проблем материаловедения университета Тохоку, Сендай 980-8577, Япония

Методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и дифракции быстрых электронов на отражение в условиях сверхвысокого вакуума на поверхности тонких пленок GaN(0001) *in situ* исследованы серии упорядоченных сверхструктур, включающих реконструкции  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$ ,  $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$ ,  $5 \times 5$ ,  $5\sqrt{3} \times 2\sqrt{13}$ ,  $10 \times 10$ , а также жидкую фазу  $1 \times 1$ -Ga. Пленки GaN выращивались на подложках 6H-SiC(0001) методами молекулярнолучевой эпитаксии в сочетании с обработкой в высокочастотном разряде в азотной плазме. Из сопоставления СТМ-изображений высокого разрешения с результатами первопринципных расчетов полной энергии разработана структурная модель Ga-адатома, описывающая образование основных фаз  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$ , а также фаз  $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$  и  $10 \times 10$ , относящихся к семейству "N×N". Для другой группы поверхностных реконструкций, к которым относятся фазы  $5 \times 2.5$  и  $5\sqrt{3} \times 2\sqrt{13}$ , характерной оказалась квази-одномерная структура, которая может быть объяснена пайерлсовскими искажениями решетки адатомов, расположенных на участках T4.

Показано, что как димеризация, так и отсутствие атомов в их регулярных положениях в решетке, которые обычно наблюдаются на поверхностях традиционных полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$ , не являются основными механизмами минимизации энергии в GaN.

## 2.6. ПОЛУЧЕНИЕ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaN/AlGaN МЕТОДОМ МПЭ С ПЛАЗМЕННОЙ АКТИВАЦИЕЙ

***В.А. Векшин\*, В.Н. Жмерик, В.Ю. Давыдов, В.В. Ратников, М.Г. Ткачман,  
Т.В. Шубина и С.В. Иванов***

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Россия, Санкт-Петербург,  
Политехническая ул., 26. \*E-mail: [vekshin@beam.ioffe.rssi.ru](mailto:vekshin@beam.ioffe.rssi.ru)

Одним из основных методов роста III-N соединений является молекулярно-пучковая эпитаксия с плазменной активацией азота. При этом для обеспечения удовлетворительного качества слоев необходимо точно контролировать соотношение потоков атомов III группы и активированного азота. Предложенный нами новый тип активатора азота с высокочастотным емкостным магнетронным разрядом (RF-CCM) [1] позволяет не только достигать удовлетворительных скоростей роста эпитаксиальных слоев (до 1,8 мкм/ч), но и контролировать непосредственно во время роста стехиометрические условия вблизи подложки путем измерения оптических эмиссионных спектров разряда [2].

Использование данного метода контроля соотношения потоков позволило получить на подложке  $Al_2O_3(0001)$  слои  $Al_xGa_{1-x}N$  ( $x < 0,52$ ) высокого структурного качества и структуры GaN/ $Al_{0,1}Ga_{0,9}N$  с одиночными и множественными квантовыми ямами, продемонстрировавшие интенсивную фотолюминесценцию.

Работа поддержана грантами РФФИ 99-02-17103 и 00-02-16760.

[1] V.N. Jmerik, V.V. Mamutin, V.A.Vekshin, T.V. Shubina, S.V. Ivanov, P.S. Kor'ev. Mater. Sci. & Engineer. B59, 60 (1999).

[2] V.N. Jmerik, V.A. Vekshin, V.Yu. Davydov, V.V. Ratnikov, M.G. Tkachman, T.V. Shubina, and S.V. Ivanov. Phys. Stat. Sol. (Materials of ICNS-4) Принято в печать.

## 2.7. СВОЙСТВА СЛОЕВ AlN, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ SiC В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР МЕТОДОМ ХЛОРИДНО-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ.

О.Ю.Ледяев, А.Е.Николаев, И.П.Никитина, А.В.Фомин, В.А.Дмитриев,  
 НП “Центр по исследованию роста кристаллов”, С.-Петербург, Россия,  
 ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия,  
М.С.Дунаевский, А.Н.Титков,  
 ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия,

Эпитаксиальные слои AlN/SiC были выращены методом хлоридно-гидридной газофазной эпитаксии (HVPE). Температура в зоне роста изменялась от 700 до 1200<sup>0</sup>С. Толщины выращенных слоев составили от 0.1 мкм до 1 мкм. Скорости роста изменялись в диапазоне от 0.1 до 0.5 мкм/мин. Морфология поверхности AlN была охарактеризована с помощью атомно-силового микроскопа. Структурные свойства эпитаксиальных слоев AlN были изучены методом рентгеновской дифракции. Рентгеновские кривые качания измерялись в режимах  $\omega$ -сканирования и  $\omega, 2\theta$ -сканирования на отражениях (0002) и (1124). Минимальное значение полуширины рентгеновской кривой качания, измеренное в режиме  $\omega$ -сканирования (0002), для эпитаксиального слоя AlN составляет порядка 80 arcsec, что свидетельствует о высоком кристаллическом качестве полученных слоев. Зависимость морфологии и кристаллического совершенства выращенных слоев от температуры роста будет обсуждаться.

## 2.8. ВЫРАЩИВАНИЕ НИТРИДОВ III ГРУППЫ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АММИАКА.

И.А.Соколов, Д.М.Красовицкий, Ю.В.Погорельский, М.В.Степанов, В.П.Чалый,  
А.П.Шкурко, С.П.Яковлев.

ЗАО «Научное и технологическое оборудование», С.-Петербург; ter@atc.rfntr.newa.ru .

## 2.9.С. НАРАЩИВАНИЕ ПЛЁНОК AlN И GaN ИЗ МОНОПРЕКУРСОРОВ НА Si И АЛМАЗЕ.

К.Ю.Черных<sup>1)</sup>, Б.В.Спицын<sup>2)</sup>, Н.Н.Мельник<sup>3)</sup>, М.А.Прелас<sup>4)</sup>, А. Б.Спицын<sup>4), 5)</sup>,  
В.П.Стоян<sup>1)</sup>, В.И.Петров<sup>1)</sup>, М.В.Чукичев<sup>1)</sup>

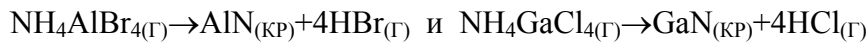
1) МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия; 2) ИФХ РАН, Москва, Россия,

2) Физический институт РАН, Москва, Россия,

3) Университет Миссури - Колумбия, США; 4)МИСИС, Москва, Россия,

Нитриды Al, Ga, In и их твёрдые растворы привлекают в последние годы исключительно высокое внимание исследователей и инженеров, как перспективные высокотемпературные полупроводниковые материалы (ВПМ). Интересно наращивание ВПМ на полупроводниках (Si, GaAs), а также сращивание различных ВПМ с целью создания гетеропереходов. Целью работы было исследование кристаллизации AlN и GaN на Si и алмазе из соответствующих газообразных монопрекурсоров в реакторах с горячей (РГС) и с холодной (РХС) стенкой. Монопрекурсоры привлекательны, поскольку в составе их молекулы содержится химическая связь Me – N. Исходные соединения увлекались потоком Ar ОСЧ (99,998%) и их термическая диссоциация происходила на подложках, поддерживаемых графитовым нагревателем при постоянной температуре (650÷1050)<sup>0</sup>С. При температуре кристаллизации 950-1000<sup>0</sup>С получена гетероэпитаксия AlN на  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4H-SiC и алмазе. Рост плёнок происходил по брутто-реакциям:





На Si подложках получены сплошные прозрачные плёнки, в ряде случаев с гладкой внешней поверхностью толщиной до 20 мкм. Рентгено-структурный анализ показал однофазный состав плёнок AlN и GaN. Раман-спектры плёнок AlN и GaN толщиной  $\approx 30$  мкм и  $\approx 15$  мкм, соответственно, имеют механические напряжения. Была изучена катодолюминесценция  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$  на Si(111) подложке. Будут обсуждены структура плёнок, наращенных на Si и алмазе, и некоторые их электрические свойства.

### **2.10.С. ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ РОСТА СЛОЕВ InGaN МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АММИАКА**

**Д.М. Красовицкий\*, И.А. Соколов, М.В. Степанов, Ю.В. Погорельский, С.И. Петров, В.П. Чалый, А.П. Шкурко**

ЗАО «Научное и технологическое оборудование»  
а/я 29, 194156, г. Санкт-Петербург, Россия (ter@atc.rfntr.neva.ru)

Получение слоев InGaN высокого качества на сегодняшний день остается одной из горячих тем в технологии нитридов III группы и приборов на их основе. Основными технологическими проблемами, которые необходимо преодолеть при росте твердых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с параметром  $x > 0,1$ , являются поверхностная сегрегация и расслоение на фазы, вплоть до образования жидких капель индия на ростовой поверхности. В работе сообщается методика определения критических для данной температуры подложки потоков индия, приводящих к образованию капель, с целью оптимизации условий роста слоев InGaN молекулярно-пучковой эпитаксией с использованием аммиака. Показано влияние отношения потоков компонент V/III групп в диапазоне температур подложки 550-700°C, а также исследованы люминесцентные свойства полученных слоев.

### **2.11.С. РАДИКАЛО-ЛУЧЕВАЯ ГЕТЕРИРУЮЩАЯ ЭПИТАКСИЯ – НОВЫЙ МЕТОД В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР ТИПА GAN/GAAS**

**Кидалов В.В., Котляревский М.Б.**

Бердянский государственный педагогический институт, г.Бердянск, Украина  
**Сукач Г.А., Белоусов С.М.**

Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, Украина

Цель работы – разработка простого, эффективного и дешевого метода радикало-лучевой гетерирующей эпитаксии (РЛГЭ) для получения тонких пленок

GaN на подложках GaAs, которые могут быть использованы для реализации приборов оптоэлектроники нового поколения.

Для получения активных радикалов азота использовался разряд высокочастотного генератора. В работе определены термодинамические условия формирования гетероэпитаксиальных структур типа GaN/GaAs. Проведено компьютерное моделирование процессов роста пленок GaN на подложках GaAs в методе РЛГЭ с учетом вариации как внешних (температура, давление энергия радикалов и др.), так и внутренних (энергия связи атомов в GaAs, "уход" атомов мышьяка из подложки, диффузия атомов азота внутрь подложки и др.) факторов.

Наличие пленок GaN и переходного слоя GaAsN на подложках GaAs подтверждено фотолюминесцентными и структурными исследованиями. Опыты с применением Оже-спектрометра показали, что состояние границы раздела GaN/GaAs в

зависимости от условий формирования пленок может иметь как резкие, так и плавные концентрационные профили.

## **2.12.С. СКОРОСТЬ РОСТА ПРИ ХЛОРИДНО-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ GAN**

**Е.Н. Вигдорович, Ю.Н. Свешников**

ЗАО "Элма-Малахит, Москва

Хлоридно-гидридная эпитаксия (HVPE) снова вызывает интерес, как методика получения квазиобъемных материалов, для обеспечения согласования кристаллических решеток на поверхности роста, толстых слоев и, снижающих деформацию в структурах, буферных слоев. В настоящей статье приведены режимы роста для GaN и основные результаты.

Было исследовано изменение скорости роста GaN в динамическом и статическом режимах, как функция температуры подложки. При низких температурах, скорость роста увеличивается по экспоненте благодаря увеличивающейся эффективности взаимодействия GaCl и NH<sub>3</sub> на поверхности роста. Кажущаяся энергии активации 55,9 ккал/моль. При высоких температурах, наблюдается предсказываемое термодинамикой уменьшения скорости роста.

## **2.13.С. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ GAN**

**Ю.Н. Свешников, Е.Н. Вигдорович**

ЗАО "Элма-Малахит"

В работе сделана попытка термодинамического анализа задержки роста при зарождении GaN на сапфире. Показано, что время задержки зависит от температуры роста и расходов исходных веществ.

Рассчитаны значения предельной растворимости Mg, Zn и H.

Акцепторное состояние GaN проявляется благодаря атомам Mg(Zn), заменяющими Ga в решетке GaN. Однако, при выращивании слоев с использованием водорода, GaN, легированный Mg (Zn) в процессе роста, получается полуизолирующим, и поэтому требуется после ростовая обработка для активации акцепторной примеси. Результаты расчета показывают, что водород в виде (H<sup>+</sup>) может компенсировать акцепторы при температуре роста, и образовывать нейтральные комплексы. После выращивания при отжиге при более низкой температуре комплексы (Mg-H)<sup>0</sup> распадаются и происходит активация акцепторов.

## **2.14.С. ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GAN**

**Т.И. Маркова, Е.Н. Вигдорович, Ю.Н. Свешников**

ЗАО "Элма-Малахит", Москва

В настоящей статье, методом электронной микроскопии было исследовано зародышеобразование эпитаксиальных слоев GaN в динамическом и статическом режимах. Предложена модель зародышеобразования и механизма роста GaN на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### **3. РАЗРАБОТКА ПРИБОРОВ: ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ И ПОСТРОСТОВАЯ ОБРАБОТКА.**

Председатель – *Г.В. Сапарин.*

#### **3.1. СВЕРХРЕШЕТКИ AlGaN/GaN, ВЫРАЩИВАНИЕ И СВОЙСТВА.**

*В.В. Лундин, А.В. Сахаров, А.Ф. Цацульников, Е.Е. Заварин\*,  
А.И. Бесюлькин, М.Ф. Кокорев, Р.Н. Кютт, В.Ю. Давыдов, В.В. Третьяков,  
Д.В. Пакхнин и А.С. Усиков.*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, 194021 Санкт-Петербург,  
Политехническая 26. [\\*zavarin2001@mail.ru](mailto:*zavarin2001@mail.ru)

Методом МОГФЭ на сапфировых подложках были выращены AlGaN/GaN сверхрешетки с различными периодами (5–40 нм), различным составом твердого раствора AlGaN в барьерах и буферных слоях. Было исследовано встраивание алюминия в твердый раствор AlGaN в зависимости от скорости роста. Показано, что для слоев AlGaN с мольной долей AlN более 15–20%, скорость роста должна существенно снижаться для избежания насыщения по вхождению Al в твердый раствор. Структуры исследовались наблюдением дифракции рентгеновских лучей, Рамановского рассеяния, спектров оптического поглощения. На сверхрешетках с периодами 10–40 нм наблюдался существенный сдвиг края поглощения в длинноволновую сторону.

#### **3.2. МОЗАИЧНАЯ СТРУКТУРА – ОДИН ИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Ш-НИТРИДОВ.**

*Шмидт Н.М.*

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе

Мозаичная структура, присущая Ш-нитридам гексагональной модификации – это форма самоорганизации ансамбля дефектов, занимающая наивысшую ступень в иерархической лестнице классификации дефектов. Эта форма нетипична для полупроводниковых материалов и мало изучена. В связи с этим, в первой части доклада будут рассмотрены свойства и особенности, присущие таким сложным системам дефектов. Затем будет проведен сравнительный анализ, имеющихся экспериментальных данных по оптическим и электрическим свойствам отдельных слоев Ш-нитридов и светоизлучающих структур на их основе со свойствами, прогнозируемыми из структурных особенностей. Обсуждены критерии, определяющие качество отдельных слоев и приборных структур, а также принципиальное отличие этих критериев от выработанных для традиционных материалов Ш-V. Будет показана важная роль морфологических исследований на макро- и микроуровнях для выработки этих критериев и необходимость развития новых методов более полной характеристики мозаичной структуры.

### 3.3. ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР В СИСТЕМЕ In–Ga–N, ПОЛУЧЕННЫХ ЭПИТАКСИЕЙ ИЗ МЕТАЛЛО-ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

*Г.А. Александрова, О.Н.Ермаков, В.В.Соловьёв, Б.О.Анухтин*

ОАО НПП «Сапфир», Москва 105318, Россия

*М. В. Чукичев*

Физический факультет МГУ, Москва 119899, Россия

С использованием данных по люминесцентным и электрофизическим характеристикам структур в системе In–Ga–N исследована связь основных параметров этих структур с особенностями их синтеза методом МOCVD. Полученные данные интерпретируются с учётом термодинамических и кинетических особенностей синтеза  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  в широком диапазоне составов. Отмечается, что в электрофизических характеристиках  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  проявляются общие для других соединений  $\text{A}_3\text{B}_5$  закономерности. В частности, величина подвижности  $\mu$  определяется рассеянием на заряженных примесях в частично компенсированном полупроводнике. Отсутствие чёткой корреляции между величиной  $\mu$  и интенсивностью жёлто-зелёной полосы позволяет сделать вывод о том, что центры, ответственные за её проявление, не являются главным фактором, ответственным за ухудшение люминесцентных характеристик.

### 3.4. AlGaN ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ ДЛЯ УФ ФОТОДЕТЕКТОРОВ.

*Онушкин Г.\*, Николаев А., Фомин А., Ледяев О., Черенков А., Калинина Е.,  
Никитина И.,*

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия,

НП «Центр по исследованию роста кристаллов», С.-Петербург, Россия,

*Дмитриев В.,*

TDI, Inc., 8660 Dakota Dr., Gaithersburg, MD 20877, USA.

Нитриды III-группы являются наилучшими кандидатами для создания на их основе «солнечно-слепых» ультрафиолетовых (УФ) фотодетекторов, благодаря уникальным свойствам этих материалов. В данной работе исследовались фотоэлектрические свойства эпитаксиальных слоев GaN и  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  различного состава, выращенные методом хлоридно-гидридной газотранспортной эпитаксии (HVPE). Состав выращенных слоев определялся методом рентгеновской диффрактометрии. К слоям формировались методом термовакуумного напыления Ni полупрозрачные барьеры Шоттки. Исследовались вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики этих барьеров. Спектральные характеристики фоточувствительности структур исследовались в диапазоне энергий квантов 2–5,6 эВ при комнатной температуре. Будут представлены спектры фоточувствительности, зависимости фоточувствительности и контраста (УФ/видимая часть спектра) от состава твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и от концентрации некомпенсированных донорных центров.

### 3.5. РАСТРОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

*С. К. Обыден, Г. В. Сапарин, П. В. Иванников*

Физический факультет МГУ, Воробьевы Горы, 1, 1, Москва, 119899

E-mail: [obyden@ccl.msu.su](mailto:obyden@ccl.msu.su)

Гетероэпитаксиальные структуры, выращенные на основе нитрида галлия, часто обладают ярко выраженными особенностями микрорельефа [1]. Эти микронеоднородности могут, в конечном итоге, влиять как на электрические, так и на люминесцентные характеристики приборов, изготавливаемых на базе этих структур. Более того, нарушения люминесцентной и электрической пространственной однородности в слоях GaN могут быть скрытыми, т. е. не связанными с видимыми нарушениями однородности микрорельефа. Электрические неоднородности проявляются в виде нативных встроенных электрических барьеров, а также как дефекты искусственно выращенных p-n переходов и как пространственные флуктуации высоты искусственного потенциального барьера. Люминесцентные неоднородности GaN-структур наблюдаются в виде локальных изменений квантового выхода излучения, а также как вариации его спектрального состава. Наличие в базовых слоях GaN фигур роста, межблочных границ и границ зерен, точечных макродефектов и “булавочных проколов”, механических трещин, областей стока точечных микродефектов и локализации дислокаций, пространственных флуктуаций глубины квантовых ям и подобных неоднородностей различной физической природы может оказаться основным фактором, определяющим рабочие характеристики и полезный выход оптоэлектронных приборов. Поэтому, эффективная комплексная диагностика GaN-структур, как на этапе разработки ростовых технологий, так и на всех стадиях технологического процесса изготовления оптоэлектронных приборов, представляется весьма актуальной задачей.

На наш взгляд, наиболее приемлемыми для такой диагностики являются методики, развитые в растровой электронной микроскопии (РЭМ) [2, 3]. РЭМ является многофункциональным прибором, способным работать во многих аналитических режимах и позволяющим исследовать полупроводниковые структуры в различных физических аспектах: микрофотография (режим вторичной электронной эмиссии – ВЭЭ), карта квантового выхода люминесценции (режим катодолюминесценции – КЛ) и локализация электрических барьеров (режим наведенного тока – НТ). Уникальной особенностью РЭМ является то, что он позволяет проводить исследования структур во всех этих режимах одновременно. Это дает возможность проводить сравнительный анализ микрофотографий для различных режимов и таким образом оценивать степень, взаимовлияние и пространственную корреляцию вышеозначенных факторов неоднородности, что в конечном итоге определяет качество исследуемых структур.

В настоящей работе описываются результаты исследований GaN-структур с помощью как традиционных, так и новейших методик РЭМ-анализа, разработанных в последнее время на кафедре Физической электроники Физического факультета МГУ. Применение новых РЭМ-методов [3, 4], как то – цветной КЛ (ЦКЛ), композитного контраста и ЦКЛ с повышенным спектральным разрешением – позволило получить новые данные о строении GaN-структур различных типов. Исследовались островковые, полосковые и сплошные пленки GaN на подложках Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC. Обнаружен избирательный характер внедрения различных примесей в грани микрокристаллитов. Впервые прямыми методами локализованы области повышенной концентрации дислокаций в полосковых структурах GaN латерального наращивания и прослежена их зависимость от параметров структур [5]. Проведена классификация дефектов в предпромышленных образцах светодиодных мезоструктур на базе InGaN/AlGaIn/GaN.

Здесь же были обнаружены и измерены относительные пространственные флуктуации сигнала НТ [4], которые оказались сопоставимы с величиной флуктуаций поверхностного потенциала, описывающих форму длинноволновых хвостов спектров электролюминесценции в данных структурах [6]. В образцах светодиодных мезоструктур с квантовыми ямами, полученных от различных независимых производителей были обнаружены пространственные флуктуации положения максимума длины волны люминесценции, связанные, по-видимому, с вариациями глубины квантовых ям [4]. Эти эксперименты демонстрируют высокую эффективность РЭМ-диагностики применительно к структурам на основе нитрида галлия и родственных материалов.

1. Сапарин Г.В., Обыден С.К., Четверикова И.Ф., Чукичев М.В., Попов С.И., Николаев С.И. Морфологическое и катодоллюминесцентное исследования гетероэпитаксиальных слоев нитрида галлия на сапфире. *ПОВЕРХНОСТЬ. Физика, химия, механика.* **5**, с. 106- 111 (1984)
2. Saparin G.V., Obyden S.K. Colour Display of Videoinformation in Scanning Electron Microscopy: Principles and Applications to Physics, Soil Science, Biology and Medicine. *SCANNING* 10, 87 – 106 (1988)
3. Obyden S.K., Ivannikov P.V., Saparin G.V. Color Cathodoluminescence Display in the Scanning Electron Microscope of Deep Relief Surfaces. *SCANNING* 19, 533 – 540 (1997)
4. Г.В. Сапарин, П.В. Иванников, М.В. Чукичев, А.Э. Юнович, Ю.Б. Шелементьев, М.А. Викторов. Применение методов цветной катодоллюминесценции в РЭМ для исследования синтетических алмазов и структур на основе нитрида галлия. //Алмазные пленки и пленки родственных материалов. // Сборник докладов 12-го Международного симпозиума “Тонкие пленки в электронике”, Киев, 23-27 апреля 2001 г.
5. Freitas J.A. Jr., Ok-Hyun Nam, Davis R.F., Saparin G.V., Obyden S.K. Optical characterization of lateral epitaxial overgrown GaN layers. *Appl. Phys. Lett.* **72**, 23, 2990 – 2992 (1998)
6. Yunovich A.E., Kudryashov V.E., Mamakin S.S., Turkin A.N., Kovalev A.N., Manyakhin F.I. Spectra and quantum efficiency of light emitting diodes based on GaN heterostructures with quantum wells. *Phys. Stat. Sol. (a)*, v. 176, N 1, 125-131 (1999).

### 3.6.С. ГЛУБОКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ПЛЕНОК НИТРИДА ГАЛЛИЯ ИОНАМИ НЕАГРЕССИВНЫХ ГАЗОВ

***А.И. Стогний\**, *О.М. Стукалов*, *Н.Н. Новицкий***

Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси  
220072, Минск, ул. П. Бровки 17, e-mail: [stognij@ifftp.bas-net.by](mailto:stognij@ifftp.bas-net.by)

***Е.В. Луценко\**, *Г.П. Яблонский***

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси  
220072, Минск, пр. Ф. Скорины 68, e-mail: [lutsenko@dragon.bas-net.by](mailto:lutsenko@dragon.bas-net.by)

***B. Schineller and M. Heuken***

AIXTRON AG, Kackertstr. 15-17, D-52072 Aachen, Germany

Предложен метод замедленного реактивного ионно-лучевого травления нитрида галлия, основанный на применении смеси  $O_2+xAr$  ( $10\%<x<30\%$ ) в качестве рабочего газа. Обсуждаются особенности деградации оптических свойств пленок после травления ионами неагрессивных газов ( $H_2$ , He,  $N_2$ ,  $O_2$ , Ne, Ar, Kr и Xe). Получены скорости травления предложенным методом от 2,5 до 6 нм/мин и анизотропные профили травления с гладкими боковыми стенками и чистым дном в эпилепках GaN толщиной до 3 мкм. Анализируются РЭМ и АСМ изображения областей после травления. Обсуждены особенности механизма травления предложенным методом.

Порог генерации лазеров, сформированных ионно-лучевым травлением на эпитаксиальных слоях GaN, по сравнению со сколотыми увеличился на 6-12 процентов.

### **3.7.С. ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ И ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СРЕДЫ ПОЛИМЕРНО - ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

*О.Н. Ермаков*

ОАО НПП «Сапфир», Москва 105318, Россия

Проведён сравнительный анализ оптических свойств эпитаксиальных структур  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ , полученных методом MOCVD, а также тонкоплёночных полимерных структур, излучающих в синей, зелёной и оранжево-красной областях спектра. Установлен сходный характер люминесцентных свойств обоих типов структур, включая высокую эффективность и достаточно большую полуширину спектров люминесценции, а также стоковский сдвиг между полосой излучения и краем поглощения. Представлены экспериментальные данные по люминесцентным свойствам обоих типов структур, включая генерацию стимулированного излучения, управление цветовыми характеристиками люминесценции композитных структур, а также реализацию «белого» света. Возможность использования обоих типов структур в качестве пассивных и активных элементов с диодными характеристиками позволяет считать их перспективными средами полимерно-твердотельной оптоэлектроники.

### **3.8.С. АНАЛИЗ ЛОКАЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ В СИСТЕМАХ $\text{In-Ga-Al-N}$ И $\text{In-Ga-Al-P}$**

*О.Н.Ермаков*

ОАО НПП «Сапфир», Москва 105318, Россия

Представлен анализ локальных структурных и композиционных эффектов в системах  $\text{In-Ga-Al-N}$ ,  $\text{In-Ga-Al-P}$ , включая эффекты фазового расслоения, стабилизации состава, формирования естественных квантово - размерных структур. Отмечается, что в рассматриваемых системах, характеризуемых высокой критической температурой и большой величиной параметра взаимодействия в твёрдой фазе, упругие напряжения в системе подложка/слой могут приводить к существенному искажению изотерм солидуса и обеспечивать синтез твёрдых растворов в пределах областей несмешиваемости. Экспериментально наблюдаемое существенное различие величины уширения краевой полосы в этих системах в системе  $\text{In-Ga-Al-P}$ .

## 4. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ ИЗ НИТРИДОВ III ГРУППЫ.

Председатель – *М.Г.Мильвидский.*

### 4.2. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА GAN

<sup>1</sup>*Л.Э.Великовский,* <sup>2</sup>*Д.М.Красовицкий,* <sup>1</sup>*В.Г.Мокеров,* <sup>2</sup>*Ю.В.Погорельский,*

<sup>2</sup>*И.А.Соколов,* <sup>2</sup>*М.В.Степанов,* <sup>2</sup>*В.П.Чалый,* <sup>2</sup>*С.П.Яковлев,* <sup>3</sup>*Н.Н.Базлов*

1. Центр микро- и нанoeлектроники ИРЭ РАН, 101999, Москва, ГСП-9, Моховая ул., 11, к.7, Тел. 7(095)203-15-35, факс: 7(095)203-81-14, E-mail: [mok@mail.cplire.ru](mailto:mok@mail.cplire.ru)
2. ЗАО “Полупроводниковые приборы”, Санкт-Петербург, тел. (812)-2518226
3. Мин. обороны РФ, Москва, К-160, тел (095)195-25-13

В последние годы проявляется возрастающий интерес к транзисторам на основе GaN и системы AlN/GaN, обладающих большой шириной запрещенной зоны  $E_g(>3\text{эВ})$  и являющихся наиболее перспективными для «мощных» твердотельных СВЧ-приборов для систем телекоммуникаций и, в особенности, для бортовых радиолокаторов. Исследуемые структуры n-i-GaN выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках сапфира. В качестве источника азота использовался поток аммиака с последующим его разложением на «горячей» подложке, а источниками Ga и Si служили стандартные эффузионные ячейки с этими материалами. Кремний использовался в качестве донорной примеси. Установка МЛЭ позволяла варьировать соотношение потоков N/Ga в более широком диапазоне (от 1 до 1000), чем в стандартных МЛЭ-системах. С помощью лазерной интерферометрии производился «in-situ» контроль скорости роста и состояния ростовой поверхности. Разработанная технология роста включала: отжиг подложки в вакууме, нитридизацию ее поверхности, осаждение низкотемпературного буферного слоя и его отжиг в потоке аммиака, и затем осаждение n-слоя GaN. Такая процедура позволила получить качественные слои GaN при  $T_{\text{п}} \approx 800\text{--}850^\circ\text{C}$  и соотношении потоков N/Ga=130–180. Нелегированные (i) слои GaN демонстрировали удельное сопротивление не менее  $10^6\Omega\cdot\text{см}$  при концентрации нескомпенсированных носителей  $\sim 5 \cdot 10^{14}\text{см}^{-3}$ . Концентрация и подвижность носителей в активных n-слоях составляли  $n=(2\div 3) \cdot 10^{17}\text{см}^{-3}$  и  $\mu \approx 40\div 150\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , соответственно. Толщина буферного GaN слоя составляла 1,5мкм, а верхнего n-слоя – 0,15÷0,4мкм.

На структурах n-i-GaN были изготовлены полевые транзисторы с барьером Шоттки с длиной затвора  $L_g=1\text{мкм}$ . В качестве омических контактов использовалась система Ti/Al/Pt, вожжённая при  $T=700^\circ\text{C}$ . Металлизация Pt/Ti/Au использовалась для затворов транзисторов. Из-за высокой стойкости GaN по отношению к процессам жидкостного травления, как для формирования межприборной изоляции (травление меза-областей), так и для заглубления подзатворной области транзистора было использовано реактивное ионное травление (РИТ). Заглубление подзатворной области позволило использовать достаточно толстые n-слои GaN и улучшить качество омических контактов, уменьшить паразитные сопротивления истока и стока. РИТ меза-областей и приборного канала осуществлялось с использованием газовых смесей на основе  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ . Исследованные зависимости скорости травления GaN от высокочастотной мощности, подводимой к плазме, ее давления и состава, позволили оптимизировать режимы травления. Радиационные дефекты, вносимые РИТ, приводят к нежелательному увеличению токов утечки затвора. Эти эффекты удалось минимизировать путем снижения энергии ионов до 80–90эВ. Использование структур с концентрацией Si  $\approx 7 \cdot 10^{17}\text{см}^{-3}$  позволило поднять напряжение пробоя до 15÷20 В.

Крутизна транзисторов была порядка 10÷25 мS/mm, что в целом соответствует параметрам использовавшейся однородно легированной структуры GaN. Разработан



шаблон с набором транзисторов с различными расстояниями сток-исток и затвор–сток. Для максимального расстояния получены значения пробойного напряжения 80 В.

### 4.3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТОК И ПРОИЗВОДСТВА СВЧ-ПРИБОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaN/AlGaN.

***В.Н.Данилин\*, Ю.П.Докучаев\*, Т.А.Жукова\*, М.А.Комаров\*\*, А.А.Арендаренко\*\*, Ю.Н.Свешников\*\*, А.Н.Ковалев\*\*\*, И.А.Соколов\*\*\*\*, Чарыков Н.А.\*\*\*\*\****

\*) ГУП НПП "Пульсар"

\*\*) ЗАО «Элма-Малахит», Зеленоград.

\*\*\*) Московский институт стали и сплавов, Ленинский проспект, 4, 117936, Москва, Россия, E – mail: Kovalev@tmte.misa.ac.ru

\*\*\*\*) ЗАО “Научное и технологическое оборудование”, Санкт-Петербург  
\*\*\*\*\*) Московский энергетический институт (ТУ)

Рассмотрены особенности разработок и перспективы промышленного производства электронных приборов на основе GaN. Анализируются мощностные характеристики приборов, достигнутые в рабочем диапазоне частот 1-20 ГГц. Возможность всего набора активных элементов от малошумящих и мощных приборов до супермощных со сложение 2-х и 4-х кристаллов в одном корпусе, создание двухзатворных модуляторных приборов, а также монолитных интегральных схем позволяет конструировать сверхмощные устройства, полностью состоящие из активных высокотемпературных элементов на основе широкозонных структур с гетеропереходами AlGaN/GaN.

### 4.4. ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaN ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

***В. А. Козлов, А. Б. Козырев\*, А. В. Самохвалов***

Институт Физики Микроструктур РАН, 603600, г. Н. Новгород, ГСП-105

e-mail: [kozyrev@ipm.sci-nnov.ru](mailto:kozyrev@ipm.sci-nnov.ru)

Освоение технологии изготовления сравнительно широкозонного материала GaN с сильным взаимодействием электронов с оптическими фононами делает его перспективным не только для получения межзонного лазерного излучения, но и для целей генерации электромагнитного излучения за счет использования внутризонной инверсии электронов.

В данной работе рассмотрены два механизма генерации электромагнитного излучения для освоения диапазона 1 THz - 10 THz. Эти механизмы основаны на идее создания динамической отрицательной проводимости (ОДП) в полупроводниках и полупроводниковых гетероструктурах на пролетных частотах в импульсном и координатном пространствах [1].

Динамическая ОДП возникает при пролете барьера из-за группировки электронов в отрицательной фазе переменного поля. Выполнено численное моделирование поведения горячих носителей в коротких гетероструктурах на основе GaN и определены параметры структур, пригодных для получения генерации в терагерцовом диапазоне частот.

Работа поддержана РФФИ (№00-02-16148, №01-02-06159) и научной программы “Физика твердотельных структур” (№99-1142).

[1] А.А.Андронов, В.А.Козлов, Письма в ЖЭТФ, **17**, 124 (1973); Л.Е.Воробьев и др., Письма в ЖЭТФ, **73**, 253 (2001).

#### 4.5. СТАЦИОНАРНЫЕ И ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ГРУППЫ III

*С.А. Витусевич<sup>1</sup>, М.В. Петричук<sup>2</sup>, Н. Кляйн<sup>1</sup>, С.В. Данилюк<sup>2</sup>, В.Н. Соколов<sup>2</sup>,  
В.А. Кочелан<sup>2</sup> и А.Е. Беляев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Institut für Schichten und Grenzflächen, Forschungszentrum-Juelich, D-52425 Juelich, Germany

<sup>2</sup>Институт физики полупроводников, НАН Украины, 03028 Киев, Украина

В последнее время большой интерес вызывает использование электронных приборов на основе нитридов группы III для силовых и высокочастотных приложений. Эта технология обладает большим потенциалом для изготовления приборов с более высокими выходной мощностью, рабочим напряжением и температурой. Благодаря уникальной комбинации высокой плотности тока, большого пробойного электрического поля и хорошей теплопроводности эти материалы находятся на переднем крае современных полупроводниковых исследований.

В этом сообщении представлены исследования стационарных и низкочастотных шумовых характеристик транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе GaN/AlGaN с длиной базы до 150 нм. Нами было проведено комплексное исследование тока в НЕМТ структурах с каналами различной длины и ширины. В структурах без затвора с помощью измерений эффекта Холла была определена концентрация и подвижность носителей в канале. Измерения низкочастотного шума проводились при разных напряжениях база–исток в конфигурации с общим истоком. Было выявлено перераспределение эффективных источников шума в канале транзистора при различных условиях токопереноса. Также были определены эффективные значения параметра Хоуге для пассивной (вне затвора) и активной (под затвором) областей канала. Показано, что при увеличении напряжения на затворе преобладающим становится шум в области затвора.

#### 4.6. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ К НИТРИДУ ГАЛЛИЯ И ПОДОБНЫМ МАТЕРИАЛАМ

*Чарыков Н.А.\*, Белоусов М.Л., Перевозчиков М.В., Орешников Ю.В.*

Московский энергетический институт (ТУ)

*Данилин В.Н., Жукова Т.А.*

ГУП НПП "Пульсар"

Аппаратно-программный компьютерный комплекс (АПКК) ОК-TEST является цифровой системой для измерения статических вольтамперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых приборов и тест-структур и предназначен для определения контактного сопротивления к нитриду галлия и подобным материалам. Диапазон значений напряжения, задаваемый на исследуемую структуру, 0...10 В, максимальное значение тока 100 мА. Погрешность измерения напряжения составляет величину не более 2%. Время измерения одной вольтамперной характеристики образца для 256 точек составляет примерно за 10 мс. Результаты измерений ВАХ, а так же идентифицированные параметры контактных сопротивлений, кроме отображения на экране видеомонитора, записываются в файл данных, представляющий собой протокол измерений параметров образцов с возможностью ввода 12-тизначного имени (кода) измеряемого образца, даты измерений и другой служебной информации.

#### 4.7.C. МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ПЕРЕДАЮЩЕЙ ДЛИННОЙ ЛИНИИ (TLM) ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ К НИТРИДУ ГАЛЛИЯ И ПОДОБНЫМ МАТЕРИАЛАМ

*Данилин В.Н., Жукова Т.А., Комаров М.А.*

ГУП НПП "Пульсар"

*Белоусов М.Л., Перевозчиков М.В. Чарыков Н.А.\**

Московский энергетический институт (ТУ)

char@vostok.ru

Предлагается модификация методики TLM (Transmitte Line Model) определения контактного сопротивления к нитриду галлия и подобным материалам для планарных тест-структур (ТС) на непроводящих подложках с полосковой геометрией. Предложенная коррекция теории, а следовательно, и методики идентификации характеристического контактного сопротивления  $r_c$  и удельного сопротивления слоя полупроводника  $r_{os}$  по результатам технологических экспериментов, позволяет использовать ТС простейшей полосковой геометрии без введения дополнительных технологических операций, что упрощает процесс изготовления фотошаблонов ТС, позволяет существенно сэкономить площадь, отводимую под ТС, облегчает проблему контактирования на зондовой установке, приводя к упрощению и удешевлению решения задачи полной автоматизации зондовых технологических измерений. С помощью данной методики можно проводить экспериментальное измерение  $r_c$  и  $r_{os}$  на различных технологических этапах изготовления прибора, осуществлять быструю оценку разброса указанных параметров по поверхности пластины и на различных пластинах в партии.

### 5. ОПТИЧЕСКИ НАКАЧИВАЕМЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ GaN.

Председатель – *В.Г.Сидоров.*

#### 5.1. InGaN/GaN/AlGaN ЛАЗЕРЫ С ОПТИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

*Лундин В.В., Сахаров А.В., Усиков А.С.*

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН 194021 С.-Петербург ул. Политехническая 26  
и OES-ITRI, Chung Hsing Rd. Chutung, Hsinchu 310, Taiwan, R.O.C.

*Бедарев Д.А., Цацульников А.Ф.*

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН 194021 С.-Петербург ул. Политехническая 26

*Ru Chin Tu and Jim Y. Chi*

OES-ITRI, Chung Hsing Rd. Chutung, Hsinchu 310, Taiwan, R.O.C.

Серия InGaN/GaN/AlGaN структур различной геометрии и с различными режимами роста активной области на сапфировых подложках была выращена методом МОГФЭ. Обнаружено, что в исследованных структурах слои AlGaN обеспечивают в основном ограничение возбужденных носителей, и их влияние на оптическое ограничение слабо влияет на пороговую плотность возбуждения. Достигнута лазерная генерация под оптической накачкой при комнатной температуре с пороговыми плотностями  $13.5 \text{ кВт/см}^2$  и  $40 \text{ кВт/см}^2$  при длине волны 405 нм и 435 нм, соответственно.

## 5.2. СИНЕ-ЗЕЛЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИ НАКАЧИВАЕМЫЙ INGAN/GAN/ALGAN ЛАЗЕР

*Сахаров А.В., Усиков А.С., Лундин В.В., Бедарев Д.А., Цацульников А.Ф.,  
Заварин Е.Е., Бесюлькин А.И.*

Физико-Технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, 194021, Политехническая 26, С.-  
Петербург, Россия

*Леденцов Н.Н., Vimbeg D.*

Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin, Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin,  
Germany

Исследованы оптические свойства InGaN/GaN/AlGaN структур излучающих в сине-зеленом оптическом диапазоне. Получена лазерная генерация с пороговыми плотностями возбуждения 7 и 17 кВт/см<sup>2</sup> при 77 К и 293 К с максимальной длиной волны генерации 496 нм. Картина распределения дальнего поля и характер генерации указывают на генерацию через моды высокого порядка в несимметричном волноводе.

## 5.3. ЛАЗЕРЫ ФИОЛЕТОВОГО - СИНЕГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА НА ОСНОВЕ InGaN/GaN КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

*Е.В. Луценко\*, В.Н. Павловский, В.З. Зубелевич, Г.П. Яблонский*

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси

220072, Минск, пр. Ф. Скорины, 68, e-mail: [lutsenko@dragon.bas-net.by](mailto:lutsenko@dragon.bas-net.by)

*А.В. Мудрый*

ИФТТП НАН Беларуси 220072, Минск, ул. П. Бровки 17

*H. Protzmann, B. Schineller, M. Heuken*

AIXTRON AG, Kackertstr. 15-17, D-52072 Aachen, Germany

Исследованы люминесцентные и лазерные характеристики квантоворазмерных гетероструктур на основе InGaN/GaN при оптической накачке. Получена генерация в интервале длин волн 400–470 нм. Дифференциальная внешняя квантовая эффективность генерации составила 3%, импульсная мощность – 40 Вт. С увеличением длины волны порог генерации синих лазеров резко возрастает и как следствие падает максимальная рабочая температура. Показано, что наиболее существенный вклад в повышение порога генерации с увеличением длины волны вносит уменьшение квантового выхода спонтанного излучения. Спектральное положение линии генерации синих лазеров относительно спектров возбуждения люминесценции и фотолюминесценции вблизи порога генерации показывает, что генерация возникает вблизи края зоны InGaN, а локализованные состояния могут вносить определенный вклад в ее формирование.

## 5.4. ЭКСИТОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaN/AlGaN ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

*М.А. Якобсон<sup>1</sup>, Д.К. Нельсон<sup>1</sup>, Н. Гранжан<sup>2</sup>, Ж. Масси<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе, Политехническая 26,  
194021 С.-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Centre de Recherche sur l'Hétéro-Epitaxie et ses Applications-CNRS, Rue B. Grégory,  
Sophia Antipolis, 06560 Valbonne, France

Исследовалось влияние высокой плотности возбуждения на экситонные состояния в структурах с квантовыми ямами (QW) GaN/AlGaN. Гигантское встроенное электрическое поле (порядка 1 МВ/см), существующее в структурах GaN/AlGaN вследствие спонтанной поляризации и пьезоэлектрического эффекта, приводит к красному сдвигу экситонных состояний. При увеличении плотности возбуждения наблюдался синий сдвиг экситонного пика. Максимальный сдвиг (приблизительно 10 мэВ при плотности возбуждения 1 МВт/см<sup>2</sup> и при T=6 К) наблюдался в самой широкой яме (толщиной 16 монослоев); величина сдвига уменьшалась с уменьшением ширины ямы. Эффект объясняется экранированием встроенного электрического поля фотовозбужденными носителями.

### 5.5.С. ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> И Si

*Е.В. Луценко\**, *В.Н. Павловский*, *В.З. Зубелевич*, *Г.П. Яблонский*

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси  
220072, Минск, пр. Ф. Скорины, 68, e-mail: [lutsenko@dragon.bas-net.by](mailto:lutsenko@dragon.bas-net.by)

*H. Protzmann*, *B. Schineller*, *M. Heuken*

AIXTRON AG, Kackertstr. 15-17, D-52072 Aachen, Germany

Исследованы люминесцентные и лазерные характеристики эпитаксиальных слоев GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при оптической накачке в зависимости от температуры. Перестройка длины волны генерации составила 35 нм (360–395 нм) при изменении температуры от 78 до 500 К. Характеристическая температура порога генерации T<sub>0</sub> = 155 К в интервале 300–480 К и T<sub>0</sub> = 55 К при более высоких температурах. Продемонстрировано, что температурная зависимость порога генерации определяется такими характеристиками спонтанного излучения, как эффективность излучательной рекомбинации, положение и полуширина спектра люминесценции. Показано, что отжиг с лазерной подсветкой эпитаксиальных слоев GaN/Si приводит к резкому возрастанию (до 50 раз) интенсивности их фотолюминесценции.

### 5.6.С. СПЕКТРЫ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР InGaN/AlGaN/GaN.

*А.Н. Туркин*, *А.В. Улитин*, *М.В. Чукичев*

Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, 119899 Москва, Россия.

E-mail: [a\\_turkin@chat.ru](mailto:a_turkin@chat.ru)

Исследованы спектры катодолюминесценции гетероструктур на основе GaN и его твердых растворов, выращенных методом эпитаксии из металлоорганических соединений с целью создания полупроводниковых источников излучения в коротковолновой области спектра: светодиодов и лазеров. Спектры катодолюминесценции (КЛ) пленок GaN и гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN исследованы при 300 и 80 К. Люминесценция этих пленок, исследована методами цветной КЛ в растровом электронном микроскопе (РЭМ) [1]. Коротковолновый край спектра ≈3.49 эВ соответствует краю запрещенной зоны GaN при комнатной температуре. Максимум ультрафиолетового пика, обусловленный рекомбинацией на доноре Si, сдвигается с температурой от 3.47 эВ (80 К) до 3.36 эВ (300 К). Плечо

полосы вблизи 3.26 эВ может быть объяснено межпримесной рекомбинацией. Желтый цвет, наблюдаемый на картинках в РЭМ при малом уровне возбуждения, соответствует известной широкой полосе вблизи 2.34 эВ, обусловленной дефектами. Спектры КЛ образцов, имеющих отличие в структуре, несущественно различались при комнатной температуре. Различие же в свечении и, соответственно, в спектрах КЛ при температуре, близкой к температуре жидкого азота, было более существенным. Это позволяет сделать вывод о возможном температурном высвечивании, связанном с различием дефектов в структурах с разным строением и составом.

[1] С.К.Обыден, Г.В.Сапарин, П.Г.Иванников, М.В.Чукичев, А.Н.Туркин, А.Э.Юнович, M.Leroux, S.Dalmasso, V.Beaumont, P. De Mierry. *Материалы электронной техники, Известия ВУЗов* 4, с.29 (2000).

## **6. ОПТИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ.**

*Председатель – А.С.Усиков.*

### **6.1. ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕМНЫХ КРИСТАЛЛОВ GaN, ЛЕГИРОВАННЫХ Er**

*Ю.В.Жиляев, В.В.Криволапчук, М.М.Мездрогина., С.Д.Раевский, С.Н.Родин, А.П.Скворцов, Ш.А.Юсупова*

ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021, Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, д.26, e-mail: yushaira@hotmail.com

Исследованы спектры оптического поглощения в объемных кристаллах GaN<Er<sup>3+</sup>>. Исходные кристаллы GaN n-типа толщиной 100÷500 мкм были получены методом газофазной эпитаксии в хлоридной системе. Er был введен методом диффузии. Параметры исходных кристаллов при 300 К: концентрация электронов 10<sup>18</sup>÷10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>, подвижность до 100 см<sup>2</sup>/В·с. В спектрах фотолюминесценции (ФЛ) нелегированных кристаллов при 77 К присутствует лишь линия “краевой” ФЛ E=3.401 эВ.

В спектрах оптического поглощения кристаллов GaN<Er<sup>3+</sup>> обнаружена характерная для Er<sup>3+</sup> группа линий в диапазоне 2.356÷2.388 эВ. Линии соответствуют переходам <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> → <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>. Количество линий при T=2 К и их малая ширина дают основание полагать, что в решетке GaN ионы Er<sup>3+</sup> занимают преимущественно одну позицию. Наиболее вероятным представляется положение Er<sup>3+</sup> на месте узла GaN. Работа была частично поддержана РФФИ (грант № 00-02-16989).

### **6.2. ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ ЭКСИТОНОВ С УЧАСТИЕМ ФОНОНОВ В СТРУКТУРАХ GaN, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ И ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ.**

*М.Г. Ткачман, Т.В. Шубина, В.Н. Жмерик и С.В. Иванов*

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая 26, 194021 Санкт-Петербург, Россия

*T. Paskova and B. Monemar*

Department of Physics and Measurement Technology, Linköping University, S-581 83  
Linköping, Sweden

В работе представлены результаты сравнительного исследования оптических свойств слоев GaN: образца толщиной ~ 25 мкм, выращенного методом газофазной

эпитаксии (HVPE), и тонкого слоя ( $\sim 0,7$  мкм), выращенного методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МВЕ). Спектры фотолюминесценции (PL) для образцов обоих типов носят экситонный характер. В спектрах хорошо различимы первая (1LO) и вторая (2LO) фононные реплики. Для определения природы экситонных переходов были получены спектры отражения (R) в трех поляризациях ( $\alpha, \sigma, \pi$ ). В работе исследованы температурные зависимости энергий экситонных переходов, а так же температурная зависимость отношения интенсивностей 2LO- и 1LO- фононных реплик. Произведена подгонка формы линий фононных повторений с использованием распределения Максвелла.

### 6.3. УПРУГИЕ И ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ НИТРИДОВ АЛЮМИНИЯ И ГАЛЛИЯ

*Добрынин А.В.*

Московский институт электронной техники  
103498 Москва, Зеленоград E-mail: [dobrynin@zemail.ru](mailto:dobrynin@zemail.ru)

Механические напряжения в гетероэпитаксиальных структурах возникают дважды: при осаждении из-за разницы параметров решеток и при изменении температуры после осаждения. Уровень напряжений столь высок (до  $10^8 \div 10^9$  Па), что структуры изгибаются, растрескиваются, расслаиваются, в них происходит релаксация напряжений. Электрофизические свойства в слоях существенно изменяются. Изменения этих характеристик позволяют оценивать напряжения в слое. Однако эти оценки часто бывают не точны. Наиболее распространенным методом определения напряжений в гетероструктурах является измерение кривизны структуры.

Напряжения экспериментально исследовали в структурах  $\text{AlN} (11\bar{2}6)[\bar{3}\bar{3}62] // \text{Al}_2\text{O}_3 (01\bar{1}2)[2\bar{1}\bar{1}0]$ ., полученных при  $1050^\circ\text{C}$  или  $1150^\circ\text{C}$ . Деформации в слоях становились отрицательными при превышении пороговой толщины  $H_T = 1-3$  мкм в зависимости от ориентации слоя и разориентации подложки. При комнатной температуре в подложке напряжения растяжения не превышали 1,4 ГПа, что меньше предела разрушения. С нагревом выпуклые структуры постепенно распрямлялись и становились вогнутыми. С ростом толщины слоя  $H_1$  деформации в нем сокращались.

Из результатов экспериментов следует, что эпитаксия нитридов на сапфире идет в поле деформаций растяжения ( $1-7 \times 10^{-3}$ ), после охлаждения деформации составляют  $(-3 \div 3) \times 10^{-3}$ . Упругие деформации почти полностью релаксируют во время роста за счет образования дислокаций. Разрушение гетероструктур происходит после охлаждения за счет образования трещин в сапфире и распространения их в слой. В структурах на кремниевых подложках при охлаждении деформации наоборот сокращаются, и разрушение идет за счет образования трещин в слое при охлаждении. На кремнии нитрид галлия осаждался в поле растяжения, а нитрид алюминия – в поле сжатия. Твердые растворы  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  показали такой же уровень и характер деформаций.

В докладе обсуждается возможность снижения напряжений за счет различных технологических приемов, проводится сравнение результатов с литературными данными.

## 6.4. ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ Ga(In,Al)N МОС-МЕТОДОМ

Ю.Н. Свешников, Е.Н. Вигдорович

ЗАО "Элма-Малахит", Москва

МОС процесс проводился в горизонтальном кварцевом реакторе при атмосферном давлении. В качестве исходных материалов использовались триметилгаллий (TMG), триметилиндий (TMI), триметилалюминий (TMA) и аммиак (NH<sub>3</sub>). Приведены условия роста для Ga(In,Al)N и основные результаты. Была исследована зависимость скорости роста GaN от температуры подложки и зависимость состава GaInN, GaAlN от TMI / (TMI+TMG) и TMA / (TMA+TMG) для различной температуры роста.

Самая высокая подвижность электронов (600-700 см<sup>2</sup>/В·с) была получена в эпитаксиальных слоях GaN, использующих толщину буферных слоев GaN 30 нм.

## 6.5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ GaN

Е.Н. Вигдорович, Ю.Н. Свешников

ЗАО "Элма-Малахит"

Определен параметр взаимодействия тройных систем на основе 111-V в приближении регулярных растворов (через различие в постоянных кристаллической решетки бинарных систем).

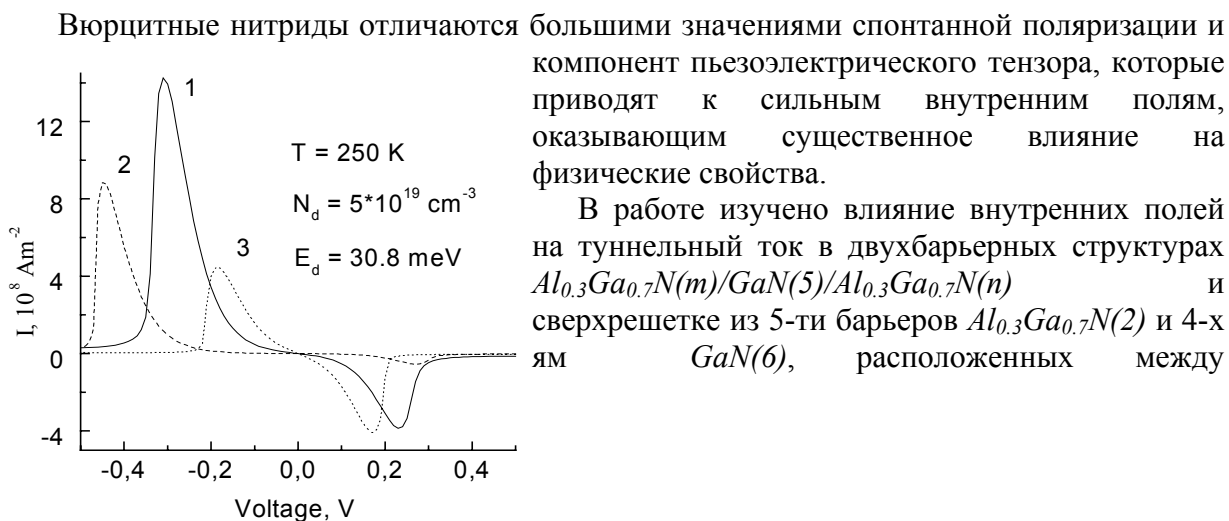
Был использован подход Stringfellow, в котором межмолекулярное взаимодействие в многокомпонентных системах определяется различием в постоянных кристаллических решеток. Для псевдобинарных систем GaN-InN, GaN-AlN и AlN-InN определены параметры взаимодействия и построены бинады и спиноды. В системе Ga<sub>x</sub>In<sub>y</sub>Al<sub>1-x-y</sub>N построены спинодальные изотермы.

Приведен термодинамический анализ для MOVPE GaAlN, GaInN и AlInN. Показано, что распределение пар-твердое при получении GaAlN, GaInN и AlInN зависит от температуры роста, парциального давления элемента 111-группы и отношения V/111.

## 6.6.С. ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ПОЛЕЙ НА ТУННЕЛЬНЫЙ ТОК В НАПРЯЖЕННЫХ СТРУКТУРАХ GaN/Al<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>N(0001)

С.Н. Гриняев\*, А.Н.Разжувалов

Сибирский физико-технический институт им. В.Д.Кузнецова  
634050, г.Томск, пл. Новособорная 1, e-mail: gsn@phys.tsu.ru





легированными контактными областями из  $GaN$ . Зависимость тока  $I$  от напряжения  $V$  рассчитывалась как в [1]. Коэффициент прохождения определялся методом эффективной массы [2]. Внутренние электрические поля учитывались в рамках макроскопического подхода [3].

Результаты расчета для двухбарьерных структур приведены на рис.1 (1–  $m=n=2$ ; 2–  $m=3, n=2$ ; 3–  $m=3, n=2$ ), а для сверхрешетки на рис.2. Пики тока  $I_{max}$  отвечают напряжениям  $V_{max}$ , при которых энергия Ферми совпадает с уровнями резонансов в ямах. Отличие модулей  $I_{max}$  для прямого и обратного смещений связано с разницей коэффициентов прохождения, а сдвиги  $V_{max}$  – с треугольным видом ям, вызванном внутренним полем. Для несимметричных структур туннельный ток зависит от положения барьеров по отношению к полярной оси.

В ограниченной сверхрешетке из-за неравенства числа барьеров и ям возникает однородное эффективное поле  $F_{eff}$ , смещающее уровни в соседних ямах друг

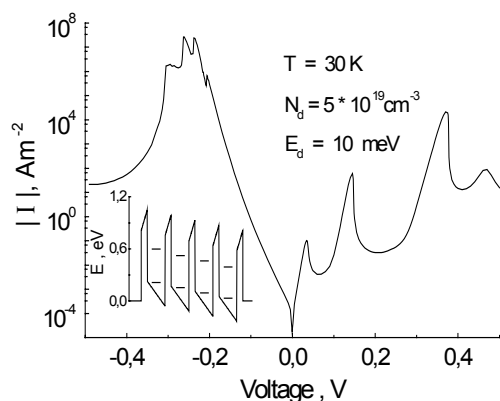


Рис.2

относительно друга, что приводит к формированию штарковской лестницы. При  $V > 0$  интервал между уровнями лестницы увеличивается, поэтому пики  $I(V)$  имеют резкий характер. При  $V < 0$  внешнее поле компенсирует  $F_{eff}$ , гибридизация между состояниями усиливается, коэффициент прохождения увеличивается, интервал между напряжениями  $V_{max}$  уменьшается, вследствие чего пики в туннельном токе сглаживаются. При изменении параметров сверхрешетки эффекты асимметрии и штарковской локализации в туннельном токе наблюдаются в широком интервале температур.

[1] R. Tsu and L. Esaki, Appl. Phys. Lett. 22, 11, 562 (1973).

[2] С.Н. Гриняев, А.Н. Разжувалов, ФТТ 43, 4, 529 (2001).

[3] F. Bernardini, F. Fiorentini. Phys.Rev. B57, 16, R9427 (1998).

### 6.7.С. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СЛОЕВ НИТРИДОВ III ГРУППЫ.

К.В.Закутайлов\*, А.Н.Ковалев\*, И.А.Соколов\*\*

\*) Московский институт стали и сплавов, Ленинский проспект,4,117936,  
Москва,Россия, E – mail: [Kovalev@tmte.misa.ac.ru](mailto:Kovalev@tmte.misa.ac.ru)

\*\*) ЗАО “Научное и технологическое оборудование”, Санкт-Петербург

Полярность поверхности слоев  $GaN$  и соединений на его основе играет важную роль в формировании приборных структур: светодиодов и полевых гетеротранзисторов  $AlGaN/GaN$ . Использование ударного механизма воздействия (мгновенного сжатия) позволяет выявить полярность поверхности пленки, т.е. выход плоскостей Me или N на поверхность кристалла, а также оценить наличие макродоменных областей в пленке. На основе пьезотестера, определяющего знак заряда, возникающего при сжатии вдоль нормали к поверхности, создано устройство для выявления полярности.

### 6.8.С. О ПРИРОДЕ ПРОБОЯ И ПРОВОДИМОСТИ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ ALGAN

***С.Ю. Шаповал, В.Л. Гуртовой, А.В. Ковальчук***

Институт проблем технологии микроэлектроники РАН, 142432 Черноголовка факс: (095)962-8047, тел.: (095)962-8080 (доп. 4-41-41), e-mail: Shapoval@ipmt-hpm.ac.ru

***C. Gaquiere, D. Theron***

Institut d'Electronique et de Microelectronique du Nord, UMR-CNRS 9929, Department Hyperfrequences et Semiconducteurs, Avenue Poincare BP 69, 59652 Villeneuve D'ASCQ CEDEX, France

В настоящей работе с использованием транзисторных структур на основе гетероструктур AlGaIn/GaN с квазидвумерным электронным газом проводилось исследование изменения пробивных напряжений, проводимости канала, крутизны и высокочастотных характеристик. В качестве пассивирующего слоя использовались тонкие пленки нитрида кремния, осаждаемые методом ЭЦР-плазменного стимулирования. Основная задача состояла в уменьшении содержания кислорода и водородных связей (Si-H, N-H) в пленке нитрида кремния, поскольку известно, что примеси кислорода в полупроводниках  $A^{III}B^V$  создают уровни, способствующие увеличению числа электронов проводимости, а водородные связи приводят к формированию объемного заряда в слое диэлектрика. Объемный заряд в диэлектрике изменяет электронную структуру полупроводника, что особенно важно для структур с высоким эффектом поляризации, таких как AlGaIn/GaN. В оптимизированных условиях наращивания пассивирующего слоя наблюдалось увеличение тока насыщения и усиления на высоких частотах.

### **6.9.С. АЛЬТЕРНАТИВНАЯ МОДЕЛЬ ГОЛУБОЙ ПОЛОСЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В GaN, СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННОМ Mg.**

***М.Леру<sup>1</sup>, П.Веннегэ<sup>1</sup>, С.Далмассо<sup>1</sup>, М.Бенесса<sup>2</sup>, Э.Фельтэн<sup>1</sup>, Ф. де Мерри<sup>1</sup>, Б.Бомон<sup>1</sup>, Б.Дамилано<sup>1</sup>, Н.Гранжан<sup>1</sup>, П.Жибар<sup>1</sup>***

<sup>1</sup> Centre de Recherche sur l'Hétéro-Epitaxie et ses Applications, Centre National de la Recherche Scientifique, Rue Bernard Grégory, Sophia Antipolis, 06560 Valbonne, France.

<sup>2</sup> Laboratoire TECSSEN, UMR 6122 CNRS, Faculté des Sciences et Techniques de S<sup>t</sup> Jérôme, 13013 Marseille cedex 20, France.

Известно, что при сильном ( $>2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) легировании Mg в GaN происходит самокомпенсация [1], приводящая к сильному уменьшению плотности свободных дырок. В образцах, выращенных методом металло-органической газофазной эпитаксии, сильное легирование Mg также ведет к появлению широкой полосы люминесценции с пиком около 2.8-2.9 эВ, который может преобладать в спектре люминесценции [2]. Это не наблюдается в образцах легированного Mg GaN, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Методами просвечивающей электронной микроскопии мы наблюдали, что сильное легирование Mg может вызывать изменение полярности GaN. В частности, в легированных Mg образцах GaN, выращенных методом металло-органической газофазной эпитаксии, наблюдаются пирамидальные области инверсии с плотностью порядка  $10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$  шириной несколько нм, что коррелирует с появлением голубой полосы фотолюминесценции. Нами предложена пробная модель данной полосы, основанная на приближении в рамках электростатики, включающая в себя связанные на акцепторе дырки и электроны, которые локализованы в этой маленькой области инверсии сильным полем спонтанной поляризации в GaN.

[1] U.Kaufmann, P.Schlotter, H.Obloh, K.Köhler, M.Maier, Phys. Rev. B **62** (2000) 10867.

[2] M.Leroux, N.Grandjean, V.Beaumont, G.Nataf, F.Semond, J.Massies, P.Gibart, J. Appl. Phys. **86** (1999) 3721.

## 7. СВОЙСТВА КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaN.

Председатель – *А.Н. Туркин.*

### 7.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕЛЕГИРОВАННЫХ СВЕРХРЕШЕТОК n-ALGAN/n-GAN

*А.Я. Поляков\**, *Н.Б. Смирнов*, *А.В. Говорков*, *М.Г. Мильвидский*  
ФГУП "Гиредмет", Москва, 109017, Б. Толмачевский пер., д. 5. E-mail:  
[polyakov@mail.girmet.ru](mailto:polyakov@mail.girmet.ru)

*A. Osinsky, P.E. Norris*

Corning Applied Technologies, Woburn, MA 01801, USA

*N.N. Faleev*

ECE Department, Texas Tech University, Lubbock, TX 79409, USA

Методом МОС-гидридной эпитаксии выращены симметричные сверхрешетки с толщиной ям GaN около 80 Å и около 35 Å и составом по алюминию в барьерах близким к 15% и 25%. На этих СР измерены картины рентгеновской дифракции, слоевые концентрации и подвижности электронов при 77 К и 300 К, спектры МКЛ без электрического поля и при приложении электрического поля, профили концентрации из вольт-фарадных характеристик, спектры РСГУ. Заметный квантово-размерный сдвиг (с 3,44 эВ до 3,53 эВ) обнаружен лишь для самых тонких ям около 35 Å. Приложение обратного смещения в 3 В слабо сдвигает спектр в длинноволновую область к 3,52 эВ, а подача прямого смещения в 3 В смещает спектр в коротковолновую область к 3,54 эВ, что связывается с действием пьезоэлектрического поля. Слойная концентрация электронов на "толстых" СР (80 Å) возрастает с  $2,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  до  $1,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , а слоевая подвижность несколько падает (с  $1600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  до  $1420 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ) при увеличении процента алюминия в барьерах с 15% до 25% (измерения при 77 К). Отмеченное изменение слоевой концентрации подтверждается и данными измерений профилей концентрации, полученных из ВФХ. В спектрах РСГУ структур с 25% алюминия обнаружена дополнительная полоса с эффективной энергией активации около 0,8 эВ, которая предварительно приписана дефектным состояниям на интерфейсе.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 01-02-17230).

### 7.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДУЛЯЦИОННО ЛЕГИРОВАННЫХ СВЕРХРЕШЕТОК p-ALGAN/GAN

*А.Я. Поляков\**, *Н.Б. Смирнов*, *А.В. Говорков*

ФГУП "Гиредмет", Москва, 109017, Б. Толмачевский пер., д. 5, E-mail:  
[polyakov@mail.girmet.ru](mailto:polyakov@mail.girmet.ru)

*A. Osinsky, P.E. Norris*

Corning Applied Technologies, Woburn, MA 01801, USA

*S.J. Pearton*

MSE Department, University of Florida, Gainesville, FL32611, USA

*J. Van Hove, A. Wowchak, P. Chow*

SVT Associates, Inc., 7620 Executive Drive, Eden Prairie, MN 55344, USA

Изучены слоевая концентрация и подвижность, температурная зависимость проводимости, профили концентрации из вольт-фарадных характеристик, спектры МКЛ, спектры фотоэлектрической релаксационной спектроскопии, адмиттанс спектры, а также карты дефектов, снятые в режиме наведенного тока на легированных магнием слоях p-GaN и модуляционно легированных сверхрешетках p-AlGaIn/GaN (100 Å/100 Å,

процент алюминия в барьерных слоях около 25%). Образцы были получены методом МЛЭ на буферных полуизолирующих слоях GaN или AlGa<sub>N</sub>. Показано, что сверхрешетки характеризуются гораздо более высокой слоевой концентрацией дырок ( $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  вместо  $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) и гораздо более слабой температурной зависимостью проводимости (энергия активации около 20 мэВ вместо 160 мэВ), чем однослойная структура с той же концентрацией магния. Но лишь модуляционно легированная СР, выращенная на полуизолирующем подслое GaN, позволяет получить и повышенную подвижность дырок ( $31 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  вместо  $6 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ), в СР же, выращенной на буфере AlGa<sub>N</sub>, подвижность даже ниже, чем в p-GaN (около  $2 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ). В СР на буфере AlGa<sub>N</sub> обнаружено также сильное уширение линии МКЛ, очень заметный сдвиг пика краевой люминесценции в длинноволновую сторону и присутствие в спектре ФЭРСГУ и адмиттанс-спектрах дополнительных акцепторных центров с энергией около 0,4 эВ от края валентной зоны. В режиме НТ на образцах p-GaN и СР на AlGa<sub>N</sub> буфере наблюдались дефекты в виде темных гексагонов. Размеры таких дефектов уменьшались, а концентрация увеличивалась при переходе от p-GaN к СР на AlGa<sub>N</sub> буфере. В СР, выращенных на подслое GaN, подобные дефекты не обнаружены.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 01-02-17230).

### 7.3. ОПТИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ФОНОНЫ В НАПРЯЖЕННЫХ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ GaN/AlGa<sub>N</sub>

*В.Ю. Давыдов<sup>1\*</sup>, А.А. Клочихин<sup>1</sup>, И.Е. Козин<sup>2</sup>, И.Н. Гончарук<sup>1</sup>, А.Н. Смирнов<sup>1</sup>,  
Р.Н. Кютт<sup>1</sup>, М.П. Щезлов<sup>1</sup>, А.В. Сахаров<sup>1</sup>, В.В. Лундин<sup>1</sup>, Е.Е. Заварин<sup>1</sup>,  
А.С. Усиков<sup>1</sup>*

1. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, Политехническая 26, Россия \*valery.davydov@pop.ioffe.rssi.ru
2. Институт физики, С-Петербургский государственный университет, 198904 Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты исследования зависимости рамановских спектров напряженных гексагональных сверхрешеток GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N от толщины и состава входящих в них слоев. Установлено, что оптический фонon симметрии A<sub>1</sub>(TO) представляют собой единую моду в сверхрешетке, распространяющуюся сквозь всю структуру. Распространение всех остальных оптических мод ограничено слоями GaN или Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N. В нашем докладе приведены результаты первых исследований сложенных акустических фононов в короткопериодных сверхрешетках GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N. С использованием различных геометрий рассеяния были получены данные о дисперсии продольной акустической ветви в сверхрешетке GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x=0.28). Значение усредненной скорости звука для такой сверхрешетки составило 8410 м/сек.

### 7.4. АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ InGaN/AlGa<sub>N</sub>/GaN-ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

*Г.А. Сукач*

Институт физики полупроводников НАН Украины, Проспект Науки, 45, 03028, Киев, Украина, E-mail: sukach@isp.kiev.ua

Исследовались многослойные InGaN/AlGa<sub>N</sub>/GaN-гетероструктуры с квантовыми ямами, поученные методом МОС-гидридной эпитаксии. Здесь представлены результаты экспериментальных исследований их термических параметров, а также механизмов формирования температуры перегрева активной области  $\Delta T_{p-n}$  СИД.

Исследовались люминесцентные характеристики, а также стационарные и импульсные ВАХ совместно с кинетикой нагрева–охлаждения активной области СИД. Из анализа кинетики нагрева–охлаждения определялась временная трансформация термических характеристик СИД, а также характеристические тепловые времена отдельных слоев гетероструктуры и прибора в целом. Мы могли выделить от трех до четырех характеристических времен, заключенных в пределах от сотен наносекунд до нескольких миллисекунд.

Из ВАХ была определена величина термического сопротивления СИД  $R_T = 260 \pm 40$  К/Вт. Совместный анализ стационарных и импульсных ВАХ позволил определить зависимость  $\Delta T_{p-n}(I)$ . Было показано, что в диапазоне изменения токов от  $2 \times 10^{-3}$  до  $3 \times 10^{-2}$  А зависимость  $\Delta T_{p-n}(I)$  для СИД на основе InGaN/AlGaIn/GaN-гетероструктур имеет характер близкий к квадратичному. В последующем она становится линейной, что характерно для известных СИД инфракрасного и красного диапазонов излучения.

### **7.5.С. ЧАСТИЧНОЕ РАЗУПОРЯДОЧЕНИЕ НЕЛЕГИРОВАННЫХ СВЕРХРЕШЕТОК n-ALGAN/GAN ИМПЛАНТАЦИЕЙ АРГОНА.**

***А.Я. Поляков\****, ***Н.Б. Смирнов***, ***А.В. Говорков***, ***М.Г. Мильвидский***, ***А.А. Шленский***  
ФГУП "Гиредмет", Москва, Б. Толмачевский пер., д. 5, E-mail: [polyakov@mail.girnet.ru](mailto:polyakov@mail.girnet.ru)

***В.Т. Бублик***, ***К.Д. Щербачев***

Московский Институт Стали и Сплавов, Москва, 117936, Ленинский пр., д. 4.

***В.А. Дравин***, ФИАН РАН

***A. Osinsky***, ***P.E. Norris***

Corning Applied Technologies, Woburn, MA 01801, USA

***S.J. Pearton***

MSE Department, University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA

Нелегированные СР AlGaIn/GaN (35 Å/35 Å, 15% Al в барьерном слое) были подвергнуты облучению ионами аргона ( $8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> при 150 кэВ +  $2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> при 80 кэВ) и последующему отжигу под слоем Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при 1000°C в течение 3 часов. На образцах до и после облучения снимались рентгеновские дифрактограммы, спектры МКЛ при 90 К, а также картины распределения интенсивности МКЛ по площади образца на растровом электронном микроскопе. Обнаружено, что такая обработка приводит к нарушению периодичности СР, как явствует из исчезновения сателлитных сверхрешеточных пиков в дифрактограммах и СР пика в спектре МКЛ. В то же время полного перемешивания сверхрешетки не происходит, на что указывает положение пика твердого раствора в дифрактограмме и появление пика, связанного с твердым раствором в спектре МКЛ (в обоих случаях состав соответствует составу барьерных слоев до облучения, а не половинному составу, как следовало бы ожидать при полном разупорядочении симметричной СР). Кроме того, после отжига в картинах МКЛ обнаружено появление сетки темных линий, по-видимому, связанных с генерацией дислокаций и частичной релаксацией упругих напряжений.

Работа в "Гиредмет" проводилась при частичной поддержке РФФИ, грант 01-02-17230.

## 8. СВЕТОДИОДЫ ИЗ НИТРИДОВ III ГРУППЫ.

Председатель – *А.С.Зубрилов.*

### 8.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СПЕКТРЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ МОДУЛИРОВАННО ЛЕГИРОВАННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ ТИПА InGaN/GaN

***Ф.И. Маняхин, А.Б.Ватмана***

Московский Институт Стали и Сплавов,  
119991, Москва, Ленинский проспект, 4. E-mail: fman@misa.ac.ru

***А.Э. Юнович, С.С. Мамакин***

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет. E-mail: yunovich@scon175.phys.msu.ru

Исследовано распределение заряженных центров  $N(z)$  и спектры электролюминесценции светодиодов (СД) на основе р-п-гетероструктур GaN/AlInGaN/GaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ). Барьеры в МКЯ были легированы донорами Si. Концентрация примесей в р-п- переходе была велика ( $N_A \approx 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \gg N_D \approx (3-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ). Зависимость  $N(z)$  на границе п-области имеет периодические максимумы и минимумы, которые приблизительно соответствуют легированию барьеров. Так, по-видимому, впервые показана возможность исследования структур с легированными МКЯ методом динамической емкости. В отличие от исследованных ранее СД с МКЯ, сдвиг максимума спектров с увеличением  $J$  сравнительно мал (3–12 мЭВ для голубых СД, 20–50 мЭВ для зеленых СД). Это объясняется экранированием пьезоэлектрических полей в ямах электронами от доноров в барьерах [1]. Работа поддержана РФФИ, грант N 00-02-16418.

1. N.Gardner, C.Kocot, W.Goetz et al. 4<sup>th</sup> Intern. Conf. on Nitride Semicond., Denver, July 2001, Book of Abst. P.38, PM B6.1.

### 8.3. УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ И КИНЕТИКА СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ

***С.С.Мамакин, А.А.Чугунов, А.Э.Юнович\****

Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, каф. физики полупроводников. \*yunovich@scon175.phys.msu.ru

***В.З. Зубелевич, Е.В. Луценко\*\****

Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной Академии Наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь. \*\* lutsenko@dragon.bas-net.by

Исследована угловая зависимость и кинетика излучения спектров электролюминесценции (ЭЛ) белых светодиодов (СД) на основе голубых СД из гетероструктур GaN/AlInGaN/GaN, покрытых люминофором из аллюмо-иттриевого граната с примесью Се. Показано, что угловая зависимость спектров и цветовые характеристики белых СД критически зависят от конструкции светодиода и соотношения интенсивностей излучения кристалла и люминофора. Установлено, что различные времена релаксации люминесценции кристалла и люминофора приводят к изменению цветовых характеристик СД при возбуждении импульсами с длительностью порядка 100 нс.

#### **8.4. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ИЗБЫТОЧНЫЕ (БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ) ТОКИ В СВЕТОДИОДАХ С ГЕТЕРОСТРУКТУРАМИ**

***Ф.И.Маняхин\***, А.Б.Ватмана*

Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет). 119991, Москва, Ленинский просп.,4. E-mail: [fman@misa.ac.ru](mailto:fman@misa.ac.ru)

***И.В.Рыжиков***

Московская государственная академия приборостроения и информатики

***В.С.Абрамов***, Фирма «Корвет», Москва

Исследована природа избыточных токов в светодиодных гетероструктурах на основе AlGaIn/InGaIn/GaN синего и зеленого диапазонов спектра, а также на основе AlGaInP желтого и красного диапазонов спектра. В качестве объектов исследования использовали светодиоды, герметизированные пластмассовыми корпусами и открытые структуры на кристаллодержателях.

Измеряли вольт-амперные характеристики при токах от  $10^{-7}$  до  $10^{-1}$  А в автоматическом режиме по шестистам точкам, а также зависимость силы света от тока и напряжения смещения после различных внешних воздействий: облучения нейтронами потоками  $10^{11}..10^{13}$  см<sup>-2</sup>, гамма-квантами в диапазоне доз  $10^5..10^7$  рад, выдержки в воде 4 суток, в камере влаги при температуре  $T=50^{\circ}\text{C}$  и влажности 80%.

Наибольшее внимания заслуживают результаты исследования влияния воздействий на негерметизированные структуры. Выдержка на открытом воздухе этих структур у ряда приборов вызвала увеличение обратных токов, у других – уменьшение. У значительной части структур никаких изменений в вольт-амперных характеристиках не произошло. В то же время выдержка в воде привела к снижению токов утечки у подавляющего большинства структур. Это можно объяснить образованием на поверхности кристаллов тонкого полупроводящего слоя растворенных в воде примесей. Этот слой создает условия для стока поверхностного заряда и его нейтрализации, что приводит к исчезновению физического р-п перехода и уменьшению или исчезновению токов утечки и обратных токов. У структур с изначально низкими токами утечки, по-видимому, такие условия стока заряда уже существуют.

#### **8.5. СРЕДСТВА, МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НИТРИДНЫХ СВЕТОДИОДОВ**

***Л.С. Ловинский***

ВНИИ Оптико-физических измерений

[vniofi@vniofi.ru](mailto:vniofi@vniofi.ru)

Представлены характеристики прецизионных специализированных средств измерений – фотометров и радиометров и результаты измерений оптико-физических параметров нитридных светодиодов – энергетических и фотометрических характеристик, температурно-спектральных и амплитудных зависимостей излучения. Приводятся параметры прецизионных стабилизированных источников, разработанных на базе исследованных светодиодов.

## 8.6. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ M-i-N-GaN-СВЕТОДИОДОВ

**В.Г.Сидоров**

Государственный технический университет, 195251 С-Петербург, Политехническая, 29;  
[sidorov@twonet.stu.neva.ru](mailto:sidorov@twonet.stu.neva.ru)

**А.Г.Дрижук, С.В.Шестериков**

Государственный технический университет, 160035 Вологда, Ленина, 15

Представлены конструкции и характеристики ряда оптоэлектронных устройств, созданных на основе M-i-n-GaN-светодиодов: оптрона GaN-CdS, переключающего диода ZnTe-GaN с памятью и индикацией устойчивых состояний цветом излучения, фотоприемника CdS-GaN с переключением и памятью, преобразователя ИК-изображения в видимое с запоминанием этого изображения.

Общим элементом всех устройств служит M-i-n-GaN-светодиод на сапфире с активной областью из GaN, легированного Zn и O одновременно, излучающий голубой свет (длина волны в максимуме 0,48 мкм) с линейной поляризацией до 60%. Этот светодиод может быть использован в качестве опорного цветового источника, источника в поляризационных приборах и индикатора высокочастотного напряжения при настройке радиоустройств в диапазоне до 200 МГц. Совместно с поляроидом светодиод служит датчиком угловых или линейных перемещений, а вместе с пленкой жидкого кристалла является датчиком электрических и неэлектрических величин, воздействующих на жидкий кристалл.

Наличие высокоомного i-слоя в конструкции светодиода позволяет наносить непосредственно на этот слой дополнительные функциональные слои и создавать оптоэлектронные устройства с разнообразными свойствами. Введение электрической и оптической обратной связи между слоями структур позволяет получать приборы с S-образной вльт-амперной характеристикой.

Двойное легирование активной области светодиодов обеспечивает достаточно высокую эффективность как светодиодам (КПД=0,1–0,3%, мощность излучения до 100 мкВт), так и устройствам. Устройства имеют монолитные конструкции, миниатюрны, надежны и могут быть использованы в системах автоматики и связи в качестве датчиков перемещений, переключателей, преобразователей, усилителей и генераторов оптических и электрических сигналов.

## 8.7.С. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУР GaN(Zn,O)

**А.Г.Дрижук\*, В.А.Кукушкин, Л.Н.Суханов,**

Вологодский государственный естественно-математический лицей  
 160035, Вологда, ул. Пролетарская 18, ВГЕМЛ.

[zsvo@vologda.ru](mailto:zsvo@vologda.ru)

**С.В.Шестериков**

Вологодский государственный технический университет  
 160008, Вологда, ул. Ленина 15, ВоГТУ.

Рассмотрены особенности выращивания HVPE методом на сапфировых подложках светоизлучательных структур на основе GaN(Zn,O) с поляризованной люминесценцией ( $h\nu_{\max} \sim 2,55 \text{ эВ}$ ).

Исследованы характерные отличия в спектрах возбуждения поляризованной фотолюминесценции (ФЛ) GaN(Zn,O) и спектрально близкой к ней неполяризованной ФЛ GaN(Zn).



По результатам исследования термоэлектрических и фотоэлектрических свойств структур показано, что слой GaN(Zn,O) имеет p-тип проводимости.

Приведены результаты исследования микроструктуры областей свечения в GaN(Zn,O), обнаружившие эффект стягивания областей свечения под контактом с увеличением напряжения.

Обсуждается возможный механизм данного эффекта, который объясняет такие особенности поляризованной электролюминесценции (ЭЛ), как ярко выраженный порог возгорания ЭЛ по напряжению, отрицательное дифференциальное сопротивление на вольт-амперной характеристике N-типа и высокочастотную модуляцию тока при ЭЛ.

### **8.8.С. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ**

***Столяревская Р.И.***

Всероссийский научно-исследовательский институт  
оптико-физических измерений (ВНИИОФИ)

Москва, 119361, Озерная 46, [stoly-m4@vniiofi.ru](mailto:stoly-m4@vniiofi.ru)

***Аникин П.П., Аникин Д.П., Никифоров С.Г.***

ООО «Корвет-Лайтс».

Москва, 105058, Мироновская 10А, [anik@corvett.sitek.net](mailto:anik@corvett.sitek.net)

Оборудование для создания световых приборов на основе светодиодов (СД) подлежит обязательной сертификации на соответствие отечественным и международным стандартам, а также правилам ЕЭК ООН. Фотометрические характеристики, определяемые в ходе испытаний продукции с целью её сертификации, это, как правило, осевая сила света и пространственное распределение силы света, координаты цветности. Изготовители СД, выпуская свою продукцию, нормируют в технических условиях типовую силу света и доминирующую длину волны, что вызывает определенные проблемы у потребителей СД. Сделан акцент на изучение оптических характеристик светодиодов с помощью спектральных методов измерений (на спектрофотометре «SPECORD-S100»), как наиболее точных и информативных. Лаборатория «Корвет-Лайтс» имеет установки для измерения осевой силы света и её пространственного распределения для отдельных СД и матриц. Имеется образцовый источник света на основе СД, сертифицированный Госстандартом РФ.

Дан краткий обзор рекомендаций Международной Комиссии по Освещению (МКО) в области измерений характеристик светодиодов, как разработанных, так и находящихся в стадии разработки, созданным и применяемым во ВНИИОФИ и «Корвет-Лайтс» методикам и средствам фотометрирования СД.

## 9. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ III ГРУППЫ.

Председатель – *А.Э.Юнович.*

### 9.1. СВЕТОДИОДЫ ИЗ INGA, СВЕТОСИГНАЛЬНЫЕ И ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ.

*Д.М. Коган, И.Т.Рассохин*

Научно-производственный центр оптико-электронных приборов «ОПТЕЛ»  
107082, Москва, ул. Бакунинская, 84, т/ф (095) 269-55-55.

Электронный адрес: [OPTEL@caravan.ru](mailto:OPTEL@caravan.ru)

Нитридные соединения группы  $A^{III}B^V$  открыли путь к созданию высокоэффективных светодиодов с зеленым, синим и белым цветами свечения.

Конструкторские и технологические разработки, представленные в данной работе, выполнялись с использованием импортных кристаллов InGaN с зеленым ( $\lambda_{\max} \approx 505$  и  $525$  нм) и синим ( $\lambda_{\max} \approx 450 \dots 480$  нм) свечением. Кристаллы изготовлены на сапфировой подложке, активная область содержит либо структуру из нескольких квантовых ям, либо одиночную квантовую яму. Кристаллы имеют размеры  $\sim 323 \times 0375$  мкм и характеризуются при  $J_{\text{пр}} = 20$  мА мощностью излучения  $0,8 \dots 2$  мВт для зеленого свечения и  $1,5 \dots 2,5$  мВт для синего свечения. В ряде устройств белого свечения использованы импортные стандартные светодиоды  $\varnothing 5$  мм.

### 9.3. ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ СВЕТОФОРЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ.

*Агафонов Д.Р.*

ООО «Корвет-Лайтс», Москва, 105058, Мироновская 10А, [lights@corvett.sitek.net](mailto:lights@corvett.sitek.net)

В докладе анализируются преимущества и недостатки железнодорожных светофоров на основе светодиодных источников излучения.

Была проведена серия полевых и лабораторных экспериментов по изучению оптических свойств светодиодных светофоров. Анализ материалов показал, что машинисты лучше видят квазимонохромные светодиодные светофоры, по сравнению с ламповыми. Уже в течение полугода проводится опытная эксплуатация мачтовых и карликовых светодиодных светофоров (производство ООО «Корвет-Лайтс») пяти цветов (белый, синий, зеленый, красный, желтый) на Горьковской и Октябрьской железных дорогах в соответствии с Техническим заданием Министерства Путей Сообщения.

Делается вывод о необходимости оснащения Российских железных дорог светодиодными светофорами.