



Минобрнауки России

Институт физики микроструктур РАН
– филиал Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
Российской академии наук»
(ИФМ РАН)

Академическая ул., д. 7, д. Афонино, Кстовский р-н,
Нижегородская обл., 603087
почта: ГСП-105, Н.Новгород, 603950

тел.: (831) 417-94-73, факс: (831) 417-94-64
E-mail: director@ipmras.ru: <http://www.ipmras.ru>
ОКПО 25565230, ОГРН 1025203020193
ИНН/КПП 5260003387/525043001

“УТВЕРЖДАЮ“
и.о. директора ИФМ РАН
д. ф.-м. н.
В.И. Гавриленко

“ ___ “ сентября 2020 г

_____ № _____
На № _____ от _____

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Нечаева Дмитрия Валерьевича

«Плазменно-активированная молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур
(Al,Ga)N/c Al₂O₃ для оптоэлектронных приборов среднего ультрафиолетового
диапазона ($\lambda < 300$ нм)»,

представленную на соискание степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников»

Актуальность темы исследований

В последние десятилетия наблюдается интенсивное развитие физических основ и технологии приборов на основе широкозонных соединений (Al,Ga)N. Наибольшие усилия в этой области сосредоточены на разработке мощных СВЧ транзисторов, а также фотоэлектрических и светоизлучающих приборов ультрафиолетового (УФ) диапазона, которые имеют многочисленные применения в экологии, промышленности, науке и медицине. Важным преимуществом соединений на основе (Al,Ga)N является их самая высокая среди полупроводниковых материалов термическая, химическая и радиационная стойкость, а также возможность непрерывного варьирования ширины прямой запрещенной зоны от 3.4 до 6.1 эВ в активных слоях Al_xGa_{1-x}N за счет изменения содержания Al, что позволяет реализовывать УФ оптоэлектронные приборы, работающие как в ближнем, так и среднем УФ диапазоне длин волн от 365 до 210 нм.

Несмотря на достигнутый существенный прогресс в развитии приборов УФ оптоэлектроники их параметры все еще не удовлетворяют многим требованиям практических приложений. Прежде всего, необходимо отметить, что до сих пор эффективность УФ светоизлучающих диодов более чем на порядок уступает эффективности светодиодов видимого диапазона. Это вызвано целым рядом нерешенных научных и технологических задач создания УФ полупроводниковых приборов на основе AlGaIn соединений и поэтому актуальность и востребованность развития данного направления не вызывает никаких сомнений.

Среди актуальных направлений исследований критически важным является развитие основ эпитаксиального роста приборных гетероструктур на основе AlGaIn

соединений. В диссертационной работе эти гетероструктуры были выращены с помощью плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ) – одной из основных ростовых технологий соединений АЗ-N, характеризующейся уникальными возможностями низкотемпературного эпитаксиального роста, точностью на атомарном уровне и возможностью использования широкого набора диагностических методов.

В диссертационной работе Нечаева Д.В. решаются ключевые проблемы технологии ПА МПЭ (Al,Ga)N слоев и в первую очередь проблема повышения их структурного качества при гетероэпитаксии на сильно рассогласованных подложках с-сапфира. Существенное место в работе занимают исследования кинетики ПА МПЭ роста (Al,Ga)N слоев в металл-обогащенных условиях. Для этих исследований был разработан оптический *in situ* метод контроля избыточной металлической фазы на поверхности растущего слоя. С помощью этого метода были впервые описаны процессы формирования непрерывного адслоя и накопкластеров из атомов III группы. Результаты этих исследований использовались для разработки нескольких импульсных методов формирования с помощью ПА МПЭ толстых (до 3 мкм) слоев бинарных и тройных соединений в системе (Al,Ga)N с атомарно-гладкой и свободной от капель морфологией поверхности. В работе также решается одна из основных проблем по получению р-типа проводимости в соединениях $Al_xGa_{1-x}N$ с высоким содержанием Al с использованием активно развиваемого метода поляризационного легирования. На основе полученных теоретических и экспериментальных результатов в диссертационной работе были получены опытные образцы нескольких типов фотоприемников и эмиттеров среднего УФ диапазона с выходными характеристиками, которые позволяют говорить об их возможно практическом применении для решения актуальных прикладных задач.

Структура диссертации

Диссертация посвящена изучению роста методом МПЭ ПА широкозонных соединений AlGaN (в том числе AlN) и применению полученных результатов для формирования источников спонтанного и стимулированного излучения среднего УФ диапазона. В рамках изучения роста широкозонных соединений AlGaN последовательно решалось несколько задач. Первой рассматривалась задача формирования высококачественного широкозонного буферного слоя AlN, актуальность которой обусловлена отсутствием коммерчески доступных подложек, обеспечивающих малое рассогласование кристаллических решеток с AlN. С целью снижения плотности прорастающих дислокаций при формировании зародышевого слоя AlN был развит метод эпитаксии с повышенной миграцией адатомов (ЭПМА), а при росте основного слоя AlN для фильтрации прорастающих дислокаций оказались эффективными 3D вставки ультратонких слоев GaN. Интересным результатом, полученным в этой части диссертации, является также развитый метод анализа картин дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО), который совместно с системой многолучевого оптического измерения упругих напряжений и другими методами позволил детально изучить процессы релаксации упругих напряжений в процессе роста. При формировании слоев AlGaN была рассмотрена кинетика их роста, которая согласуется с результатами, полученными другими научными группами. Показано, что для получения гладких высококачественных слоев AlGaN необходимы металлбогатённые условия роста, а для удаления избыточного Ga с поверхности предложен метод его быстрого термического испарения с помощью кратковременного увеличения температуры роста.

Одной из важных проблем широкозонных соединений AlGaN является получение слоев р-типа проводимости с высокой концентрацией дырок, что связано с большой

глубиной уровня акцепторов. В диссертационной работе Нечаева Д.В. развит метод поляризационного легирования Mg слоёв AlGaN и определены параметры (в частности - градиент состава), способствующие получению слоев с концентрации дырок на уровне 10^{18} см⁻³ и достижению высокой степени электрической активации акцепторов. Этот результат позволил сформировать p-i-n фото- и светодиоды, работающие в диапазоне < 300 нм, и исследовать их характеристики.

Следующим шагом к получению эффективных источников УФ диапазона стало развитие в диссертации технологии квантоворазмерных структур на основе AlGaN. Основными задачами в этой части являлись снижение плотности прорастающих дислокаций и уменьшение влияния высоких поляризационных полей, которые приводят к снижению эффективности излучательной рекомбинации в таких структурах. Для формирования активных областей в диссертации был развит метод дискретной эпитаксии. Продемонстрировано преимущество структур с квантовыми ямами с субмонослойными GaN вставками по сравнению с квантовыми ямами с квазинепрерывным составом, которое, в частности, проявилось в высокой температурной стабильности сигнала фотолюминесценции от таких структур. Результатом этого стало достижение стимулированного излучения с оптической накачкой при комнатной температуре в диапазоне от 258 до 290 нм с пороговыми плотностями накачки 480-150 кВт/см², соответственно. Стоит отметить интересный способ получения достаточно мощного спонтанного излучения (до 150 мВт) от AlGaN гетероструктур с помощью внешней накачки электронным лучом, что позволило получить излучение на $\lambda=235-240$ нм с эффективностью 0.75%.

Соответствие содержания диссертации специальности

Диссертация полностью соответствует специальности 01.04.10 – «физика полупроводников», а именно пункту 1 – «Физические основы технологических методов получения полупроводниковых материалов, композитных структур, структур пониженной размерности и полупроводниковых приборов и интегральных устройств на их основе», пункту 2 – «Структурные и морфологические свойства полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе», а также пункту 8 – «Спонтанная и стимулированная люминесценция в полупроводниковых материалах и композитных структурах, полупроводниковые лазеры и светоизлучающие устройства».

Достоверность основных результатов и выводов.

Достоверность полученных результатов и сформулированных выводов диссертационной работы подтверждена опытным путем через многократные повторения ростовых процессов, а также независимой характеристикой процессов и образцов комплексом современных методов. Основу диссертационной работы составляют исследования, результаты которых опубликованы в ведущих международных и российских журналах за 2012-2018 гг. Они докладывались на многочисленных международных и отечественных конференциях по физике полупроводников, список которых представлен в диссертации и автореферате. Эти результаты были также представлены и обсуждены на семинаре по физике полупроводников в ИФМ РАН.

Новизна исследований и полученных результатов.

На наш взгляд, наиболее важными среди новых результатов, полученных в диссертационной работе Нечаева Д.В., являются следующие:

1. Продемонстрированы преимущества температурно-модулированной эпитаксии в сильно металл-обогащенных условиях для получения атомарно-гладких однородных слоев AlGaN.
2. За счет сравнительных исследований ПА МПЭ различных зародышевых слоев AlN/c-Al₂O₃ показано преимущество эпитаксии с повышенной миграцией адатомов (ЭПМА), обеспечивающей генерацию наименьшей плотности прорастающих дислокаций.
3. Обнаружено, что взаимодействие металлического Al с подложкой c-Al₂O₃ при росте AlN зародышевых слоев методом ЭПМА приводит к нарушению планарности интерфейса AlN/c-Al₂O₃.
4. За счёт введения сверхтонких (3 - 4 нм) трехмерных слоев GaN разработан метод фильтрации прорастающих дислокаций до уровня $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ в буферных слоях AlN/c-Al₂O₃ толщиной до 2 мкм.
5. Разработана программа цифровой обработки картин ДОБЭ, которая совместно с развитыми оптическими измерениями кривизны подложки позволила при росте AlN/c-Al₂O₃ темплейтов исследовать и контролировать упругие напряжения в буферных слоях AlN с ультратонкими вставками GaN.
6. Впервые экспериментально исследована зависимость степени электрической активации атомов Mg, выступающих в качестве акцепторной примеси, от градиента состава в слоях AlGaN:Mg, что позволило с помощью поляризационного легирования сформировать методом ПА МПЭ p-i-n фото- и светодиоды с высоким содержанием Al для УФ спектрального диапазона.
7. Продемонстрированы возможности субмонослойной дискретной эпитаксии по формированию монослойных КЯ AlGaN для получения от них стимулированного УФ излучения на длинах волн $\lambda=260\text{-}290 \text{ нм}$ с минимальной пороговой мощностью оптической накачки при комнатной температуре $\sim 150 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$ для $\lambda=290 \text{ нм}$.

Личный вклад соискателя и замечания.

Все представленные в диссертационной работе гетероструктуры (Al,Ga)N/AlN/c-Al₂O₃ были получены непосредственно соискателем в ходе его работы на установке ПА МПЭ. Описанные во второй главе алгоритмы анализа картин ДОБЭ являются продолжением его выпускной квалификационной работы. Им была предложена идея о введении тонких слоев GaN в буферные слои AlN с целью снижения плотностей прорастающих дислокаций. Ему принадлежит наибольший вклад в изучение кинетики роста (Al,Ga)N соединений методом ПА МПЭ и разработка методик проведения этих исследований. Все опытные образцы УФ-оптоэлектронных приборов были выращены с непосредственным участием соискателя.

Результаты диссертационной работы представляют интерес для таких организаций, как ОАО «НПО Геофизика-НВ», Объединенный институт ядерных исследований, АО «НПО «Орион», а также ряда других центров, ориентирующихся на создание и использование элементной базы полупроводниковой УФ-оптоэлектроники.

Несмотря на объемную, хорошо проделанную работу стоит отметить в ней следующие недостатки:

- 1) В практической значимости работы (стр. 8) утверждается, что для гетероструктур с квантовыми ямами Al_yGa_{1-y}N/Al_xGa_{1-x}N на сапфировых подложках «Пороговые характеристики являются одними из минимальных, полученных на гетероподложках любой эпитаксиальной технологией». Однако при сравнении с данными, приведёнными в

Главе 1 (литературный обзор) на стр. 32 величины порогов отличаются почти на порядок для $\lambda \sim 260$ нм (480 кВт/см² в диссертации и 61 кВт/см² в литературе).

2) В разделе 4.4 «Ограничение распространения прорастающих дислокаций» Главы 4 демонстрируется эффективность введения 3D вставок GaN для фильтрации дислокаций в AlN слое. Несмотря на достаточно подробное рассмотрение процессов релаксации упругих напряжений опущено обсуждение оптимальности выбираемых толщин и периодичности этих 3D вставок для снижения плотности прорастающих дислокаций.

3) В Главе 5 пункт 5.2 «Р-і-п фотодиоды на основе AlGaIn:Mg» никак не обсуждается выбранный дизайн фотодиода, для которого использовалось формирование р-области с поляризационным легированием. Также в данной части диссертации нет сравнения полученных характеристик фотодиодов с достигнутым мировым уровнем.

4) В Главе 5 пункт 5.6 «Источники спонтанного УФ излучения с электронной накачкой» к сожалению не приводятся теоретические оценки эффективности преобразования энергии электронного пучка в энергию УФ излучения, хотя процесс этот сложный и многостадийный. Поэтому сложно оценить достигнутые параметры источников, обсуждаемых в этом пункте. Приведённые зависимости параметров УФ излучения от тока и энергии пучка электронов также слабо комментируются.

5) К недостаткам диссертации можно отнести отсутствие в Главе 5 схем измерения оптических характеристик структур, что затрудняет оценку достигнутых в диссертации параметров приборных структур.

Заключение по диссертационной работе.

Диссертационная работа Д.В. Нечаева «Плазменно-активированная молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур (Al,Ga)N/c Al₂O₃ для оптоэлектронных приборов среднего ультрафиолетового диапазона ($\lambda < 300$ нм)» представляет собой законченное научное исследование по актуальным проблемам и задачам в области технологии и физике полупроводниковых приборов на основе нитридов третьей группы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации, соответствующей всем требованиям, предъявляемым к оформлению диссертационной работы на соискание степени кандидата физико-математических наук в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Представленные в отзыве замечания несколько не снижают значимость диссертационной работы, а ее автор – Нечаев Дмитрий Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников».

Отзыв составлен Лобановым Дмитрием Николаевичем, к.ф.-м.н., старшим научным сотрудником отдела физики полупроводников ИФМ РАН, +7 (831) 417-94-73, фактический адрес: 603087 Нижегородская обл., д. Афонино, ул. Академическая, д.7, для корреспонденции: 603950, ГСП-105, Нижний Новгород, dima@ipmras.ru.

с. н. с. отдела физики полупроводников ИФМ РАН
к.ф.-м. н.

Лобанов Д.Н.