

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

САВЧУК АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**Разработка технологии выращивания слоев гетероструктуры на основе
нитрида галлия для лазерных диодов в устройствах освещения**

2.2.3 Технология и оборудование для производства материалов и приборов
электронной техники

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р. техн. наук, профессор
Мурашев Виктор Николаевич

Москва – 2022

Актуальность темы исследования. Полупроводниковая оптоэлектроника является одним из ключевых разделов электроники. Важность этого направления в науке и промышленности подчеркивается присуждением Нобелевской премии в области физики в 2000 году Жоресу Ивановичу Алфёрову за исследование гетероструктур и в 2014 году Исаму Акасаки, Хироси Амано и Сюдзи Накамуре за предложение метода выращивания многокомпонентных наногетероструктур и создание на их основе синих светодиодов, приведших к появлению ярких и энергосберегающих источников белого света.

Светодиодная технология является доминирующей на рынке энергосберегающего твердотельного освещения. Потребность в повышении энергоэффективности систем освещения создает необходимость в рассмотрении других оптоэлектронных приборов для светотехнического применения. Логическим продолжением идеи использования полупроводниковых твердотельных излучателей в системах освещения является применение лазерных диодов (ЛД). ЛД – это полупроводниковый прибор, в котором происходит усиление спонтанного излучения за счет вынужденной рекомбинации в гетероструктуре.

ЛД, как источники освещения, имеют ряд преимуществ над светодиодами. Во-первых, максимальная оптическая мощность, которую можно получить от одного чипа ЛД в 5-6 раз больше, чем от аналогичного по площади светодиода. Во-вторых, благодаря направленности вынужденного излучения, у ЛД больше внешняя квантовая эффективность. В-третьих, ЛД в меньшей мере подвержены эффекту уменьшения мощности («efficiency droop»). Следствием этого является то, что ЛД эффективнее справляются с преобразованием электроэнергии в оптическое излучение при высоких уровнях мощности. Однако, у ЛД есть и некоторые особенности, которые отражаются на функционировании в системах освещения. В первую очередь это узкий монохроматический спектр, направленность потока излучения и относительно высокая стоимость по сравнению со светодиодами.

Недостаточная изученность вопроса применения ЛД в системах освещения и технологические особенности получения лазерных гетероструктур препятствуют коммерциализации энергосберегающих технологий в этом направлении. Таким образом, комплексное теоретическое и экспериментальное исследование, направленное на разработку технологий получения пленок гетероструктуры ЛД на основе GaN для использования в энергоэффективном осветительном устройстве является актуальной научной и технической задачей и позволит сделать следующий шаг в повышении энергоэффективности и рационального использования природных ресурсов.

Степень разработанности темы. Значительная часть исследований ЛД как излучателей в оптоэлектронных приборах для освещения направлена на оптимизацию состава и толщины люминофорных покрытий для получения максимального светового потока по аналогии со светодиодным освещением. Некоторые исследователи занимаются оптимизацией конструкции гетероструктуры для получения максимальной оптической мощности и уменьшения стоимости ЛД. Часть исследователей рассматривают возможность интеграции в лазерное освещение системы передачи данных.

Большинство исследований построено на использовании мелкосерийных ЛД, разработанных для применения в медицине, измерительном и проекционном оборудовании. Существующий позитивный опыт создания промышленной технологии производства нитридных ЛД связан с изготовлением одномодовых фиолетовых ЛД для работы с Blu-ray дисками и не может быть напрямую использован в освещении. Согласно исследованиям, технология изготовления ЛД на основе нитридов в различных спектральных диапазонах значительно отличается, поэтому важна оптимизация технологии для применения в освещении.

Существующая база данных в области применения ЛД для освещения характеризуется разнонаправленностью и отсутствием системности в оценке ключевых для технологии параметров, отсутствием компонентной базы, функционально предназначенной для именно этого применения, что затрудняет сопоставление существующих оптоэлектронных приборов для освещения на основе светодиодных систем с лазерными аналогами и прогнозирование перспектив развития отрасли. Комплексные исследования особенностей применения ЛД в системах освещения и разработка технологических решений для их создания является важной научно-технической задачей.

Цель и задачи. Целью работы является разработка технологии создания, с помощью МОС-гидридной эпитаксии, слоев гетероструктуры нитридных ЛД, предназначенных для использования в высокоэффективных системах освещения. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- выбрать тип и конструкцию ЛД, оптимальные для применения в системах освещения;
- исследовать процессы дефектообразования в эпитаксиальных пленках а-GaN для создания темплейтов;
- исследовать и оптимизировать процесс легирования пленок а-GaN для создания эмиттерных слоев ЛД;

- разработать технологию роста пленок нитрида галлия в неполярной ориентации с помощью МОС-гидридной эпитаксии для создания гетероструктур лазерных диодов синего спектрального диапазона.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- определена взаимосвязь между плотностью V-дефектов в а-GaN и концентрацией смешанных дислокаций;
- выявлены взаимосвязи между концентрацией в газовой фазе прекурсоров Si, Ge и S и уровнем легирования в эпитаксиальных слоях а-GaN с электронной проводимостью.

Методы исследований. Методы исследований. При выполнении диссертационной работы для решения поставленных задач использовались методы экспериментального исследования, системного анализа и математического моделирования.

Для определения кристаллографических параметров эпитаксиальных слоев использовалась рентгеновская дифрактометрия в геометрии θ - 2θ и $\Delta\omega$. Для контроля морфологии была использована электронная, атомно-силовая и оптическая микроскопия. Для определения концентрации был применен четырехзондовый метод. При проведении исследований спектральных характеристик системы освещения на основе ЛД была создана программа моделирования параметров лазерного освещения на основе лазерных диодов синего спектрального диапазона в среде Visual Studio.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается достаточной и соответствующей инженерной точности корреляцией полученных теоретических расчетов с фактическими данными экспериментальных исследований.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- установлено, что для применения в лазерных устройствах освещения с наиболее распространенными люминофорами наибольшая энергетическая эффективность может быть достигнута с помощью ЛД, выращенных на а-GaN неполярной ориентации;
- предложена гипотеза, объясняющая механизм зарождения V-дефектов в а-GaN за счет большей скоростью роста в местах выхода скоплений смешанных дислокаций на поверхность пленки;
- доказано, что для активации дырочной проводимости эмиттерных слоев ЛД на основе а-GaN наиболее эффективным является низкотемпературный отжиг в атмосфере кислорода;
- разработана технология выращивания эпитаксиальных слоев а-GaN на подложках г-сапфира без ex-situ обработки.

Основные положения, выносимые на защиту:

- для максимальной эффективности преобразования электрической энергии в оптическую в устройствах освещения на основе ЛД, доминантная длина волны ЛД не должна отличаться от максимума спектра поглощения люминофора;
- концентрация V-дефектов в a-GaN коррелирует с плотностью смешанных дислокаций. Механизм зарождения V-дефектов связан с большей скоростью роста в области выхода на поверхность скопления смешанных дислокаций;
- оптимальная концентрация донорной примеси и морфология поверхности эмиттерного слоя ЛД на основе a-GaN достигается при использовании H_2S в качестве прекурсора;
- для активации акцепторной примеси в эмиттерном слое ЛД на основе a-GaN отжиг в атмосфере кислорода является более эффективным, чем в атмосфере азота.

В первой главе выполнен обзор существующих исследований в области лазерного освещения и нитридной технологии. По результатам обзора сформулированы цели и задачи работы.

Существующие системы освещения на основе полупроводниковых излучателей, в том числе лазерных диодов и светодиодов работают на основе принципа аддитивности цветов. Белый свет от таких источников получается за счет смешения либо синего света от полупроводникового излучателя и красно-желтого света люминофора, либо за счет смешения синего, зеленого и красного света исключительно от полупроводниковых излучателей. Основной характеристикой источников белого света является световой поток. Световой поток – это физическая величина, которая характеризует мощность излучения в видимом для человеческого глаза спектральном диапазоне.

Энергоэффективность любого оптоэлектронного прибора определяется из отношения светового потока к потребляемой электрической мощности. Ключевой задачей является увеличение этого отношения. Конструкция лазерных диодов за счет иной физики процесса генерации излучения в большинстве спектральных диапазонов позволяет иметь более высокое, чем у светодиодов отношение преобразования электрической мощности в оптическую. При этом в существующих работах не рассматривается вопрос определения оптимальной длины волны лазерного излучения для применения в лазерных системах освещения. На энергоэффективность оптоэлектронных приборов на основе лазерных диодов для систем освещения влияет совокупность нескольких факторов. Большое значение имеет световая эффективность излучения заданной длины волны лазерного диода в совокупности с люминофором. С одной стороны, прошедшее через люминофор лазерное излучение является важной составляющей результирующего белого света и

вносит существенный вклад в световой поток. С другой стороны, спектр лазерного диода должен обеспечить максимальную эффективность преобразования излучения в люминофоре. Зачастую задача подбора оптимальных спектральных составов компонентов системы освещения является поиском компромисса между двумя этими факторами, и для лазерных систем освещения эта работа еще не проделана.

Технология выращивания гетероструктур современных нитридных ЛД сильно зависит от требуемого спектрального диапазона. Наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики ЛД в контексте применения в системах освещения оказывает кристаллографическое совершенство эпитаксиальных слоев в активной области ЛД и последовательное сопротивление гетероструктуры. Технология молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет создавать прецизионные слои нитридных материалов с высоким кристаллографическим совершенством, однако для коммерциализации ЛД в системах освещения необходимо использование более массовой МОС-гидродной технологии. Легирование пленок GaN сопряжено с использованием широкого спектра технологических приемов и материалов и технологии легирования могут значительно отличаться для различных режимов роста пленок GaN.

Для реализации концепции построения систем освещения с использованием нитридных ЛД необходимо решить ряд задач, которые вытекают из особенностей ЛД.

Необходимо выбрать спектральный диапазон, применение которого обеспечит наибольшую эффективность систем освещения на основе ЛД.

Исходя из выбранного спектрального диапазона необходимо разработать технологические режимы получения эпитаксиальных пленок GaN.

Необходимо провести анализ структуры и механизма образования дефектов в тонких пленках GaN и разработать методы, позволяющие минимизировать образование дефектов.

Для уменьшения последовательного сопротивления и одновременного улучшения кристаллографического совершенства пленок GaN необходимо проведение исследований влияния технологических приемов активации примеси и прекурсоров на технологию изготовления подходящих для систем освещения ЛД.

Решение указанных задач позволит получить полезный научно-технический задел и достичь поставленных целей.

Во второй главе представлена разработанная методика моделирования светотехнических и колориметрических параметров системы лазерного освещения. На основе разработанной методики была написана программа в среде C# для моделирования

светотехнических и колориметрических параметров системы освещения по методике МКО1931.

Входными данными являются:

- спектр светодиодной системы в относительных единицах;
- спектр светодиода без люминофора, используемого в светодиодной системе освещения;
- спектр поглощения люминофора светодиодной системы освещения, нормированный на единицу;
- световая эффективность светодиодной системы освещения;
- спектр лазерного диода.

Расчетными параметрами программы являются:

- коэффициент, характеризующий интенсивность поглощения в слое люминофора;
- внешняя квантовая эффективность люминофора;
- спектр системы на основе лазерного излучения и люминофора из светодиодной системы освещения
- коррелированная цветовая температура лазерной системы освещения;
- световая эффективность лазерной системы освещения.

В качестве тестовых спектров для проверки работы модели использовались спектры излучения светодиодных осветительных устройств, полученные с помощью спектрометра SOLAR S100, световой поток тестовых оптоэлектронных приборов был измерен в интегрирующей гониометрической сфере ТКА-КК1, коррелированная цветовая температура и индекс цветопередачи был измерен с помощью портативного анализатора спектра UPRtek MK350. Полученные с помощью моделирования данные хорошо коррелируют с экспериментальными измерениями и позволяют судить о корректности полученных с помощью моделирования параметров осветительного устройства.

Согласно полученным результатам моделирования для ЛД в системах освещения существует оптимум, который совпадает с пиком поглощения люминофора. Использование лазерных диодов с длиной волны меньше либо больше оптимальной приводит к тому, что значительная часть синего излучения проходит через люминофор и для уменьшения доли этого излучения приходится значительно увеличивать толщину люминофора, что крайне негативно сказывается на световой эффективности. Так как лазерные диоды имеют высокую спектральную плотность мощности, системы освещения на их основе куда более чувствительны к изменению спектра первичного излучения.

Согласно литературным данным, большинство коммерческих люминофоров имеют максимум поглощения в диапазоне 460-470 нм. При производстве ЛД в указанном

спектральном диапазоне существенно проявляется влияние встроенного поля на активную область, поэтому для повышения эффективности и увеличения выходной оптической мощности актуальным является создание технологии производства торцевых ЛД с резонатором Фабри-Перо на основе неполярного а-GaN.

Для отработки технологических режимов получения пленок а-GaN была разработана лабораторная установка МОС-гидридной эпитаксии ЭПИ-N. Параметры установки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики установки ЭПИ-N

№ п/п	Характеристика	Ед. изм.	Значение
1	Диапазон рабочих давлений в реакторе	мБар	20-700
2	Диапазон рабочих температур подложкодержателя	°С	600-1200
3	Тип термопары		Тип К
4	Мощность ВЧ-генератора	кВт	15
5	Диапазон термостатирования канала МОС	°С	-25 ÷ +100°С
6	Точность поддержания температуры термостата канала МОС	°С	±0.1°С
7	Количество исполнительных пневматических клапанов		36
8	Количество регуляторов расхода газа		10
9	Количество регуляторов давления механических		1
10	Количество регуляторов давления электронных		6
11	Количество клапанов пневмоэлектромагнитных		37
12	Типы межэлементных разъемных соединений		VCR
13	Диаметр соединительных трубок	мм	6,35
14	Герметичность соединений по гелию	Па·м ³ /сек	1,3·10 ⁻⁹
15	Требования к энергопитанию: Напряжение Мощность Частота Азот Водород Сжатый воздух Охлаждающая вода, не менее	В кВт Гц Кгс/см ² Кгс/см ² Кгс/см ² М ³ /час	220 5 50-60 >5 >3 >5.5 3,2
16	Требования к энергопитанию ВЧ-генератора: Напряжение Мощность Частота Охлаждающая вода, не менее	В кВт Гц М ³ /час	380+-191 15 50+-1 1,2

В третьей главе рассмотрена технология создания пленок a-GaN на подложке г-сапфира. Пленки GaN выращивались методом МOC-гидридной эпитаксии при пониженном давлении (80 торр) в горизонтальном кварцевом реакторе с предварительной нитридизацией поверхности. Первый этап - высокотемпературный (950 °C) слой нитридизации, второй этап - низкотемпературный (700 °C) буферный слой GaN, третий этап выращивание пленки GaN. Источниками компонентов III и V были триэтилгаллий (ТЭГ) и аммиак (NH₃) соответственно. Подложка г-сапфира не подвергалась обработке *ex-situ*, и процесс выращивания был непрерывным. Особенность реактора, использованного в данной работе, заключалась в двухуровневом вводе потока газа. Верхний поток газовой смеси состоял из N₂ и NH₃, а нижний поток - из H₂ и ТЭГ. Слоистый газовый поток в квазиламинарном режиме в реактор подавался через пористый ввод

На рисунке 1 представлена зависимость скорости роста пленки GaN от температуры при постоянном расходе водорода через контейнер с ТЭГ (при температуре 17°C) $f = 400 \text{ см}^3/\text{мин}$.

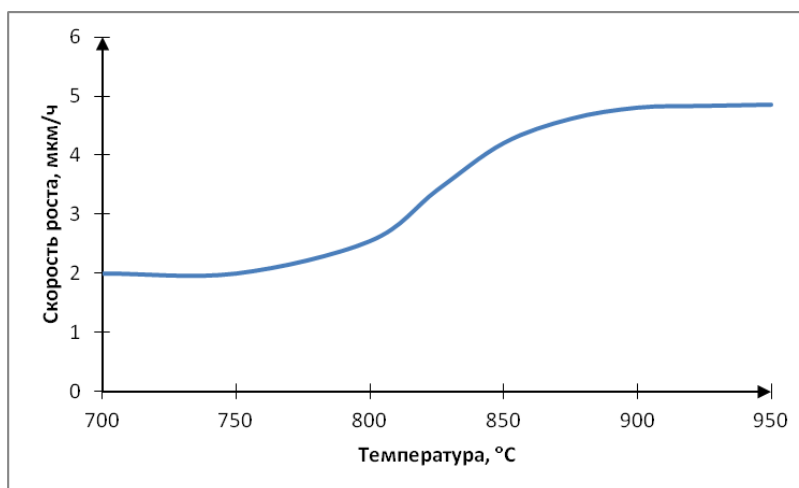


Рисунок 1 – Зависимость скорости роста пленки GaN от температуры при постоянном расходе ТЭГ $f = 400 \text{ см}^3/\text{мин}$

После выращивания, пленки были исследованы на рентгеновском дифрактометре, используя сканирование дифракции рентгеновских лучей $\Delta\omega$. Этим методом определялось кристаллическое совершенство пленки. Сканирующий электронный микроскоп и атомно-силовой микроскоп использовались для идентификации и анализа дефектов. Основным типом макродефектов на поверхности, которые были обнаружены, дефекты, схожие по структуре с V-дефектами с-плоскости. Для лучшего понимания

механизма образования V-дефектов поверхность пленки была протравлена гидроксидом калия, и те же дефекты были повторно исследованы. Плотность дефектов рассчитывалась по СЭМ-изображению площадью 1 см^2 в трех областях каждого образца и принималось среднее значение.

На рисунке 2 представлен вид дефекта в изометрии, полученный с помощью сканирующего электронного микроскопа.

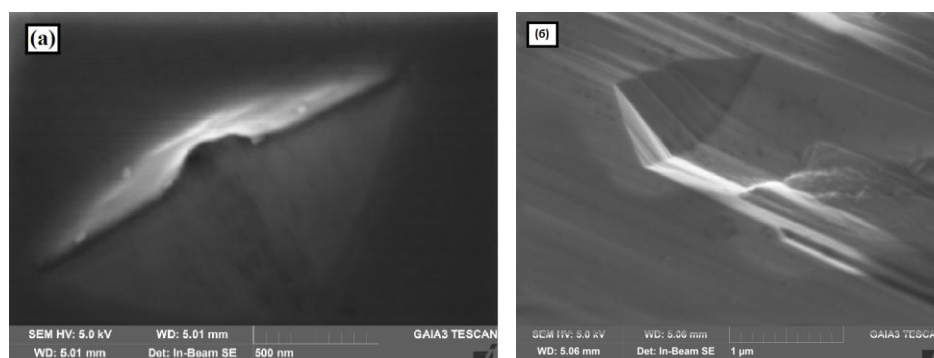


Рисунок 2 – Внешний вид дефектов структуры а) до травления в КОН, б) после травления в расплаве КОН

На рисунке 3 представлена структура дефекта, полученная с помощью атомно-силового микроскопа.

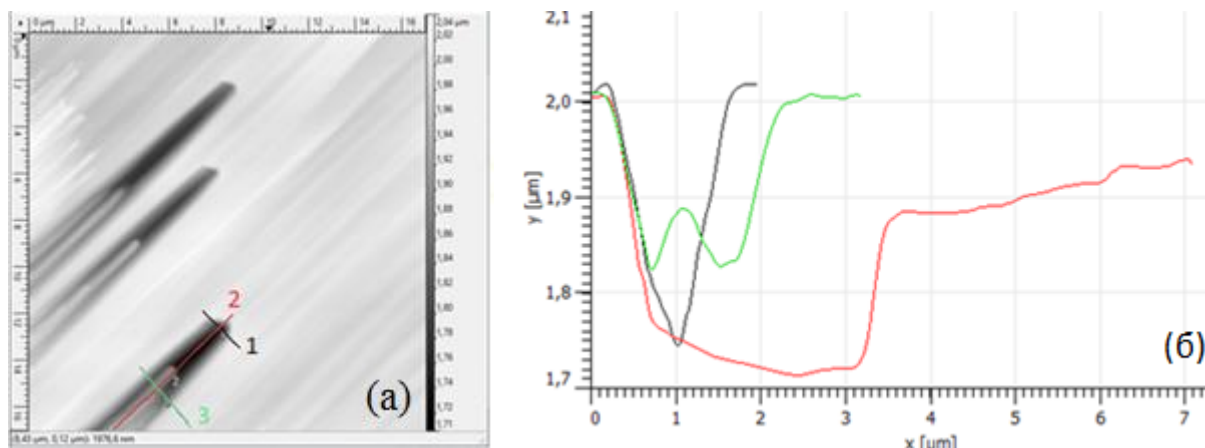


Рисунок – 3 структура дефектов а) вид сверху б) вертикальные сечения по линиям 1-3

Плотность дислокаций находилась в диапазоне - $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-2}$. По данным, полученным атомно-силовым микроскопом, шероховатость (R_a) выращенных пленок не

более 1 нм, что является многообещающим результатом, дающим возможность реализовать гетероструктуры лазерных диодов с помощью этой технологии.

Структуры были исследованы с помощью рентгеновского дифрактометра в геометрии $\Delta\omega$. В с-плоскости известно, что V-дефекты зарождаются на местах выхода дислокаций, и вероятность образования V-дефектов выше на смешанных, чем на краевых дислокациях. На а-плоскости возможные векторы Бюргерса смешанных дислокаций могут быть $b = \pm \begin{bmatrix} 1\bar{2}10 \end{bmatrix}$ or $b = \pm \begin{bmatrix} 2\bar{1}10 \end{bmatrix}$; $b = \pm \begin{bmatrix} 11\bar{2}0 \end{bmatrix} \pm [0001]$; $b = \pm [0001] \pm \begin{bmatrix} 2\bar{1}10 \end{bmatrix}$, а чисто краевые дислокации - $b = \pm [0001]$. Измерение кривой качения может предоставить информацию об отношении концентрации смешанных и краевых дислокаций в структуре. Это возможно, потому что вдоль оси (1120) краевые дислокации не видны, а уширение на полувысоте происходит из-за смешанных и винтовых дислокаций, а вдоль оси (1100) уширение на полувысоте обусловлено только краевыми дислокациями.

Измерения ширины на полувысоте кривой качения всех образцов вдоль оси (1011) практически одинаковы, в связи с чем, отсутствует сильная корреляция между краевыми дислокациями и плотностью V-дефектов. Что касается ширины на полувысоте кривой качения, измеренной вдоль оси (1120), существует линейное соответствие между плотностью V-дефектов и плотностью смешанных пронизывающих дислокаций. На рисунке 4 видно, что этой зависимости соответствует коэффициент корреляции, равный 0,81, что указывает на возможную связь между этими параметрами. Эта корреляция доказывает, что аналогично с-плоскости, для неполярной а-плоскости вероятность зарождения V-дефекта выше для места выхода смешанной дислокации, чем для чисто краевой дислокации.

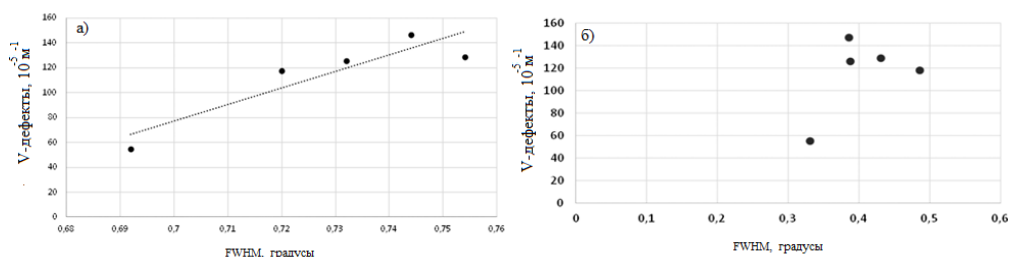


Рисунок 4 – Зависимость плотности дефектов от ширины на полувысоте кривой качения а) вдоль оси (1120) б) вдоль оси (1100)

Результаты исследования особенностей отжига а-GaN дырочной проводимости показаны на рисунке 5.

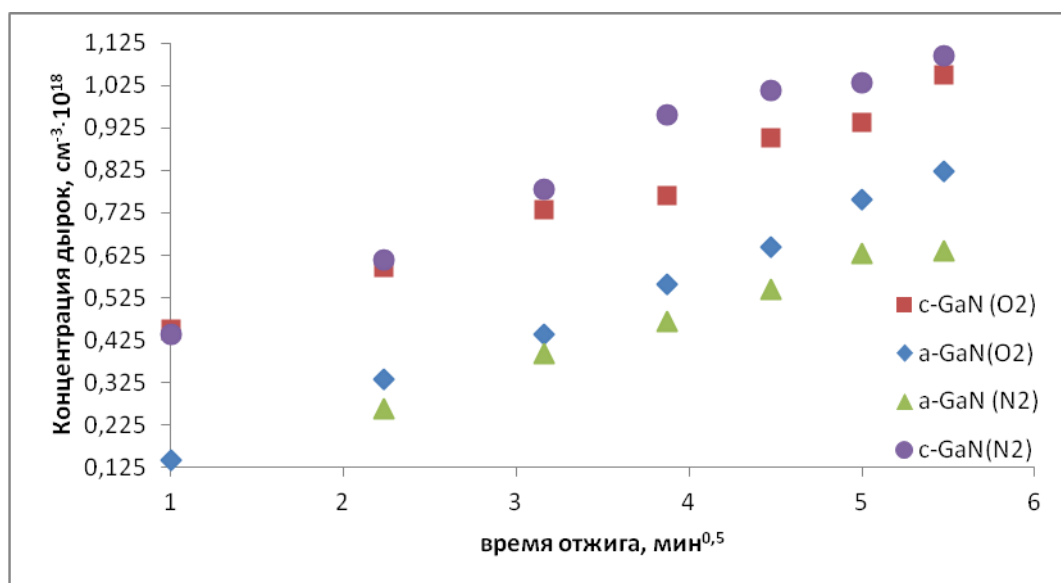


Рисунок 5 – концентрация дырок в зависимости от корня из времени отжига при температуре 550°C

Из графика видно, что у образцов a-GaN как начальная, так и конечная концентрация дырок меньше, чем у c-GaN. Для сопоставимой концентрации дырок должно быть увеличено парциальное давление Sr_2Mg в бачке или расход газа носителя.

Как a-GaN так и c-GaN имеют линейную зависимость активации Mg от корня из времени, что хорошо укладывается в активационную природу дырочной проводимости. Особенностью является то, что в отличие от c-GaN в a-GaN более эффективен режим отжига в кислороде.

В качестве источников донорной примесей использовался, сероводород (H_2S) 0.5% смесь в аргоне, моносилан (SiH_4) 1% смесь в аргоне и герман (GeH_4) 2% смесь в аргоне.

Для определения наиболее подходящего прекурсора и режима легирования пленок n-типа проводимости a-GaN, было проведено исследование зависимости шероховатости поверхности по площади 1 мкм² с помощью АСМ. Результаты измерения для Ge, Si и S представлены на рисунке 6.

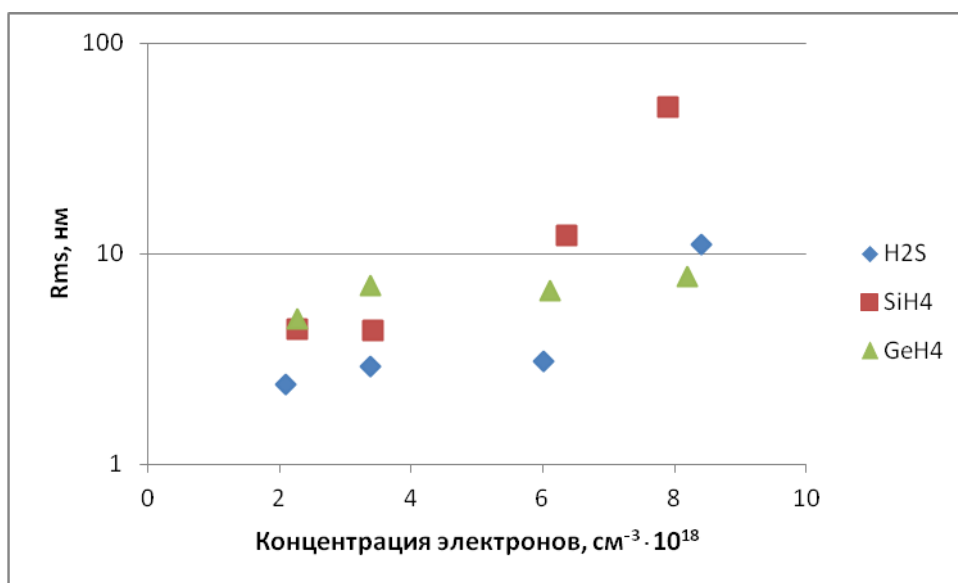


Рисунок 6 – зависимость Rms от концентрации электронов в пленках a-GaN

Из рисунка 6 видно, что при легировании кремнием для достижения концентрации электронов более $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ возникает существенное количество дефектов поверхности, которые негативно сказываются на морфологии пленок. Использование германия позволяет избежать деградации качества пленок при росте уровня легирования, это связано с большим соответствием размеров атомов германия и галлия, и, соответственно, меньшим напряжением, вносимым в подрешетку галлия атомами примеси. Интересным является результат влияния серы на морфологию. При достижении концентрации электронов в 10^{19} cm^{-3} согласно данным АСМ происходит ухудшение морфологии, однако, при меньших концентрациях, Rms в два раза меньше, чем у пленок, легированных Si и Ge. Исследования с помощью рентгеновской дифрактометрии показывают, что для пленок с сопоставимой толщиной и уровнем легирования наименьшие механические напряжения характерны для пленок, легированных серой. Возможным объяснением является то, что сера встраивается в подрешетку азота, и вносимые механические напряжения в пленки a-GaN, выращенные на г-сапфире меньше, чем для атомов Si и Ge, которые встраиваются в подрешетку Ga. Применение пленок серы в качестве прекурсора при легировании пленок a-GaN позволяет достичь баланса между высоким уровнем легирования и качеством поверхности пленок. Режимы выращивания эпитаксиальных пленок представлены в таблице 2.

Таблица 2. Технологические режимы получения пленок а-GaN n-типа проводимости

Наименование слоя	Состав	Расход, см ³ /мин (±0,1%)	Температура МО, °С	Давление МО, бар	Время, с	Температура реактора, °С
Нитридизация	NH ₃	2000			15	950
	H ₂	500				
Буферный слой	NH ₃	4600			1000	700
	H ₂	2500				
	ТЭГ	117	17	0,6		
GaN	NH ₃	3000			1200	1000
	H ₂	2500				
	ТЭГ	333	17	0,6		
	H ₂ S	400				

Выводы. В работе был проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований колориметрических и энергетических параметров лазерных диодов в системах освещения для обеспечения наибольшей энергоэффективности при сохранении оптимальных функциональных параметров. Были решены следующие задачи:

Было показано, что для применения в системах освещения на основе ЛД наибольшую эффективность с существующими люминофорами обеспечивают ЛД спектрального диапазона 465-475 нм.

Было обосновано, что для создания ЛД, предназначенных для систем освещения на основе ЛД целесообразно создание гетероструктур на основе GaN неполярной ориентации.

Был исследован механизм образования дефектов в темплейтах а-GaN на r-сапфире. Согласно полученным результатам основным типом дефектов являются V-дефекты. С помощью проведения серии экспериментов по выращиванию пленок а-GaN при различных технологических условиях и анализа результата дифрактометрии в геометрии Δ-ω было установлено, что аналогично с-плоскости, для неполярной а-плоскости вероятность зарождения V-дефекта связана с плотностью смешанных дислокаций. Наименьшая плотность V-дефектов ($5,5 \cdot 10^6$ см⁻²) удалось добиться для образца, выращенного с использованием трехступенчатого роста с применением двухслоевого ввода газов. На первом этапе проводилась нитридизация при 950 °С, на второй этапе

выращивался низкотемпературный (700 °С) буферный слой GaN, на третьем этапе выращивалась пленки GaN при температуре 1000 °С. Источниками компонентов III и V были ТЭГ и аммиак соответственно.

Было показано, что для активации акцепторной примеси в а-GaN более эффективным является отжиг в атмосфере кислорода. Получить максимальную проводимость дырочного типа при этом сохранив гладко-зеркальную морфологию поверхности удалось при температуре реактора 950 °С, расходе ТЭГ, аммиака и Cr_2Mg 333 см³/мин, 4000 см³/мин и 300 см³/мин соответственно, при этом температура МО ТЭГ – 17°С и давление – 0,6 бар, температура Cr_2Mg 15°С и давление – 0,5 бар. Отжиг проводился в течение 30 мин в атмосфере кислорода.

Было показано, что для достижения высокой концентрации электронов при сохранении гладкозеркальной морфологии пленок а-GaN целесообразно применение серы в качестве прекурсора. Наилучших результатов по электронной проводимости и морфологии поверхности удалось добиться при использовании в качестве прекурсора H_2S и следующем технологическом режиме: температура реактора 950 °С, расхода ТЭГ, аммиака и H_2S 333 см³/мин, 3000 см³/мин и 400 см³/мин соответственно, при этом температура МО ТЭГ – 17°С и давление – 0,6 бар.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на четырех международных конференциях и форумах в том числе на 11 Белорусско-Российский Семинаре "ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И СИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ", г. Минск, Республика Беларусь, 2017 год, 5-ой международной школе-конференции "Saint-Petersburg OPEN 2018" по Оптоэлектронике, Фотонике, Нано- и Нанобиотехнологиям, Санкт-Петербург, Россия, 2018 год, International workshop on nitride semiconductors 2018, г. Канадзава, Япония, 2018 год, 6-ой международной школе-конференции "Saint-Petersburg OPEN 2019" по Оптоэлектронике, Фотонике, Нано- и Нанобиотехнологиям, Санкт-Петербург, Россия, 2019 год.

Публикации. По теме диссертации опубликовано десять печатных работ, шесть из которых в рецензируемых научных журналах, входящих в базы Scopus и Web of Science и рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ. Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. Aluyev A., Savchuk A., Murashev V. et al., Chromaticity coordinates temperature dependence for blue laser diodes for solid state laser lighting //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1124. – №. 4. – С. 041032.

2. Abdullaev O., Savchuk, A., Ahmerov, Y. et al. MOCVD growth GaN on sapphire //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – T. 617. – №. 1. – C. 012015.
3. Savchuk A., et al. Structure of V-defects in a-GaN films grown on r-sapphire substrate //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – T. 1410. – №. 1. – C. 012022.
4. Rabinovich O., Savchuk A., Orlova M. et al. AlGaIn optimization for photodetectors //Optical and Quantum Electronics. – 2019. – T. 51. – №. 3. – C. 1-10.
5. Orlova M., Savchuk A., Ermosin I. et al. Influence of Growth Parameters on a-Plane InGaIn/GaN Heterostructures on r-Sapphire //physica status solidi (b). – 2019. – T. 256. – №. 5. – C. 1800371.
6. Chelny A. Savchuk A., Murashev V. et al. The influence of quantum well geometry on wavelength of AlInGaAs/InP laser diodes //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – T. 1695. – №. 1. – C. 012079.
7. Savchuk A. et al. AlGaP LEDs optimization //Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXIX. – International Society for Optics and Photonics, 2021. – T. 11680. – C. 1168011.
8. Chelny A., Savchuk A., Murashev V. et al. AlGaInAs/InP laser heterostructure improvement //Novel In-Plane Semiconductor Lasers XX. – International Society for Optics and Photonics, 2021. – T. 11705. – C. 117051E.
9. Патент RU 207 000U1 МПК F21V 8/00 выдан 06.10.2021
10. Savchuk A. et al. Macrodefects investigation in a-GaN films //AIP Advances. – 2022. – T. 12. – №. 2. – C. 025217.