

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ И НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ им. Н.С. КУРНАКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИОНХ РАН)

119991, г. Москва, Ленинский проспект, 31. Тел. (495) 952-0787, факс (495) 954-1279, E-mail: info@igic.ras.ru

13.10.2022 № 12204-1-6215/795

на № _____ от _____

«Утверждаю»

Директор ИОНХ РАН
член-корр РАН, профессор, д.х.н.
В.К. Иванов
«13» / 10 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации
на диссертационную работу Савчука Александра Александровича
**«Разработка технологии выращивания слоев гетероструктуры на основе
нитрида галлия для лазерных диодов в устройствах освещения»** на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов
электронной техники»

Актуальность темы исследования заключается в том, что
светодиодная технология является доминирующей на рынке устройств
освещения. Потребность в повышении энергоэффективности устройств
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 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. Поэтому тема диссертации, связанная с разработкой технологии выращивания слоев гетероструктуры на основе нитрида галлия для лазерных диодов в устройствах освещения, представляется актуальной.

Научная новизна работы состояла в проведении комплекса 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 г-сапфире. Согласно полученным результатам основным типом дефектов являются V-дефекты. С помощью проведения серии экспериментов по выращиванию пленок GaN при различных технологических условиях и анализа результата дифрактометрии, что вероятность зарождения V-дефекта

связана с плотностью смешанных дислокаций. Наименьшая плотность V-дефектов ($5,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$) удалось добиться для образца, выращенного с использованием трехступенчатого роста с применением двухслоевого ввода газов. На первом этапе проводилась нитридизация при 950°C , на второй этапе 15 выращивался низкотемпературный (700°C) буферный слой GaN, на третьем этапе выращивалась пленки GaN при температуре 1000°C . Источниками компонентов III и V были ТЭГ и аммиак соответственно. Было показано, что для активации акцепторной примеси в GaN более эффективным является отжиг в атмосфере кислорода. Получить максимальную проводимость дырочного типа при этом сохранив гладкозеркальную морфологию поверхности удалось при температуре реактора 950°C , расходе ТЭГ, аммиака и Cr_2Mg $333 \text{ см}^3/\text{мин}$, $4000 \text{ см}^3/\text{мин}$ и $300 \text{ см}^3/\text{мин}$ соответственно, при этом температура МО ТЭГ – 17°C и давление – $0,6 \text{ бар}$. Отжиг проводился в течение 30 мин в атмосфере кислорода. Было показано, что для достижения высокой концентрации электронов при сохранении гладкозеркальной морфологии пленок a-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°C , расхода ТЭГ, аммиака и H_2S $333 \text{ см}^3/\text{мин}$, $3000 \text{ см}^3/\text{мин}$ и $400 \text{ см}^3/\text{мин}$ соответственно. Было определена взаимосвязь между плотностью V-дефектов в GaN и концентрацией смешанных дислокаций, выявлены взаимосвязи между концентрацией в газовой фазе прекурсоров Si, Ge и S с уровнем легирования в эпитаксиальных слоях GaN с электронной проводимостью.

Достоверность и обоснованность была обусловлена применением современных методов исследования, в частности 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.

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 GaN на подложках сапфира.

Результаты работы могут быть рекомендованы для промышленного получения в НПО «Оптрон», НПО «Орион» и НИТУ «МИСиС». С результатами работы следует ознакомиться АО «НПП «ИСТОК»», АО «НИИ «Феррит-Домен» и ИОНХ РАН.

Недостатки. Несмотря на высокий уровень представленных исследований, по работе можно сделать ряд замечаний:

1. В целях работы отсутствует задача, связанная с анализом оптической совместимости излучения ЛД и люминофора. В тоже время практически вся вторая глава диссертации целиком посвящена этой проблеме.

2. Отжиг в атмосфере кислорода, как правило, приводит к образованию пленок на поверхности полупроводника, например, в кремнии. Поэтому, непонятно, почему для активации дырочной проводимости в эпитаксиальных слоях нитрида галлия, использовался отжиг в парах кислорода, а не в парах элементов второй группы Zn Cd, которые как известно являются основными акцепторными примесями в полупроводниках.

3. Таб.1 (автореферат). В пункте 3 не указан тип термопары и градусы в которых охарактеризован рабочий диапазон установки. В пункте 15 не показаны данные по плотности потоков газов и, как следствие, не рассмотрены режимы течения потоков.

4. Неполно представлены информация по чистоте использованных газов, и других прекурсоров, по подготовке подложек и их ориентация.

Данные замечания не снижают общую высокую оценку работы, которая выполнена на современном научно – техническом уровне, а ее результаты могут быть использованы в научном и прикладном плане.

Заключение

Диссертационное исследование А.А.Савчука посвящено актуальной теме «разработке технологии выращивания слоев гетероструктуры на основе нитрида галлия для лазерных диодов в устройствах освещения» и представляет завершенную научно – исследовательскую работу, Представленные в работе результаты исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы. Работа выполнена на высоком теоретическом, экспериментальном и аналитическом уровне.

Диссертационная работа Савчука А.А. соответствует требованиям ВАК РФ п.24 «Положение о порядке присуждения ученых степеней» (в редакции Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 №842), а ее автор, заслуживает присуждение ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Содержание работы, автореферат и отзыв на диссертацию А.А Савчука рассмотрены и одобрены на заседании секции «Неорганическое материаловедения» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук 12.10 2022 протокол № 3

Гл. науч. сотр. ИОНХ РАН,

Проф. д.х.н



С.Ф.Маренкин

