

*На правах рукописи*

Ефремов Артем Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  СВЕТОДИОДОВ**

Специальность 01.04.10. – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2005

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
Шретер Юрий Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Пихтин Александр Николаевич  
кандидат технических наук,  
Закгейм Александр Львович

Ведущая организация: ЗАО "Светлана-Оптоэлектроника"

Защита состоится " 15 " декабря 2005 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, корпус II, ауд. 470

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО " Санкт-Петербургский государственный политехнический университет "

Автореферат разослан " 14 " ноября 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.01  
Доктор технических наук

Коротков А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Создание мощных светодиодных ламп на основе нитрида галлия и замена ими ламп накаливания входит в ряд приоритетных направлений развития оптоэлектроники.

После успешного решения проблемы р-типа GaN и использования  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  в качестве активного слоя светодиодных структур, С. Накамуре удалось в 1994 году разработать яркие голубые и зеленые светодиоды [1]. Комбинация голубого светодиода с желтым люминофором позволила вскоре создать белые светодиоды – прототипы твердотельных ламп.

Важнейшей задачей для создания конкурентно-способного твердотельного освещения является увеличение эффективности светодиодных ламп. Эффективность лучших промышленных светодиодов на основе GaN достигает 15÷35%. Однако максимальная внешняя квантовая эффективность наблюдается при небольших токах 0.1 ÷1 мА, и уже при рабочем токе 20 мА она заметно падает [2]. Механизм падения эффективности в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  структурах исследован недостаточно. Обычно падение эффективности с уровнем инжекции связывают с уменьшением вероятности захвата носителей заряда в InGaN квантовую яму [2]. Однако наблюдающиеся зависимости эффективности от температуры не могут быть объяснены в рамках этих представлений [3]. Понимание физического механизма уменьшения эффективности  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  структур важно для технологического решения данной проблемы.

Поскольку эффективность светодиодов пока менее 50%, большая часть электрической энергии, потребляемой светодиодом, рассеивается в виде тепла. Перегрев структур протекающим током ограничивает эффективность и срок службы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодов. Поэтому анализ теплового режима светодиодных структур также требует детального изучения.

Проблеме уменьшения оптических потерь в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодных структурах в настоящее время посвящены многие исследования [4]. Это вызвано тем, что свет, генерируемый в активной области, испытывая полное внутреннее отражение, проходит большой путь в пленке GaN. Поэтому процессы поглощения и рассеяния, определяемые плотностью дефектов в GaN, могут оказывать существенное влияние на выход света. В связи с этим необходимы прямые измерения оптических потерь на длине волны генерируемого света в светодиодной структуре.

**Цель работы** состояла в исследовании основных механизмов, ограничивающих эффективность  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодов. Ее достижение было связано с решением трех задач:

1. Исследование механизма уменьшения эффективности  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодов при увеличении рабочего тока (более 20 мА).
2. Исследование влияния перегрева активного слоя на эффективность  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодов.
3. Исследование влияния поглощения и рассеяния света, генерируемого в активной области, на вывод света и эффективность  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодов.

### **Научная новизна работы**

В работе впервые получены следующие результаты.

1. Обнаружены большие переходные токи в  $p\text{-GaN}/\text{InGaN}/n\text{-GaN}$  светодиодных структурах, которые превосходят на несколько порядков избыточные стационарные туннельные токи. Вид стационарных и переходных  $I\text{-}V$  – и  $dI/dV\text{-}V$  характеристик объясняется туннелированием и захватом электронов на состояния, локализованные на гетерограницах  $\text{InGaN}/\text{GaN}$ .
2. Обнаружено, что температурные зависимости эффективности электролюминесценции имеют особенности при 150 и 250 К. Эти особенности сохраняются в широком диапазоне токов инжекции. Из этого следует, что безызлучательная рекомбинация на одних и тех же состояниях, локализованных на гетерограницах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ , контролирует эффективность электролюминесценции.
3. Предложена туннельно-рекомбинационная модель избыточного тока  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуры.
4. Обнаружена планарная неоднородность электролюминесценции светодиодной структуры и временная задержка (~20-40 нс) в распределении электролюминесценции по площади светодиодов после их деградации.
5. Экспериментально показано, что рабочие токи в обычных GaN светодиодах могут быть увеличены в 5-7 раз при обеспечении хорошего теплоотвода. Предложена конструкция светодиода с улучшенным теплоотводом.
6. Предложена методика определения коэффициента ослабления света в светодиодных структурах и определен коэффициент ослабления для света с длиной волны 465 нм в конкретной  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуре, составивший  $90\pm 15\text{см}^{-1}$ . Проведен анализ

основных каналов выхода света из  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуры с учетом его поляризации.

### **Практическое значение работы**

Показано, что наиболее вероятной причиной падения эффективности  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодов с увеличением рабочего тока является безызлучательная рекомбинация через состояния, связанные с сегрегацией остаточных примесей на гетерограницах.

На основании анализа тепловых режимов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодов указаны пути увеличения рабочих токов светодиода в 5-7 раз.

Предложена классификация светодиодов по мощности в зависимости от способа их охлаждения.

Разработана методика определения коэффициента ослабления света в светодиодных структурах.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологии  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодов.

**Достоверность и надежность результатов работы** обеспечена тем, что они получены на большом количестве образцов и на значительных массивах экспериментальных данных с обработкой результатов на ЭВМ.

**Апробация и личный вклад автора.** Результаты работы доложены на четвертой Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто - и наноэлектронике 2002, а также на семинарах в СПбГПУ и Физико-Техническом институте им. А.Ф.Иоффе.

**Публикации.** Основные результаты работы содержатся в 6 научных публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Падение эффективности электролюминесценции  $n\text{-GaN}/\text{InGaN}/p\text{-GaN}$  структур в диапазоне рабочих токов  $5 \div 20$  мА обусловлено безызлучательной рекомбинацией на состояниях, локализованных на гетерограницах  $\text{InGaN}/\text{GaN}$ , и уменьшением коэффициента инжекции носителей заряда в  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  квантовую яму с ростом напряжения в результате

пиннинга уровня Ферми на гетерограницах.

2. Механические напряжения, создаваемые металлизацией  $p$ -слоя GaN, приводят к неоднородности инжекции по площади InGaN/GaN светодиодной структуры. Увеличение емкости участка структуры под  $p$ -контактом после деградации светодиода приводит к временной задержке (~20-40 нс) в распространении электролюминесценции по площади структуры.

3. Рабочие токи обычных GaN светодиодов могут быть увеличены в 5-7 раз (с соответствующим увеличением выхода света) при оптимизации теплоотвода.

4. Коэффициент ослабления света, генерируемого в активной области тонкопленочных светодиодных структур, может быть определен из отношения интенсивностей излучения, выходящего по нормали и параллельно плоскости структуры.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 103 страниц, из которых 31 рисунки, а также библиографию из 101 наименований.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследования. Формулируются цели работы и основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена исследованию влияния электрического поля в  $p$ - $n$ -переходе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуры на эффективность электролюминесценции. Она начинается с обзора литературных данных, посвященных основным физическим свойствам  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодных структур и механизмам, ограничивающим их квантовую эффективность. Далее описаны исследуемые в работе светодиодные структуры и методика экспериментов.

Для анализа механизма инжекционных потерь в GaN светодиодах в работе впервые исследованы переходные токи. В широком диапазоне токов детально исследованы температурные зависимости эффективности электролюминесценции  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодных структур в области температур 77 – 300 К. Проведены также исследования температурных зависимостей прямого тока и емкости, а также вольт-амперных, вольт-фарадных и вольт-яркостных характеристик  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}/\text{GaN}$  светодиодных структур.

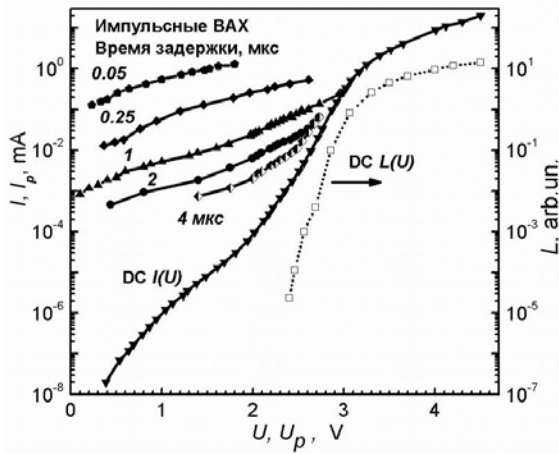


Рис.1. ВАХ при постоянном и импульсном напряжении и вольт-яркостная характеристика  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}/\text{GaN}$  структуры.

При комнатной температуре эффективность электролюминесценции максимальна при 2-4 мА и уменьшается как с ростом, так и с уменьшением тока. При понижении температуры от 300 до 77 К максимумы на кривых  $\eta_{\text{eff}}(I)$  сдвигаются в область меньших токов, что говорит о том, что до токов 20-50 мА уменьшение эффективности с током не связано с перегревом структуры протекающим током.

Прямые вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследованных  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  структур, измеренные на постоянном напряжении, близки к характеристикам, наблюдавшимся ранее у голубых светодиодов на основе GaN [5, 6]. В этих работах был сделан вывод о доминировании туннелирования в механизме прохождения тока.

При малых напряжениях в исследованных структурах были обнаружены переходные токи, по величине на несколько порядков превосходящие избыточные стационарные туннельные токи. Сопоставление немонотонного поведения переходных и стационарных ВАХ, а также анализ зависимостей соответствующих дифференциальных проводимостей  $dI/dV$  от напряжения, интерпретированы исходя из представлений о туннелировании и захвате электронов на состоянии, локализованные на гетерограницах  $\text{InGaN}/\text{GaN}$ .

Оригинальная часть начинается с анализа зависимостей эффективности электролюминесценции  $\eta_{\text{eff}}$  исследованных  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}/\text{GaN}$  светодиодных структур от прямого тока при различных температурах. Установлено, что в диапазоне токов  $10^{-4} \div 50$  мА токовые зависимости эффективности имеют колоколообразный вид в области температур 77 – 300 К. При комнатной температуре эффективность электролюминесценции максимальна при 2-4 мА и уменьшается как с ростом, так и с уменьшением тока. При понижении температуры

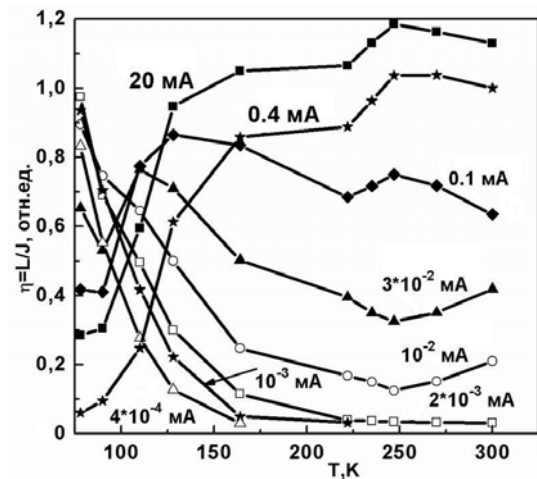


Рис. 2. Температурные зависимости эффективности электролюминесценции  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}/\text{GaN}$  светодиодной структуры.

На рис. 2 приведены температурные зависимости эффективности электролюминесценции голубого светодиода, измеренные при различных плотностях прямого тока. Ранее в литературе отмечалось anomальное уменьшение эффективности электролюминесценции голубых  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодов с понижением температуры, наблюдавшееся при достаточно больших величинах прямого тока [3]. При этом эффективность фотолуминесценции с понижением температуры возрастала.

В работе обнаружено, что anomальное уменьшение эффективности при охлаждении наблюдается только в области больших токов,  $I > \sim 1$  мА. Температурное поведение эффективности электролюминесценции при малых токах имеет противоположный характер, и в области малых токов,  $I < \sim 50$  мкА, эффективность увеличивается при понижении температуры. Выраженные ступени на температурных зависимостях прямого тока и эффективности, наблюдающиеся вблизи 150 и 250 К в широком диапазоне токов, позволяют сделать вывод, что эффективность при малых и больших уровнях инжекции определяется рекомбинацией на одних и тех же состояниях. Вид этих зависимостей указывает на присутствие двух групп состояний на интерфейсах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ .

Детальный анализ полученных экспериментальных данных позволил предложить туннельно-рекомбинационную модель избыточного тока  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодных структур. Модель включает туннелирование электронов сквозь потенциальный барьер в n-GaN, их захват в локализованные состояния на гетерогранице  $\text{InGaN}/\text{p-GaN}$  и рекомбинацию с дырками, термически активированными над барьером в p-GaN (рис. 3). При малых напряжениях доминирует захват электронов. Рекомбинационный ток резко увеличивается при росте плотности дырок на интерфейсе с напряжением вблизи напряжения включения светодиода. Присутствие заряженных состояний на границе раздела изменяет распределение диффузионного потенциала и внешнего напряжения в структуре. При этом зонная диаграмма n-GaN/  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{p-GaN}$  гетероструктуры и электрические характеристики зависят не только от уровня легирования слоев n-GaN ( $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), и p-GaN ( $N_a = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), но и

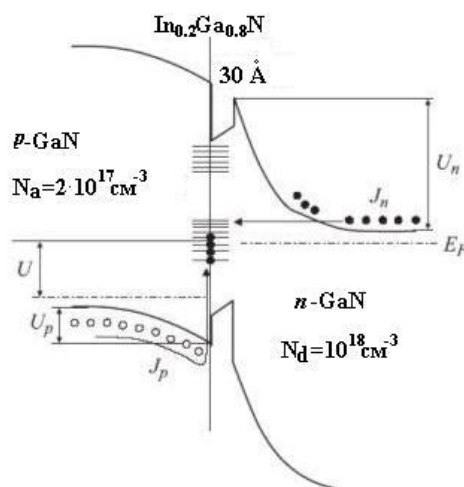


Рис. 3. Схематическая энергетическая диаграмма  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}/\text{GaN}$  структуры.



от величины заряда, локализованного в области интерфейсов. Пиннинг уровня Ферми на гетерогранице с высокой плотностью состояний подавляет инжекцию носителей заряда в квантовую яму и является основной причиной снижения эффективности при больших токах.

Туннельно-рекомбинационная модель избыточного тока  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодных структур подтверждена измерениями ВАХ и вольт-яркостных характеристик  $n\text{-GaN}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/p\text{-GaN}$  структур фиолетовых светодиодов. В этих структурах наблюдаются ВАХ, близкие к ВАХ голубых светодиодов. Однако при росте тока вплоть до нескольких миллиампер наблюдается лишь слабая электролюминесценция, не зависящая от величины тока, что связано с подавлением инжекции носителей заряда в квантовую яму. При дальнейшем увеличении тока яркость фиолетовой структуры растет с током медленней, чем в голубых структурах.

На основании емкостных измерений была оценена плотность состояний на границах, составившая  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Предполагается, что наиболее вероятными источником глубоких состояний, ответственных за пиннинг уровня Ферми на гетерогранице  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ , являются водородсодержащие комплексы на гетерогранице  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  и дислокациях.

С помощью цифровых микрофотографий электролюминесценции обнаружена неоднородность электролюминесценции в области участка структуры вблизи и под  $p$ -контактной площадкой. Неоднородность инжекции по площади структуры связывается с механическими напряжениями, создаваемые металлизацией  $p$ -слоя GaN.

Установлено, что при частичной деградации структуры, происходит увеличение емкости структуры, вследствие роста числа состояний на интерфейсе. Это так же подтверждается замедлением распространения интенсивности излучения по площади светодиодной структуры.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния перегрева активного слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуры протекающим током на эффективность и оптическую мощность голубых светодиодов, расчетам допустимых электрических режимов и поиску возможностей устранения перегрева. Приводится обзор методик определения температуры активного слоя и обзор светодиодных упаковок различных производителей.

В работе проанализирован вклад инжекционных и джоулевых потерь в уменьшение эффективности при увеличении рабочего тока  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуры. Для разделения влияния инжекционных и джоулевых потерь на мощность излучения и эффективность исследовались зависимости интенсивности электролюминесценции  $L(I)$  в

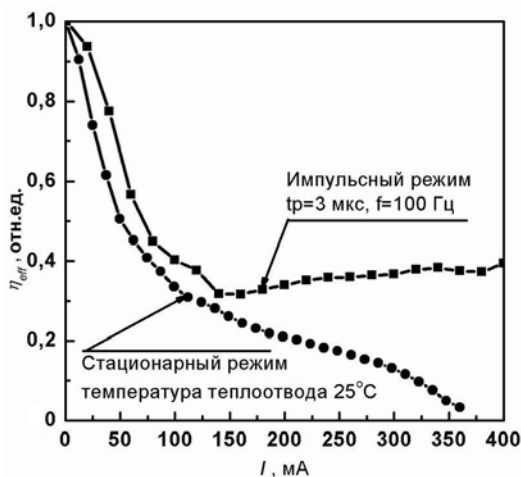


Рис. 4. Токовые зависимости эффективности электролюминесценции.

есть инжекционными потерями вплоть до токов  $\sim 150$  мА (рис 4). При дальнейшем росте тока доминирующим становится перегрев структуры.

Тепловой анализ светодиода на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  структуры проведен с учетом растекания теплового потока, генерируемого в активной области  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  структуры, в пленку GaN, сапфировую подложку, монтажное основание, катодный вывод и рассеивания тепла от радиатора в окружающую атмосферу. Показано, что при оптимальном теплоотводе достижимый минимальный перегрев активной области индикаторного светодиода ограничивается тепловым сопротивлением сапфировой подложки и равен  $R_{\text{min}} \approx 30$  К/Вт. Температура InGaN активной области ( $T_J$ ) при упаковке  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  структуры в стандартный корпус индикаторного светодиода с диаметром 5 мм была определена с помощью термопары, помещенной в отверстие  $\varnothing 0.2$  мм, просверленное в эпоксидном корпусе и монтажном основании. С учетом тепловых сопротивлений сапфировой подложки и ее теплового контакта с основанием при рабочем токе 20 мА  $T_J = 54$  °С. Увеличение сечения катодного вывода позволило уменьшить тепловое сопротивление светодиода от 420 до 170 К/Вт и снизить  $T_J$  до 40 °С.

Для изучения влияния температуры на оптическую мощность светодиода было проведено исследование работы

импульсном режиме работы светодиода. Получены токовые зависимости дифференциальной эффективности электролюминесценции  $\eta_{\text{eff}} \equiv dL/dI$  (I) в импульсном и стационарном режимах работы в диапазоне токов от 1 до 400 мА.

Их анализ показал, что в условиях эффективного теплоотвода, при закреплении  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$  структуры на элементе Пельтье, поддерживающем температуру теплоотвода 25 °С, эффективность определяется

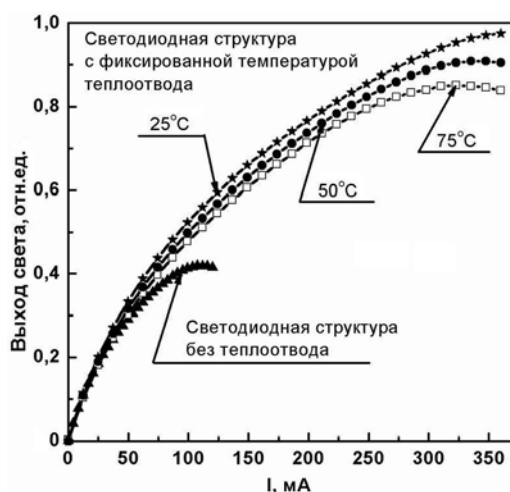


Рис. 5 Токовые зависимости интенсивности электролюминесценции.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуры в условиях фиксированной температуры материала радиатора (рис.5). Установлено, что предельные значения рабочих токов при эффективном теплоотводе могут быть увеличены в 5-7 раз.

Установлена максимально допустимая температура активной области  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуры:  $T_{\max} \approx 135 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В работе также проведен расчет необходимой площади поверхности радиатора в зависимости от потребляемой светодиодом мощности и от температуры активной области. Расчет передачи тепла от радиатора в окружающую среду проводился с учетом естественной конвекции и лучистого теплообмена. Отмечена перспективность разработки структур, способных работать при температуре активной области  $200\div 300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это позволило бы уменьшить размеры радиаторов в лампах твердотельного освещения.

Предложен новый вид упаковки мощного светодиода с малым тепловым сопротивлением. Определены допустимые тепловые режимы и предельные возможности повышения оптической мощности и эффективности светодиода в предложенной упаковке при использовании его в качестве твердотельной осветительной лампы.

**Третья глава** содержит исследование влияния поглощения и рассеяния света, генерируемого в активной области, на вывод света из  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  структур и эффективность голубого светодиода.

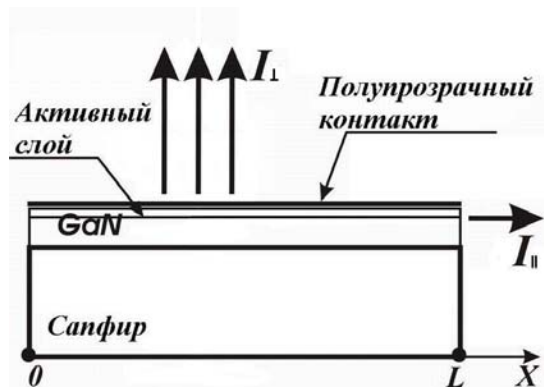


Рис. 6. Двумерная модель светодиодной структуры.

Глава содержит обзор оптических свойств и методов увеличения вывода света из  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодных структур. Предлагаемые методы включают, в основном, изменение текстуры поверхности сапфировой подложки и пленок GaN или формы и размеров светодиодной структуры. В то же время проблема увеличения вывода света тесно связана с оптическими свойствами пленок GaN, прежде всего с поглощением и рассеянием на длине волны генерируемого света, зависящими от плотности дислокаций и примесей в GaN.

В связи с этим в работе проведен анализ оптических потерь в светодиодной структуре, который в совокупности с экспресс-измерениями коэффициента ослабления света, позволит оптически характеризовать и оптимизировать выращенный материал.

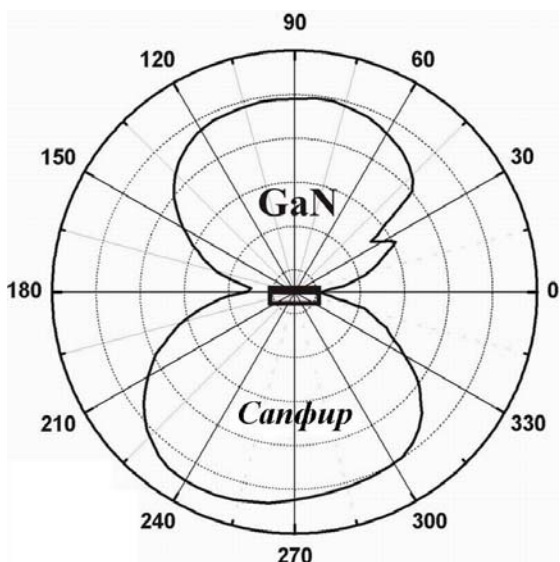


Рис. 7. Угловая зависимость интенсивности света, выходящего из светодиодной структуры.

ную и боковую поверхности нашей модели. Отношение этих потоков является функцией от коэффициента ослабления света  $\alpha$ :

$$\frac{I_{\parallel}}{I_{\perp}} = \frac{0.75(1 - \exp(-\alpha L))}{\kappa \alpha L},$$

где  $\kappa$  - коэффициент пропускания полупрозрачного металлического контакта,  $L$  – линейный размер структуры. Под коэффициентом ослабления подразумевается суммарный коэффициент, определяющийся поглощением и рассеянием света в слое нитрида галлия.

Показано, что полученное выражение применимо для определения коэффициента ослабления света в исследуемой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуре.

Отношение  $I_{\parallel} / I_{\perp}$  определялось из эксперимента. В целях повышения точности снимались полные угловые зависимости интенсивности электролюминесценции исследуемой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуры рис. 7. К контактам светодиодной структуры, с помощью термокомпрессии, приваривались золотые проволочки. На этих проволочках структура закреплялась в подвешенном состоянии на контактных распорках и прикреплялась к синхронному двигателю таким образом, чтобы ось симметрии светодиодной структуры совпадала с осью вращения двигателя. Фотодетектор с диафрагмой помещался на расстояние 60 мм, значительно превышающее линейные размеры светодиодной структуры,  $L = 0.27$  мм. Это расстояние и выбранный диаметр диафрагмы обеспечивали угловое разрешение эксперимента равное  $1.8^{\circ}$ . Погрешность, вносимая выбранным угловым разрешением, была в пределах  $2.5 \cdot 10^{-2}$ . Существенную погрешность в эксперимент вносило наличие сколов и неров-

В работе рассматривается упрощенная двумерная модель светодиодной структуры, состоящей из сапфировой подложки толщиной 100 мкм, слоя GaN толщиной 2.5 мкм и полупрозрачного металлического контакта (рис 6.). Считается, что сечение светодиодной структуры имеет идеальную прямоугольную форму. Генерация света происходит в активном слое, находящемся на расстоянии 0.25 мкм от верхней границы GaN. Выводятся выражения для потоков излучения  $I_{\perp}$  и  $I_{\parallel}$ , выходящих строго по нормали через верх-

ностей на торцах, возникающих при технологическом скрайбировании исследуемых структур. Это проявлялось в небольшой асимметрии углового распределения (рис.7).

Полученные из эксперимента значения отношения  $I_{\parallel} / I_{\perp}$  с учетом погрешности лежат в пределе между 0.23 и 0.32, что соответствует коэффициенту ослабления для света с длиной волны 465 нм,  $90 \pm 15 \text{ см}^{-1}$ . Это значение лежит в диапазоне значений 4 – 150  $\text{см}^{-1}$ , указанных в работах [7-9].

В заключительной части главы, в рамках геометрической оптики, проведен анализ основных каналов выхода света, генерируемого в активной области  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуры с учетом его поляризации.

### **Основные результаты и выводы**

1. Впервые исследованы переходные токи в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодных структурах. Обнаружено, что переходные токи по величине превосходят стационарные на несколько порядков.

2. Захват носителей заряда состояниями гетерограниц  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  определяет токочный транспорт при малых прямых напряжениях.

3. Переходные и стационарные ВАХ, температурные зависимости эффективности электролюминесценции и тока объясняются в рамках туннельно-рекомбинационной модели протекания тока в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодных структурах, в предположении существования двух групп состояний на гетерограницах.

4. Уменьшение эффективности электролюминесценции с ростом прямого напряжения в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодных структурах связано с увеличением тока, обусловленного безызлучательной рекомбинацией на гетерограницах.

5. Механические напряжения, создаваемые металлизацией  $p$ -слоя GaN, приводят к неоднородности инжекции по площади  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  светодиодной структуры.

6. Оценена плотность состояний на гетерограницах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ , составившая  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

7. Обнаружена временная задержка (~20-40 нс) в распределении интенсивности электролюминесценции по площади светодиодов после их деградации, связанная с увеличением емкости структуры.

8. Выход света из обычных GaN структур может быть увеличен в 3 раза при увеличении рабочего тока в 5 раз и обеспечении отвода тепла новой конструкцией корпуса светодиода.

9. Предложена классификация светодиодов по мощности в зависимости от способа охлаждения.

10. Предложена методика, и определен коэффициент ослабления света в исследуемых светодиодных структурах. Коэффициент ослабления составил  $90 \pm 15$  см на длине волны 465 нм.

11. Проведена оценка выхода света из светодиодной структуры на основе геометрической оптики с учетом поляризации генерируемого света в квантовой яме, его отражения и ослабления в GaN слое.

## Список цитируемой литературы

1. Nakamura S., Makui T., Senon M. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.*, 1994, vol. 64, p.1687.
2. Mukai T., Yamada M., Nakamura S. Characteristics of InGaN-Based UV/Blue/Green/Amber/Red Light-Emitting Diodes // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, vol. 38, p.3976
3. Hori A., Yasunaga D., Satake A., K. Fujiwara. Temperature dependence of electroluminescence intensity of green and blue InGaN single-quantum well light-emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.*, 2001, vol. 79, p.3723.
4. Fujii T., Gao Y., Sharma R., Hu E.L., DenBaars S.P., Nakamura S. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening // *Appl. Phys. Lett.*, 2004, vol. 84, p.855.
5. Casey H.C., Muth Jr., J, Krishnankutty S., Zavada J.M. Dominance of tunneling current and band filling in InGaN/AlGaN double heterostructure blue light-emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 68, p.2867.
6. Morkoc H. Nitride Semiconductors and Devices / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999
7. Schad S., Neubert B., Eichler C., Scherer M., Habel F., Seyboth M., Scholz F., Hofstetter D., Unger P., Schmid W., Karnutsch C., Streube K. Absorption and Light Scattering in InGaN-on-Sapphire- and AlGaInP-Based Light-Emitting Diodes // *J. of Lightwave Technology*, 2004, vol. 22, p.2323.
8. Ambacher O., Rieger W., Ansmann P., Angerer H., Moustakas T.D., Stutzman M. Sub-bandgap absorption of gallium nitride determined by photothermal deflection spectroscopy // *Sol. State Commun.*, 1996, vol. 97 (5), p.365.
9. Brunner D., Angerer H., Bustarret E., Freudenberg F., Hopler R., Dimitrov R., Ambacher O., Stutzmann M. Optical constants of epitaxial AlGaIn films and their temperature dependence // *J. Appl. Phys.*, 1997, vol. 82, p.5090.

### Список включенных в диссертацию работ.

1. Ефремов А.А., Шретер Ю.Г., Ребане Ю.Т., Н.И., Бугров В.Е., Горбунов Р.И. Светодиодные лампы: Проблема смешивания цветов // Тез. докладов четвертой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Санкт-Петербург. Изд.-во СПбГПУ, 2002, с.102.
2. Ефремов А.А., Тархин Д.В., Бочкарева Н.И., Горбунов Р.И., Ребане Ю.Т., Шретер Ю.Г. Определение коэффициента ослабления света в тонких слоях светодиодных структур // ФТП, 2006, т. 40, вып. 3, с. 383-388.
3. Бочкарева Н.И., Zhirnov E.A., Ефремов А.А., Ребане Ю.Т., Горбунов Р.И., Шретер Ю.Г. Туннельно-рекомбинационные токи и эффективность электролюминесценции InGaN/GaN светодиодов // ФТП, 2005, т.39, вып. 5, с.627-632.
4. Бочкарева Н.И., Жирнов Е.А., Ефремов А.А., Ребане Ю.Т., Горбунов Р.И., Клочков А.В., Лавринович Д.А., Шретер Ю.Г. Влияние состояний на границах раздела на емкость и эффективность электролюминесценции InGaN/ GaN-светодиодов // ФТП, 2005, т. 39, вып. 7, с.829-833.
5. Бочкарева Н.И., Ефремов А.А., Ребане Ю.Т., Горбунов Р.И., Клочков А.В., Шретер Ю.Г. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов // ФТП, 2006, т. 40, вып. 1, с.122-127.
6. Ефремов А.А., Бочкарева Н.И., Горбунов Р.И., Лавринович Д.А., Ребане Ю.Т., Тархин Д.В., Шретер Ю.Г. Тепловые режимы голубых InGaN/GaN светодиодов // ФТП, 2006, т. 40, вып. 5, с.656-669.