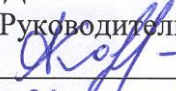


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра полупроводниковой электроники

ДОПУСТИТЬ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ГЭК
Руководитель ООП к. ф.-м. наук
 А.Г. Коротаев
« 20 » июня 2019 г.

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД


об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы
(диссертации)

ВЛИЯНИЕ ВСТРОЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПЕРЕНОС НОСИТЕЛЕЙ
ЗАРЯДА В ИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУРАХ InGaN/GaN

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в
аспирантуре
направление подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия

Копьев Виктор Васильевич

Научный руководитель
канд. физ.-мат. наук

 И.А. Прудаев
« 20 » июня 2019 г.

Автор работы
аспирант

 В.В. Копьев

Актуальность работы

Гетероструктуры на основе множественных квантовых ям и сверхрешеток InGaN/GaN преимущественно выращиваются методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Ранее в многочисленных научных работах было установлено, что микроструктура слоев InGaN зависит от множества технологических факторов, которые достаточно сложно, а зачастую и невозможно учесть при моделировании приборов с использованием современных средств.

Известно, что в активной области светодиодов с квантовыми ямами присутствуют сильные встроенные электрические поля. Это приводит к формированию сильной пространственной неоднородности поля, которая становится тем сильнее, чем выше содержание InN в материале. В литературе для анализа экспериментальных данных по транспорту носителей в квантовых ямах InGaN/GaN зачастую используется условие квазиравновесия, которое для области низких температур будет некорректным.

При относительно высокой доле InN (более 20 %) происходит релаксация упругих напряжений в структурах с квантовыми ямами InGaN/GaN с образованием дислокаций несоответствия. Исследование кристаллического совершенства слоев InGaN указывает на наличие в них локализованных областей, обогащенных индием, возникающих за счет фазового распада твердого раствора, и флуктуации толщины. Высокая плотность прорастающих дислокаций создает хвосты плотности состояний в барьерах GaN между различными квантовыми ямами. В итоге структуры с квантовыми ямами и сверхрешетками InGaN/GaN становятся достаточно сложными, для того чтобы можно было провести детальный теоретический анализ физических процессов, протекающих в них.

Эффекты резонансного туннелирования ранее были обнаружены и описаны для родственных гетероструктур AlGaIn/GaN. Для образцов со сверхрешетками и квантовыми ямами InGaIn/GaN в литературе не представлено экспериментальных данных по резонансному туннелированию, что может быть связано с наличием большого количества дефектов, вызванных флуктуацией состава твердого InGaIn, и высокой плотностью прорастающих дислокаций в них.

Не представляется возможным получить согласие расчетных и экспериментальных вольт-амперных характеристик светодиодов с множественными квантовыми ямами InGaIn/GaN во всем интервале рабочих температур. Удовлетворительное описание вольт-амперных характеристик было получено при решении уравнений Пуассона и непрерывности без учета квантово-размерных эффектов для температур выше комнатной. Все эти вопросы требовали своего теоретического рассмотрения и экспериментальных исследований, поэтому их решение является актуальным.

Объект, предмет, цель и задачи исследования

В качестве *объекта* исследований были выбраны структуры с множественными квантовыми ямами и сверхрешетками $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ($x = 0.12 - 0.15$).

Целью работы является выявление особенностей влияния встроенных электрических полей на механизмы переноса носителей заряда и вид зависимостей квантового выхода от мощности в широком диапазоне температур для гетероструктур на основе множественных квантовых ям и сверхрешеток InGaIn/GaN.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

1. Разработка и монтаж экспериментальных установок для измерения спектров фото- и электролюминесценции, вольт-амперных характеристик в структурах с множественными квантовыми ямами и сверхрешетками InGaIn/GaN.

2. Исследование люминесцентных свойств монополярных и биполярных структур с множественными квантовыми ямами и сверхрешетками InGaIn/GaN с различными параметрами в режимах электро- и фотолюминесценции для выявления влияния на спектры и квантовый выход плотности накачки и температуры.

3. Исследование вертикального транспорта носителей заряда в гетероструктурах различного типа в интервале температур от 10 до 400 К методом вольт-амперных характеристик.

4. Выявление условий наблюдения участков отрицательной дифференциальной проводимости на статических вольт-амперных характеристиках, соответствующих резонансным переходам носителей между уровнями размерного квантования в различных квантовых ямах InGaN/GaN.

Предметом исследований в работе является физико–математическая модель процессов, имеющая место в активной области структур с множественными квантовыми ямами и сверхрешетками InGaN/GaN, в области температур ниже комнатной и в интервале плотностей тока от 100 пА/см² до 100 А/см².

Научная новизна

1. Для гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN в диапазоне криогенных температур участки отрицательного сопротивления на прямых и обратных ветвях вольт-амперных характеристик обнаружены впервые.

2. В ходе экспериментов обнаружено, что снижение температуры приводит к росту утечек при постоянной плотности тока в режиме электролюминесценции для светодиодных структур с множественными квантовыми ямами In_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN.

3. Установлено впервые, что, наряду с термически активированной инжекцией, в формирование вольт-амперной характеристики светодиодной структуры с множественными квантовыми ямами In_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN даёт вклад инжекция дырок из примесных состояний Mg.

Практическая и научная значимость

Научная значимость полученных результатов обусловлена тем, что предложенные модели транспорта и инжекции носителей из примесных состояний Mg и над квантовыми ямами InGaN/GaN вносят огромный вклад в понимание процессов, протекающих в активной области светодиодных гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN.

Полученные результаты имеют большую *практическую значимость*. С использованием полученных данных в будущем возможна разработка технологии управления свойствами нитридных структур с целью оптимизации активной области существующих и новых приборов (светодиодов и лазеров видимого диапазона длин волн, фотоприемников и солнечных элементов, НЕМТ транзисторов, резонансно-туннельных, генераторных и усилительных диодов).

Методология исследования

В работе проводилось исследование модельных «моноплярных» структур *n*-GaN/Квантовые ямы (*n*-InGaN-GaN)/*n*-GaN/*i*-GaN, содержащими только один тип носителей. В таких модельных структурах исключается роль рекомбинационных процессов и упрощается, интерпретация экспериментальных результатов.

Для исследований были выбраны три структуры, выращенные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на сапфировой подложке с ориентацией (0001). Схематически структуры представлены на рисунке 1, *a*. Последовательность роста была следующей: зародышевый слой GaN толщиной 50 нм, толстый буферный слой *i*-GaN, легированный Si слой *n*-GaN, десятипериодная область InGaN/GaN с толщиной квантовых ям *n*-In_{0.15}Ga_{0.85}N – 3 нм, и верхний слаболегированный слой *n*-GaN. Структуры отличались толщиной барьеров GaN – 3, 6 и 12 нм.

Изменение напряженности встроенных электрических полей, вызванных механическими упругими напряжениями на гетерограницах (пьезополей) проводилось за счет изменения толщины барьеров между квантовыми ямами InGaN/GaN.

Экспериментальные образцы светодиодных гетероструктур представляли собой структуры $p\text{-GaN}/p\text{-AlGaN}/\text{Квантовые ямы (InGaN-GaN)}/n\text{-GaN}/i\text{-GaN}$, которые были выращены методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на сапфировых подложках с ориентацией (0001). Общий вид светоизлучающих структур представлен на рисунке 1, б.



Рисунок 1 – Схематические изображения монополярной (а) и светодиодной (б) структур с активной областью на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN

В ходе экспериментов измеряли вольт-амперные характеристики гетероструктур и зависимость квантового выхода от плотности тока в интервале температур от 10 до 400 К с использованием криостата и источника-измерителя Keithley 2636А. При плотности тока от 3 до 300 А/см² измерения проводили в импульсном квазистационарном режиме с использованием осциллографа LeCroy104Xs.

В работе проводилось измерение температурных и мощностных зависимостей внешнего и внутреннего квантовых выходов гетероструктур в режимах электролюминесценции и фотолюминесценции в широком диапазоне температур. Фотолюминесценция возбуждалась импульсным YAG:Ni-лазером со средней мощностью 22.4 мВт (частота 1 кГц, длительность импульсов 10 нс, длина волны 355 нм) или полупроводниковым лазером с импульсной мощностью – 4 Вт (длительность – 15 нс, $\lambda = 405$ нм). Сигнал люминесценции измерялся при помощи оптоволоконной спектрометрической системы Ocean Optics USB2000+.

Основные результаты исследования

Исследован транспорт носителей заряда в монополярных структурах с квантовыми ямами InGaN/GaN.

1. Установлено, что напряженности встроенного поля составляют -0.84, -1.17 и -1.28 МВ/см для структур с барьерами GaN 3, 6 и 12 нм соответственно. Таким образом, уменьшение толщины барьеров приводит к релаксации упругих напряжений и снижению напряженности встроенного поля в барьерах и квантовых ямах структур. Были рассчитаны положения максимумов спектров фотолюминесценции в зависимости от величины встроенного поля. Наблюдается удовлетворительное совпадение экспериментальной и расчетной значений данной величины.

2. Экспериментально найдены эффекты резонансного туннелирования в гетероструктурах с квантовыми ямами InGaN/GaN. На прямой ветви вольт-амперных характеристик обнаружены сдвоенные пики проводимости, которые свидетельствуют о том, что в структурах с квантовыми ямами InGaN/GaN наблюдается множественный характер разрешенных уровней энергии в пределах одного периода сверхрешетки InGaN/GaN. Этот результат объясним с учетом сильных встроенных электрических полей с напряженностью порядка 1 МВ/см в области барьеров.

Экспериментально исследован транспорт носителей заряда в светодиодных структурах «синего» диапазона с КЯ InGaN/GaN.

1. Установлено, что в условиях отклонения от равновесного состояния, в области криогенных температур и невысоких прямых напряжений (менее 3 – 4 В) транспорт

носителей заряда описывается в рамках диффузионно-дрейфового приближения с учетом инжекции дырок из примесных состояний Mg с последующим туннелированием в барьерах GaN.

2. Обнаружено, что, при низких температурах, в области высоких прямых напряжений (более 3 – 4 В) транспорт носителей заряда имеет баллистический характер, что проявляется в резком росте тока при увеличении напряжения и уменьшении квантового выхода. Показано, что при высокой плотности тока может наблюдаться инверсия температурной зависимости квантового выхода, когда квантовый выход резко возрастает при увеличении температуры.

Использована модель баллистической утечки, учитывающая увеличение сопротивления области множественных квантовых ям при снижении температуры. Анализ результатов моделирования показал, что при температурах ниже 220 К снижение квантового выхода обусловлено баллистической утечкой электронов в p -область над квантовыми ямами InGaN/GaN, в то время как при температурах выше комнатной спад связан также и с оже-рекомбинацией.

Сильные встроенные электрические поля в наногетероструктурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN приводят к появлению эффектов баллистического транспорта при криогенных температурах даже для составов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с относительно небольшими $x = 0.12 - 0.15$, характерными для светоизлучающих диодов и лазеров «синего» диапазона.

Список публикаций по теме исследования

1. Romanov I. S. Effects of GaN barrier thickness on built-in electric field and internal quantum efficiency of blue InGaN/GaN multiple quantum wells LED structures / I. S. Romanov, I. A. Prudaev, V. V. Kopyev // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2016. – Vol. 55. – P. 05FJ15–1–4.

2. Kopyev V. V. Resonant tunneling of charge carriers in InGaN/GaN superlattice / V. V. Kopyev, I. A. Prudaev, V. L. Oleynik // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2017. – Vol. 864, №1. – P.012052–1–4.

3. Прудаев И. А. Температурная зависимость квантового выхода структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN при фото- и электролюминесценции / И. А. Прудаев, И. С. Романов, В. В. Копьев, С. Б. Ширапов, О. П. Толбанов, С. С. Хлудков // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56, № 7. – С. 30–32.

4. Копьев В. В. Падение эффективности в светодиодных структурах на основе InGaN/GaN при фото- и электролюминесценции / В. В. Копьев, И. А. Прудаев, И. С. Романов // *Изв. вузов. Физика.* – 2015. – Т. 58, № 8/2. – С. 135–138.

5. Романов И. С. Влияние толщины барьеров светодиодных гетероструктур (0001) InGaN/GaN/Al₂O₃ на их оптические характеристики / И. С. Романов, И. А. Прудаев, В. Н. Брудный, В. В. Копьев, Вад. А. Новиков, А. А. Мармалюк, В. А. Курешов, Д. Р. Сабитов, А. В. Мазалов // *Изв. вузов. Физика.* – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 110–113.

6. Прудаев И. А. Температурная зависимость квантового выхода светодиодных структур InGaN/GaN при высокой плотности тока / И. А. Прудаев, В. В. Копьев, И. С. Романов, В. Н. Брудный // *Изв. вузов. Физика.* – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 53–56.

7. Прудаев И. А. Влияние баллистической утечки на температурную зависимость квантового выхода светодиодов на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN / И. А. Прудаев, В. В. Копьев, И. С. Романов, В. Л. Олейник // *ФТП.* – 2017. – Т. 51, № 2. – С. 240–246.

8. Романов И. С. Внутренняя квантовая эффективность светодиодных структур при различных распределениях носителей заряда по квантовым ямам InGaN/GaN / И. С. Романов, И. А. Прудаев, В. В. Копьев // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2018. – Т. 61, № 2. – С. 9–11.

Отчет о проверке на заимствования №1



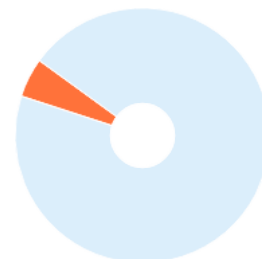
Автор: Копьев Виктор viktor.kopev@gmail.com / ID: 6354554
Проверяющий: Копьев Виктор (viktor.kopev@gmail.com / ID: 6354554)
 Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»- <http://users.antiplagiat.ru>

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 2
 Начало загрузки: 20.06.2019 11:22:23
 Длительность загрузки: 00:00:01
 Имя исходного файла: Научный доклад Копьев В.В
 Размер текста: 172 кБ
 Символов в тексте: 13967
 Слов в тексте: 1723
 Число предложений: 184

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
 Начало проверки: 20.06.2019 11:22:25
 Длительность проверки: 00:00:05
 Комментарии: не указано
 Модули поиска: Модуль поиска Интернет



| ЗАИМСТВОВАНИЯ | ЦИТИРОВАНИЯ | ОРИГИНАЛЬНОСТЬ |
|---------------|-------------|----------------|
| 5,17% | 0% | 94,83% |

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
 Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.
 Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.
 Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.
 Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.
 Заимствования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.
 Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

| № | Доля в отчете | Доля в тексте | Источник | Ссылка | Актуален на | Модуль поиска | Блоков в отчете | Блоков в тексте |
|------|---------------|---------------|------------------------------|---|-------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| [01] | 2,02% | 2,02% | Программа фестиваля Ради... | http://tsu.ru | 25 Дек 2014 | Модуль поиска Интернет | 4 | 4 |
| [02] | 1,42% | 1,42% | Физика и техника полупров... | http://i.urau.ru | 16 Янв 2018 | Модуль поиска Интернет | 1 | 1 |
| [03] | 1,21% | 1,21% | 3 Физико-технический инст... | http://lib.knigi-x.ru | 07 Ноя 2017 | Модуль поиска Интернет | 2 | 2 |

Еще источников: 2
 Еще заимствований: 0,52%