

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.3.049.776.21

Гаронин
Вадим Павлович

Моделирование полупроводниковых структур $A^{III}B^V$ в программном
комплексе COMSOL Multiphysics

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 01 "Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах"

Научный руководитель
Степанов Андрей Анатольевич
кандидат технических наук,
доцент

Минск 2019

ВВЕДЕНИЕ

Со времени своей первоначальной экспериментальной демонстрации в Fujitsu Labs в 1980 году, транзистор с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ), основанный на многокомпонентном полупроводниковом гетеропереходе на основе GaN начали широко использовать в радиочастотных устройствах, для которых малошумящие и высокочастотные характеристики являются наиболее важными. За последние несколько десятилетий исследований по ТВПЭ на основе A^{III}-нитрида и A^{III}-B^V группы получили значительное развитие. Так как A^{III}-нитриды относятся к A^{III}-B^V семейству, стабильной структура группы A^{III}-нитридов, то структура GaN, представляет собой гексагональный вюрцит.

GaN привлек к себе значительное внимание как основной материал для производства высокоскоростных и мощных электронных устройств благодаря его широкой запрещенной зоны, высокой подвижности электронов и большого значения напряжения пробоя. В частности, ТВПЭ на основе GaN в форме Al(Ga)N/GaN ТВПЭ, рассматривается как усилитель мощности следующего поколения для беспроводной связи и преобразователя энергии в энергетических устройствах. Две основные проблемы, связанные с GaN ТВПЭ - это утечка на затворе и нестабильность постоянного тока в радиодиапазоне.

Благодаря возможности изменять, ширину запрещенной зоны в диапазоне 0,7–6,2 эВ, материалы A^{III}-N так же заслуживают большого внимания для изготовления светодиодов, в том числе и видимого спектра света, используемых в качестве источников освещения. Монолитная интеграция ТВПЭ и светодиодов на основе GaN может устранить паразитные индуктивности и значительно минимизировать размер драйвера светодиода.

Учитывая высокую подвижность электронов в A^{III}-B^V ТВПЭ, появляется возможность замены, существующей кремниевой КМОП-технологий на A^{III}-B^V технологии.

В данной диссертации предлагает исследовать электрофизические и механические параметры в устройствах на основе AlGaIn/GaN посредством мультифизического моделирования методом конечных элементов. В отличие от подходов к моделированию на основе квантовой физики, которые широко распространены в литературе, в этом работе используется новый физический подход, объединяющий пьезоэлектрические эффекты, тепловое расширение и электрические условия, присутствующие на границах выбранной модели, чтобы имитировать механические эффекты рабочего устройства при электрическом токе через транзистор. Ожидаемые результаты - это механические деформации, а

также признаки потенциальных сбоев в активном устройстве, выведенные из рассчитанных значений напряжения. Конкретный вклад каждого набора смоделированной физики (то есть пьезоэлектрического, термического, структурного, электрического) в механическое поведение в устройстве будет количественно определен с конкретным анализом того, как каждый из них влияет на другую физику.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель работы состоит в получении комплекса свойств и характеристик для создание многофункционального интегрированного устройства на основе GaN.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Моделирование пьезоэлектрических свойств полевых транзисторов с оптимальной конструкцией для последующей интеграции
2. Моделирование электрофизических свойств светодиодов с оптимальной конструкцией для последующей интеграции
3. Формулирование рекомендации для проектирования многофункциональных полностью интегрированных устройств на основе GaN.

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», в НИЛ 4.7 "Устройства обработки и отображения информации".

Соискателем самостоятельно проведен обзор и анализ научной и патентной литературы, выявлены и оценены современные методы моделирования и изготовления полупроводниковых структур $A^{III}B^V$. Все основные результаты, выводы получены соискателем самостоятельно.

Основные положения и результаты диссертации обсуждались на следующих научных конференциях и форумах и опубликованы в соответствующих сборниках: VI Международная научно-техническая конференция «Светотехника и электроэнергетика: история, проблемы, перспективы», г. Тернополь, Украина, 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов университета БГУИР.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 54 наименований. Общий объем диссертации 84 страницы, в том числе 49 рисунков и 4 таблицы.

Во введении проведено краткое знакомство с областью, в рамках которой проводилась научно-исследовательская работа. Раскрыта актуальность выбранной темы магистерской диссертации, сформулирована цель и поставлены конкретные задачи.

Первая глава диссертационной работы содержит основные выводы обзора и анализа научной литературы в области особенностей использования AlGaN/GaN в электронике и оптоэлектронике. GaN привлек к себе значительное внимание как основной материал для производства высокоскоростных и мощных электронных устройств благодаря его широкой запрещенной зоне, высокой подвижности электронов и большого значения напряжения пробоя. В частности, ТВПЭ на основе GaN в форме Al(Ga)N/GaN ТВПЭ, рассматривается как усилитель мощности следующего поколения для беспроводной связи и преобразователя энергии в энергетических устройствах. Две основные проблемы, связанные с GaN ТВПЭ - это утечка на затворе и нестабильность постоянного тока в радиодиапазоне.

Предлагаемый диэлектрический пассивирующий слой важен для восстановления желаемой производительности. Этот пассивирующий слой в основном функционирует в качестве нейтрализации ловушечных состояний. Несколько типов ловушек расположенные в разных местах по всему слою GaN. Ловушки, расположенные в буфере, всегда приводят к задержке стока, тогда как ловушки на поверхности обычно вызывают задержку сигнала на затворе. Процесс генерации и рекомбинации ловушек может изменить баланс заряда. Различные модели были использованы для объяснения этой нестабильности постоянного тока в радиодиапазоне. Общий подход показывает влияние ловушечных состояний в импульсных $A^{III}-B^V$. Этот подход относительно прост и понятен и может быть непосредственно применен к оценке отклонение напряжения на характеристической кривой импульсной ВАХ. Для обычного усилителя мощности класса А, выходная мощность может быть значительно снижена, что значительно ограничивает выигрыш в характеристиках. Это также применяется и к другим типам усилителей. Более всего на характеристики влияют поверхностные ловушки, которые эффективно нейтрализуются слоем дополнительной диэлектрической пассивации, такой как SiNx, Al₂O₃ или композитным слоем SiNx/Al₂O₃. Барьер и квантовые ловушки создаются за счет

деформации эпитаксиального слоя вблизи канала. Это создает жесткое ограничение по несовпадению параметров решетки и коэффициенту теплового расширения между барьером и каналом для гарантии низкой плотности дефектов. Ток утечки на затворе в существующих ТВПЭ с диодом Шоттки всегда ухудшает шумовые характеристики и создает потенциальную проблему надежности.

Основываясь на опыте с кремниевой технологией, под затвором вставлен диэлектрик с высоким k коэффициентом, чтобы уменьшить ток утечки. Следовательно, металл-оксид-полупроводник ТВПЭ (МОПТВПЭ) или ТВПЭ металл-изолятор-полупроводник (МДПТВПЭ) структуры были разработаны для уменьшения тока утечки в ТВПЭ на основе GaN на несколько порядков.

Во второй главе представлено описание тепловой и пьезоэлектрической модели полевого транзистора на основе GaN. Для решения данной задачи теплового моделирования существует модуль передачи тепла в COMSOL. Этот модуль содержит несколько различных режимов применения, наиболее общий из которых является режимом применения General Heat Transfer. Этот режим приложения дает пользователю возможность включить проводимость, конвекцию и/или излучение в стационарном режиме (то есть стационарные) или переходные (то есть зависящие от времени) условия. Модель, используемая в тепловом моделировании представлена на рисунке 1.

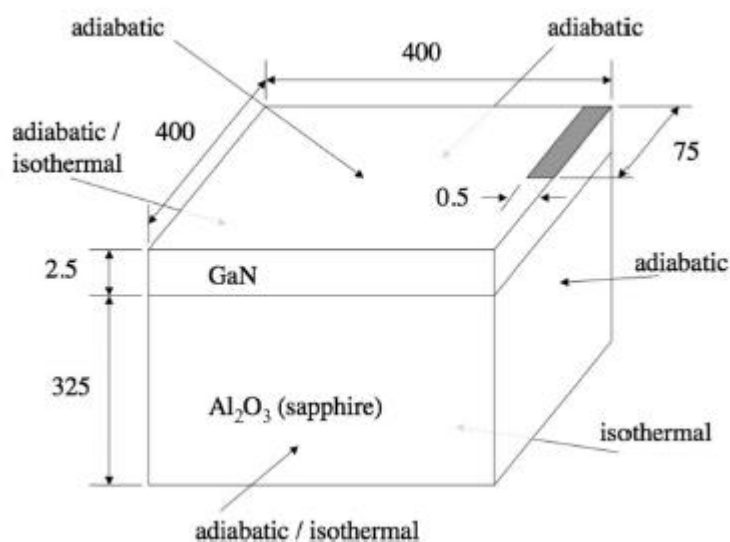


Рис. 1 – Структура трехмерная модель метода конечных элементов

Задачи в этом процессе теплового моделирования состояли в том, чтобы получить решение методом конечных элементов распределение температуры в устройстве, определить температуру канала двумерного электронного газа, а затем проверить результаты модели метода конечных элементов путем наложения результатов моделирования на данные. Поскольку теплопроводность была единственным типом теплообмена, рассмотренным в аналитической модели

Chattopadhyay, и в экспериментальное исследование, выполненное Gregušová и соавт., в этой диссертации использовал уравнению 4 для анализа метода конечных элементов.

GaN и AlGaN являются пьезоэлектрическими материалами. Как таковые, они способны проявлять как прямой пьезоэлектрический эффект, так и обратный пьезоэлектрический эффект. Первое происходит, когда материал испытывает накопление электрического заряда, когда к нему прикладывается прямое механическое напряжение. Последнее как раз наоборот, когда материал испытывает электрическое напряжение, и изменяет форму, согласно приложенному напряжению. Модель пьезоэлектрического моделирования представлена на рисунке 2.

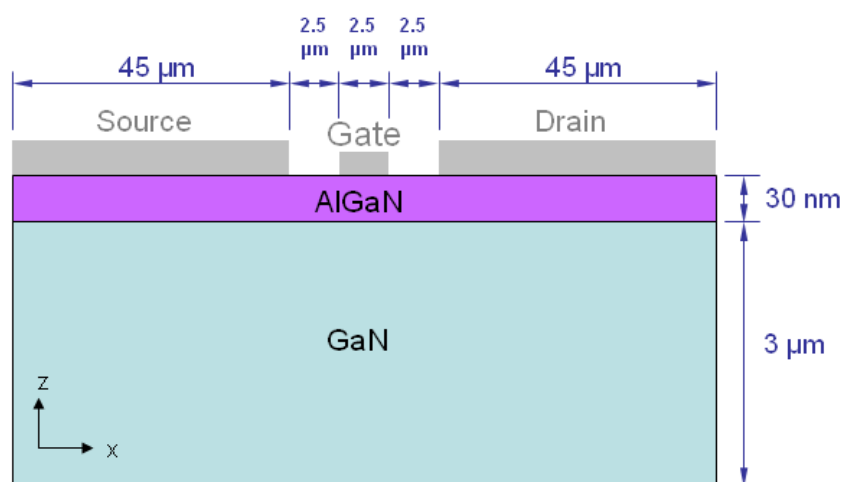


Рис. 2 – Схема модели для пьезоэлектрического анализа.

Интересно, что в ТВПЭ оба вида пьезоэлектрического эффекта (прямой и обратный) воздействуют одновременно, что составляет большой интерес для исследования. Во-первых, прямой пьезоэлектрический эффект возникает, когда высокие температуры в канале создают тепловое напряжение во всем устройстве, что, в свою очередь, создает электрический заряд, который необходимо рассеять. Во-вторых, обратный пьезоэлектрический эффект возникает, когда электрическое поле, прикладываемое к устройству, характеризующееся смещением истока-стока и напряжением затвора, по своей природе создает механическое напряжение. Надлежащая характеристика пьезоэлектрических эффектов, возникающих в приборах ТВПЭ, имеет решающее значение при проектировании и оказывает большое влияние на электрические характеристики.

Геометрия и материалы пьезоэлектрической модели основаны на устройстве ТВПЭ, изученном Gregušová и соавт. Хотя слой AlGaN не был включен в тепловую модели, он имеет решающее значение в пьезоэлектрическом анализе. Идентично

Gregušová и соавт. модель состояла из 30 нм слоя $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ (то есть соединения, состоящего из 25% AlN и 75% GaN), поверх слоя GaN 3 мкм. Источник, затвор и сток были исключены из пьезоэлектрического анализа, поскольку ни один из них не содержал пьезоэлектрических материалов; однако их x-размеры (то есть длины) были важны для граничных условий. Сапфировая (Al_2O_3) подложка также была исключена из пьезоэлектрического соображения, поскольку не является пьезоэлектрическим материалом.

В третьей главе данной диссертационной работы представлена объединенная тепло-пьезо-механическая модель. Ни тепловая модель, ни пьезоэлектрическая модель не учитывали фактические области омического контакта и контакта Шоттки в своих анализах, поскольку их наличие не оказало бы никакого влияния на тепловые и пьезоэлектрические результаты. Тем не менее, эти контакты действительно влияют на механическое поведение в устройстве из-за их теплового расширения и вкладов несоответствия механической жесткости, поэтому они должны быть включены в общую связанную модель для окончательного анализа.

Эти контакты действительно влияют на механическое поведение в устройстве из-за их теплового расширения и вкладов несоответствия механической жесткости, поэтому они должны быть включены в общую связанную модель для окончательного анализа.

Конкретная конфигурация слоев омических контактов Ti/Al/Ni/Au и Шоттки Ni/Au должна быть определена. То, что происходит во время осаждения омических контактов (то есть истока и стока) в устройствах AlGaIn/GaN ТВПЭ, заключается в том, что металлизация уложенных слоев осаждается на слое AlGaIn, затем испаряется для целей затвердевания и, наконец, закрепляется быстрый термическим отжигом при 850°C в течение 30 с в атмосфере N_2 . Ruvimov и соавт. показали, что после завершения отжига структура контакта резко меняется. Уменьшается не только общая контактная структура по толщине, но и образуются новые внутренние сплавы (т.е. диффузия Au через Ni образует сплав Au-Al; расширение сплава Al-Ni на верхней поверхности).

Четвертая глава знакомит нас с электрофизическим моделированием GaN светодиода в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Для моделирования используется только активная область двойного гетероперехода, для одной и двух квантовых ям, из которых испускается световое излучение. Моделируемая структура светодиода с одной квантовой ямой состоит из слоя $\text{In}_{0,06}\text{Ga}_{0,94}\text{N}$ толщиной 50 нм, зажатого между слоями $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N}$ толщиной 0,15 мкм. Моделируемая структура светодиода с двумя квантовыми ямами состоит из AlGaIn от координаты 0 мкм до 0,15 мкм, первой квантовой ямы InGaIn от 0,15 мкм до

0,155 мкм, барьерного слоя $n\text{-AlGaN}$ от 0,155 до 0,165 мкм, вторая квантовой ямы InGaN от 0,165 мкм до 0,170 мкм и $p\text{-AlGaN}$ из 0,170 мкм до 0,310 мкм соответственно.

Поскольку устройство является латерально инвариантным, его можно смоделировать, используя линию, разрезанную в направлении z , как показано на рисунке 3. Площадь поперечного сечения устройства рассчитывается исходя из того, что активная область имеет поперечные размеры 200×200 мкм, что является типичным размером светодиодной мезы. На рисунке 3 показана структура светодиода, на котором основана эта модель. Секция, которая смоделирована, выделена красной полосой. Сверху справа: геометрическая модель области двойной гетероструктуры полного устройства. Внизу справа: легирующий профиль - это PIN -диод с слоем InGaN , образующим внутреннюю область. Подробно описаны представление структуры для моделирования, особенности моделирования полупроводниковой структуры и графические представления интересующих нас параметров и характеристик готовой структуры.

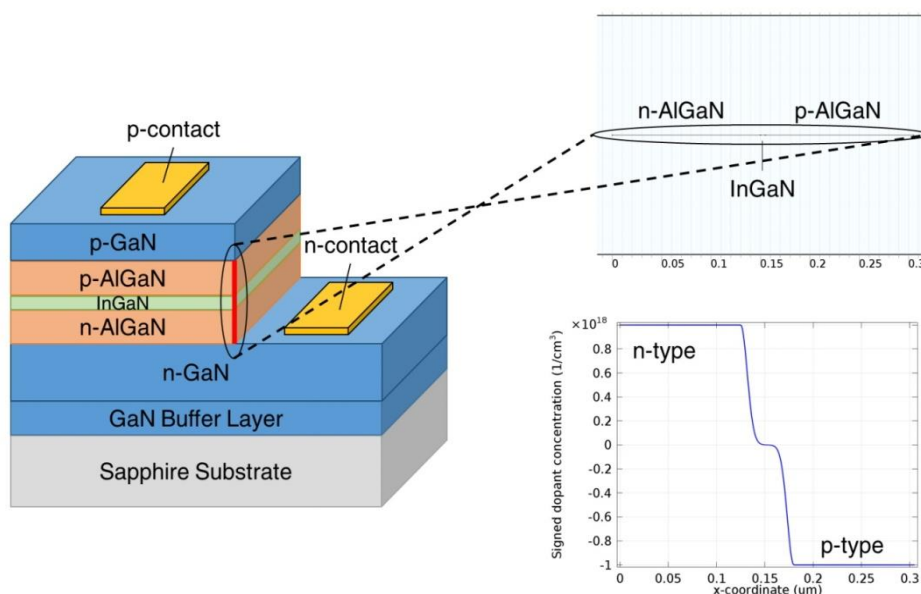


Рисунок 3 – Геометрия и легирование светодиодного устройства

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ структур ТВПЭ на GaN показал, что основными недостатками являются:

1) уменьшение механической прочности в следствие пьезоэлектрической и тепловой деформации;

- 1) нестабильность постоянного тока в радиодиапазоне;
- 2) ток утечки на затворе;
- 3) высокая паразитная емкость на затворе.

Способами устранения перечисленных выше недостатков являются:

- 1) оптимизация конструкции и размеров слоев AlGa_N/Ga_N;
- 2) введение диэлектрического пассивирующих слоев SiN_x или Al₂O₃;
- 3) формирование T-образная конструкция затвора для достижения низкого сопротивления затвора и низкая паразитного емкости затвора.

Показана возможность интеграции ТВПЭ с светодиодом на основе Ga_N, методы создания и оценки эффективности работы данного интегрированного устройства. Для оптимальной реализации данных монокристаллических интегральных устройств и их последующей эффективной работы необходимо:

- моделирование пьезоэлектрических свойств полевых транзисторов для определения оптимальной конструкцией для последующей интеграции;
- моделирование электрофизических свойств светодиодов для определения оптимальной конструкцией для последующей интеграции;
- формулирование рекомендации для проектирования многофункциональных полностью интегрированных устройств на основе Ga_N.

Выявлено что прямой пьезоэлектрический эффект возникает, когда высокие температуры в канале создают тепловое напряжение во всем устройстве, что, в свою очередь, создает электрический заряд, который необходимо рассеять.

Обнаружено, что пьезоэлектрическое напряжение растягивает слой AlGa_N, тогда как тепловое напряжение сжимало данный слой. Следовательно, тепловое напряжение имело эффект уменьшения общего напряжения в устройстве из-за его противоположного знака.

Моделирование светодиода с двумя квантовыми ямами показало, что неоднородная плотность электронов и дырок в слоях InGa_N оказывает влияние на внутреннюю квантовую эффективность. Возможные решения, такие как изменение толщины квантового барьера или дальнейшее увеличение квантовых ям, могут быть использованы для повышения значения внутреннего квантового выхода устройства.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Гаронин В.П., Степанов А.А.; Муха Е.В.; Казаркин Б.А.; Смирнов А.Г. «Моделирование высокоэффективных светодиодов в программном пакете

COMSOL Multiphysics». VI Международная научно-техническая конференция «Светотехника и электроэнергетика: история, проблемы, перспективы» - 2017.

2. Гаронин В.П., Степанов А.А.; Муха Е.В.; Казаркин Б.А.; Смирнов А.Г. «Моделирование светодиодной структуры синего диапазона на основе InGaN/GaN в программном пакете COMSOL Multiphysics». VI Международная научно-техническая конференция «Светотехника и электроэнергетика: история, проблемы, перспективы» - 2017.