

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

УДК 004.942

Челяпин
Алексей Евгеньевич

Термическая нестабильность полевых транзисторов с затвором Шоттки

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
Колосницын Борис Сергеевич
Профессор, кандидат технических
наук

Минск 2016

ВВЕДЕНИЕ

Достижения современных мощных полевых транзисторов в сантиметровом диапазоне и длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн впечатляют. Например, на AlGaN-GaN транзисторах в лабораториях достигнута удельная выходная мощность 41 Вт/мм на 4 ГГц, 17.6 Вт/мм на 10 ГГц, 10 Вт/мм на 40 ГГц и 2 Вт/мм на 80.5 ГГц. Для этих транзисторов получена предельная частота генерации 300 ГГц. К особенностям современных транзисторов следует отнести их чрезвычайно малые, нанометровые размеры, широкое использование гетероструктур, а также очень высокие плотности токов, приводящие к сильному локальному разогреву электронного газа и, соответственно, решетки полупроводникового материала. Мощность, получаемая от таких транзисторов, определяется особенностями вольт-амперных характеристик (ВАХ) в областях токов и напряжений, близких к предельно допустимым для этих приборов. ВАХ транзисторов в упомянутых режимах зачастую неоднозначна - имеет либо N - либо S - образный вид. Поэтому правильное описание некоторых особенностей процесса токопереноса требует применения моделей высокого уровня, основанных, например, на совместном решении кинетического уравнения Больцмана и уравнения Шредингера. При этом часто имеется большая область параметров приборов, где возможно применение гораздо более простых, часто аналитических моделей. Такие модели требуют неизмеримо меньше вычислительных затрат и могут легко применяться для задач оптимизации.

Актуальность работы определяется необходимостью расчета режимов, близких к разрушению транзисторов. Такой расчет дает возможность оценить влияние топологических и электрофизических параметров на границы допустимых режимов работы прибора, а также оценивать перспективность с этой точки зрения новых конструкций ПТШ.

Модели более высокого уровня строгости применяются при этом для проверки выводов полученных с помощью экспрессных моделей. В настоящей работе разработаны численные методы для моделей трех уровней сложности. К наивысшему относится однодолинная квазигидродинамическая модель (КГМ), достаточно точно учитывающая ряд нелокальных эффектов, существенных для приборов с длиной активной области меньшей 1 мкм. К таким эффектам относится, например, всплеск дрейфовой скорости. В рамках КГМ удается правильно построить модель ударной ионизации. Описание разностной схемы может быть также произведено для менее строгой

диффузионно-дрейфовой модели. Эта модель хорошо работает для приборов с длиной активной области большей или порядка 1 мкм.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации. Выходные характеристики полевых транзисторов определяются многими факторами: электрофизическими параметрами структуры, размерной обработкой, топологией, особенностями вольт – амперных характеристик в режимах, близких к предельно допустимым для этих приборов. Поэтому понимание физики процессов, непосредственно предшествующих разрушению транзисторов, и последующая оптимизация их структуры является актуальной задачей и влечет за собой фундаментальные исследования электронных транспортных свойств.

Исследование физики процессов, происходящих в мощных высокочастотных полевых транзисторах, в областях токов и напряжений, близких к предельно допустимым для этих приборов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка математических моделей позволяющих анализировать физические процессы в наноразмерных полупроводниковых многослойных структурах с граничными условиями, моделирующими как источники напряжения, так и источники тока.

2. Исследование с помощью этих моделей статических и высокочастотных характеристик ПТШ, а также определяющих эти характеристики физических процессов, связанных с неодномерным распределением электрического поля, растеканием тока из канала транзистора в подложку и нелокальностью дрейфа горячих электронов и дырок.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является полевой транзистор с затвором Шоттки. Предметом исследования являются свойства ПТШ в термически нестабильном режиме работы.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Точное моделирование температурной нестабильности в современных ПТШ является нетривиальной задачей, и поиск ее удачных решений продолжается даже сейчас. В связи с этим полученные результаты представляют научный и практический интерес, поскольку направлены на исследование режимов работы наноразмерных полевых транзисторов, непосредственно предшествующих их разрушению.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Механизм внезапного выгорания подложки на основе GaAs ПТШ при напряжениях, меньших напряжения пробоя затвор-сток, объясняется быстрым (менее 1 нс) установлением ВАХ с областью ОДП, вызванное управляемым стоковой нагрузкой переключение транзистора в состояние с высокой проводимостью. В этом состоянии в полуизолирующей подложке транзистора образуются токовые шнуры шириной порядка 10 мкм и высокой плотностью тока, в которых благодаря джоулеву разогреву и происходит локальное проплавление структуры ПТШ.

2. В мощных полевых транзисторах с затвором Шоттки максимум КПД определяется напряжением лавинного пробоя ОПЗ затвор-сток в отличие от максимума мощности, который определяется напряжением срыва лавинно-инжекционной неустойчивости.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Аналитическое исследование моделей температурной нестабильности в полевых транзисторах с затвором Шоттки проводилось соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем был исследован механизм внезапного выгорания GaAs ПТШ при напряжениях, меньших напряжения пробоя затвор-сток. Исследования проводились совместно с научным руководителем кандидатом технических наук, профессором Колосницыным Б. С.

Апробация результатов диссертации. Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы, а также результаты прикладных исследований и разработок были доложены на 51-й научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов БГУИР, 2015.

Публикации. Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 2 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций (см. список опубликованных работ).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 26 наименований. Общий объем диссертации составляет 51 страница.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **реферате** представлены основные результаты магистерской диссертации, а также дана краткая характеристика проделанной работы.

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы по определению режимов температурной неустойчивости полевых транзисторов с затвором Шоттки.

В **первой главе** приведен анализ литературных данных, обзор научных статей по теме магистерской диссертации. Дается подробный анализ особенностей лавинного пробоя планарного ПТШ. Также здесь приводятся описания современных типов планарных транзисторов с затвором Шоттки.

Во **второй главе** рассмотрены особенности лавинно–инжекционной неустойчивости и малые пробивные напряжения слоистых полупроводниковых структур, изотермический пробой стока арсенид галлиевых полевых транзисторов с затвором Шоттки.

В **третьей главе** исследованы физические механизмы, ограничивающие максимальную мощность и эффективность полевых транзисторов с затвором Шоттки. Показано, что в ПТШ максимум КПД достигается сразу после начала лавинного пробоя затвора в отличие от максимума мощности.

В **заключении** изложены основные результаты магистерской диссертации, основные выводы теоретической части и приведены основные результаты исследований температурной нестабильности полевых транзисторов с затвором Шоттки.

В **приложении** приведена краткая презентация основных результатов магистерской диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы над магистерской диссертацией был проведен аналитический обзор основных особенностей термической нестабильности полевых транзисторов с затвором Шоттки. С помощью численного моделирования симметричного полевого транзистора с затвором Шоттки исследовано влияние заряда ловушек у поверхности полупроводника в промежутке затвор–сток, а также края контакта Шоттки на напряжение лавинного пробоя затвора перекрытого транзистора $U_{пр}$. Показано, что в наиболее важном для высокочастотных ПТШ интервале толщин активного слоя и широком диапазоне концентраций доноров, в нем искажение электрического поля у края контакта Шоттки невелико и не влияет на величину $U_{пр}$. В ПТШ с незаглубленным затвором отрицательные заряды на ловушках могут заметно увеличивать $U_{пр}$, однако максимальная полезная мощность транзистора при этом уменьшается.

Показано, что в $n-i-n$ структуре напряжение срыва лавинно–инжекционной неустойчивости может быть значительно ниже напряжения лавинного пробоя.

Показано, что после достижения некоторого критического напряжения исток–сток дифференциальная проводимость ПТШ становится отрицательной при любых потенциалах затвора.

Механизм образования ОДП на ВАХ GaAs ПТШ имеет лавинно–инжекционную природу, которая проявляется в модуляции проводимости, перестройке электрического поля транзистора и взаимном усилении потоков дырок, инжектированных из области ударной ионизации у стока, и электронов, инжектированных из истокового n^+ контакта.

Механизм внезапного выгорания подложки на основе GaAs ПТШ при некотором критическом значении напряжения исток-сток может быть объяснён быстрым (менее 1 нс) установлением ВАХ с областью ОДП, вызванное управляемым стоковой нагрузкой переключение транзистора в состояние с высокой проводимостью и напряжением исток-сток около 10 В. В этом состоянии в полуизолирующей подложке транзистора образуются токовые шнуры шириной порядка 10 мкм и высокой плотностью тока. В этих шнурах благодаря Джоулеву разогреву и происходит локальное проплавление структуры ПТШ.

Необычная зависимость напряжения пробоя (резкое увеличение тока затвора) затвор-сток от потенциала затвора появляется потому, что за это резкое увеличение тока затвора отвечает лавинная инжекция, зависимость напряжения срыва которой от потенциала затвора соответствует экспериментальной.

Показано, что в ПТШ максимум КПД достигается сразу после начала лавинного пробоя затвора в отличие от максимума мощности. Последний достигается после возникновения лавинно-инжекционной неустойчивости. Таким образом, варьируя величинами активной выходной нагрузки и напряжений питания, можно настроить транзистор, как на максимум выходной мощности, так и на максимум КПД.

Результаты исследований могут быть использованы при поиске оптимальной конструкции для разрабатываемых новых мощных ПТШ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] А.Е. Челябин. Термическая нестабильность полевых транзисторов с затвором Шоттки. 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов: Материалы конференции. – Минск: БГУИР, 2015.

[2] А.Е. Челябин. Термическая нестабильность полевых транзисторов с затвором Шоттки. Технические средства защиты информации: XIII белорусско-российская научно-практическая конференция. – Минск: БГУИР, 2015. – с 80.