МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского**

**Национальный исследовательский университет**

**А. Б. Макаров**

**С. В. Оболенский**

**Е.А. Тарасова**

**Исследование тепловых процессов в мощных многосекционных транзисторах на примере**

**Gan hemt**

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета   
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки

03.03.03 «Радиофизика»,

10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем»,

02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии»,

11.05.02 «Специальные радиоэлектронные системы»

Нижний Новгород

2015

УДК 53.082, 538.95

ББК 32.85

М15

М15 А.Б. Макаров, С.В. Оболенский, Е.А. Тарасова Исследование тепловых процессов в мощных многосекционных транзисторах на примере Gan hemt: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 11 с.

Рецензент: доктор физико-математических наук **В. К. Киселев**

В пособии представлено описание модели, которая описывает тепловые процессы в мощных многосекционных транзисторах. Подробно изложены методика и способы получения температуры нагрева канала транзистора с помощью калибровки параметров представленной тепловой модели.

Практикум предназначен для студентов дневного и вечернего отделений радиофизического факультета ННГУ в качестве пособия при подготовке и проведении лабораторных работ по курсам «Физика полупроводников и полупроводниковых приборов», «Физика твердого тела и твердотельная электроника».

Ответственный за выпуск:

зам. председателя методической комиссии радиофизического факультета ННГУ,

д.ф.-м.н., профессор **Е.З. Грибова**

УДК 53.082, 538.95

ББК 32.85

**© Нижегородский государственный**

**университет им. Н.И. Лобачевского, 2015**

**1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

1.1 ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые приборы на основе широкозонных (3-4 эВ) соединений нитридов достаточно давно привлекают внимание разработчиков всего мира. Действительно, приборы на основе GaN-гетероструктур обещали уникальное сочетание мощностных и частотных характерис­тик. И эти надежды отчасти начали сбываться – GaN-транзисторы и монолитные интегральные схемы на их основе уже производятся серийно. Но камнем преткновения оставались высокие частоты, прежде всего – в миллиметровом диапазоне длин волн.

Однако в последние годы, судя по многочисленным публикациям, и эта проблема преодолена. Ведущие мировые производите­ли уже приступили к производству СВЧ-приборов на основе широкозонных гетероструктур (Al,Ga,In)N для работы в миллиметровом диапазоне. По сути, это означает новую эру в полупроводниковой СВЧ-электронике, поскольку открывает поистине фантастические возможности.

1.2 ОПИСАНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ

Как известно, мощные транзисторы являются многосекционными, т.е. их активная область, включая канал и электрод затвора, разбита на секции, соединенные параллельно друг с другом. Так как секции расположены близко, центральная часть транзистора нагревается до 150–200оС, а периферия на 10…30оС холоднее. Поэтому для решения задач проектирования важна разработка математических моделей (как численных, так и аналитических), способных рассчитывать величину указанного нагрева.

Распределение температуры, а также процесс распространения теплоты в сплошной среде (газе, жидкости или твёрдом теле) описывается с помощью уравнения теплопроводности. Оно выражает тепловой баланс для малого элемента объёма среды с учётом поступления теплоты от источников и тепловых потерь через поверхность элементарного объёма вследствие теплопроводности. Для изотропной неоднородной среды уравнение теплопроводности имеет вид (1):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

где — плотность среды; *—* теплоёмкость среды при постоянном объёме; *t* — время; *х, у, z* — координаты; *Т = Т*(*х, у, z, t*) — температура; — коэффициент теплопроводности; *F = F* (*x, y, z, t*) — заданная плотность тепловых источников. Величины зависят от координат и, вообще говоря, от температуры. Для анизотропной среды уравнение (1) вместо содержит тензор теплопроводности *,*где *i, k =* 1, 2, 3.

В случае изотропной однородной среды уравнение теплопроводности принимает вид (2):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

где — оператор Лапласа, a2 = — коэффициент температуропроводности; В стационарном состоянии, когда температура не меняется со временем, уравнение теплопроводности переходит в Пуассона уравнение (3):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

или, при отсутствии источников теплоты, в Лапласа уравнение (4):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

В простейшем одномерном случае решение уравнения Лапласа  
 имеет вид (5):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

где константы *C1* и *C2*определяются из граничных условий, при этом удельный тепловой поток (на единицу площади) имеет вид (6):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

Обычно задача распределения температуры в кристалле представляет из себя численное решение трехмерного уравнения Пуассона с заданием источников тепла, что логично вследствие неравномерного распределения плотности тока в канале. Отсюда следует большое количество расчетных ячеек, что приводит к большой точности решения, но и к большому времени счета, что является большим недостатком.

Однако, можно упростить ход решения, используя в математической модели для решения задачи о распределении температуры в кристалле уравнение Лапласа с граничными условиями. Так как при таком подходе неравномерность распределения плотности тока в канале отражается в граничных условиях, при этом ток, как источник тепла, кладется равным нулю внутри кристалла. Что само собой ускоряет решение задачи.

В данной работе моделирование тепла осуществляется с помощью программы Temperature, разработанной на кафедре электроники Радиофизического ф-та ННГУ.

Численные расчеты распределения температуры в кристалле проводятся по двум трехмерным стационарным моделям.

Первая модель учитывает разогрев поверхности кристалла от каждой секции в отдельности, причем секции трактуются в данной модели в виде плоских тепловыделяющих элементов. Выделяемая в транзисторе мощность распределяется на все тепловыделяющие элементы равномерно. Вторая оперирует одной секцией в виде прямоугольника, ширина и длина которого равны внешним размерам многосекционного транзистора (см. пунктирную линию на рис.1).

|  |  |
| --- | --- |
|  | **Рис. 1**  **Объект исследования – секционный полевой транзистор:  d – ширина секции,  b – длина секции,**  **e1 – расстояние между секциями,  N – количество секций, Lz – толщина кристалла,  d1 – ширина поперечного сечения,**  **B1 – длина поперечного сечения на полувысоте пирамиды** |

Математическая модель для решения задачи о распределении температуры в кристалле транзистора основана на уравнении Лапласа (7):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

Для разных поверхностей кристалла граничные условия имеют разный вид:

1. На свободной поверхности всегда поддерживается нулевое значение потока тепла, т.е. при проведении расчетов во внешних ячейках расчетной сетки температура всегда автоматически задавалась равной температуре из ячеек во втором слое;

2. Температура основания постоянна и равна заданной в начале расчета;

3. Температура ячеек расчетной сетки, соответствующих нагретым секциям, вычисляется по формуле (8):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

где *L* – расстояние между двумя соседними узлами вертикальной расчетной сетки, *Р*– рассеиваемая в ячейке мощность, λ – теплопроводность материала, *S* – площадь расчетной ячейки, *T*0 – температура второго слоя ячеек.

Однако из-за неравномерного распределения выделяемой мощности в канале невозможно точное определение ширины тепловыделяющего элемента для модели, учитывающей разогрев от каждой секции, поэтому **целью данной работы является определение ширины тепловыделяющего элемента по двум критериям, описанным ниже.**

Первый критерий подразумевает совпадение максимальных температур кристалла, рассчитанных с помощью первой и второй модели (критерий MAX) (рис 3).

Второй критерий описывает ситуацию, когда плавная кривая второй модели проходит между остриями пиков (температур нагретых секций) и минимальной температурой между секциями (критерий MID) (рис.4).

|  |
| --- |
|  |
| **Рис.3. Распределение T (критерий MAX)** |

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 4. Распределение T (критерий MID)** |

Для ускоренного аналитического расчета максимальной температуры кристалла возможно использование формулы (9):

 (9)

, *,*

*k = 0.184517*, *n = -0. 294467, m = 3.13516* ,

где *Tосн* – температура основания кристалла, *b* и *d* – длина и ширина секционного транзистора соответственно, *N* – количество секций, *e1* – расстояние между секциями, *Lz* – высота кристалла транзистора, *d1* – ширина поперечного сечения, *B1* – длина поперечного сечения на полувысоте пирамиды (см. рис. 1); P – рассеиваемая мощность, λ – теплопроводность.

Погрешность расчета по формуле (9) составляет 0.8-2% для величин *b* и *d*, сравнимых между собой, 4-8 % для *b ≤ d ≤* 2*b* и 10-15% для *d << b*. Такая погрешность позволяет проводить оптимизацию конструкции транзистора в практических условиях.

Аналитический расчет вольт-амперных характеристик исследуемого транзистора проводится по следующим формулам (10):

; (10)

;  ,

где *W* – ширина затвора, *Nd* – концентрация доноров, μ – подвижность носителей заряда, ε – диэлектрическая проницаемость, *Vb* – контактная разность потенциалов затвора, *Vg* – напряжение затвора, *Vнас –* скорость насыщения, *k* – тепловой коэффициент.

Результаты расчета электрофизических параметров по данным аналитическим формулам дают погрешность не более 20%. Использование аналитических выражений (10) дает выигрыш по времени оптимизации до 5 раз.

**2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

В данной работе рассматривается реальный транзистор фирмы Cree   
(рис. 5), ширина затвора которого 3600 мкм, а длина 350 нм. Транзистор разделен на 10 секций (5 основных секций и 5 подсекций). Материал подложки – SiC, ее толщина – 100мкм.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 5. Фотография транзистора фирмы Cree** |

1. Во вкладках «Multiple Sections» (1-ая модель) и «One Section» (2-ая модель) задайте входные параметры моделей:

* геометрические параметры, рассчитайте, пользуясь фотографией транзистора (рис. 5) и зная ширину затвора, а также учитывая, что основной поток тепла распространяется под углом 450 к поверхности кристалла (рис. 1);
* температуру основания задайте равной 270 С;
* выделяемую в транзисторе мощность положите равной 100 Вт.
* Теплопроводность рассчитайте по формуле (11):

(11)

1. Расчет проводите следующим образом: сначала для теплопроводности, соответствующей температуре основания; затем получите теплопроводность, соответствующую максимальной температуре нагретых секций, после этого рассчитайте среднее значение теплопроводности и проведите расчет для этого значения.
2. По полученным графикам (подобным рис. 3, 4) определите среднее значение ширины тепловыделяющего элемента (параметр b), полученное с помощью применения двух критериев, описанных выше. Сравните полученный результат с его литературным значением.
3. Рассчитайте температуру нагрева транзистора аналитически и сопоставьте полученное значение с результатами численных расчетов. Объясните расхождение. Произведите аналитические оценки температуры «сверху» и «снизу».

Александр Борисович **Макаров**

Сергей Владимирович **Оболенский**

Елена Александровна **Тарасова**

**Исследование тепловых процессов в мощных многосекционных транзисторах на примере Gan hemt**

***Практикум***

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.