

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 GaNHEMT**

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки
011800 «Радиофизика и электроника»
010400 «Информационные технологии»
654700 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем»

Нижний Новгород,
2014

УДК 53.082, 538.95

ББК 32.85

И-37

И-37 А.Б.Макаров, С.В.Оболенский, Е.А. Тарасова Исследование тепловых процессов в мощных многосекционных транзисторах на примере GaN НЕМТ: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. – 22 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». (Уточнить название курсов у ФИИТ и ИБТС)

Ответственный за выпуск:

Заместитель председателя методической комиссии радиофизического факультета ННГУ,
д.ф.-м.н., профессор **В.Н. Мануилов**

УДК 53.082, 538.95

ББК 32.85

© Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2014

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 150–200°C, а периферия на 10...30°C 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):

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho C_V T = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + F(1)$$

где ρ — плотность среды; C_V — теплоёмкость среды при постоянном объёме; t — время; x, y, z — координаты; $T = T(x, y, z, t)$ — температура; λ — коэффициент теплопроводности; $F = F(x, y, z, t)$ — заданная плотность тепловых источников. Величины ρ, C_V, λ зависят от координат и, вообще говоря, от температуры. Для анизотропной среды уравнение (1) вместо λ содержит тензор теплопроводности λ_{ik} , где $i, k = 1, 2, 3$.

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \Delta T + f \quad (2)$$

где Δ — оператор Лапласа, $a^2 = \lambda/(\rho C_V)$ — коэффициент температуропроводности; $f = F/(\rho C_V)$. В стационарном состоянии, когда температура не меняется со временем, уравнение теплопроводности переходит в Пуассона уравнение (3):

$$\Delta T = f/a^2 = F/\lambda \quad (3)$$

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

$$\Delta T = 0 \quad (4)$$

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

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (5)$$

где константы C_1 и C_2 определяются из граничных условий, при этом удельный тепловой поток (на единицу площади) имеет вид (6):

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\lambda C_1 \quad (6)$$

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).

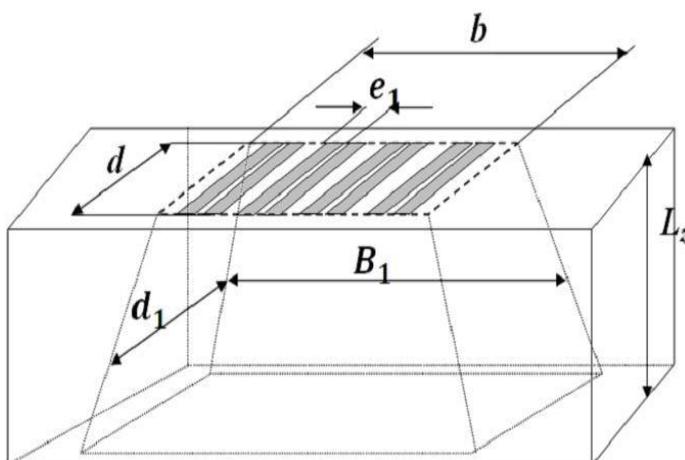


Рис. 1 Объект исследования – секционный полевой транзистор: d – ширина секции, b – длина секции, e_1 – расстояние между секциями, N – количество секций, L_z – толщина кристалла, d_1 – ширина поперечного сечения, B_1 – длина поперечного сечения на полувывоте пирамиды

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

$$T''_{XX} + T''_{YY} + T''_{ZZ} = 0. \quad (7)$$

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):

$$T = \frac{P \cdot L}{\lambda \cdot S} + T_0, \quad (8)$$

где L – расстояние между двумя соседними узлами вертикальной расчетной сетки, P – 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).

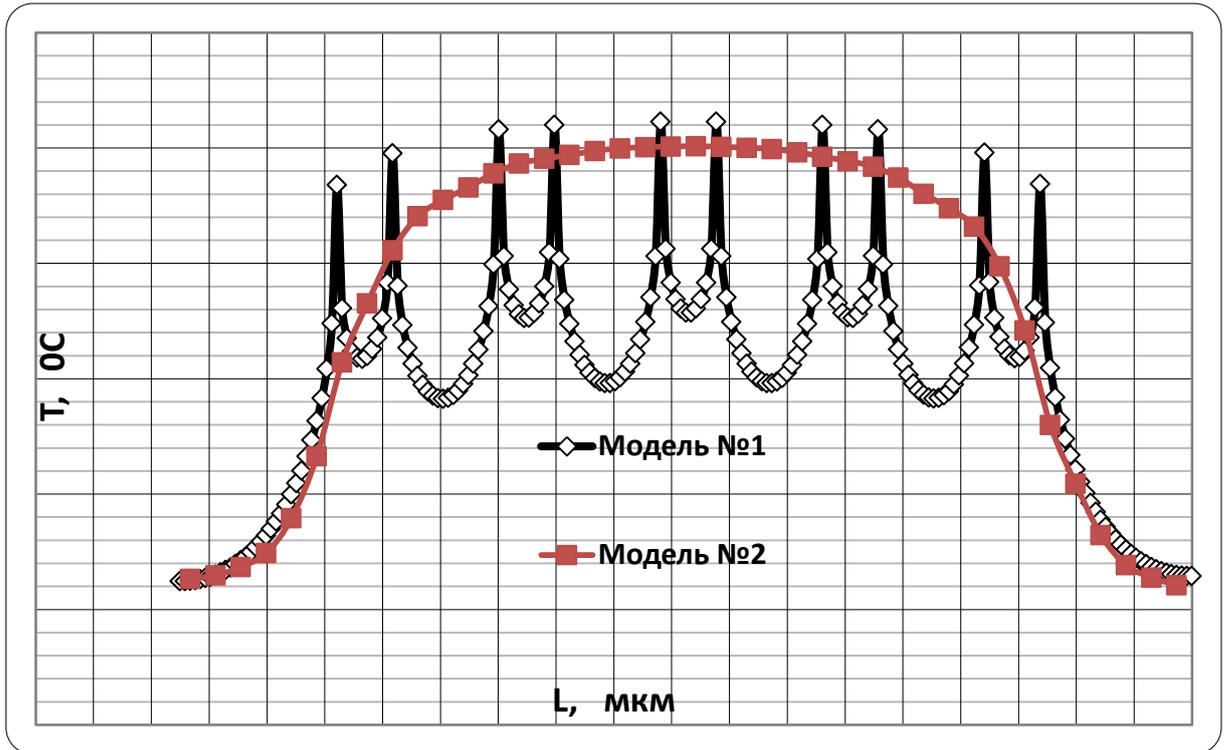


Рис.3. Распределение T (критерий MAX)

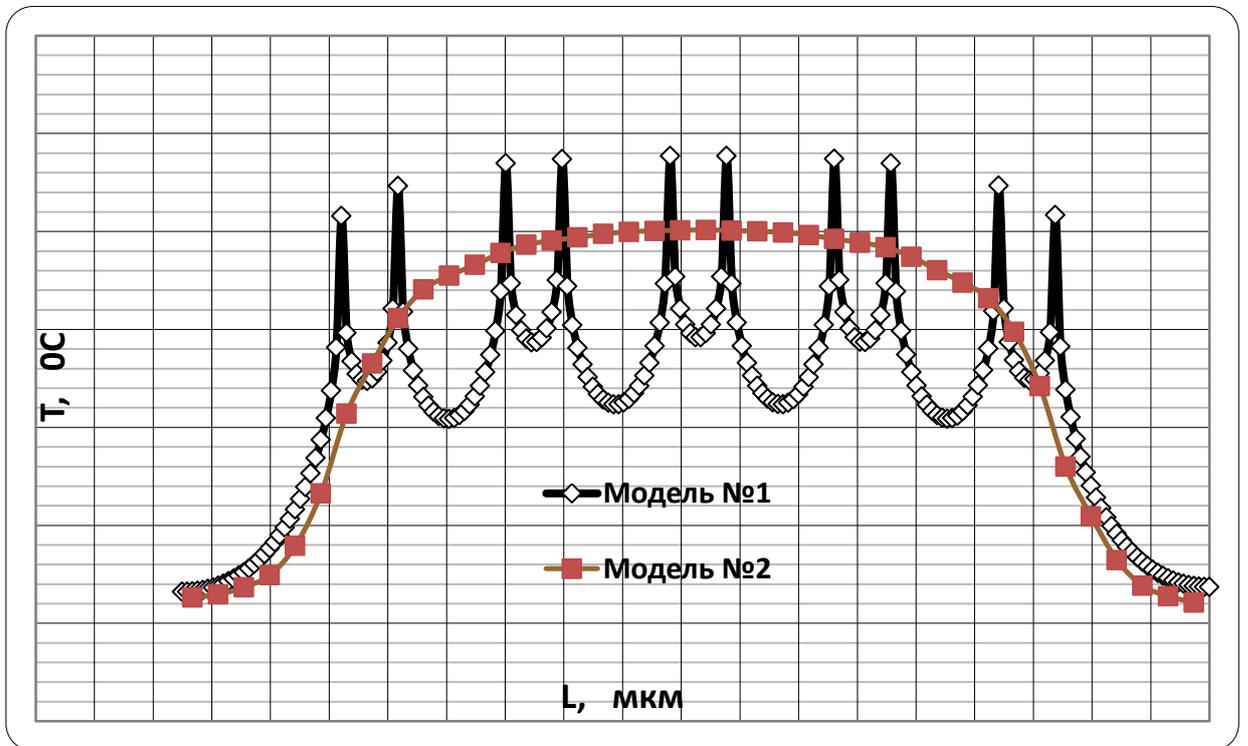


Рис. 4. Распределение T (критерий MID)

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

$$T = \frac{P \cdot L_z}{B_1 \cdot d_1 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{B_1}{d_1}\right)^k \cdot \left(\frac{B_1 \cdot d_1}{L_z^2}\right)^n \cdot m + T_{осн} \quad (9)$$

$$B_1 = b + L_z = b \cdot N + e_1 \cdot (N - 1) + L_z, \quad d_1 = d + L_z,$$

$$k = 0.184517, \quad n = -0.294467, \quad m = 3.13516,$$

где $T_{осн}$ – температура основания кристалла, b и d – длина и ширина секционного транзистора соответственно, N – количество секций, e_1 – расстояние между секциями, L_z – высота кристалла транзистора, d_1 – ширина поперечного сечения, B_1 – 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 $b \leq d \leq 2b$ и 10-15% для $d \ll b$. Такая погрешность позволяет проводить оптимизацию конструкции транзистора в практических условиях.

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

$$I = k \cdot W \cdot (a - dg) \cdot N_d \cdot V; \quad dg = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(V_g + V_b)}{eN_d}};$$

$$V = \frac{\mu E}{1 + \mu E / V_{нас}}, \quad (10)$$

где W – ширина затвора, N_d – концентрация доноров, μ – подвижность носителей заряда, ε – диэлектрическая проницаемость, V_b – контактная разность потенциалов затвора, V_g – напряжение затвора, $V_{нас}$ – 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.

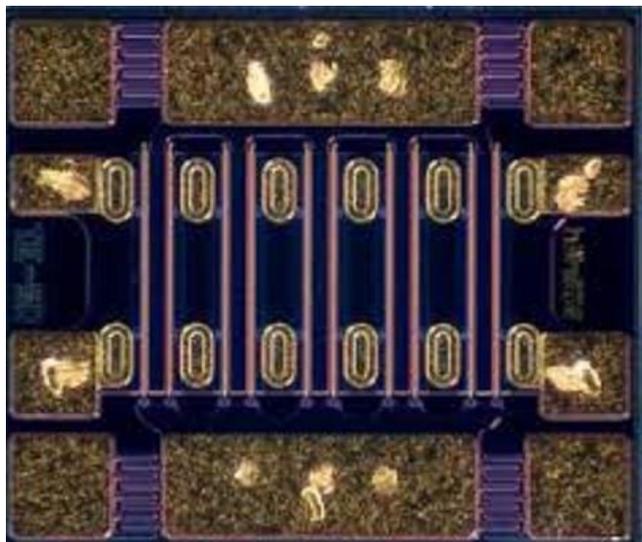


Рис. 5. Фотография транзистора фирмы Cree

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 45° к поверхности кристалла (рис. 1);
- температуру основания задайте равной 27° C;
- выделяемую в транзисторе мощность положите равной 100 Вт.

- Теплопроводность рассчитайте по формуле (9):

$$\lambda = \frac{611}{T-115} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{см}\cdot\text{К}} \right) \quad (9)$$

- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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 GaNHEMT**
Практикум

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л.
Заказ № . Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Нижегородского госуниверситета
им. Н.И. Лобачевского
603600, г. Нижний Новгород, ул. Большая Покровская, 37
Лицензия ПД № 18-0099 от 14.05.01