

Моделирование теплоэлектрических процессов в мощном МОП СВЧ транзисторе с дефектом структуры

В.А. Сергеев^{1,2}, А.М. Ходаков¹, А.А. Куликов¹

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Гончарова 48/2, Ульяновск, Россия, 432071

²Ульяновский государственный технический университет, ул. Северный Венец 32, Ульяновск, Россия, 432027

Аннотация. Представлены результаты теплового моделирования распределения температуры в структурах мощного МОП СВЧ транзистора с макродефектами электрофизической природы. Показано, что наличие дефекта в структуре транзистора приводит к повышению максимальной температуры перегрева канала и увеличению неоднородности распределения температуры по площади активной области кристалла. Рассмотрено влияние расположения дефекта на величину максимального перегрева структуры и напряжения затвор-исток. Разработанная тепловая модель может служить основой для создания методик диагностики МОП транзисторов по теплоэлектрическим характеристикам и выявления дефектных изделий.

1. Введение

Мощные МОП СВЧ транзисторы (МПТ) с различной топологией базовой транзисторной ячейки все активнее заменяют мощные биполярные транзисторы в аппаратуре ВЧ и СВЧ диапазонов [1,2]. При проектировании МПТ с целью увеличения их рабочих частот плотность упаковки базовых ячеек в кристалле МПТ повышают, но возможности такого повышения ограничены минимально достижимыми топологическими размерами ячейки и температурой перегрева канала МПТ в результате разогрева кристалла рассеиваемой мощностью. Даже при равномерном распределении плотности тока в структуре МПТ температура перегрева канала может достигать 120-150 °С [3]. Различного рода макродефекты структуры, очевидно, будут приводить к увеличению максимальной температуры канала и ускорению деградиационных процессов в приборе [4]. Однако, исследования влияния макродефектов на распределение температуры в структуре МПТ и их тепловые характеристики не проводились.

Мощность рассеяния МПТ, которая в транзисторе превращается в тепло, определяется следующим выражением:

$$P = U_{DS} I_D, \quad (1)$$

где U_{DS} – напряжение сток-исток, I_D – ток стока. При заданном режиме работы (U_{DS} постоянно) ток стока будет зависеть от температуры. Физическими причинами зависимости тока стока от температуры $I_D(T)$ является то, что с увеличением температуры T уменьшаются величины подвижности носителей в канале транзистора и напряжения отсечки U_{th} . Температурный коэффициент тока истока в зависимости от режима работы МПТ может быть

как положительным, так и отрицательным. На практике большинство полевых транзисторов работают при отрицательном температурном коэффициенте тока истока, то есть действует отрицательная тепловая обратная связь (ОТОС) [5].

При производстве СВЧ МПТ транзисторов в результате нарушения технологических процессов в структуре и конструкции транзистора возникают макродефекты, приводящие к неоднородному распределению плотности тока и мощности в структуре прибора и, как следствие, к локальным перегревам, теплоэлектрической неустойчивости токораспределения и отказам. Дефект электрофизического вида представляет собой отклонение от номинальных значений электрических параметров приборной структуры в некоторой локальной части ее активной области. Наличие дефекта приводит к перераспределению рассеиваемой структурой мощности между дефектной и бездефектной областями структуры даже в изотермическом режиме (до саморазогрева).

Целью данной работы является компьютерное моделирование и экспериментальное исследование изменений тепловых характеристик мощных МОП СВЧ транзисторов при введении в их структуру макродефектов различного вида.

2. Теплоэлектрическая модель

Для определения температурного поля в структуре МПТ построена 3D теплоэлектрическая модель, схема которой представлена на рисунке 1.

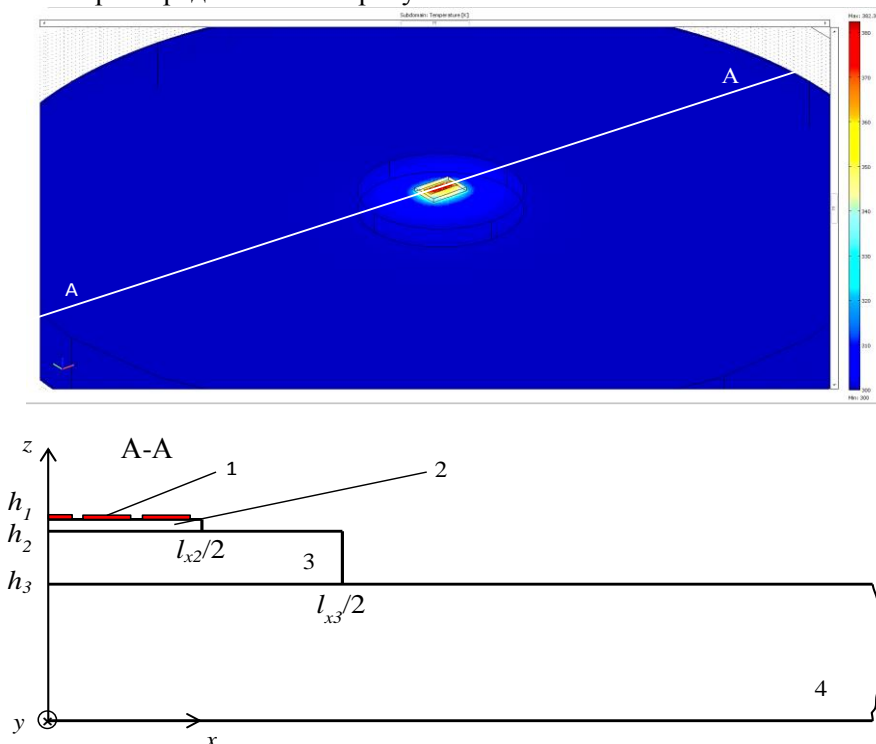


Рисунок 1. Геометрия МОП СВЧ транзистора: 1 – токоведущая металлизация, 2 – полупроводниковый кристалл, 3 – керамическая прокладка, 4 – теплоотвод.

Упрощенная конструкция МПТ представляет собой трехслойную структуру, первым слоем которой является прямоугольный $(l_{x2} \times l_{y2} \times (h_1 - h_2))$ полупроводниковый кристалл, с расположенной на его верхней поверхности токоведущей металлизацией, вторым слоем – цилиндрическая керамическая прокладка (КП) радиусом $r = l_{x3}/2$ и высотой $(h_2 - h_3)$ и третьем слоем – теплоотвод, высотой h_3 .

Распределение температуры в структуре транзистора находится из решения уравнения теплопроводности

$$\nabla_{x,y,z}(\lambda_i(T_i)\nabla_{x,y,z}T_i(x,y,z))=0, \quad (i=2, 3, 4) \quad (2)$$

где $T_i = (T_{li} - T_0)$; T_{li} , T_0 – температуры слоев структуры и окружающей среды; λ_i – коэффициенты теплопроводности слоев структуры.

Граничные условия заданы следующими:

- боковые поверхности прямоугольного кристалла, керамической прокладки и свободная верхняя поверхность КП теплоизолированы;
- температура теплоотвода поддерживается равной T_0 ;
- на верхней поверхности ППС задается плотность мощности

$$-\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial z}\Big|_{z=h_1} = \begin{cases} q(x,y), (x,y) \in S_{ar}, \\ 0, (x,y) \in S - S_{ar} \end{cases}, \quad (3)$$

где S , S_{ar} – площади верхней поверхности кристалла и активной области.

В режиме насыщения зависимость тока стока от температуры можно представить как [5]

$$I_D = \frac{K_s(T)}{2}(U_{GS}(T) - U_{th}(T))^2, \quad (4)$$

где $K_s(T) = \mu_n(T)C\frac{W}{L}$ – удельная крутизна ВАХ; W , L – ширина и длина затвора; C – погонная емкость материала затвора; μ_n – подвижность носителей заряда в канале. Подвижность носителей в канале уменьшается с ростом температуры [6]

$$\mu_n(T) = \mu_{n0}\left(\frac{T_0}{T}\right)^m. \quad (5)$$

Функцию плотности мощности в активной области, с учетом выражений (1), (4) и (5) можно записать следующим образом:

$$q(x,y) = \frac{U_{DS}I_D}{S_{ar}} = \frac{U_{DS}K_s(T_0)}{2S_{ar}}U^2(T)\left(\frac{T_0}{T}\right)^m, \quad (6)$$

где $K_s(T_0) = \mu_{n0}(T_0)C\frac{W}{L}$, $U(T) = (U_{GS}(T) - U_{th}(T))$, U_{GS} – напряжение затвор-исток.

Для задания условие включения транзистора в электрическую цепь будем считать ток стока транзистора постоянным. Это означает, что при постоянном U_{DS} и при любом температурном распределении $T(x,y,h_1)$ по активной области полупроводниковой структуры (ППС) должно выполняться условие:

$$\iint_{S_{ar}} \frac{U^2(T)}{T^m} ds = \frac{2I_D S_{ar}}{K_s(T_0)T_0^m}. \quad (7)$$

Решение теплоэлектрической модельной задачи (2) – (7) находилось численным методом конечных элементов с помощью специально разработанной программы, включающей в себя интерактивную программную среду COMSOL Multiphysics. Проверка соблюдения условия (7) проводилась итерационным методом, представленным [4]. Управляющим изменяющимся параметром цикла итераций являлось напряжение $U(T)$.

Для численного моделирования и сравнения расчетных характеристик с экспериментальными в настоящей работе в качестве объекта исследования был выбран кремниевый мощный полевой СВЧ транзистор КП907Б. Кристалл кремния ($m=1,5$) с геометрическими размерами $1.8 \times 1.3 \times 0.3$ мм закреплялся на цилиндрической пластине радиусом $r = 3.6$ мм и высотой 1.5 мм из BeO, которая в свою очередь устанавливалась на алюминиевый теплоотвод. Зависимости от температуры коэффициентов теплопроводности материалов структуры выбирались из базы

данных программы COMSOL. Температура окружающей среды $T_0 = 300$ К. Значение величины тока стока задавалось в пределах $I_D = 0,1 \div 0,5$ А. Напряжение сток-исток $U_{DS} = 20$ В.

Внешний вид верхней поверхности кристалла МПТ, в которую вносился дефект, и ее модельное представление представлены на рисунке 2. Имитация дефекта конструкции проводилась путем отключения групп токоведущих дорожек металлизации 1, 2, 3 базовых транзисторных ячеек.

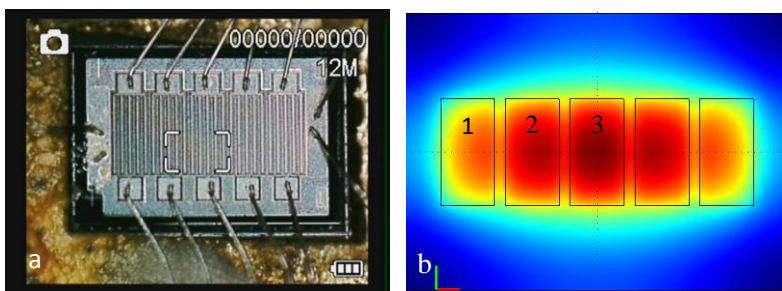


Рисунок 2. Верхняя поверхность кристалла МПТ (а) и ее модельное представление (б).

Была исследована зависимость температуры перегрева ППС от протекающего тока стока. Внесение дефекта в структуру транзистора приводит к увеличению максимальной температуры перегрева и неоднородности распределения температуры по активной области кристалла. Наибольшие значения этих величин наблюдаются при отключенной 1-ой крайней дорожке (рисунок 3).

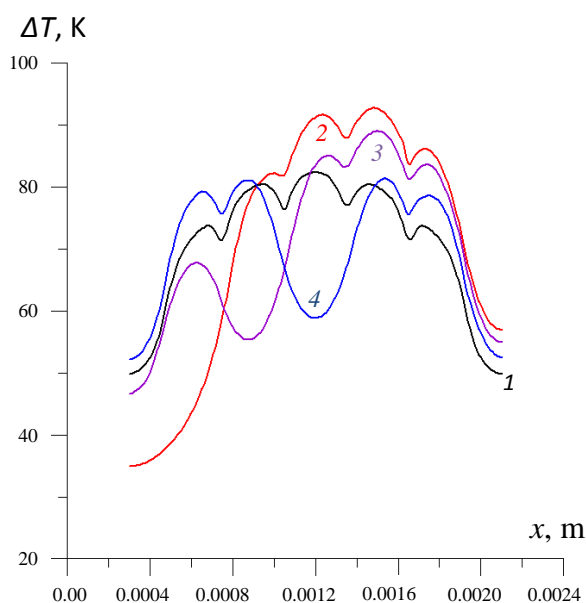


Рисунок 3. Температура перегрева верхней поверхности кристалла ($y = 0.65$ мм); 1 – без дефекта; нет дорожки: 2 – 1-ой, 3 – 2-ой, 4 – 3-ей. $I_D = 0.5$ А, $U_{DS} = 20$ В.

Введем коэффициент неоднородности распределения температуры по активной области полупроводниковой структуры

$$\delta = \frac{T_{max} - T_{av}}{T_{av}}, \quad (8)$$

где T_{max} и T_{av} – максимальная и средняя температуры активной области ППС.

Как видно из рисунка 4, разница между коэффициентами неоднородности для дефектной (отсутствие 1-ой дорожки) и бездефектной структур сильно возрастает с увеличением величины силы тока стока, для рассматриваемого варианта на 24%.

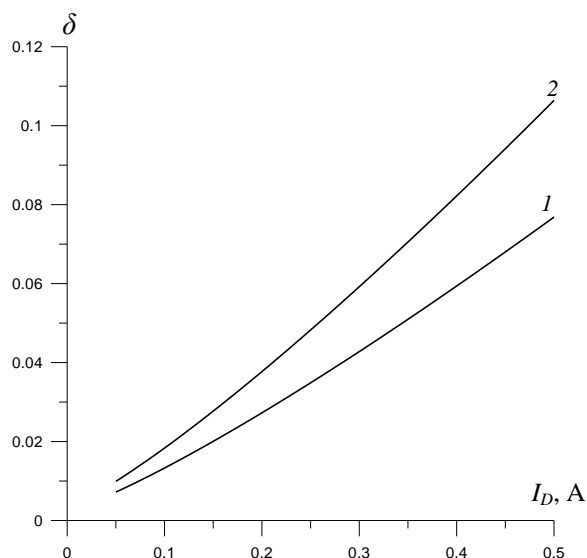


Рисунок 4. Коэффициент неоднородности температурного распределения по активной области ППС транзистора: 1 – без дефекта, 2 – отсутствует 1-я дорожка.

Была проведена экспериментальная апробация результатов расчетных исследований. Проводились измерения максимальной температуры кристалла полевых транзисторов типа КП907Б при изменении тока стока в пределах $I_D = 0,1 \div 0,7$ А. Постоянство тока истока поддерживалось путем изменения напряжения на затворе. Транзистор присоединялся к алюминиевому теплоотводу в виде плоской пластины с размерами 100x100x10 мм. Теплоотвод в свою очередь устанавливался на термостол. Температура термостола поддерживалась 27 °С. Напряжение сток-исток U_{DS} задавалось равным 6В. Схема включения испытуемого транзистора представлена на рисунке 5.

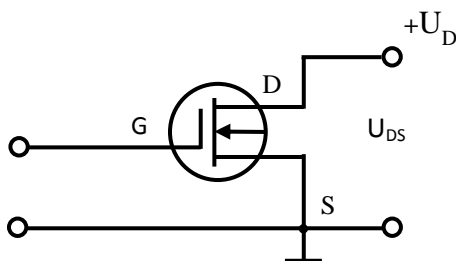


Рисунок 5. Схема включения испытуемого транзистора КП907Б.

Апробация модели проводилась путем сравнения зависимостей от силы тока истока относительного напряжения U_d/U_0 , где U_d и U_0 – напряжение U (формула (6)) для дефектной и бездефектной структур соответственно, полученного расчетным путем (рисунок 5) и экспериментальной зависимости U_{GSd}/U_{GS0} , где U_{GSd} и U_{GS0} – напряжение затвор-исток для дефектной и бездефектной структур (рисунок 6).

Сравнение показало, что расчетные и экспериментальные зависимости находятся в хорошем качественном согласии. Как видно из графиков, крутизна кривых $U(I_D)$ и $U_{DS}(I_D)$ для дефектных структур больше чем для бездефектных структур.

3. Заключение

Разработана теплоэлектрическая модель мощного полевого СВЧ транзистора и проведены расчетные исследования для МПТ с дефектом электрофизического вида, которые позволили получить температурное распределение по структуре транзистора. Показано, что значения коэффициента неоднородности распределения температуры по активной области

полупроводниковой дефектной структуры мощного полевого транзистора больше чем для бездефектной структуры. Проведена оценка влияния местоположения дефекта на величины максимального перегрева структуры и напряжения затвор-исток. Наибольшие значения этих величин наблюдаются при отключенной первой крайней дорожке, что подтвердилось экспериментом. Крутизна зависимости напряжения затвор-исток от силы тока стока для дефектных структур больше чем для бездефектных структур. Разработанная тепловая модель может служить основой для создания методик диагностики мощных полевых СВЧ транзисторов по теплоэлектрическим характеристикам, с целью выявления дефектных изделий.

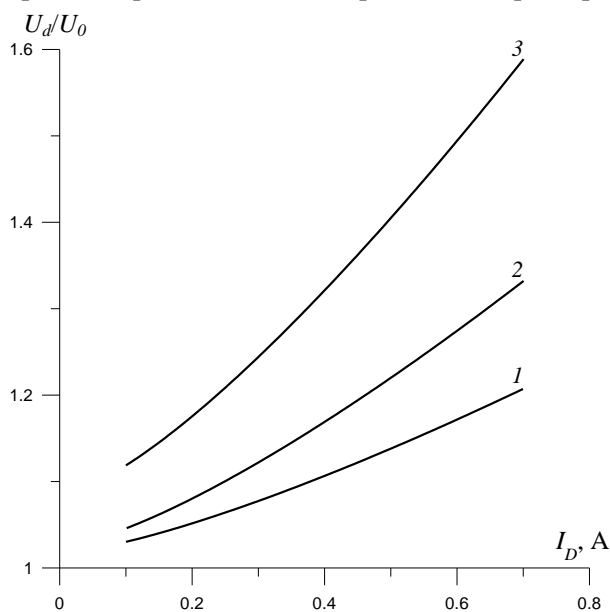


Рисунок 5. Напряжение $U = (U_{GS} - U_{th})$ от силы тока стока: 1 – отсутствует 3-я дорожка, 2 – отсутствует 2-я дорожка, 3 – отсутствует 1-я дорожка; $U_{DS} = 6 V$.

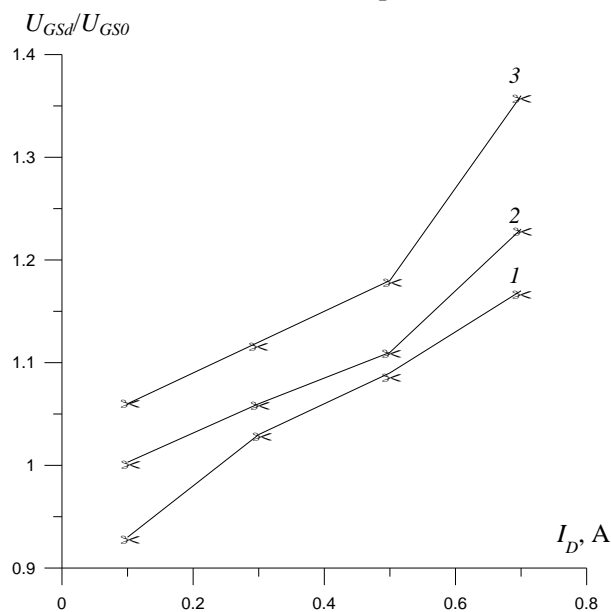


Рисунок 6. Напряжение затвор-исток от силы тока стока: 1 – отсутствует 3-я дорожка, 2 – отсутствует 2-я дорожка, 3 – отсутствует 1-я дорожка; $U_{DS} = 6 V$.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 18-47-730024).

5. Литература

- [1] Бачурин, В.В. Динамика развития отечественных мощных кремниевых полевых ВЧ и СВЧ МОП транзисторов / В.В. Бачурин, А.Г. Васильев, М.М. Крымко, О.В. Сопов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – Т. 2, № 227. – С. 3-15.
- [2] Асessorов, В.В. Мощные ВЧ и СВЧ полевые транзисторы для аппаратуры средств радиосвязи / В.В. Асessorов, В.А. Кожевников, В.И. Дикарев, А.В. Асessorов // Компоненты и технологии. – 2006. – № 5. – С. 41-43.
- [3] Ди Лоренцо, Д.В. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления / Д.В. Ди Лоренцо, Д.Д. Канделуола – М: Радио и связь, 1988. – 118 с.
- [4] Сергеев, В.А. Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов / В.А. Сергеев, А.М. Ходаков – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 160 с.
- [5] Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. Том I / У. Титце, К. Шенк – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с.
- [6] Shur, M Handbook Series on Semiconductor Parameters – Singapore: World Scientific, 1996. – Vol. 1. – 237 p.

Modeling of thermoelectric processes in a powerful microwave MOSFET with a structural defect

V.A. Sergeev^{1,2}, A.M. Hodakov¹, A.A. Kulikov¹

¹Ulyanovsk branch of Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Goncharova str. 48/2, Ulyanovsk, Russia, 432071

²Ulyanovsk State Technical University, Northern Crown str. 32, Ulyanovsk, Russia, 432027

Abstract. The results of thermal modeling of the temperature distribution in the structures of a high-power MOSFET transistor with macrodefects of an electrophysical nature are presented. It is shown that the presence of a defect in the structure of the transistor leads to an increase in the maximum temperature of the channel overheating and an increase in the inhomogeneity of the temperature distribution over the area of the active region of the crystal. The influence of the location of the defect on the value of the maximum overheating of the structure and the gate-source voltage is considered. The developed thermal model can serve as the basis for creating methods for diagnosing MOSFET transistors by thermoelectric characteristics and identifying defective products.