

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СУБМИКРОННОГО ГЕТЕРОСТРУКТУРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Д. т. н. В. И. Тимофеев, Е. В. Семеновская

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»
E-mail: v.timofeyev@kpi.ua, helensem@ukr.net

Разработана методика расчета теплового сопротивления субмикронного гетероструктурного полевого транзистора, позволяющая установить зависимость величины теплового сопротивления транзистора от параметров кристалла транзистора, его геометрических размеров и формы. Результаты расчета величины теплового сопротивления для субмикронных транзисторов хорошо согласуются с экспериментальными данными для исследуемых субмикронных транзисторов.

На этапе проектирования интегральных схем, особенно монолитных интегральных схем (МИС), необходимо оценивать влияние электротепловых процессов в активной области полевых транзисторов. Известно, что надежность работы мощных полевых субмикронных транзисторов в МИС зависит от рабочей температуры активной области транзистора, которая в свою очередь определяется подводимой мощностью рассеивания по постоянному току и эффектами саморазогрева транзисторной структуры.

В общем случае температурный режим транзистора описывается трехмерным уравнением Лапласа $\nabla^2 T(x, y, z) = 0$, где $T(x, y, z)$ — температура в любой точке структуры. Данное уравнение решается аналитически только в частных случаях, для концентрических сфероидов, концентрических цилиндров и параллельных пластин [1]. На практике для решения применяют численные методы, основанные на методах конечных элементов, конечных разностей и конечных объемов. Однако решение уравнения Лапласа численными методами является достаточно трудоемким. Это обусловлено сложностью задания граничных условий для многослойных структур и проблемой сходимости решения, к тому же не всегда удается провести анализ отдельных областей структуры для определения теплового сопротивления всей структуры. Поэтому представляет интерес методика оценки теплового сопротивления транзистора в зависимости от геометрических и теплофизических параметров элементов транзисторной структуры.

Известные методы анализа теплового сопротивления, основанные на законе Фурье для теплопроводности, предполагают, что тепловой поток от источника тепла к основанию кристалла растекается под углом 45° [2—4]. Их решения хорошо сходятся для затворов, имеющих форму квадрата и круга. В случае же когда затвор выполнен в форме полоска, ошибка составляет от 10 до 50%.

В [5, с. 15] предложен метод расчета теплового сопротивления мощного полевого транзистора по тепловой модели исходя из данных о форме и размерах кристалла и источника тепла (затвора).

Тепловая модель представляет собой объемную фигуру, боковая поверхность которой образована линиями растекания теплового потока. При этом принимают, что тепловой поток из центра источника тепла растекается под углом α , а от краев — под углом β , в связи с чем боковая поверхность имеет изломы. Верхняя грань имеет ту же форму и размеры, что и источник тепла, нижняя — что и кристалл. Например, на рис. 1 приведена тепловая модель транзистора размерами $L \times W \times h$ с источником тепла в форме прямоугольника размерами $L_{и} \times W_{и}$.



Рис. 1. Тепловая модель транзистора с источником тепла в форме прямоугольника

Оппонент
к. т. н. В. И. БОСЫЙ
(НПП «Сатурн», г. Киев)

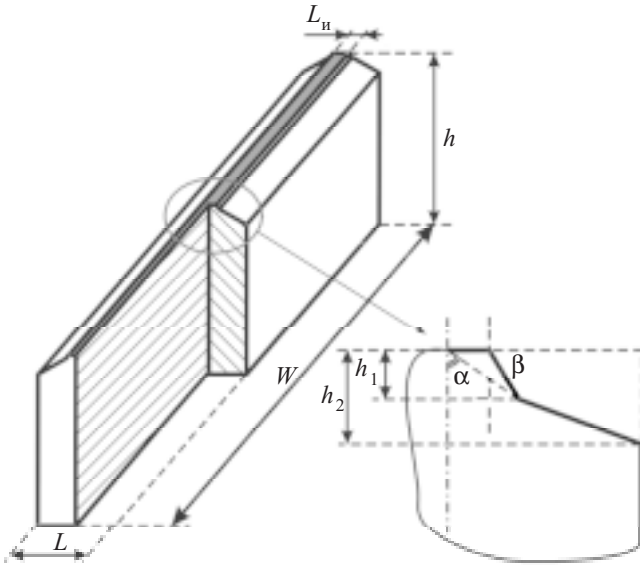


Рис. 2. Тепловая модель субмикронного транзистора

В [5] была установлена зависимость углов растекания теплового потока (точнее, их тангенсов) от формы источника тепла — полоска, круга, квадрата и прямоугольника, и от режимов работы транзистора — среднего, максимального и изотермического.

Величину теплового сопротивления определяют по формуле

$$R_T = \sum_{i=1}^n R_{Ti},$$

где $R_{Ti} = \frac{h_i}{\Delta S_i \cdot \lambda}$;

- n — число сечений;
- h_i — высота i -го сечения;
- ΔS_i — прирост площади i -го сечения;
- λ — коэффициент теплопроводности.

Достоинством этого метода является возможность расчета величины теплового сопротивления транзистора для любой геометрической формы затвора и

кристалла, недостатком — громоздкость вычислительных операций, возникающая при большом количестве сечений тепловой модели.

Для субмикронного транзистора с затвором, имеющим форму полоска, разработаны способы определения величины теплового сопротивления по приросту площади растекания теплового потока [6] и по соотношению объемов элементов тепловой модели [7]. Рассмотрим второй из них, поскольку он более полно отражает тепловые процессы, протекающие в транзисторе.

Тепловая модель указанного транзистора, построенная в соответствии с [5], представлена на рис. 2. Сверху она ограничена площадью затвора, снизу — площадью кристалла и состоит из двух призм, одна высотой h_1 с объемом V_1 , другая высотой $(h_2 - h_1)$ с объемом V_2 , и параллелепипеда высотой $(h - h_2)$ с объемом V_3 .

Величину теплового сопротивления транзисторной структуры определим по формуле [7]

$$R_T = f^V f^R,$$

где $f^V = \frac{V_{тз} V_3}{V_{кр} V_{кр}}$;

$$f^R = \frac{S_{кр}}{V_{кр} \lambda}$$

$S_{кр}$, $V_{кр}$ — соответственно площадь сечения кристалла и его объем, $S_{кр} = LW$, $V_{кр} = LWh$;

$V_{тз}$ — объем тепловой модели, $V_{тз} = V_1 + V_2 + V_3$;

λ — коэффициент теплопроводности материала кристалла.

Значения объемов, составляющих тепловую модель, определяются по формулам

$$V_1 = h_1 / 3 \cdot (S_1 + S_n + \sqrt{S_1 S_n});$$

$$V_2 = (h_2 - h_1) / 3 \cdot (S_1 + S_{кр} + \sqrt{S_1 S_{кр}});$$

$$V_3 = S_{кр} (h - h_2),$$

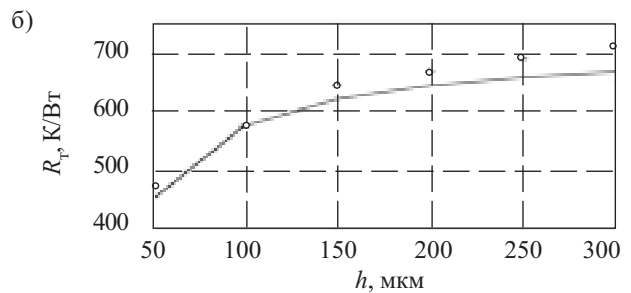
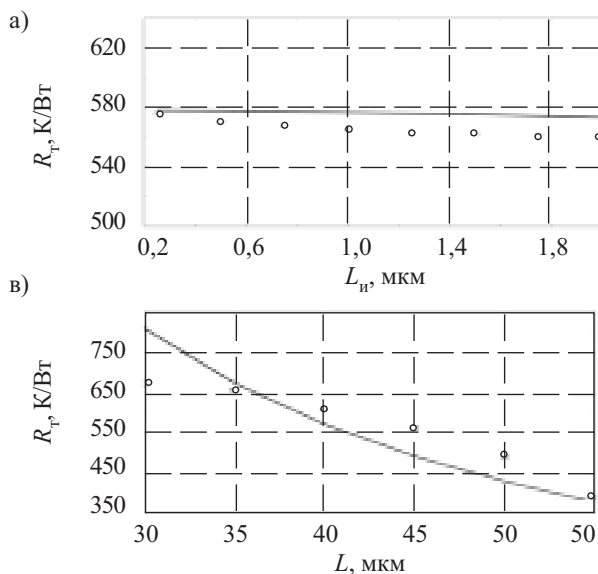


Рис. 3. Зависимость теплового сопротивления субмикронного транзистора на сапфировой подложке для разных значений длины затвора (а), высоты (б) и длины транзистора (в):

— — расчет; о — эксперимент

где S_1 — площадь сечения тепловой модели на высоте h_1 ,

$$S_1 = L_1 W_1;$$

S_n — площадь источника тепла, $S_n = L_n W_n$;

$$h_1 = \frac{L_n}{2 \operatorname{tg} \alpha} + \frac{L_n}{2 \operatorname{tg} \alpha} \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{L_n}{2 \operatorname{tg} \alpha} \left(\frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2 + \dots + 0,01;$$

$$h_2 = \frac{L}{2 \operatorname{tg} \alpha}.$$

При этом для транзистора с затвором, имеющим форму полоска, в соответствии с [5, с. 42] были выбраны $\operatorname{tg} \alpha = 1,571$, $\operatorname{tg} \beta = 0,819$.

Расчет теплового сопротивления субмикронного транзистора проводился для различных значений длины затвора, длины и ширины кристалла. В качестве исходных данных были приняты следующие: $L_n = 0,25$ мкм, $W_n = 250$ мкм, $h = 100$ мкм, $L = 40$ мкм, $W = 250$ мкм, материал кристалла — сапфир, коэффициент теплопроводности которого $\lambda = 35$ Вт/(м·К) [8]. Результаты расчетов приведены на рис. 3 в сравнении с экспериментальными данными R_T^* , взятыми из [8].

Оценка погрешности полученных результатов проводилась по формуле

$$\delta(\%) = \frac{R_T - R_T^*}{R_T^*} \cdot 100\%.$$

Она показала, что отклонения расчетных значений от экспериментальных не превышают 10%.

Таким образом, разработан достаточно простой и при этом достоверный способ определения величин

теплового сопротивления кристалла субмикронного транзистора. Расчеты показали, что тепловое сопротивление зависит от геометрических размеров затвора и кристалла транзистора: оно прямо пропорционально высоте кристалла и обратно пропорционально длине затвора и длине кристалла.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ellison G. Thermal computations for electronics: Conductive, radiative and convective air cooling.— Chicago, Illinois, USA: Jamnia & Associates, 1999.
2. Yang H., Wang H., Tan C. L. Thermal resistance of metamorphic InP-based HBTs on GaAs substrate using a linearly graded In_{0.5}Ga_{0.5}P metamorphic buffer // IEEE Trans. Electron Dev.— 2004.— Vol. 51, № 8.— P. 1221—1227.
3. Pacelli A., Pacelli P., Mastrapasqua M. Compact modeling of thermal resistance in bipolar transistors on bulk and SOI substrate // IEEE Trans. Electron Dev.— 2002.— Vol. 49, № 6.— P. 1027—1033.
4. Joy R., Schlig E. S. Thermal properties of very fast transistors // IEEE Trans. Electron Dev.— 1997.— Vol. 17, № 3.— P. 586—594.
5. Захаров А. Л., Асвадунова Е. И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов: Метод эквивалентов.— М.: Радио и связь, 1983.
6. Пат. 89911, Україна. Спосіб визначення теплового опору кристалу субмікронного транзистора / О. В. Семеновська, В. І. Тимофєєв. — 2010.— Бюл. № 5.
7. Спосіб визначення теплового опору кристалу субмікронного транзистора / О. В. Семеновська, В. І. Тимофєєв.— Офіційний бюлетень. Винаходи. Корисні моделі. Топографії інтегральних мікросхем.— Україна.— 2010.— № 5.
8. Darwish A. M., Bayba A. J., Hung H. A. Thermal resistance calculation of AlGaN-GaN devices // IEEE Trans. Microwave Theory Tech.— 2004.— Vol. 52, № 11.— P. 2611—2620.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»
12—16 сентября 2011 г., Севастополь, Украина

КрыМиКо 2011 CrMiCo

September 12-16, 2011, Sevastopol, Ukraine
21st International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology»

Тел. +380-50-3931288
Факс +380-692-435258
E-mail cuimico.org@gmail.com
http://www.crimico.org

21-я Международная Крымская конференция
«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»
12—16 сентября 2011 г.

1. Твердотельные приборы и устройства СВЧ
 - 1а. Моделирование и автоматизированное проектирование твердотельных приборов и устройств
2. Электровакуумные и микровакуумные приборы СВЧ
3. Системы СВЧ-связи, вещания и навигации
 - 3а. Информационные технологии в телекоммуникациях
4. Антенны и антенные элементы
5. Пассивные компоненты
 - 5а. Материалы и технология СВЧ-приборов
 - 5б. Нанозлектроника и нанотехнологии
6. СВЧ-электроника сверхбольших мощностей
 - 6а. Электромагнитная и радиационная стойкость материалов и электронной компьютерной базы
7. СВЧ-измерения
8. Прикладные аспекты СВЧ-техники
 - 8а. Микроволновые технологии и техника в биологии и медицине
9. Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн
- Н. История развития радиотехнологий и телекоммуникаций (третьи Федотовские чтения)