

УДК 621.382.323

**Е.В. Семеновская, В.И. Тимофеев, доктор техн. наук.**

## **Электротепловой анализ субмикронных гетероструктур**

### **Аннотация**

В статье рассматриваются различные способы определения теплового сопротивления по форме и размерам источника тепла транзистора. Разработан алгоритм расчета значения теплового сопротивления транзистора по модели – тепловому эквиваленту. Установлена зависимость теплового сопротивления от параметров теплового эквивалента: размеров источника тепла, конструкции и степени легирования субмикронной транзисторной структуры. Полученные результаты могут найти применение для оценки теплового состояния интегральных микросхем.

### **Abstract**

The paper presents study on transistor's heat resistance dependence on its shape and size. The algorithm for heat resistance calculation, based on heat equivalent model is developed. Dependency of heat resistance on heating source parameters, such as size, shape and doping of submicron transistor is studied. The results might be useful for IC's heat conditions estimation.

### **Введение**

Тепловое сопротивление транзистора является важным параметром теплового режима транзисторной структуры, определяющим условия эксплуатации полупроводникового прибора. Поэтому любые исследования касающиеся вопросов определения теплового сопротивления прибора являются актуальными и имеют важную научную и практическую ценность.

Изучение этой проблемы указывает на тот факт, что уже при разработке первых полупроводниковых транзисторов, исследователи делали попытки связать величину теплового сопротивления с каким-либо электрическим параметром транзистора или геометрическими размерами кристалла

транзистора и теплофизическими характеристиками материала кристалла [1, 2].

### **Основная часть**

Согласно работы [2] тепловое сопротивление транзистора определяется из следующего соотношения:

$$R_T = \frac{h}{S \cdot \lambda},$$

где  $h$  – высота кристалла, мкм;

$S = \text{Ш} \times L$  – площадь сечения кристалла, мкм<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала кристалла, Вт/(м·К).

Определение теплового сопротивления по приведенной формуле не находит широкого применения из-за большой погрешности по сравнению с расчетом этого параметра другими способами, например, определения теплового сопротивления с помощью метода «теплового эквивалента» [3].

Рассмотрим операции метода теплового эквивалента и проведем исследования по установлению зависимости величины теплового сопротивления тепловой модели транзистора, используя этот метод.

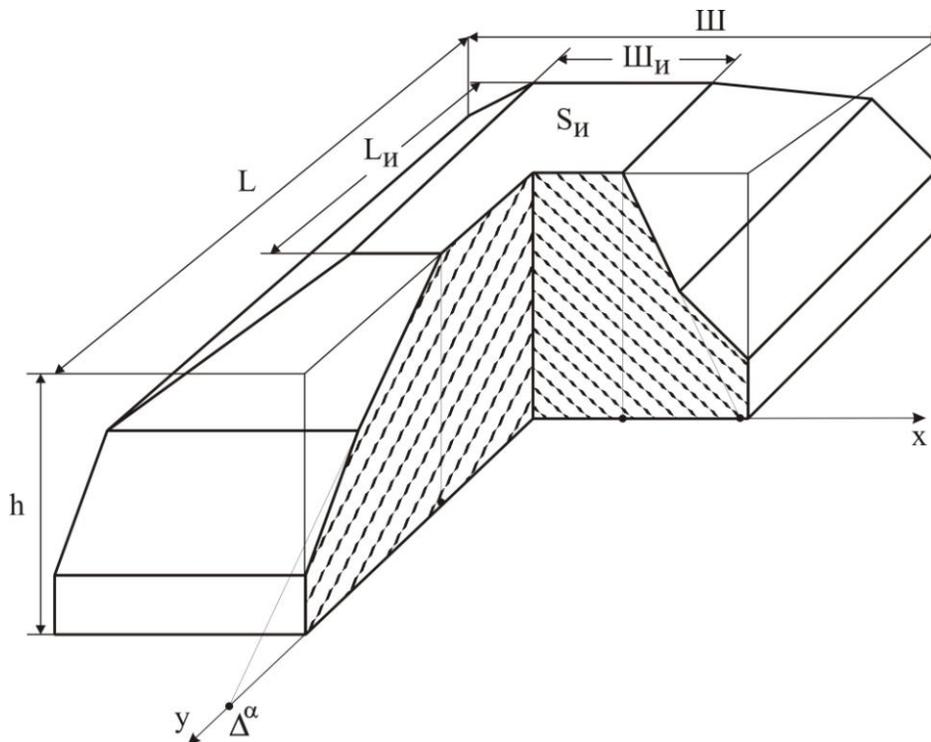
В основу способа положено представление о растекании теплового потока от источника тепла, расположенного на поверхности кристалла, до теплоотвода транзистора.

Тепловой поток, растекаясь по элементам транзисторной структуры, приобретает форму объемной фигуры – теплового эквивалента, отдельные параметры которого коррелируются с величиной теплового сопротивления. В качестве аналогов теплового сопротивления в методе теплового эквивалента могут быть площадь сечения эквивалента или объем фигуры теплового эквивалента, размещенного в пределах транзисторной структуры.

Способ определения теплового сопротивления включает операцию графического построения фигуры теплового эквивалента, определения координат изломов боковой поверхности теплового эквивалента, определения прироста площадей сечений эквивалента по линиям излома

боковой поверхности, который является мерой для величины теплового сопротивления. Для построения теплового эквивалента выбирают размеры кристалла и источника тепла и тепловой режим для исследуемой модели, который определяется углами  $\alpha$  и  $\beta$  растекания теплового потока.

На рисунке 1 приведена модель теплового эквивалента кристалла с источником тепла прямоугольной формы.



*Рис. 1. Модель теплового эквивалента транзистора.*

*На рисунке обозначены:*

*$h, Ш, L$  – размеры кристалла;  $Ш_{И}, L_{И}$  – размеры источника тепла;*

*$\alpha, \beta, \Delta^{\alpha}, \Delta^{\beta}$  - углы и катеты прямоугольного треугольника;*

*1 – поперечный излом эквивалента; 2 – продольный излом;*

*3 – излом боковой поверхности кристалла;*

*4, 5 – линии тангенсов углов  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно.*

Размеры и форма кристалла, равны  $h \times Ш \times L = 150 \text{ мкм} \times 400 \text{ мкм} \times 400 \text{ мкм}$ , а размеры источника тепла  $Ш_{И} \times L_{И} = 70 \text{ мкм} \times 160 \text{ мкм}$ . Тангенсы углов  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно равны  $\text{tg } \alpha = 1,527, \text{tg } \beta = 0,79$  (режим  $R_{Тср}$ ) [4].

Тепловой эквивалент представляет собой фигуру подобную форме источника тепла и растекающейся под углом  $\beta$  от краев источника тепла и под углом  $\alpha$  от центра источника тепла.

В рассматриваемой модели (рис. 1) тепловой эквивалент заключен между источником тепла и подложкой кристалла, а боковая поверхность формируется линиями тангенсов углов  $\alpha$  и  $\beta$ . Тепловой эквивалент для исследуемой модели представляет собой четырехгранную усеченную пирамиду, боковая поверхность которой терпит поперечный излом (по оси  $OX$ ), продольный излом (по оси  $OY$ ) и излом по боковой поверхности кристалла от растекания теплового потока под углом  $\alpha$ . Таким образом, усеченная пирамида теплового эквивалента состоит в свою очередь из трех усеченных пирамид, разделенных линиями изломов боковой поверхности.

При построении теплового эквивалента проводят расчет следующих параметров модели, используя размеры кристалла и источника тепла:

$$\begin{cases} \Delta^\alpha = h \cdot \operatorname{tg}\alpha, \text{мкм} \\ \Delta^\beta = h \cdot \operatorname{tg}\beta, \text{мкм} \end{cases}$$

$$h_1^\alpha = \frac{h \cdot \left( \Delta^\alpha - \frac{\text{Ш}}{2} \right)}{\Delta^\alpha} = 19 \text{мкм}, \quad h_1^\beta = \frac{h \cdot \left( \Delta^\beta - \frac{L}{2} - \frac{L_{\text{и}}}{2} \right)}{\Delta^\beta} = 0 \text{мкм},$$

где  $\Delta^\alpha$  и  $\Delta^\beta$  – катеты углов  $\alpha$  и  $\beta$ , мкм;

$h_1^\alpha$  и  $h_1^\beta$  – высоты пересечения боковой поверхности кристалла боковой поверхностью эквивалента, мкм;

$\text{Ш}$ ,  $L$ ,  $h$  – размеры кристалла, мкм.

Высоту  $h'$  поперечного излома боковой поверхности находим из следующего соотношения:

$$h' = \Delta h'_1 + \Delta h'_2 + \Delta h'_3 + \dots + \Delta h'_n + 1 = 47 \text{мкм},$$

$$\text{где } \Delta h'_1 = \frac{\text{Ш}_{\text{и}}}{2 \cdot \operatorname{tg}\alpha} = 23 \text{мкм}; \Delta h'_2 = \frac{\Delta h'_1 \cdot \operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha} = 18 \text{мкм}; \Delta h'_3 = \frac{\Delta h'_2 \cdot \operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha} = 9 \text{мкм};$$

$n$  – число членов убывающего ряда;  $\text{Ш}_И$  – ширина источника тепла.

Высоту  $h''$  продольного излома боковой поверхности находим из ряда убывающих величин:

$$h'' = \Delta h_1'' + \Delta h_2'' + \Delta h_3'' + \dots + \Delta h_n'' + 1 = 107 \text{ мкм},$$

где  $\Delta h_1'' = \frac{L_И}{2 \cdot \text{tg} \alpha} = 52 \text{ мкм}$ ;  $\Delta h_2'' = \frac{\Delta h_1'' \cdot \text{tg} \beta}{\text{tg} \alpha} = 35 \text{ мкм}$ ;  $L_И$  – длина источника тепла.

Высоту  $h'''$  излома на боковой поверхности кристалла находим из выражений:

$$\begin{cases} h_\alpha''' = h - h^\alpha \\ h_\beta''' = h \cdot h_1^\beta = 131 \text{ мкм} \end{cases}$$

Площадь сечения эквивалента по линии излома на высоте  $h'$  находим из формулы:

$$S' = 4 \times \text{Ш}' \times L' = 33,69 \cdot 10^3 \text{ мкм}^2,$$

где  $\text{Ш}' = \frac{\text{Ш}_И}{2} + h' \cdot \text{tg} \beta = 72 \text{ мкм}$ ,  $L' = \frac{L_И}{2} + h' \cdot \text{tg} \beta = 117 \text{ мкм}$ .

Площадь сечения  $S''$  эквивалента по линии продольного излома боковой поверхности:

$$S'' = 4 \times \text{Ш}'' \times L'' = 108,9 \cdot 10^3 \text{ мкм}^2,$$

где  $\text{Ш}'' = \text{Ш}' + (h'' - h') \cdot \text{tg} \alpha = 164 \text{ мкм}$ ,  $L'' = \frac{L_И}{2} + h'' \cdot \text{tg} \beta = 165 \text{ мкм}$ .

Площадь сечения теплового эквивалента  $S'''$  на высоте  $h'''$  равна площади горизонтального сечения кристалла:

$$S''' = 4 \times \frac{\text{Ш}}{2} \times \frac{L}{2} = \text{Ш} \times L = 160 \cdot 10^3 \text{ мкм}^2.$$

Численную величину теплового сопротивления кристалла находим как прирост площадей сечений эквивалента:

$$R_T^{кр} = \sum_1^3 \Delta S_i = S_{II} + (S' - S_{II}) + \frac{S''' - S''}{10^3} = 84,89 \cdot 10^3 \frac{К}{Вт}.$$

Таким образом, рассмотрен конкретный пример алгоритма расчета величины теплового сопротивления кристалла с геометрическими размерами 150 мкм×400 мкм×400 мкм и источником тепла прямоугольной формы с размерами 70 мкм×160 мкм для теплового режима  $R_{Tcp}$  ( $tg\alpha=1,527$ ;  $tg\beta=0,79$ ).

При разработке и проектировании транзисторов геометрия и форма кристалла и источника тепла могут изменяться. Для разных исследуемых моделей можно точно рассчитать их тепловое сопротивление по предложенной методике и при этом расчет может быть проведен для различных тепловых режимов  $R_{Tcp}$ ,  $R_{Tmax}$  и  $R_{Tиз}$ .

Проведем исследование зависимости теплового сопротивления упомянутой базовой модели при изменении высоты, ширины, длины, площади горизонтального сечения и объема кристалла; формы источника тепла и величины его площади; коэффициента теплопроводности материала кристалла.

Определение теплового сопротивления для всей разновидности исследуемых моделей проведем по описанному выше алгоритму. Каждая модель в ряду отличается только одним параметром в диапазоне изменения этого переменного параметра в сторону уменьшения от базовой модели. В результате расчета получим последовательность численных значений величины теплового сопротивления от вариации переменного параметра, что позволит установить величину удельного теплового сопротивления  $\gamma$ :

$$\gamma = \left| \frac{R_T^{max} - R_T^{min}}{X_{max} - X_{min}} \right|,$$

где  $X_{max}$ ,  $X_{min}$  – предельные значения переменной величины.

Алгоритм расчета численного значения теплового сопротивления исследуемых моделей, приведенных в таблице, проводим путем определения прироста площадей сечения теплового эквивалента, кроме моделей указанных в строках 7 и 8 таблицы 1. Для этих моделей расчет теплового сопротивления проводим путем определения объема теплового эквивалента, который связан с количественной величиной теплового сопротивления посредством коэффициента полноты заполнения кристалла эквивалентом. В этом состоит суть усовершенствования традиционного способа, которая позволила расширить область применения алгоритма на модели с переменной величиной коэффициента теплопроводности материала транзистора.

Тепловое сопротивление кристалла по усовершенствованной методике определяется по формуле:

$$R_T^{kp} = R_T^r \cdot f = 90,58 \frac{K}{Bt},$$

где  $R_T^{kp}$  – геометрический эквивалент теплового сопротивления кристалла,

$$\text{равный } \frac{150 \text{ мкм}}{400 \text{ мкм} \times 400 \text{ мкм} \times 30 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})} = 31,25 \frac{K}{Bt};$$

$$f = \frac{V^{kp}}{V_{tr}} = \frac{24 \cdot 10^6 \text{ мкм}^3}{8,28 \cdot 10^6 \text{ мкм}^3} = 2,89 - \text{коэффициент полноты заполнения}$$

кристалла тепловым эквивалентом.

Таблица 1

Значение величины  $\gamma$  для различных переменных параметров модели

№	Параметр	Число моделей с переменным параметром	Размерность	Величина $R_T$ , К/Вт исследуемых моделей	Величина $\gamma$ , К/Вт	Характер зависимости
1	$H$	150; 130; 110; 90	мкм	84,89; 84,89; 42,56; 27,01	0,96	Прямая с изломом при $h = 130$ мкм
2	$Ш$	400; 350; 300; 250; 200	мкм	84,89; 71,79; 69,69; 96,69; 34,00	0,25	Прямая
3	$L$	400; 350; 300; 250; 200	мкм	84,79; 64,79; 54,59; 35,50; 31,20	0,27	Прямая
4	$S_{КР}$	250; 160; 90; 40	$\times 10^3$ мкм <sup>2</sup>	134,88; 84,89; 45,68; 28,80	0,52	Прямая
5	$V_{КР}$	24,00; 19,76; 14,25; 10,40; 7,16	$\times 10^6$ мкм <sup>3</sup>	84,89; 69,90; 54,39; 33,23; 26,11	5,25	Прямая
6	$S_{И}$	11,2; 6,0; 2,4; 0,4	$\times 10^3$ мкм <sup>2</sup>	84,89; 125,53; 139,34; 41,69	5,25	Обратная
7	$\lambda$	56; 44; 30	Вт/(м·К)	52,118; 75,28; 90,58	2,15	Обратная
8	$Tg\beta$	0,399; 0,790; 1,018	—	80,64 ( $R_{Тиз}$ ); 90,58 ( $R_{Тср}$ ); 103,44 ( $R_{Тmax}$ );	4,2 на 0,1 единицы	—

Величина объема теплового эквивалента  $V_{ТЭ}$  для базовой тепловой модели, состоящих из трех усеченных пирамид, определялась по выражению:

$$V_{ТЭ} = V_1 + V_2 + V_3 = 828 \text{ мкм}^3,$$

где  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  – объемы усеченных пирамид, каждый из которых определялся по традиционной формуле, известной из геометрии для усеченных геометрических фигур, используя высоты и площади верхнего и нижнего оснований усеченных пирамид.

$$V_1 = \frac{h'}{3} (S' + S_{II} + \sqrt{S' \cdot S_{II}}) = 2,01 \cdot 10^6 \text{ мкм}^3;$$

$$V_2 = \frac{h'' - h'}{3} (S'' + S' + \sqrt{S'' \cdot S'}) = 4,2 \cdot 10^6 \text{ мкм}^3;$$

$$V_3 = \frac{h - h'' - h_1^\alpha}{3} (S''' + S'' + \sqrt{S''' \cdot S''}) = 2,07 \cdot 10^6 \text{ мкм}^3.$$

Результаты расчета, указанные в строке 8 (переменный параметр  $\text{tg}\beta$ ) характеризуют величину теплового сопротивления для трех различных режимов  $R_{\text{Тср}}$ ,  $R_{\text{Тmax}}$  и  $R_{\text{Тиз}}$ . В качестве базовой модели легированного субмикронного транзистора был принят кристалл GaAs размерами  $100 \text{ мкм} \times 20 \text{ мкм} \times 100 \text{ мкм}$  и затвором  $0,3 \text{ мкм} \times 100 \text{ мкм}$ , представленный на рис. 2 [5].

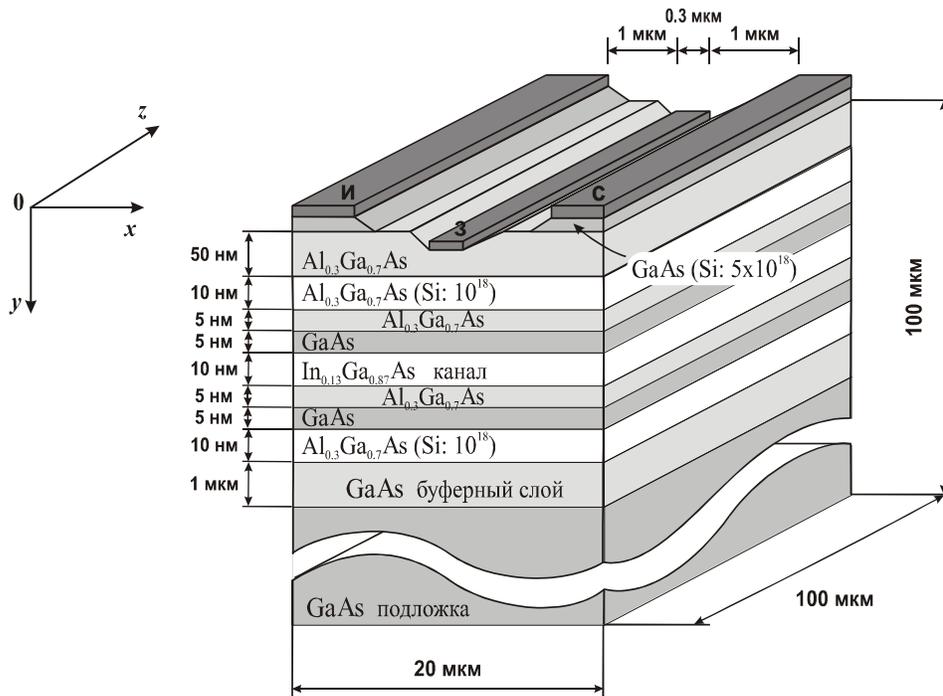


Рис. 2. Топологическая структура субмикронного гетероструктурного транзистора

На рис. 3 приведены данные расчета тепловых сопротивлений легированных субмикронных транзисторов, полученные по усовершенствованной методике. В результате расчета установлена зависимость теплового сопротивления от высоты и степени легирования слоев многослойной структуры, от ширины затвора транзистора.

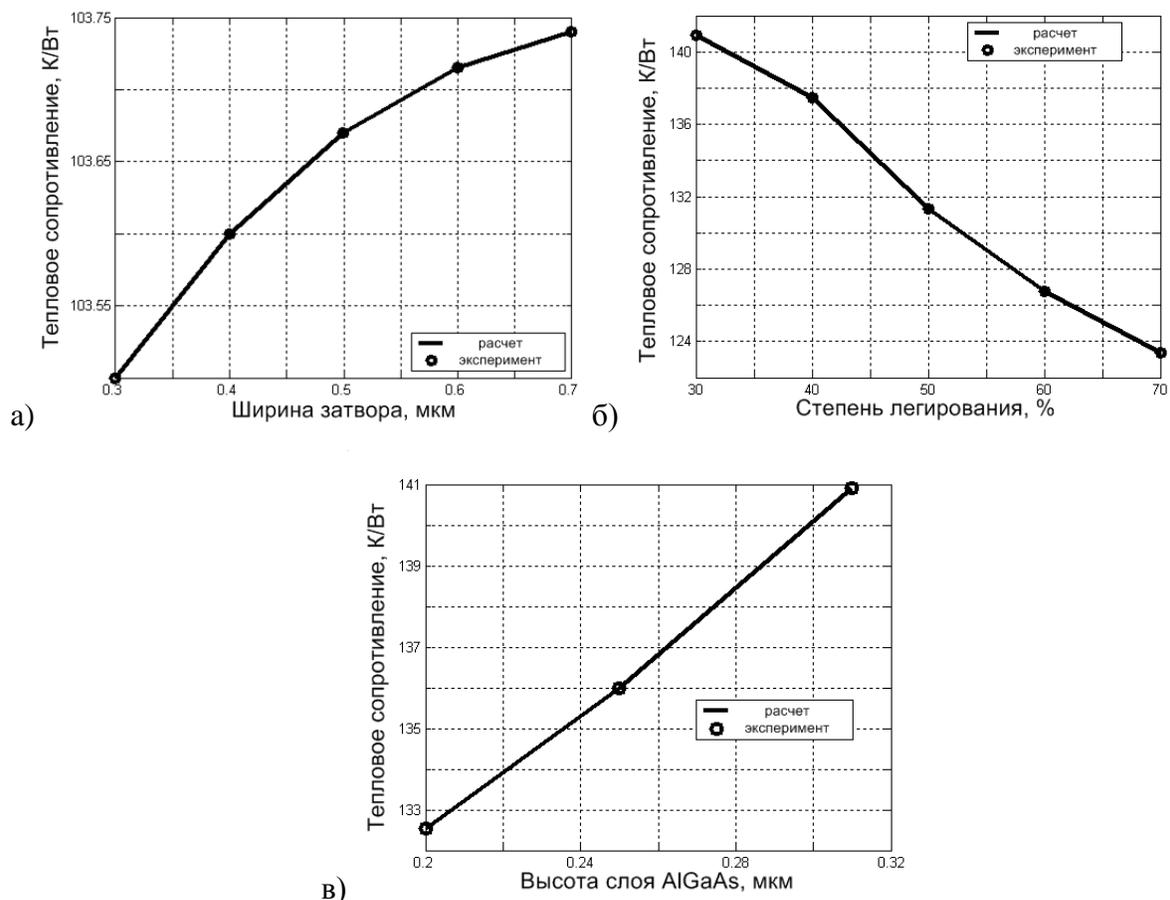


Рис. 3. Зависимости теплового сопротивления транзисторной структуры от ширины затвора (а), от степени легирования (б) и высоты слоя AlGaAs (в).

Из рис. 3 видно, что зависимость теплового сопротивления легированной транзисторной структуры от ширины затвора и высоты подзатворной области носит прямо пропорциональный характер, а от степени легирования – обратно пропорциональный.

Таким образом, предложенный алгоритм расчета теплового сопротивления можно применить для исследования субмикронных легированных структур.

#### **Выводы:**

1. Разработан алгоритм расчета численной величины теплового сопротивления транзистора по заданной форме и геометрическим размерам кристалла и источника тепла транзистора.
2. Рассмотрено два способа реализации алгоритма. Согласно первому способу тепловое сопротивление кристалла транзистора определяют как суммы приростов площадей сечений теплового эквивалента по линиям излома боковой поверхности. Второй способ является усовершенствованием существующих подходов и заключается в определении численной величины объема теплового эквивалента, которая пропорциональна тепловому сопротивлению кристалла.
3. Установлена зависимость теплового сопротивления от формы и площади источника тепла субмикронного транзистора, от высоты, ширины, длины, площади и объема кристалла; от изменения величин углов  $\text{tg}\alpha$  и  $\text{tg}\beta$ , а также от изменения коэффициента теплопроводности материала кристалла. Показано, что для переменных величин  $\text{tg}\beta$ , высоты и степени легирования подзатворного слоя характер зависимости теплового сопротивления обратно пропорциональный, а для остальных переменных параметров эта зависимость прямо пропорциональна.

### **Список используемых источников:**

1. Дульнев Г.Н. Методы расчета теплового режима приборов/ – М.: Радио и связь, 1990. – 310 с.
2. Дульнев Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена: - М.: Высшая школа, 1990. – 206 с.
3. Захоров А.Л., Асвадунова Е.И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов: Метод эквивалентов. – М.: Радио и связь, 1983. – 184 с.
4. Захоров А.Л., Асвадунова Е.И. Применение метода упрощенных эквивалентов для расчета сложных транзисторных структур. – Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Я.А. Федотова. – М.: Сов.радио, 1968, вып. 20, с. 82 – 93.
5. Inoue T., Ando Y., Miyamoto H., Nakayama T. 30-GHz-band over 5-W power performance of short-channel AlGaIn/GaN heterojunction FETs // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2005. – Vol.53, № 1 – P. 74 – 80.