

Продолжение. Начало в №2/2010

Тепловой расчет СИТ-транзисторов

и узлов силовых модулей с их применением. Часть 2

Юрий Непочатов

yuri.nepochatov@yandex.ru

Расчеты тепловых сопротивлений кристаллов и транзисторных сборок, входящих в состав узлов силовых модулей

Расчет теплового сопротивления участка структура-кристалл первого варианта конструктивного исполнения транзистора КП 926

Данная структура формируется на кристалле размером 0,55×0,56 см и состоит из 14 рядов в среднем по 270 истоков в каждом (рис. 1). Ширина истока $a = 12,4$ мкм, длина $b = 250$ мкм.

Расчет теплового сопротивления R_T произведем в три этапа.

1. Так как размеры истоков одинаковы, считаем источники тепла эквивалентными (рис. 2). Шаг между

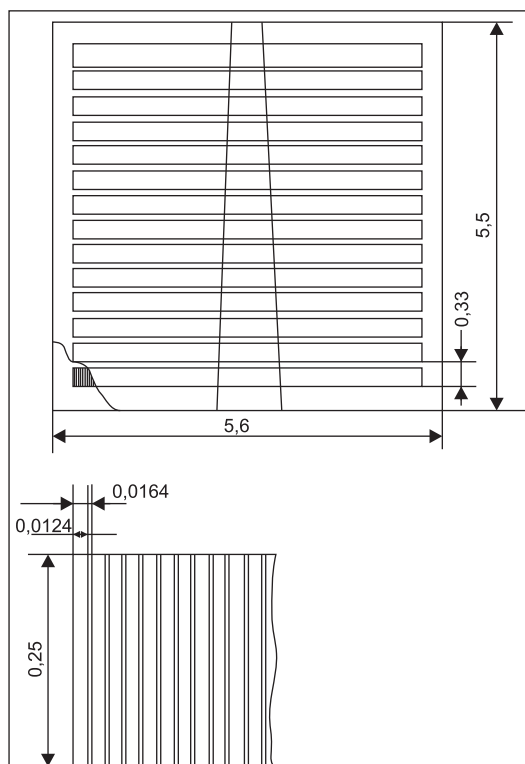


Рис. 1. Габаритные размеры и топология кристалла СИТ-транзистора КП 926

источниками $h = 16,4$ мкм. Пересечение тепловых потоков от источников по оси x произойдет на глубине, определяемой из выражения: $l_1' = h/2tg\alpha$.

По формулам (28, 29) [23] определяем $l_1 = 4,87$ мкм, $l_2 = 98,14$ мкм. Расчет R_T на этом этапе производим по формулам (18–21) [23] по специально разработанной компьютерной программе для расчета R_T . Учитывая, что коэффициент теплопроводности кремния $\lambda_{Si} = 1,06$ Вт/см·°С, получим тепловое сопротивление одной истоковой области на глубине $(0, l_1')$ равным $R_{T'}(0, l_1') = 0,1467$ °С/Вт.

Используя аналогию с электрическим сопротивлением, рассчитаем тепловое сопротивление слоя $R_T(0, l_1')$ кристалла как цепочку, состоящую из параллельно соединенных тепловых сопротивлений истоковых областей $R_{T'}(0, l_1') = 0,0388$ °С/Вт.

2. Определим размеры вновь образовавшихся источников тепла после пересечения тепловых эквивалентов истоковых областей $a_1 = n \cdot h$, где n — количество истоков в сечении по оси x , h — шаг истоков по оси x ; тогда $a_1 = 4428$ мкм.

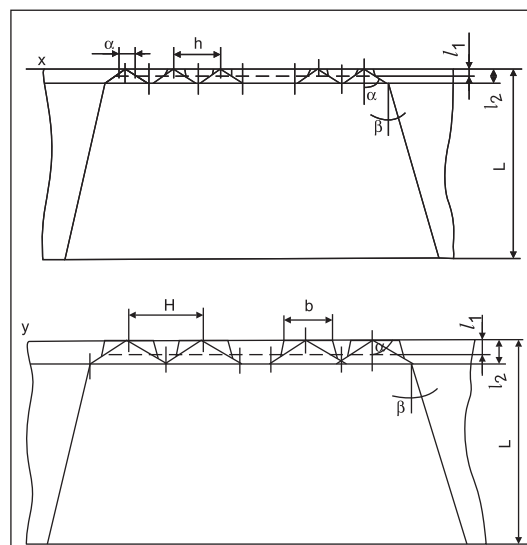


Рис. 2. Сечения теплового эквивалента по осям x , y поперечной структуры кристалла толщиной L СИТ-транзистора КП 926: a — ширина истоковой области; b — длина истоковой области; h — шаг структуры по оси x ; H — шаг структуры по оси y

Длину образовавшихся источников b_1 определим по формуле (22) — $b_1 = 252,71 \mu\text{м}$. Шаг между истоками по оси y примем равным $H_1 = 330 \mu\text{м}$ (рис. 2). Пересечение тепловых потоков по оси y произойдет на глубине $l_2 = 108,05 \mu\text{м}$. По формулам (28, 29) [23] определяем $l_1 = 99,1 \mu\text{м}$, $l_2 = 1736,47 \mu\text{м}$. Так как $l_1 < l_2$, расчет производим по формулам (18–21) [23]. В данном случае принимаем за $a = b = 252,71 \mu\text{м}$; $b = a_1 = 4428 \mu\text{м}$. Используя программу расчета, определяем R_T одного из образовавшихся источников — $R_T(l'_1, l'_2) = 0,784 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ и тепловое сопротивление слоя (l'_1, l'_2) : $R_T \text{ слоя}(l'_1, l'_2) = 0,056 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$.

3. Так как толщина кристалла $L = 300 \mu\text{м}$, то $l'_3 = L - (l'_1 - l'_2) = 186,58 \mu\text{м}$.

Ширина a образовавшегося источника тепла составит $4479,72 \mu\text{м}$, длина $b = 4620 \mu\text{м}$. По формулам (28, 29) [23] определяем $l_1 = 1756,75 \mu\text{м}$. Так как $l'_3 < l_1$ то тепловое сопротивление $R_T(l'_2, l'_3)$, рассчитанное по программе, составит $R_T(l'_2, l'_3) = 0,0854 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$. Тепловое сопротивление всего кристалла равно сумме сопротивлений слоев:

$$R_T(0, L) = R_T(0, l'_1) + R_T(l'_1, l'_2) + R_T(l'_2, l'_3) = 0,1453 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$$

Расчет теплового сопротивления участка структура-кристалл второго варианта конструктивного исполнения транзистора КП 926, состоящего из двух симметричных частей

Данная структура формируется на кристалле размером $0,56 \times 0,56 \text{ см}$ и состоит из двух симметричных частей (рис. 3).

Ширина истоковой области $a = 5 \mu\text{м}$, длина $b = 144 \mu\text{м}$. Достаточно определить тепловое сопротивление одной части, в которой имеется 2900 источников тепла. Расчет произведем аналогично методике, изложен-

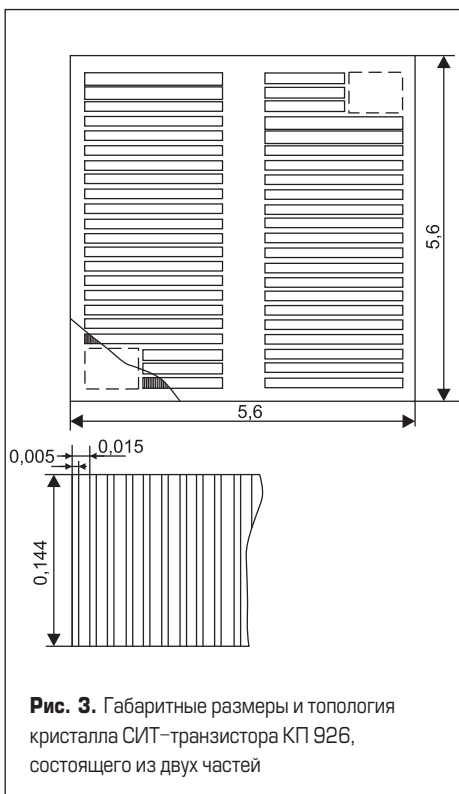


Рис. 3. Габаритные размеры и топология кристалла СИТ-транзистора КП 926, состоящего из двух частей

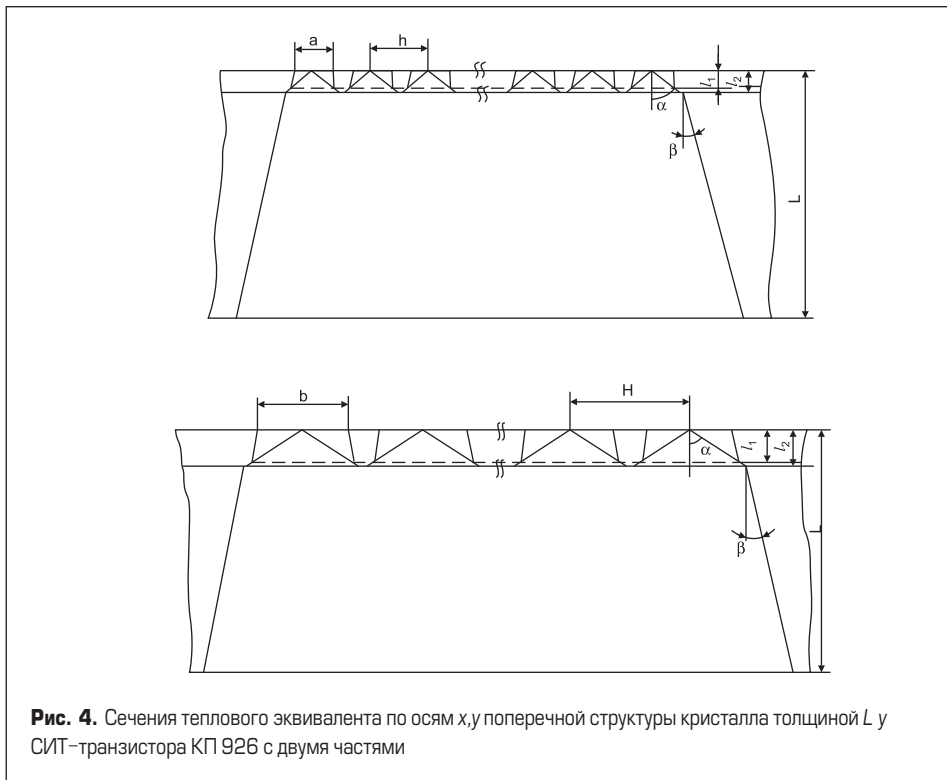


Рис. 4. Сечения теплового эквивалента по осям x, y поперечной структуры кристалла толщиной L у СИТ-транзистора КП 926 с двумя частями

ной выше. Шаг между истоками у кристалла СИТ-транзистора КП 926, состоящего из двух частей, по оси x составляет $15 \mu\text{м}$ (рис. 4), тогда расчетное значение теплового сопротивления всего кристалла толщиной $300 \mu\text{м}$ составит: $R_T(0, L) = 0,1578 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$.

Расчет теплового сопротивления транзисторных сборок

Расчет теплового сопротивления первого варианта конструктивного исполнения транзисторной сборки ТС-1 силового модуля

Определим размеры источника тепла, образовавшегося в результате теплового взаимодействия истоков $a = 4573,76 \mu\text{м}$, $b = 4714,04 \mu\text{м}$. Этот источник будет исходным при расчете транзисторных сборок. Результирующее тепловое сопротивление равно:

$$R_T = R_{T \text{ кр}} + \sum_{i=1}^N \Sigma R_{T \text{ в}}$$

где N — количество слоев и прокладок. На рис. 5 видно, что здесь пять слоев, соединенных между собой припоем, т. е. будет десять слагаемых. Так как размеры источника тепла больше, чем толщина каждого отдельно взятого слоя, растекание теплового потока происходит только под углом β . Используя программу расчета, тепловое сопротивление каждого слоя определим по формуле (30) [23]. Расчетное значение теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-1 силового модуля с основанием, выполненным из сплава МД40Н, составит $R_T = 0,9985 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$.

В случае, когда в качестве материала десятого слоя используется алюминиевый сплав Д16АТ (рис. 6) со следующими значениями

параметров $\lambda_{10} = 0,5 \text{ Вт/см }^\circ\text{C}$, $l_{10} = 0,3 \text{ см}$, происходит пересечение тепловых потоков на глубине $l = 0,5\alpha / \text{tg}\beta = 0,4762 \text{ см}$, и тепловое сопротивление транзисторной сборки с одним кристаллом равно $R_T = 0,9438 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$.

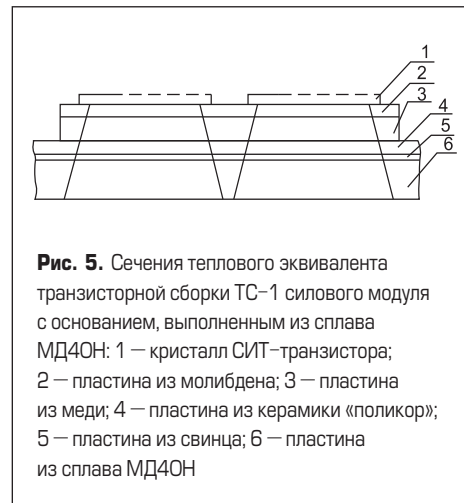


Рис. 5. Сечения теплового эквивалента транзисторной сборки ТС-1 силового модуля с основанием, выполненным из сплава МД40Н: 1 — кристалл СИТ-транзистора; 2 — пластина из молибдена; 3 — пластина из меди; 4 — пластина из керамики «поликор»; 5 — пластина из свинца; 6 — пластина из сплава МД40Н

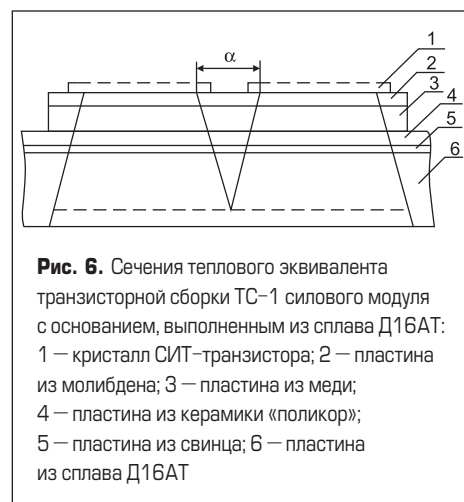


Рис. 6. Сечения теплового эквивалента транзисторной сборки ТС-1 силового модуля с основанием, выполненным из сплава Д16АТ: 1 — кристалл СИТ-транзистора; 2 — пластина из молибдена; 3 — пластина из меди; 4 — пластина из керамики «поликор»; 5 — пластина из свинца; 6 — пластина из сплава Д16АТ

Расчет теплового сопротивления второго варианта конструктивного исполнения транзисторной сборки ТС-2 силового модуля с двумя кристаллами

Определим размеры источников тепла $a = 2248,72$ мкм, $b = 4942,41$ мкм. Два таких источника находится на дне кристалла на расстоянии от середины $r' = r - mL = 308,4$ мкм.

Так как транзисторная сборка состоит из двух кристаллов, то на начальном этапе имеем четыре источника тепла (рис. 7). Просчитаем тепловое сопротивление сборки R_T с двумя кристаллами аналогично методике, изложенной выше. В результате расчета получим, что тепловое сопротивление транзисторной сборки с двумя кристаллами и с основанием, выполненным из сплава МД40Н, равно $R_T = 0,9143$ °С/Вт.

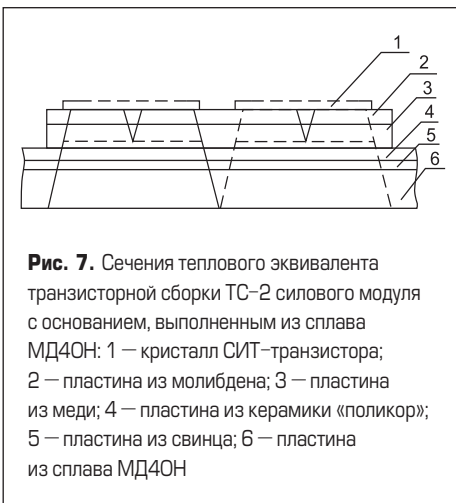


Рис. 7. Сечения теплового эквивалента транзисторной сборки ТС-2 силового модуля с основанием, выполненным из сплава МД40Н: 1 — кристалл СИТ-транзистора; 2 — пластина из молибдена; 3 — пластина из меди; 4 — пластина из керамики «поликор»; 5 — пластина из свинца; 6 — пластина из сплава МД40Н

В случае, когда основание изготавливается из алюминиевого сплава Д16АТ с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{10} = 0,5$ Вт/см °С и толщиной $l_{10} = 0,3$ см, пересечение тепловых потоков происходит на глубине $l = 0,5\alpha/\text{tg}\beta = 0,35$ см. Так как тепловые потоки объединились в один, то тепловое сопротивление транзисторной сборки равно $R_T = 0,8705$ °С/Вт (рис. 8).

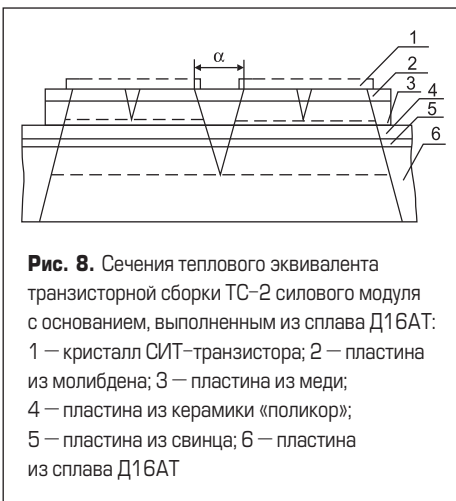


Рис. 8. Сечения теплового эквивалента транзисторной сборки ТС-2 силового модуля с основанием, выполненным из сплава Д16АТ: 1 — кристалл СИТ-транзистора; 2 — пластина из молибдена; 3 — пластина из меди; 4 — пластина из керамики «поликор»; 5 — пластина из свинца; 6 — пластина из сплава Д16АТ

В обобщенном виде результаты расчетов тепловых сопротивлений различных вариантов транзисторных сборок представлены в табл. 1.

Расчет максимальной рассеиваемой мощности

Максимально допустимая температура на кремниевой структуре транзистора составляет +150 °С, следовательно, на данной структуре можно рассеять постоянную мощность:

$$P_{\text{расс}} = (150 - T_{\text{к}}) / R_{\text{т}}$$

где $P_{\text{расс}}$ — рассеиваемая мощность, $T_{\text{к}}$ — температура корпуса, $R_{\text{т}}$ — тепловое сопротивление.

Расчетные значения максимальной рассеиваемой мощности различных вариантов конструктивного исполнения транзисторных сборок при $T_{\text{к}} = 50$ °С показаны в табл. 2.

Экспериментальное определение теплового сопротивления

Из всех методов измерения температуры кристалла [19] и оценки на этой основе величины $R_{\text{т}}$ предпочтителен электрофизический метод (метод термочувствительного параметра), что обусловлено его преимуществами: простотой реализации, возможностью измерения температуры структуры полупроводникового прибора без непосредственного доступа к ней, возможностью измерения наиболее перегретых участков (наибольшим геометрическим разрешением) [20]. Но так как свойства СИТ-транзисторов еще не полностью изучены и отсутствуют описания серьезных теоретических и практических разработок по измерению $R_{\text{т}}$ СИТ-транзисторов электрофизическим методом, поэтому измерение теплового сопротивления исследуемых транзисторных сборок проводилось с использованием термоиндикаторов плавления. С их помощью можно быстро получить информацию о тепловом режиме объекта, однако термоиндикаторам присуща инерционность, кроме того, их необходимо наносить на исследуемый объект. Нанесенный на исследуемую поверхность термоиндикатор при достижении строго определенной температуры в результате плавления одного или нескольких компонентов, входящих в его состав

и имеющих заданную температуру плавления, изменяет свой цвет. Относительная погрешность термоиндикаторов плавления находится в пределах 0,5–1,5%.

Измерения производились следующим образом. Транзисторная сборка силового модуля устанавливалась в колодку, имеющую водяное охлаждение, и подключалась к установке электротермотренировки. Непосредственно на кристаллы наносился термоиндикатор плавления ТП-130 (температура цветового перехода 133 °С). Задавалось определенное напряжение стока $U_{\text{с}}$ и плавно уменьшалось напряжение на затворе $U_{\text{з}}$ (при этом возрастал ток стока $I_{\text{с}}$) до расплавления термоиндикатора плавления. В этот момент фиксировались мощность ($I_{\text{с}}U_{\text{с}}$) и температура теплоотвода ($T_{\text{о}}$). Тепловое сопротивление определялось в соответствии с формулой:

$$R_{\text{т}} = (T_{\text{и}} - T_{\text{о}}) / P,$$

где P — рассеиваемая мощность, $T_{\text{о}}$ — температура теплоотвода, $T_{\text{и}}$ — температура цветового перехода термоиндикатора плавления, $R_{\text{т}}$ — тепловое сопротивление.

Измерение теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-1

В табл. 3 приведены результаты экспериментального измерения теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-1 с основанием, изготовленным из медно-молибденового псевдосплава МД40Н.

В табл. 4 представлены результаты экспериментального измерения теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-1 с основанием из алюминиевого сплава марки Д16АТ.

Измерение теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-2

В табл. 5 представлены результаты экспериментального измерения теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-2 с основанием, изготовленным из медно-молибденового псевдосплава марки МД40Н.

Таблица 1. Результаты расчетов тепловых сопротивлений

Вариант конструкции транзисторной сборки	Материал основания	Тепловое сопротивление транзисторной сборки, °С/Вт
ТС-1	МД40Н	0,9985
	Д16АТ	0,9438
ТС-2	МД40Н	0,9143
	Д16АТ	0,8705

Таблица 2. Расчетные значения максимальной рассеиваемой мощности

Вариант конструкции транзисторной сборки	Материал основания	Рассеиваемая мощность ($P_{\text{расс}}$), Вт
ТС-1	МД40Н	100,2
	Д16АТ	105,9
ТС-2	МД40Н	109,4
	Д16АТ	114,9

Таблица 3. Результаты экспериментального измерения теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-1 с основанием, изготовленным из медно-молибденового псевдосплава МД40Н

$U_{\text{с}}, \text{В}$	$I_{\text{с}}, \text{А}$	$P_{\text{расс}}, \text{Вт}$	$T_{\text{о}}, \text{°С}$	$T_{\text{и}} - T_{\text{о}}, \text{°С}$	$R_{\text{т эксп}}, \text{°С/Вт}$	$R_{\text{т расч}}, \text{°С/Вт}$
92	1,2	110,4	17	116	1,05	0,998
91	1,3	117,0	17	116	0,98	
95	1,2	114,0	17	116	1,02	
85	1,3	110,5	18	115	1,04	
81	1,4	113,4	18	115	1,01	
93	1,2	111,6	17	116	1,04	
79	1,5	118,5	19	114	0,96	

Таблица 4. Результаты экспериментального измерения теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-1 с основанием из алюминиевого сплава марки Д16АТ

U _{ср} , В	I _{ср} , А	P _{расч} , Вт	T _{ср} , °С	T _н -T _{ср} , °С	R _{тэксп} , °С/Вт	R _{трассч} , °С/Вт
93	1,3	120,9	18	115	0,95	0,944
89	1,4	115,7	19	114	0,92	
101	1,2	121,2	19	114	0,94	
98	1,2	117,6	18	115	0,98	
86	1,4	120,4	18	115	0,95	
84	1,3	109,2	19	114	1,04	
73	1,6	116,8	19	114	0,98	
77	1,5	115,5	18	115	0,99	

Таблица 5. Результаты экспериментального измерения теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-2 с основанием, изготовленным из медно-молибденового псевдосплава марки МД-40Н

U _{ср} , В	I _{ср} , А	P _{расч} , Вт	T _{ср} , °С	T _н -T _{ср} , °С	R _{тэксп} , °С/Вт	R _{трассч} , °С/Вт
82	1,5	123,0	18	115	0,93	0,914
78	1,6	124,8	19	114	0,91	
89	1,4	124,6	18	115	0,92	
97	1,3	126,1	19	114	0,90	
93	1,4	130,2	19	114	0,88	
109	1,1	119,9	20	113	0,94	

Таблица 6. Результаты экспериментального измерения теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-2 с основанием, изготовленным из алюминиевого сплава марки Д16АТ

U _{ср} , В	I _{ср} , А	P _{расч} , Вт	T _{ср} , °С	T _н -T _{ср} , °С	R _{тэксп} , °С/Вт	R _{трассч} , °С/Вт
87	1,5	130,5	18	115	0,88	0,870
75	1,7	127,5	18	115	0,90	
91	1,4	127,4	19	114	0,89	
102	1,3	132,6	20	113	0,85	
93	1,4	130,2	20	113	0,87	
79	1,6	126,4	18	115	0,91	

В табл. 6 представлены результаты экспериментального измерения теплового сопротивления транзисторной сборки ТС-2 с основанием, изготовленным из алюминиевого сплава марки Д16АТ.

Экспериментально определенное тепловое сопротивление несколько больше расчетных значений. Это объясняется тем, что наличие большого количества технологических слоев повышает вероятность образования «тепловых пробок» [21].

Вычислим среднее значение полученных экспериментальных измерений:

$$R_{тэксп} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{тi}$$

где *n* — количество проведенных измерений.

Среднее значение теплового сопротивления (R_{тэксп}) для транзисторной сборки ТС-1 с основанием из МД40Н составило 0,505 °С/Вт, с основанием из Д16АТ — 0,485 °С/Вт. Для транзисторной сборки ТС-2 с основанием из МД40Н среднее значение теплового сопротивления (R_{тэксп}) составило 0,913 °С/Вт, с основанием из Д16АТ — 0,883 °С/Вт.

Выводы

- Описанная методика расчета пригодна для вычисления тепловых сопротивлений в установленном тепловом режиме работы силового модуля с приемлемой для инженерных расчетов точностью.
- Приведенная методика позволяет рассчитать значения тепловых сопротивлений для всех конструктивных элементов узла силового модуля: непосредственно кристалла транзистора, а также слоев, входящих в состав конструкции и расположенных на пути распространения теплового потока до поверхности радиатора.

- Методика теплового расчета позволяет аналитическим методом определить максимальные значения рассеиваемой мощности транзисторных сборок при заданной максимально допустимой температуре на кремниевой структуре кристалла и температуре теплоотводящей пластины (корпуса), контактирующей с радиатором.
- С помощью описанного теплового расчета возможно определить температурный градиент, возникающий между *p-n*-переходом кристалла и основанием всего многослойного узла (транзисторной сборки), оптимизировать в процессе разработки силового модуля размеры и топологию кристалла, способ его крепления, формы и размеры элементов конструкции, а также применяемые теплопроводящие материалы.

Литература

1. Бичурин М. И., Букашев Ф. И., Петров В. М. Spice-модели биполярных транзисторов со статической индукцией. Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого. 2009.
2. Тамма М. и др. Мощные транзисторы со статической индукцией. Тохоку Киндзозону Гихо. 1980. № 1.
3. Антонов М. И., Данилов В. С., Корнилова С. Н., Максименко Ю. Н. Мощный полевой транзистор со статической индукцией КП801А, Б. // Электронная промышленность. 1984. № 6.
4. Антонов М. И., Данилов В. С., Корнилова С. Н., Максименко Ю. Н., Мягкая Н. К. Мощный полевой транзистор со статической индукцией // Электронная промышленность. 1985. № 7.

5. Nishizawa, Terasaki, Yhibata. Field – Effect transistor vervies analog transistor (Statis induction transistor) // IEEE Trans on electron devices. 1975. Vol. 22. № 4.
6. Транзисторы со статической индукцией. Хаидомай Кэмноси Хекоку. 1980. № 4.
7. Пат. № 52-6076 (Япония). Транзистор, управляемый полем / Nishizawa // Заявл. 28.04.71. № 46-28405.
8. Коббоид Р. Теория и применение полевых транзисторов / Пер. с англ. Л.: Энергия. 1975.
9. Nishizawa, Yamamoto. High-Frequency-High-Power Statis Induction Transistor // IEEE Trans on electron devices. 1978. № 3.
10. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов / Пер. с англ. М.: Энергия. 1975.
11. Balige. IEEE Trans on electron devices, T. ED-27. 1980. № 2.
12. Пат. № 4.106.044 (США) Полевой транзистор с ненасыщенными характеристиками / Joschida // Заявл. 27.05.77, опубл. 8. 08.78.
13. Бономорский О., Воронин П., Куканов В., Щепкин Н. Сравнительные экспериментальные исследования модулей IGBT и модулей на основе комбинированных СИТ-МОП-транзисторов // Силовая электроника. 2004. № 1.
14. Колпаков А. И. Тепловые характеристики интеллектуальных силовых модулей фирмы SEMIKRON // Компоненты и технологии. 2003. № 4.
15. Колпаков А. И. Расчет тепловых режимов MOSFET-транзисторов с помощью программы HEXRISE // Компоненты и технологии. 2002. № 5.
16. Захаров А. Л., Асвадунова Е. И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов. Метод эквивалентов. М.: Радио и связь. 1983.
17. Захаров А. Л., Асвадунова Е. И. Метод расчета тепловых сопротивлений мощных транзисторов. Сб. Полупроводниковые приборы и их применение. М.: Советское радио. 1968. № 20.
18. Захаров А. Л., Асвадунова Е. И. Расчет тепловых сопротивлений многослойных структур при наличии контактного сопротивления между слоями. Сб. Полупроводниковые приборы и их применение. М.: Советское радио. 1972. № 26.
19. ОСТ 11. 073.82. Методы контроля температуры транзисторной структуры.
20. Canali C., Donzelli G., Janoni E. Correlation beturen termal resistance, channel temperature, infrared maps and failure mechanisms in bow power MESFET devices // Microelectronics and reliability. 1989. № 2.
21. Диковский В. И., Асвадунова Е. И. Некоторые причины повышенного значения тепловых сопротивлений в мощных СВЧ-транзисторах // Электронная техника. 1980. № 1.
22. Бономорский О., Воронин П., Щепкин Н. Исследование процессов запираания комбинированных силовых транзисторов // Силовая электроника. 2004. № 2.
23. Непочатов Ю. Тепловой расчет СИТ-транзисторов и узлов силовых модулей с их применением. Часть 1 // Силовая электроника. 2010. № 2.