

Предложена инженерная методика расчёта температуры полупроводниковой структуры силовых полупроводниковых приборов в условиях их работы в гибридных коммутационных аппаратах на основе численного решения уравнений теплопроводности для модели, адекватно отражающей реальную конструкцию этих приборов.

УДК 621.316

А.Г. Сосков, д-р техн. наук
Н.О. Рак

Харьковская национальная академия городского хозяйства

И.А. Соскова, канд. техн. наук
Украинская инженерно-педагогическая академия

РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В УСЛОВИЯХ ИХ РАБОТЫ В СОСТАВЕ ГИБРИДНЫХ АППАРАТОВ

Введение. Силовые полупроводниковые приборы (СПП) входят в состав полупроводниковых ключей (ПК) как гибридных, так и бесконтактных полупроводниковых аппаратов, которые обеспечивают бездуговую коммутацию потоков электрической мощности, т.е. выполняют основную силовую функцию коммутационного аппарата. В качестве силового бесконтактного элемента в ПК в настоящее время наиболее часто используются однооперационные СПП (тиристоры, симисторы, оптронные симисторы) и двухоперационные (IGBT-транзисторы, GTO-тиристоры, IGCT-тиристоры) [1, 2].

Для рационального выбора СПП в качестве элемента ПК разработчикам коммутационных аппаратов необходимо учитывать предельные параметры СПП. Система предельно допустимых параметров ключа объединяет граничные значения напряжений и токов для входной и выходной цепи прибора, максимально возможную рассеиваемую мощность и предельно допустимые температуры переходов и корпуса. Последние определяются свойствами исходного материала, особенностями структуры переходов и конструкции прибора, а также режимом его работы и являются наиболее значимыми, поскольку в основном определяют габариты и стоимость ПК. Поэтому расчёт значений этих температур при заданных условиях работы является одной из важнейших задач, возникающих при разработке и проектировании коммутационных полупроводниковых аппаратов.

СПП, входящие в состав гибридных ПК переменного и постоянного тока, в основном работают в импульсном режиме, при этом форма токового импульса может быть произвольной при длительности до 0,002 с. [3, 4], т.е. данный режим работы СПП широко распространён и требует детального анализа.

Существует два основных метода определения температуры структуры СПП: графо-аналитический и аналитический [1]. В настоящее время для расчёта температуры СПП в импульсном режиме наибольшее распространение получил первый метод, который основан на использовании графической зависимости переходного теплового сопротивления прибора от времени [1, 5]. В [1] рассмотрены особенности, свойственные этому методу, а также основные правила его применения. Данный метод позволяет достаточно просто определять температуру полупроводниковой структуры (в дальнейшем структуры) СПП при воздействии на них единичных импульсов мощности произвольной формы. Однако, в связи со сложностью определения величина переходного теплового сопротивления в диапазоне малых времён (меньше 0,01 с.) для мощных тиристоров в справочных материалах либо вообще не приводится, либо приводится, но не отличается требуемой достоверностью [1].

Аналитический метод расчёта тепловых характеристик (температуры структуры) СПП основан на решении уравнений нестационарной теплопроводности, составленных для внутренних элементов конструкции с учётом их взаимосвязи, геометрических размеров и характеристик применяемых материалов. В общем случае нестационарные тепловые процессы многослойных систем, таких как, например, вышеупомянутые СПП, описываются системой нелинейных уравнений в частных производных с неоднородными граничными и начальными условиями. Поскольку аналитически такие системы уравнений, как правило, непосредственно неразрешимы, решение их выполняется на базе упрощённых теплофизических моделей [6].

Результаты расчёта температуры структуры СПП этим методом не являются достаточно достоверными из-за применения упрощённых теплофизических моделей СПП, где учёт слоёв припоя произведён за счёт расширения слоёв вольфрама на толщину, которая по тепловому сопротивлению эквивалентна слоям припоя [6]. Кроме того, не учитывается влияние медного основания прибора [1]. Более полное и точное представление о температурном поле СПП даёт аналитический метод, основанный на численном решении уравнений теплопроводности на базе модели, адекватно отражающей конструкцию СПП.

Учитывая высокий уровень развития современной вычислительной техники, становится возможным построить данную методику на основе численного решения уравнений теплопроводности для реальной конструкции СПП, где учтены все без исключения слои СПП.

Целью данного исследования является разработка на основе этого метода инженерной методики расчёта температуры структуры СПП при воздействии на неё токовых импульсов произвольной формы и длительностью до 0,02 с., с помощью которой возможно с достаточной для инженерных расчётов точностью определять количественные параметры температурного поля, т.е. определять значения превышения температуры в любом месте структуры СПП в произвольный момент времени воздействия импульса мощности. В отличие от методики расчёта температуры структуры СПП, основанной на использовании упрощённых теплофизических моделей СПП [1, 6], предлагаемая методика позволит с более высокой точностью выполнять расчёт превышения температуры структуры СПП.

Определение температуры СПП с помощью непосредственного решения уравнений теплопроводности. Метод конечных разностей является одним из наиболее распространённых методов, позволяющих определять превышение температуры при воздействии импульсов мощности произвольной формы в слоях модели СПП, отражающей его реальную конструкцию. Исследование конструкций СПП показывает, что в первом приближении теплофизическая модель этого прибора может быть представлена в виде многослойной системы разнородных пластин с внутренним источником тепла, расположенном в полупроводниковой структуре. Основным элементом этой модели является монокристаллическая пластина полупроводника (как правило, кремния), на которой методом диффузии образовано несколько электронно-дырочных переходов, образующих полупроводниковую структуру. Эта пластина совместно с термокомпенсаторами является выпрямительным элементом. По конструкции выпрямительного элемента современные СПП делятся на приборы с припаянными контактами (например, мощные тиристоры с гибким или жёстким выводом) и с прижимными контактами (например, мощные таблеточные тиристоры). В первой группе приборов контакт между полупроводниковой пластиной и вольфрамовым термокомпенсатором обеспечивается методом пайки (рис. 1, а), во второй припаяется только нижний термокомпенсатор, контакт же между пластиной и верхним медным основанием создаётся с помощью по-

стоянного механического нажатия (рис. 1, б), обеспечиваемого конструкцией прибора через мягкую токопроводящую прокладку [1, 5, 6].

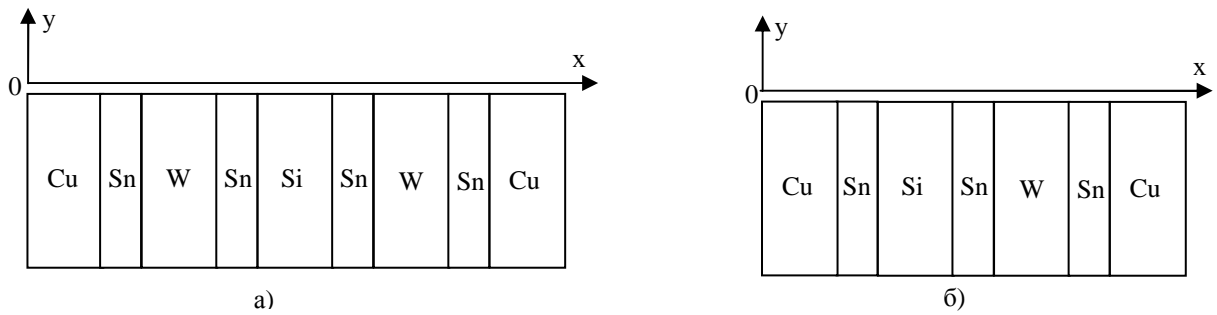


Рис.1. Теплофизические модели мощных тиристорov: а) с припаянными контактами, б) с прижимными контактами

При выполнении расчёта температурного поля СПП приняты такие допущения:

- распределение тепла в модели симметрично;
- градиент температуры в плоскости, перпендикулярной оси прибора, равен нулю, поэтому задача решается в одномерном приближении;
- вся энергия потерь выделяется в объёме полупроводниковой структуры (во всём или некоторой его части), т.е. рассматривается случай с объёмным источником тепла;
- начальная температура всех элементов модели одинакова;
- вольт-амперная характеристика СПП в прямом направлении аппроксимируется пороговым напряжением U_0 и линейной зависимостью от тока при $u > U_0$, определяемой дифференциальным сопротивлением R_0 .

Распределение превышения температуры в слоях расчётных моделей при одномерном распространении тепла определяется следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка (предполагается, что источник тепла равномерно распределён по объёму кремниевой пластины) [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = a_1(\theta) \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} \\ \dots \\ \frac{\partial \theta_4}{\partial t} = a_4(\theta) \frac{\partial^2 \theta_4}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \theta_5}{\partial t} = a_5(\theta) \frac{\partial^2 \theta_5}{\partial x^2} + \frac{q}{c_5 \gamma_5} \quad (1,а) \\ \frac{\partial \theta_6}{\partial t} = a_6(\theta) \frac{\partial^2 \theta_6}{\partial x^2} \\ \dots \\ \frac{\partial \theta_9}{\partial t} = a_9(\theta) \frac{\partial^2 \theta_9}{\partial x^2} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = a_1(\theta) \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = a_2(\theta) \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \theta_3}{\partial t} = a_3(\theta) \frac{\partial^2 \theta_3}{\partial x^2} + \frac{q}{c_3 \gamma_3} \quad (1,б) \\ \frac{\partial \theta_4}{\partial t} = a_4(\theta) \frac{\partial^2 \theta_4}{\partial x^2} \\ \dots \\ \frac{\partial \theta_7}{\partial t} = a_7(\theta) \frac{\partial^2 \theta_7}{\partial x^2} \end{array} \right.$$

где для системы (1,а), составленной для модели тиристора с припаянными контактами, переменные с индексом 1 и 9 – для меди, с индексом 2, 4, 6 и 8 – для припоя, 3 и 7 – для вольфрама, 4 – для кремниевой пластины; для системы (1,б), составленной для модели тиристора с прижимными контактами, переменные с индексом 1 и 7 – для меди, с индексом 2, 4 и 6 – для припоя, 3 – для кремниевой пластины, 5 – для вольфрама;

θ_i – превышение температуры;

$q = \frac{P(t)}{V}$ – удельная мощность, выделяемая в кремниевой пластине;

V – объём кремниевой пластины;

$a_i(\theta) = \frac{\lambda_i(\theta)}{c_i(\theta)\gamma_i}$ – коэффициент температуропроводности;

$c_i(\theta)$ – удельная теплоёмкость;

γ_i – удельная плотность;

$\lambda_i(\theta)$ – коэффициент теплопроводности.

Системы уравнений теплопроводности вида (1,а) и (1,б) могут быть решены методом конечных разностей с применением той или иной разностной схемы (явной или неявной), под которой понимают совокупность разностных уравнений, аппроксимирующих основное уравнение и дополнительные условия исходной дифференциальной задачи [7]. Выбор схемы производится исходя из соображений устойчивости, которая определяет чувствительность разностной схемы к различного рода погрешностям. Исследования устойчивости разностных схем при аппроксимации уравнений теплопроводности [7] показывают целесообразность применения неявной схемы, которая в отличие от явной является абсолютно устойчивой, т.е. выбор величины временного и пространственного шагов определяется только заданной точностью расчётов, а не соображениями устойчивости.

Для построения разностной схемы прежде всего вводится пространственно-временная сетка в области изменения независимых переменных и задаётся шаблон, т.е. множество точек сетки, участвующих в аппроксимации дифференциального выражения. Вводится сетка по переменному x таким образом, что многослойная пластина теплофизической модели толщиной l разбивается на n однородных слоёв произвольной толщины (i – порядковый номер слоя, $i \in 1,2...n$), где n – общее количество слоёв, на которые разбивается многослойная пластина СПП. При этом пространственный шаг сетки может быть как равномерным, так и неравномерным, что позволяет с большей точностью учитывать более резкое изменение температуры в слоях кремния по сравнению со слоями структуры, куда тепло практически не доходит.

Аналогично вводится равномерная сетка по времени с шагом Δt , (k – порядковый номер временного слоя, $k \in 1,2...m$), где m – количество временных слоёв, на которое разбивается вся длительность импульса мощности.

В результате применения неявной схемы система дифференциальных уравнений теплопроводности аппроксимируется следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & \frac{\Delta\tau}{R_{лев.1}}\theta_0 - \left(\frac{\Delta\tau}{R_{лев.1}} + \frac{\Delta\tau}{R_{прав.1}} + c_1\gamma_1L_1 \right)\theta_1 + \frac{\Delta\tau}{R_{прав.1}}\theta_2 + P_V(\tau)L_1\Delta\tau + \vartheta_1c_1L_1 = 0 \\
 & \frac{\Delta\tau}{R_{лев.2}}\theta_1 - \left(\frac{\Delta\tau}{R_{лев.2}} + \frac{\Delta\tau}{R_{прав.2}} + c_2\gamma_2L_2 \right)\theta_2 + \frac{\Delta\tau}{R_{прав.2}}\theta_3 + P_V(\tau)L_2\Delta\tau + \vartheta_2c_2L_2 = 0 \\
 & \dots\dots\dots \\
 & \frac{\Delta\tau}{R_{лев.i}}\theta_{i-1} - \left(\frac{\Delta\tau}{R_{лев.i}} + \frac{\Delta\tau}{R_{прав.i}} + c_i\gamma_iL_i \right)\theta_i + \frac{\Delta\tau}{R_{прав.i}}\theta_{i+1} + P_V(\tau)L_i\Delta\tau + \vartheta_i c_i L_i = 0 \\
 & \dots\dots\dots \\
 & \frac{\Delta\tau}{R_{лев.n}}\theta_{n-1} - \left(\frac{\Delta\tau}{R_{лев.n}} + \frac{\Delta\tau}{R_{прав.n}} + c_n\gamma_nL_n \right)\theta_n + \frac{\Delta\tau}{R_{прав.n}}\theta_{n+1} + P_V(\tau)L_n\Delta\tau + \vartheta_n c_n L_n = 0
 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где θ_i – превышение температуры в текущем слое материала;
 θ_{i-1} – превышение температуры в предыдущем слое материала;
 θ_{i+1} – превышение температуры в последующем слое материала;
 ϑ_i – превышение температуры в текущем слое материала на предыдущем временном слое;
 c_i, γ_i, λ_i – удельная теплоёмкость, удельная плотность и коэффициент теплопроводности для i -го слоя;

L_i – толщина i -го слоя материала;

$$R_{лев.i} = \frac{1}{2} \left(\frac{L_{i-1}}{\lambda_{i-1}} + \frac{L_i}{\lambda_i} \right), \quad R_{прав.i} = \frac{1}{2} \left(\frac{L_{i+1}}{\lambda_{i+1}} + \frac{L_i}{\lambda_i} \right) \quad \text{для } i \in 2, 3 \dots n-1;$$

$$R_{лев.i} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{\alpha} + \frac{L_i}{\lambda_i} \right), \quad R_{прав.i} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{\alpha} + \frac{L_i}{\lambda_i} \right) \quad \text{для } i = 1, n;$$

α – коэффициент теплоотдачи;

$$P_V(t) = \frac{i_T(t)[U_0 + i_T(t)R_0]}{V_{Si}} \quad \text{– объёмная плотность рассеиваемой в pn-переходе}$$

мощности;

V_{Si} – объём слоя кремния.

Для удобства заменим выражения перед θ_{i-1} , θ_i , θ_{i+1} и свободный член уравнений (2) на коэффициенты $B_i = \frac{\Delta\tau}{R_{лев.i}}$, $C_i = \frac{\Delta\tau}{R_{лев.i}} + \frac{\Delta\tau}{R_{прав.i}} + c_i\gamma_iL_i$, $D_i = \frac{\Delta\tau}{R_{прав.i}}$,

$$E_i = P_V(\tau)L_i\Delta\tau + \vartheta_i c_i \gamma_i L_i.$$

Получим систему

$$\begin{cases} B_1\theta_0 - C_1\theta_1 + D_1\theta_2 + E_1 = 0 \\ B_2\theta_1 - C_2\theta_2 + D_2\theta_3 + E_2 = 0 \\ \dots\dots\dots \\ B_i\theta_{i-1} - C_i\theta_i + D_i\theta_{i+1} + E_i = 0 \\ \dots\dots\dots \\ B_n\theta_{n-1} - C_n\theta_n + D_n\theta_{n+1} + E_n = 0 \end{cases} \quad (3)$$

При решении системы линейных уравнений зависимости λ , c и R_θ от θ считались линейными [1]:

$$\lambda(\theta) = \lambda_0(1 + b_\lambda\theta), \quad c(\theta) = c_0(1 + b_c\theta), \quad R_\theta(\theta) = R_{\theta 0}(1 + b_{R\theta}\theta),$$

где λ_0 , c_0 и $R_{\theta 0}$ – значения λ , c и R_θ при температуре начала отсчёта ($\theta = 0$);

b_λ , b_c и $b_{R\theta}$ – температурные коэффициенты λ , c и R_θ соответственно.

Граничные и начальные условия для систем уравнений (1,а), (1,б) и (3) следующие:

$$1. \quad x = 0, \quad \frac{\partial\theta_1}{\partial x} = 0.$$

2. Для каждой поверхности раздела, расположенной на границе двух соседних слоёв, в любой момент времени имеют место граничные условия четвёртого рода [8]:

$$-\lambda_{k-1}(\theta) \frac{\partial\theta_{k-1}}{\partial x} = -\lambda_k(\theta) \frac{\partial\theta_k}{\partial x} \quad \text{и} \quad \theta_{k-1} = \theta_k.$$

3. На границах двух крайних слоёв модели граничные условия третьего рода [8]:

$$-\lambda(\theta) \frac{\partial\theta}{\partial x} = \alpha(\theta_n) \quad \text{и} \quad -\lambda(\theta) \frac{\partial\theta}{\partial x} = \alpha(\theta_1),$$

где θ_1 и θ_n – превышение температуры на концах модели.

Начальные условия:

$$t = 0, \quad \theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_n = 0.$$

Неявная разностная схема, выраженная в виде системы (3), обладает трёхдиагональной матрицей, т.е. состоит из трёхточечных уравнений, которые на каждом временном слое содержат неизвестную функцию в трёх точках. Такие системы уравнений могут быть решены методом прогонки. Суть этого метода состоит в следующем. Последовательно, начиная с первого уравнения, используя известное значение θ_0 выражается превышение температуры θ_i текущего слоя через превышение температуры последующего θ_{i+1} . Например, θ_1 первого слоя выражается из первого уравнения через θ_2 второго слоя, это выражение подставляется во второе уравнение и т.д.:

$$\theta_1 = \frac{D_1\theta_2 + E_1 + B_1\theta_0}{C_1}$$

При этом в процессе подстановки на каждом этапе появляются новые прогоночные коэффициенты: при θ_i (назовём его C_i') и свободный член уравнения E_i' .

Получаем формулы для определения этих коэффициентов:

$$C_i' = C_i - \frac{B_i}{C_{i-1}} D_i \quad \text{для} \quad i \in 2, 3, \dots, n \quad \text{и} \quad C_1' = C_1 \quad \text{для} \quad i = 1;$$

$$E_i' = E_i + \frac{B_i}{C_{i-1}} E_{i-1} \quad \text{для} \quad i \in 2, 3, \dots, n \quad \text{и} \quad E_1' = E_1 + B_1\theta_0 \quad \text{для} \quad i = 1.$$

Последовательный расчёт этих коэффициентов начиная с $i=1$ и заканчивая $i=n$ возможен благодаря известному значению θ_0 и называется прямой прогонкой.

Далее выводится выражение для определения превышения температуры θ_i на каждом пространственном слое. Последовательно подставляя, начиная с первого уравнения в последующее, θ_i выраженное через θ_{i+1} , получим расчётную формулу:

$$\theta_i = \frac{D_i \cdot \theta_{i+1} + E'_i}{C'_i} \quad (4)$$

С помощью этого выражения расчёт θ_i ведётся в обратном порядке (обратная прогонка), начиная с последнего уравнения системы. Известное θ_{n+1} позволяет определить θ_n , затем θ_{n-1} и т.д. до θ_1 .

Эти операции производились для первого временного слоя, когда содержащееся в выражении для коэффициента E_i $\vartheta_i = 0$. Для последующих временных шагов вместо ϑ_i подставляется θ_i , рассчитанное на предыдущем временном шаге. Таким образом, выполняя прогонку (прямой и обратный ход) последовательно на каждом временном слое, получаем множество узловых значений температурного поля теплофизической модели СПП.

Несмотря на очень большое количество математических операций, выполняемых при расчёте этим методом (которое прямо пропорционально величинам пространственного и временного шагов), он является достаточно легко реализуемым на ЭВМ, удобным и обеспечивающим высокую точность расчётов. Такие математические средства, как MathCAD, Maple и др. позволяют составить достаточно компактную программу, в которой реализуется описанный выше алгоритм, производить расчёты с высокой точностью и малыми затратами времени, а также выводить на экран трёхмерные графики распространения тепла в структуре СПП с течением времени при воздействии на него импульса мощности.

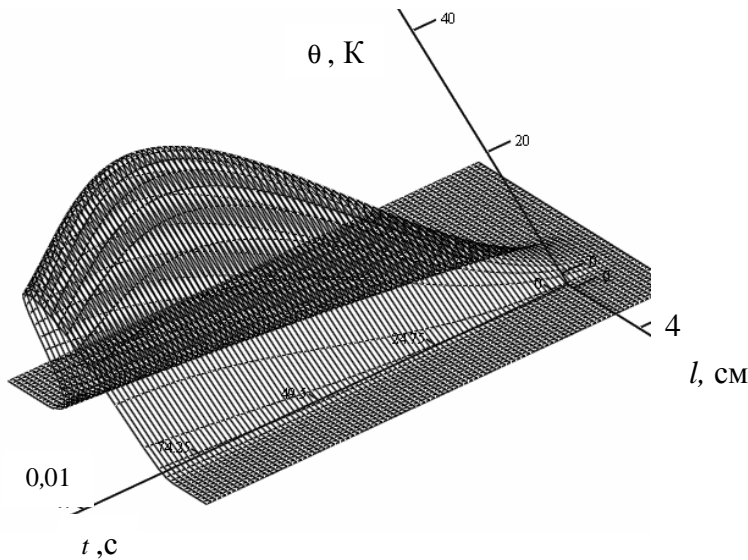


Рис. 2. Распределение превышения температуры в структуре тиристора Т161-160 при воздействии импульса переменного тока 1400 А.

Следует отметить, что при расчётах описанным методом было выбрано деление временной шкалы на 100 равномерных отрезков исходя из того, что увеличение и уменьшение этого количества в 10 раз при заданной относительной погрешности не влияет на точность результата. Также было исследовано влияние изменения толщины пространственных слоёв на которые разбивалась модель СПП. За основу были взяты такие данные: количество элементарных слоёв кремния – 10, с обеих сторон от него вольфрама – 15, припоя – 2, меди – 15.

Увеличение, как и уменьшение количества разбиений на элементарные слои каждого материала в 2 – 10 раз также очень незначительно повлияло на конечный результат (относительная погрешность составила менее 0,3 %). Таким образом, значительное уменьшение пространственного и временного шагов (более десятикратного) ведёт не столько к увеличению точности, сколько к неоправданному увеличению времени производимых расчётов на ЭВМ.

Кроме того, было исследовано влияние разбиения на большее количество элементарных слоёв только кремниевой пластины и помещения объёмного источника тепла в один центральный слой, в три центральных и во все слои кремния. Такое исследование было проведено в связи с тем, что температура в кремнии с течением времени изменяется наиболее интенсивно по сравнению с другими слоями тиристора, а также, исходя из физического строения р-п структуры, в которой в реальности тепло выделяется в самом её центре. Проведенный анализ показал, что дробность разбиения кремния и расположения источника тепла в одном, нескольких или во всех слоях кремния в разной степени сказываются на результате расчёта превышения температуры. При этом результаты максимального превышения температуры при воздействии синусоидального импульса тока отличаются примерно на 2% при помещении источника тепла в центр кремния по сравнению с занимаемым им полным объёмом (при одинаковом общем количестве слоёв кремния), значения же превышения температур в конце импульса отличаются незначительно (менее 0,1%). При одинаковом местоположении источника тепла (в центре или по всему объёму кремния), но при разном дроблении на слои кремниевой пластины разница в значениях θ совсем не значительна.

Инженерная методика расчёта превышения температуры структуры СПП. В связи с тем, что при расчётах превышения температуры с помощью показанного метода необходимо вводить информацию, характеризующую конструкцию конкретного типа СПП, которой не располагают разработчики коммутационных полупроводниковых аппаратов, авторы предлагают усовершенствованную методику расчёта температуры структуры, лишённую указанных недостатков. Суть её состоит в следующем:

1) выражение для переходного теплового сопротивления представляется для конкретного типа СПП в виде ряда экспонент типа [2, 6]:

$$r(t) = \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}). \quad (5)$$

Для этого зависимость $\theta(t)$ для слоя кремния, рассчитанная при воздействии на СПП прямоугольного импульса единичной мощности и численно равная переходному тепловому сопротивлению переход-корпус [5], аппроксимируется в виде функции типа (5), что позволяет получить значения коэффициентов R_i и τ_i . Такую операцию достаточно несложно выполнить с помощью программы Mathcad. При этом проведенные исследования показали, что уже при $n = 2$ погрешность аппроксимации менее 0,5 %;

2) затем для расчёта превышения температуры структуры СПП при воздействии импульсной мощности произвольной формы $P(t)$ используется аналитическая формула Дюамеля (интеграл Дюамеля) [9].

$$\theta = \int_0^t P(t-\tau) \frac{\partial r(\tau)}{\partial \tau} d\tau + P(t)r(0), \tag{6}$$

где $r(t)$ – переходное тепловое сопротивление;
 $P(t)$ – импульс мощности;
 $r(0)$ – переходное тепловое сопротивление при $t = 0$.

В рассматриваемом нами случае $r(0) = 0$.

Вычисления интегралов целесообразно проводить в среде Mathcad. При этом мы сможем получить значение превышения температуры не только в конце импульса тока, но и в любой момент его воздействия.

В таблице 1 приведены значения R_i и τ_i для наиболее распространённых мощных тиристоров производства ОАО «Электровыпрямитель» (Россия).

Таблица 1

Тип тиристора	Конструкция контактов	Параметры, характеризующие переходное тепловое сопротивление			
		$R_1 \cdot 10^{-3}, \frac{K}{Bm}$	$\tau_1 \cdot 10^{-3}, c$	$R_2 \cdot 10^{-3}, \frac{K}{Bm}$	$\tau_2 \cdot 10^{-3}, c$
T151-100	припаянные	19,304	20,477	3,780	1,822
T161-160	припаянные	19,304	20,477	3,780	1,822
T171-200	припаянные	14,575	20,456	2,859	1,822
T171-320	припаянные	14,575	20,456	2,859	1,822
T143-500	прижимные	4,891	19,036	1,721	1,629
T143-630	прижимные	4,891	19,036	1,721	1,629
T253-1000	прижимные	2,873	19,036	9,023	1,629
T253-1250	прижимные	2,873	19,036	9,023	1,629

Анализ данных, полученных при расчёте переходного теплового сопротивления $r(t)$ с помощью данной методики показывает, что его величина для каждого типа тиристоров несколько превышает величину $r(t)$, определяемого с помощью упрощённых теплофизических моделей [6]. При расчёте переходного теплового сопротивления для конструкции тиристоров с припаянными контактами разница в его величине достигает 16 %. При его расчёте для тиристоров с прижимными контактами разница в величине этого сопротивления достигает 5 %. Это позволяет сделать выводы о том, что расчёт превышения температуры структуры СПП целесообразнее проводить с использованием предлагаемой методики, которая позволяет с более высокой точностью производить расчёт переходного теплового сопротивления, т.к. при этом расчёте учитываются все составляющие структуры СПП, в отличие от методики с использованием упрощённых тепловых моделей; также учитывается изменение физических характеристик материалов составляющих тиристора при изменении температуры.

В качестве примера использования данной методики ниже приведен пример расчёта предельно допустимых отключаемых токов короткого замыкания в трёхфазной цепи. Выражение для тока при возникновении короткого замыкания в неблагоприятный момент времени имеет следующий вид [4]:

$$i(t, I_m) = I_m [\sin(\omega t - \varphi_K) + e^{-\frac{t}{\tau_K}} \sin \varphi_K], \quad (7)$$

где I_m – амплитуда фазного тока короткого замыкания;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

$\tau_K = \frac{L_K}{R_K}$ – постоянная времени в цепи короткого замыкания;

φ_K – угол сдвига фазы нагрузки в цепи короткого замыкания.

Примем, что температура окружающей среды максимальна – ($T_{окр} = 40^\circ\text{C}$). Используя данные табл.1 составляется аналитическое выражение для переходного теплового сопротивления, с помощью (6) составим выражение для θ как функции от тока и времени.

$$\theta(t, I_m) = \int_0^t i(t-\tau, I_m) \cdot [U_0 + i(t-\tau, I_m) \cdot R_0] \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} r(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Строим графическую зависимость $\theta = f(I_m)$ при времени t , равном времени первого прохождения тока (6) через нуль при максимально допустимом угле сдвига фаз в цепи короткого замыкания ($\cos \varphi = 0,3$).

Максимально допустимая температура полупроводниковой структуры рассматриваемых типов тиристоров 125°C [5], поэтому найдём амплитуду предельно допустимого отключаемого тока I_m , при значении которого превышение температуры будет составлять $(125 - 40)^\circ\text{C}$.

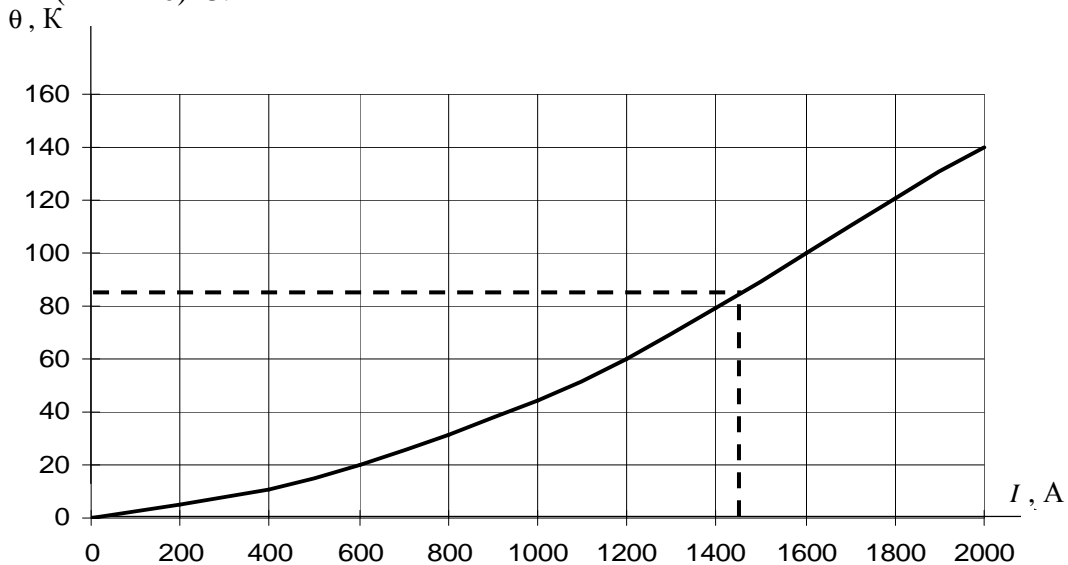


Рис. 3. Зависимость превышения температуры СПП от действующего значения принуждённой составляющей аварийного переходного тока трёхфазной цепи

По рис. 3 определяем действующее значение предельно допустимого отключаемого тока $I = \frac{I_M}{\sqrt{2}} = 1420$ при $\theta = 85^\circ\text{C}$.

Выводы. 1. Разработанная методика по сравнению с предложенной в [6] позволяет с более высокой точностью определять значения превышения температуры структуры СПП, в условиях их работы в составе гибридных аппаратов.

2. Для выполнения расчётов с помощью предлагаемой методики достаточно иметь информацию только о параметрах СПП, необходимых для расчёта мощности потерь.

3. Предлагаемая в работе методика расчёта может быть основой для создания системы автоматизированного проектирования как гибридных, так и бесконтактных полупроводниковых аппаратов.

Литература

1. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. Учебник (под ред. А.Г.Соскова). – К: Каравелла, 2005. – 344 с.
2. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом «Додэка - XXI», 2005 – 384 с.
3. Рак Н.О. Токовая нагрузка на силовые полупроводниковые приборы гибридных коммутационных полупроводниковых аппаратов переменного тока в нормальных режимах работы // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. - Киев: "Техника", 2007 р., Выпуск 76.- С. 304-310.
4. Рак Н.О. Анализ токовой нагрузки на силовые полупроводниковые приборы гибридных коммутационных полупроводниковых аппаратов переменного тока в аварийных режимах работы // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. - №3/3 (27). – С. 15 – 18.
5. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник / О.Г. Чебовский, Л.Г. Моисеев, Р.П. Недошивин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с., ил.
6. Сосков А.Г., Соскова И.А., Рак Н.О. Анализ методов расчёта температуры полупроводниковой структуры силовых полупроводниковых приборов в условиях их работы в коммутационных полупроводниковых аппаратах. Электротехника і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХП», 2008. - №1. С 34 – 37.
7. А.А. Самарский, А.В. Гулин. Численные методы: Учебное пособие для вузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 432 с.
8. Лыков Л.В. Теория электропроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
9. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. Учебник для вузов - М.: Энергоатомиздат, 1989.– 528 с.

РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ В УМОВАХ ЇХ РОБОТИ У СКЛАДІ ГІБРИДНИХ АПАРАТІВ

А.Г. Сосков, Н.О. Рак, І.А. Соскова

Запропонована інженерна методика розрахунку температури напівпровідникової структури силових напівпровідникових приладів в умовах їх роботи у гібридних комутаційних апаратах на основі чисельного рішення рівнянь теплопровідності для моделі, що адекватно відтворює реальну конструкцію цих приладів.

CALCULATION OF TEMPERATURE PAUL OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES IN THE CONDITIONS OF THEIR WORK IN COMPOSITION OF HYBRID APPARATUS

A.G. Soskov, N.O. Rak, I.A. Soskova

The engineering methods of calculation of the semiconductor structure temperature of power semiconductor devices in the conditions of their work in composition of hybrid apparatus have been proposed. This methods allow to calculate the temperature on the basis of numeral decision of equalizations of heat conductivity for a model, which adequate reflects the real construction this devices.