

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В УСЛОВИЯХ ИХ РАБОТЫ В КОММУТАЦИОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ АППАРАТАХ

Сосков А.Г., д.т.н., Рак Н.О.

Харьковская национальная академия городского хозяйства

Украина, 61002, Харьков, ул. Революции, 12, ХНАГХ, кафедра электротехники

тел.(057) 707-31-11

Соскова И.А., к.т.н.

Украинская инженерно-педагогическая академия

Украина, 61003, Харьков, ул. Университетская, 16, УИПА, кафедра теоретической и общей электротехники

тел. (057) 733-79-73

На основі аналізу методів розрахунку температури напівпровідникової структури силових напівпровідникових приладів в умовах їх роботи в комутаційних апаратах була запропонована інженерна методика розрахунку цієї температури при дії на них короткочасних імпульсів потужності довільної форми.

На основе анализа методов расчёта температуры полупроводниковой структуры силовых полупроводниковых приборов в условиях их работы в коммутационных аппаратах предложена инженерная методика расчёта этой температуры при воздействии на них кратковременных импульсов мощности произвольной формы.

ВВЕДЕНИЕ

В коммутационных полупроводниковых аппаратах (ПА) как гибридных, так и бесконтактных силовые полупроводниковые приборы (СПП) входят в состав полупроводниковых ключей (ПК), обеспечивающих бездуговую коммутацию потоков электрической мощности, т.е. выполняющих основную силовую функцию коммутационного аппарата. В качестве СПП в указанных ключах используются одноперационные приборы (тиристоры, симисторы, оптронные тиристоры) либо двухоперационные приборы (IGBT-транзисторы, ГТО-тиристоры, IGCT-тиристоры).

Важнейшим фактором, определяющим надёжность этого основного узла коммутационного ПА, является тепловой режим входящих в их состав СПП [1, 2]. Основным параметром, характеризующим этот режим, является температура полупроводниковой структуры СПП, зависящая от характера подводимой мощности и его конструкции. Поэтому расчёт значений этой температуры при заданных условиях работы является одной из важнейших задач, возникающих при разработке и проектировании коммутационных ПА. Расчёт теплового режима СПП, используемого в ПА, заметно усложняется вследствие специфической формы импульсов рассеиваемой в полупроводниковой структуре мощности и нестационарного характера протекающих в СПП теплофизических процессов [1, 2, 3].

В [1] показано, что основным режимом работающих в составе ПА СПП является импульсный режим. В этом режиме они работают в гибридных ПК переменного тока, в гибридных и бесконтактных ПК постоянного тока, особенно, когда эти приборы используются в схемах принудительной ёмкостной коммутации, также в бесконтактных ПК переменного и постоянного тока при аварийных режимах в цепи нагрузки. При этом форма токового импульса может быть произвольной при длительности до 0,02 с., т.е. данный режим СПП широко распространён в ПА и

требует детального анализа. К тому же следует отметить, что расчёт температуры полупроводниковой структуры СПП, работающих в составе ПА в длительном режиме, рассмотрен авторами в [4].

Целью данной работы является разработка инженерной методики расчёта температуры полупроводниковой структуры (в дальнейшем просто структуры) СПП при воздействии на них токовых импульсов произвольной формы и длительностью не более 0,02 с. Эта цель реализуется путём анализа аналитических методов расчёта температуры структуры СПП, выполненных на базе упрощённых тепловых моделей этих приборов.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА СПП

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 от времени [2]. В [2] рассмотрены особенности, свойственные этому методу, а также основные правила его применения. Однако, как показано в [1], применение этого метода для расчёта температуры структуры СПП при воздействии на них импульсов токов, возникающих в условиях их работы в составе ПА, затруднено из-за отсутствия достаточных исходных данных и из-за сложности формы импульса мощности, особенно в гибридных ПА [1].

Аналитический метод расчёта тепловых характеристик (температуры полупроводниковой структуры) СПП основан на численном решении уравнений нестационарной теплопроводности, составленных для внутренних элементов конструкции с учётом их взаимосвязи, геометрических размеров и характеристик применяемых материалов. В общем случае нестациона-

нарные 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 с помощью ЭВМ численно.

Изучение конструкции СПП показывает, что в первом, самом общем 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 называется выпрямительным элементом, по конструкции которого современные СПП делятся на две группы: приборы с припаянными контактами (например, мощные тиристоры с гибким или жёстким выводом) и приборы 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 постоянного механического нажатия (рис. 1, б), обеспечиваемого конструкцией прибора через мягкую токопроводящую прокладку.

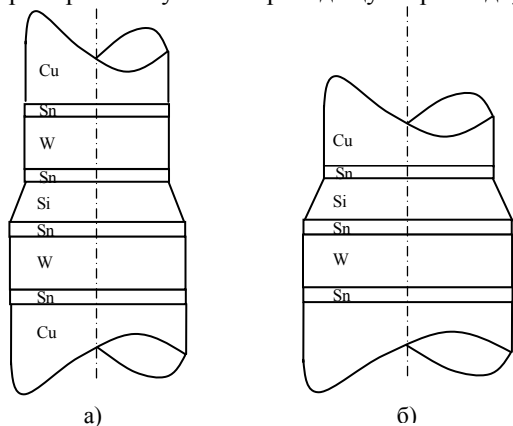


Рис. 1. Варианты конструкции мощных тиристоров: а) с припаянными контактами, б) с прижимными контактами

В связи с этим приборы с прижимными контактами являются более устойчивыми к воздействию температурных циклов и у них лучше условия отвода тепла от полупроводниковой пластины, поэтому СПП на токи свыше 250 А выполняются только в таблеточном исполнении.

Однако при рассматриваемых малых длительностях токовых импульсов реально предположить, что тепло за время импульса не успевает распространиться достаточно далеко от своего источника (полупроводниковой структуры) [1]. Действительно, в [1] показано, что при анализе температурного режима СПП,

работающих в условиях воздействия кратковременной (до 0,02 с) токовой нагрузки, достаточно будет ограничиться только рассмотрением токовой модели, состоящей в основном из выпрямительного элемента [1], что существенно упрощает решение задачи.

На рис. 2 представлена упрощённая тепловая модель СПП (тиристора) с припаянными контактами, в которой учёт слоёв припоя был произведён за счёт расширения слоёв вольфрама на толщину, которая по тепловому сопротивлению была эквивалентна слоям припоя [5].

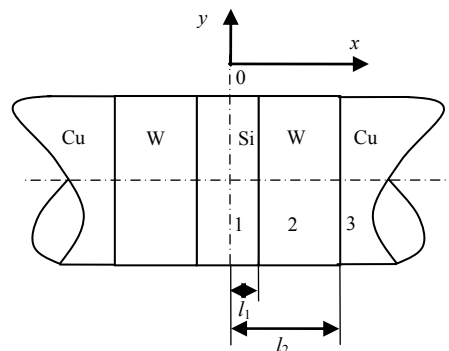


Рис. 2. Тепловая модель СПП (тиристора)

Расчёт уравнений теплопроводности в предложенной модели проводится при следующих допущениях [1]: отвод тепла от боковой поверхности при малом времени нагрева ($t_H \leq 0,02$ с) отсутствует; распространение тепла в модели симметрично; все элементы конструкции (слои кремния, вольфрама и меди) имеют одинаковый диаметр, равный диаметру кремниевой пластины в её узкой части; слой меди представлен в виде полуограниченного тела; вся энергия выделяется равномерно по объёму слоя кремния; теплофизические параметры материалов не зависят от температуры; вольтамперная характеристика в прямом направлении аппроксимируется пороговым напряжением U_0 и линейной зависимостью от тока при $u > U_0$, определяемой дифференциальным сопротивлением R_d . Правомерность таких допущений показана в [1].

Решение уравнения теплопроводности для этой модели приведено в [5]. При этом превышение температуры в центре кремниевой пластины – самой нагретой части прибора, имеет следующий вид:

$$\theta_m(t) = K \int_0^t P_T(t-\tau) \cdot f_{2m}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

$$\text{где } K = \frac{2b_1 \cdot b_2}{\pi v_1 c_1 \gamma_1} = \frac{2\lambda_1 \sqrt{a_3}}{\sqrt{a_1} \cdot \lambda_3 \pi v_1 \gamma_1}; \quad b_1 = \frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}};$$

$$b_2 = \frac{\sqrt{a_3}}{\lambda_3};$$

v – объём кремниевой пластины; λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоёмкость; γ – удельная плотность; $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коэффициент температуропроводности; $P_T(t) = i_T(t)[U_0 + i_T(t)R_d]$ – мгновенная тепловая мощность;

венная мощность; $i_T(t)$ – ток в импульсе; $0 < t \leq t_{И}$, $t_{И}$ – длительность импульса тока;

$$f_{2m}(\tau) = \int_0^{\infty} \frac{\sin p_1 u \cdot e^{-u^2 \tau}}{u(A_0^2 + B_0^2)} du, \quad (2)$$

где u – действительная переменная;

$$p_1 = \frac{l_1}{\sqrt{a_1}}; \quad p_2 = \frac{l_2 - l_1}{\sqrt{a_2}};$$

$$A_0 = \cos p_1 u \cdot \cos p_2 u - b_1 \sin p_1 u \cdot \sin p_2 u;$$

$$B_0 = b_1 b_2 \sin p_1 u \cdot \cos p_2 u + b_2 \sin p_2 u \cdot \cos p_1 u.$$

Из выражения (1) следует, что переходное тепловое сопротивление тиристора с припаянными контактами будет иметь следующий вид:

$$r_1(t) = K \int_0^t f_{2m}(t) dt,$$

где $0 < t \leq t_{И}$, $t_{И} \leq 0,02$ с.

На рис. 3 представлена упрощённая тепловая модель СПП (тиристора) таблеточного типа с прижимными контактами [6]. В ней кремниевая пластина полупроводниковой структуры прибора находится в тесном тепловом контакте справа с вольфрамовым термокомпенсатором, а слева с медным основанием прибора. Причём слои меди и вольфрама представлены в виде полуограниченных тел. Правомерность такой замены для малых отрезков времени (порядка 0,02 с) показана в [1, 6]. Кроме того, в модели не учтён тонкий слой припоя (порядка 0,1 мм) между кремниевой пластиной и вольфрамовым термокомпенсатором, и тонкая прокладка (до 0,2 мм) на основе олова между кремнием и медью.

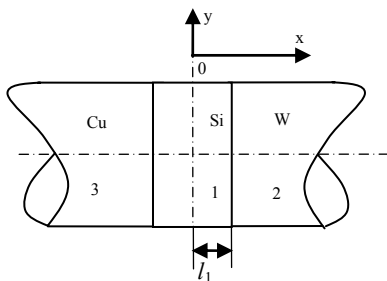


Рис. 3. Расчётная тепловая модель СПП (тиристора) с прижимными контактами

Эти слои компенсируются соответствующим увеличением толщины кремния, которая по тепловому сопротивлению равна слоям припоя и прокладки, что также допустимо при малых толщинах слоёв контактного материала [1].

Решение уравнений теплопроводности для этой модели выполняется при тех же допущениях, что и в предыдущем случае. В результате выполненных преобразований, представленных в [6], выражение для определения максимальной температуры структуры выглядит следующим образом:

$$\theta_m(t) = \frac{1}{S} \int_0^t \alpha(t-\tau) \cdot P_T(t-\tau) \cdot f_{пр}(\tau), \quad (3)$$

где $0 < t \leq t_{И}$; S – сечение кремниевой пластины в

узкой части; $\alpha(t) = 4761,5t^3 + 153,7t^2 - 9,4t + 0,5$ – коэффициент, учитывающий несимметричность распределения потока мощности в модели;

$$f_{пр}(\tau) = \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &(-1)^{n-1} \cdot k_{пр}^{n-1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \cdot e^{-\frac{2(n-1) \cdot l_1 / \sqrt{a_1}}{4\tau}} \\ &- (-1)^{n-1} \cdot k_{пр}^n \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \cdot e^{-\frac{2n \cdot l_1 / \sqrt{a_1}}{4\tau}} \end{aligned} \right\},$$

$$k_{пр} = \frac{b_{пр} - 1}{b + 1}; \quad b_{пр} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}.$$

Аналогично предыдущему случаю выражение для переходного теплового сопротивления для этой модели будет иметь следующий вид:

$$r_2(t) = \frac{1}{S'} \int_0^t f_{пр}(t) dt, \quad (4)$$

где $0 < t \leq t_{И}$, $t_{И} \leq 0,02$ с.

Таким образом, расчет температуры структуры мощных СПП различных типов их конструкций можно выполнять в среде Mathcad с помощью выражений (1) и (3).

Однако в связи с тем, что при этих расчётах необходимо вводить информацию, характеризующую конструкцию конкретного типа СПП, которой, не располагают разработчики коммутационных ПА, авторы предлагают усовершенствованную методику расчёта указанной температуры, лишённую перечисленных недостатков. Суть её состоит в следующем:

1) сложные выражения для переходного теплового сопротивления (2) и (4) представляются для конкретного типа СПП в виде ряда экспонент типа [2]:

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

Такую операцию достаточно несложно выполнить с помощью программы Mathcad. При этом проведенные исследования показали, что уже при $n = 2$ погрешность аппроксимации менее 0,5%.

В табл. 1 приведены значения для R_i и τ_i , рассчитанные указанным образом, для наиболее распространённых мощных тиристорных производств ОАО "Электровыпрямитель" (Россия);

2) затем для расчёта превышения температуры структуры СПП при воздействии импульсной мощности произвольной формы $P(t)$ используется аналитическая формула Дюамеля (интеграл Дюамеля) [7].

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

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

Таблица 1

		Параметры, характеризующие переходное тепловое сопротивление			
Тип тиристора	Конструкция контактов	$R_1, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$	$\tau_1 \cdot 10^{-3}, \text{с}$	$R_2, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$	$\tau_2 \cdot 10^{-3}, \text{с}$
T151-100	припаянные	0,01433	20,711	$4,164 \cdot 10^{-3}$	2,917
T161-160	припаянные	0,01433	20,711	$4,164 \cdot 10^{-3}$	2,917
T171-200	припаянные	0,01287	20,548	$2,077 \cdot 10^{-3}$	1,299
T171-320	припаянные	0,01287	20,548	$2,077 \cdot 10^{-3}$	1,299
T143-500	прижимные	$6,277 \cdot 10^{-3}$	17,841	$9,507 \cdot 10^{-4}$	1,120
T143-630	прижимные	$6,277 \cdot 10^{-3}$	17,841	$9,507 \cdot 10^{-4}$	1,120
T253-1000	прижимные	$6,278 \cdot 10^{-3}$	34,259	$1,177 \cdot 10^{-4}$	6,266
T253-1250	прижимные	$6,278 \cdot 10^{-3}$	34,259	$1,177 \cdot 10^{-4}$	6,266

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

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.

На рис. 4 приведены кривые изменения превышения температуры структуры наиболее распространённого тиристора T161-160 при воздействии на него синусоидального импульса тока амплитудой 1400 А и частотой 50 Гц. При этом кривая 1 получена на основании выражения (1), а кривая 2 – на основании выражения (6).

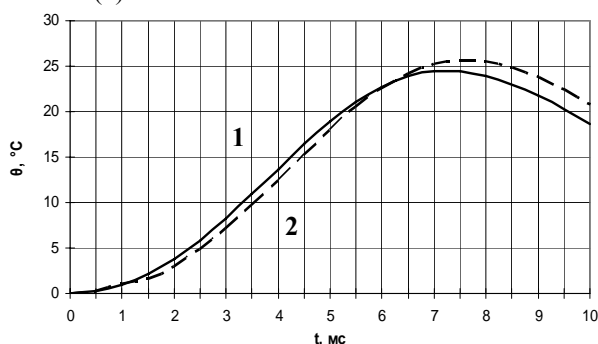


Рис. 4. Кривые изменения превышения температуры структуры тиристора T161-160: 1 - кривая, построенная на основании выражения (1), 2 – кривая, построенная на основании выражения (6)

Поскольку кривые практически совпадают, то предложенная методика расчёта позволяет получить результаты, которые с достаточной точностью для инженерных расчётов отражают нестационарные тепловые процессы, протекающие в структуре мощных полупроводниковых приборов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная авторами методика расчёта температуры структуры мощных СПП в импульсном режиме позволяет с достаточной для инженерных расчётов точностью рассчитывать нестационарный тепловой режим этих приборов при воздействии на них импульсов мощности произвольной формы и длительностью до 0,02 с. При этом для выполнения этих расчётов достаточно иметь информацию только о па-

раметрах СПП, необходимых для расчёта мощности потерь. Кроме того, использование при расчётах несложных стандартных программ делают эту методику доступной для широкого круга специалистов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита – К: Каравела, 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] Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
- [4] Сосков А.Г., Соскова И.А., Алаев П.Н., Рак Н.О. Методика расчёта теплового режима мощных управляемых полупроводниковых приборов силовых коммутационных аппаратов при длительном воздействии токовой нагрузки // Светотехника и электроэнергетика. – 2006. – №7. – С. 71-77.
- [5] Сосков А.Г., Алаев П.Н., Соскова И.А. Расчет нагрева мощных тиристорov с припаянными контактами в составе электронных ключей при воздействии импульсов тока произвольной формы // Электротехника и Электро-механика. - 2003. - №2. – С. 55 -57.
- [6] Сосков А.Г., Алаев П.Н., Соскова И.А. Расчет температурного режима силовых полупроводниковых приборов с прижимными контактами при воздействии кратковременных токовых импульсов произвольной формы // Коммунальное хозяйство городов. Научн.-техн.сб. - К.: Техника. – 2003.-Вып. 49.- С. 142-148.
- [7] Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. Учебник для вузов - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

Поступила 15.06.2007