

1. Лапин Н.Г., Нестеренко А.В. Электронный счетчик электроэнергии и его функциональные возможности // Энергетика и электрификация. – 2000. – №2. – С. 31-32.
2. Концепция построения автоматизированных систем учета электроэнергии в условиях энергорынка. – К.: НКРЭ Украины, 2002.
3. Железко Ю.С. Оценка потерь электроэнергии, обусловленных инструментальными погрешностями измерения // Электрические станции. – 2001. – №8. – С. 19-24.
4. www.nice.nnov.ru/Ru/literat/J1_99/Loskuto1/htm
5. Методические указания по определению погрешности измерения активной электроэнергии при ее производстве и распределении. РД 34.11.325 - 90. – М.: СПО ОРГРЭС, 1991. – 21 с.

Получено 14.02.2003

УДК 621.316

А.Г.СОСКОВ, д-р техн. наук, П.Н.АЛАЕВ
Харьковская государственная академия городского хозяйства
И.А.СОСКОВА, канд. техн. наук
Украинская инженерно-педагогическая академия, г.Харьков

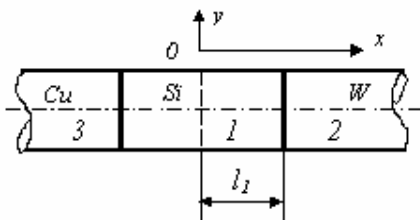
РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С ПРИЖИМНЫМИ КОНТАКТАМИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ТОКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Выполнен аналитический расчет температуры полупроводниковой структуры силовых полупроводниковых приборов с прижимными контактами на основе несимметричной тепловой модели, учитывающей реальное распределение тепла в приборе при воздействии на него кратковременных (до 0,02 с) токовых импульсов произвольной формы.

В аппаратостроении при создании гибридных и бесконтактных электрических аппаратов широко используют такие силовые полупроводниковые приборы (СПП), как мощные тиристоры и диоды с прижимными контактами. При работе этих аппаратов как в нормальных, так и в аварийных режимах, СПП, обеспечивающие в них бездуговую коммутацию электрической цепи, подвергаются воздействию длительных и кратковременных токовых нагрузок, причем, в последнем случае токовый импульс может принимать произвольную форму [1]. Для расчета температурного режима СПП при длительном воздействии токов нагрузки (более 0,05 с) хорошо зарекомендовал себя традиционный графоаналитический метод, основанный на использовании переходного теплового сопротивления СПП, которое приведено в справочных материалах. В импульсном режиме из-за недостаточной точности значений для переходного теплового сопротивления СПП в диапазоне малых времен (менее 0,02 с) более приемлемым является аналитический расчет температуры полупроводниковой структуры на основе обоснованно упрощенной тепловой модели СПП [1].

Целью данной работы является разработка аналитического метода расчета теплового режима широко распространенных мощных тиристоров (на токи до 320 А) с прижимными контактами при воздействии на них кратковременных (до 20 мс) импульсов тока произвольной формы, в том числе имеющих место при использовании их в составе электронных ключей аппаратов.

На рисунке приведена предлагаемая авторами расчетная тепловая модель СПП таблеточного типа с прижимными контактами. В ней кремниевая пластина полупроводниковой структуры СПП находится в тесном тепловом контакте справа с вольфрамовым термокомпенсатором, а слева – с медным основанием прибора. При этом слои меди и вольфрама представлены в виде полуограниченных тел. Правомерность такой замены для малых отрезков времени (порядка 0,02 с) показана в [1]. Кроме того, в модели не учтен тонкий слой (порядка 0,1 мм) припоя между кремниевой пластиной и вольфрамовым компенсатором и тонкая прокладка (до 0,2 мм) на основе олова между кремнием и медью. Эти слои компенсируются соответствующим увеличением толщины кремния, которая по тепловому сопротивлению равна убранным слоям, что также допустимо при малых толщинах слоев контактного материала [2].



Расчетная тепловая модель СПП с прижимными контактами

Так как при прохождении через СПП импульса тока тепло выделяется в основном в *pn*-переходах центральной части кремниевой пластины, то для нашего случая целесообразно представить источник тепла в виде плоского источника, расположенного в центре кремниевой пластины.

Решение уравнений теплопроводности для этой модели проводим при следующих допущениях: начальная температура всех элементов модели одинаковая; градиент температуры в плоскости, перпендикулярной к продольной оси модели, равен нулю; выделением тепла во время токовой нагрузки в меди и вольфраме пренебрегаем; теплофизические параметры материалов не зависят от температуры; 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_D [1, 2].

Форму импульса тока в СПП $i_T(t)$ принимаем произвольной.

Распределение температуры в данной несимметричной модели СПП можно представить следующими системами уравнений:

а) для правой части

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = a_1 \cdot \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = a_2 \cdot \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где переменные и параметры с индексом 1 относятся к кремниевой пластине, а с индексом 2 – к вольфраму; θ – превышение температуры; $a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; γ – удельная плотность.

Граничные и начальные условия для системы уравнений (1) следующие:

$$1) x=0, \quad -\lambda_1 \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = \frac{P_1(t)}{S}, \quad P_1(t) = \alpha(t) \cdot i_T(t) \cdot (U_0 + i_T(t) \cdot R_D),$$

где $\alpha(t)$ – коэффициент, учитывающий долю мощности, которая уходит в правую часть модели; $i_T(t)$ – мгновенное значение тока, протекающего через СПП; S – сечение кремниевой пластины в центре.

$$2) x=l_1, \quad \theta_1 = \theta_2, \quad -\lambda_1 \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial x}.$$

$$3) x \rightarrow \infty, \quad \theta_2 = 0, \quad \text{при } t=0, \quad \theta_1 = \theta_2 = \theta_3;$$

б) для левой части

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = a_1 \cdot \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial \theta_3}{\partial t} = a_3 \cdot \frac{\partial^2 \theta_3}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где переменные и параметры с индексом 3 относятся к меди.

Граничные и начальные условия для системы уравнений (2) следующие:

$$1) x=0, \quad -\lambda_1 \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = \frac{P_2(t)}{S}, \quad P_2(t) = (1 - \alpha(t)) \cdot i_T(t) \cdot (U_0 + i_T(t) \cdot R_D).$$

Остальные условия такие же, как и в предыдущем случае. Так как решения уравнений для левой и правой части идентичные, рассмотрим решение только для правой части модели. Для решения системы урав-

нений (1) используется интегральное преобразование Лапласа. Система уравнений (1) в операторной форме относительно переменной p приобретает вид

$$p \cdot \partial \theta_1(p) = a_1 \cdot \frac{\partial^2 \theta_1(p)}{\partial x^2}; \quad p \cdot \partial \theta_2(p) = a_2 \cdot \frac{\partial^2 \theta_2(p)}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Решение этой системы [3]

$$\theta_1(p) = A_1 \cdot e^{\sqrt{\frac{p}{a_1}} \cdot x} + A_2 \cdot e^{-\sqrt{\frac{p}{a_1}} \cdot x}; \quad \theta_2(p) = B_1 \cdot e^{\sqrt{\frac{p}{a_2}} \cdot x} + B_2 \cdot e^{-\sqrt{\frac{p}{a_2}} \cdot x}. \quad (4)$$

Так как при $x \rightarrow \infty$ $\theta_2(p) = 0$, то $B_1 = 0$, т.е. $\theta_2(p) = B_2 \cdot e^{-\sqrt{\frac{p}{a_2}} \cdot x}$.

На основании граничных условий 1) и 2) после соответствующих преобразований получим искомое выражение для определения максимального значения превышения температуры полупроводниковой структуры СПП ($x=0$)

$$\theta_1(p, 0) = \theta_{\max}(p) = F_1(p) \left[\frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1 \cdot \sqrt{p} \cdot \left(1 + k_{np} \cdot e^{-2 \cdot \sqrt{\frac{p}{a_1}} \cdot l_1} \right)} - \frac{\sqrt{a_1} \cdot k_{np} \cdot e^{-2 \cdot \sqrt{\frac{p}{a_1}} \cdot l_1}}{\lambda_1 \cdot \sqrt{p} \cdot \left(1 + k_{np} \cdot e^{-2 \cdot \sqrt{\frac{p}{a_1}} \cdot l_1} \right)} \right], \quad (5)$$

где $F_1(p) \div f_1(t) = \frac{P_1(t)}{S}$, $k_{np} = \frac{b_{np} - 1}{b_{np} + 1}$, $b_{np} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}$. Для на-

хождения оригинала выражения (5) применим теорему Бореля [3]:

$$F_1(p) \cdot F_2(p) \div \int_0^t f_1(t-\tau) \cdot f_2(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где $F_2(p)$ – часть выражения (4), заключенная в квадратные скобки.

Так как оригинал $F_1(p)$ известен, то остается найти только функцию $f_2(\tau)$, т.е. оригинал изображения $F_2(p)$. Для этого воспользуемся способом обратного преобразования Лапласа, основанным на разложении функции $F_2(p)$ в ряд Маклорена [3]. Выполнив соответствующие преобразования, получим

$$F_{2\max}(p) = \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1 \cdot \sqrt{p}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left((-1)^{n-1} \cdot k_{np}^{n-1} \cdot e^{-2 \cdot \sqrt{\frac{p}{a_1}} \cdot l_1 \cdot (n-1)} - (-1)^{n-1} \cdot k_{np}^{n-1} \cdot e^{-2 \cdot n \cdot \sqrt{\frac{p}{a_1}} \cdot l_1} \right)$$

После выполнения обратного преобразования Лапласа [3]

$$f_{2\max}(t) = \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \cdot Z_{np}(n),$$

где

$$Z_{np}(n) = \sum_{n=1}^{\infty} \left((-1)^{n-1} \cdot k_{np}^{n-1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot t}} \cdot e^{-\frac{\left(2[n-1] \cdot l_1 / \sqrt{a_1}\right)^2}{4t}} - (-1)^{n-1} \cdot k_{np}^n \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot t}} \cdot e^{-\frac{\left(2 \cdot n \cdot l_1 / \sqrt{a_1}\right)^2}{4t}} \right)$$

Тогда на основании (6)

$$\theta_{np\max}(t) = \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1 \cdot S \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \int_0^t \alpha(t-\tau) \cdot i_T(t-\tau) \cdot (U_0 + i_T(t-\tau) \cdot R_D) \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau}} \cdot Z_{np}(n) d\tau, \quad (7)$$

где $0 < t \leq t_u$, t_u – длительность импульса тока.

Или

$$\theta_{np\max}(t) = \frac{1}{S} \cdot \int_0^t \alpha(t-\tau) \cdot i_T(t-\tau) \cdot (U_0 + i_T(t-\tau) \cdot R_D) \cdot f_{np}(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где $f_{np}(\tau) = \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1 \cdot \sqrt{\pi \cdot \tau}} \cdot Z_{np}(n).$

Выполнив аналогичные преобразования с системой уравнений (2), получим выражение для максимального превышения температуры полупроводниковой структуры для левой части модели:

$$\theta_{лев\max}(t) = \frac{1}{S} \cdot \int_0^t (1 - \alpha(t - \tau)) \cdot i_T(t - \tau) \cdot (U_0 + i_T(t - \tau) \cdot R_D) \cdot f_{лев}(\tau) d\tau, \quad (9)$$

где $f_{лев}(\tau) = \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1 \cdot \sqrt{\pi \cdot \tau}} \cdot Z_{лев}(n)$, $k_{лев} = \frac{b_{лев} - 1}{b_{лев} + 1}$, $b_{лев} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{a_1}{a_3}}$.

Очевидно, что всегда

$$\theta_{np\max}(t) = \theta_{лев\max}(t). \quad (10)$$

Так как коэффициент температуропроводности у вольфрама ниже, чем у меди, то всегда $0 < \alpha(t) \leq 0,5$.

Для нахождения функции $\alpha(t)$ рассмотрим нагрев полуограниченной системы двух тел постоянным тепловым потоком q , расположенным, как и в рассматриваемой выше модели, на границе $x=0$. Решение уравнений теплопроводности для этой системы приведено в [4]. Из [4] следует, что, например, для правой части рассматриваемой модели выражение для определения максимальной температуры $\theta_{1\max}$ имеет вид

$$\theta_{1\max}(t) = q \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{a_1 \cdot t}}{\lambda_1} \cdot Z_{0np}(n), \quad (11)$$

где $Z_{0np} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[(-1)^{n-1} \cdot k_{np}^{n-1} \cdot \left\langle ierfc\left(\frac{(n-1) \cdot l_1}{2 \cdot \sqrt{a_1 \cdot t}}\right) - k_{np} \cdot ierfc\left(\frac{n \cdot l_1}{2 \cdot \sqrt{a_1 \cdot t}}\right) \right\rangle \right]$,

$$ierfc(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-x^2} - x \cdot (1 - erf(x)), \quad erf(x) = \Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

Очевидно, что в выражении (11) сомножитель при q есть переходное тепловое сопротивление полуограниченной системы.

Исходя из вышеизложенного, а также с учетом выражения (10) можем записать для любого момента времени:

$$\frac{P_u}{S} \cdot [1 - \alpha(t)] \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{a_1 \cdot t}}{\lambda_1} \cdot Z_{0лев}(n) = \frac{P_u}{S} \cdot \alpha(t) \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{a_1 \cdot t}}{\lambda_1} \cdot Z_{0np}(n).$$

Откуда

$$\alpha(t) = \frac{Z_{0np}(n)}{Z_{0лев}(n) + Z_{0np}(n)}. \quad (12)$$

В дальнейшем необходимо просчитать данное выражение (параметры $k_{лев}$, $k_{пр}$, l_1 , a_1 зависят от материала и геометрических размеров конкретного СПП) для нескольких временных точек согласно заданному интервалу $0 < t \leq t_u$. Далее по полученным точкам функция $\alpha(t)$ аппроксимируется полиномом порядка n , где n – число просчитанных временных точек. Например, для мощных таблеточных тиристоров типов Т253-800, Т253-1000 и Т253-1250 функция $\alpha(t)$ аппроксимируется с погрешностью до 1% следующим полиномом

$$\alpha(t) = 4761,5t^3 + 153,7t^2 - 9,4t + 0,5. \quad (13)$$

Таким образом, с помощью выражений (8)–(10) с учетом выражения типа (13), используя при этом стандартные программы для их численного решения, довольно просто с высокой точностью рассчитать температуру полупроводниковой структуры широко распространенных мощных СПП таблеточного типа на номинальные токи от 250 А и выше при воздействии на них кратковременных (до 0,02 с) импульсов тока любой формы, заданной аналитически. Поскольку температура полупроводниковой структуры СПП является одним из основных факторов, определяющих их надежную работу в составе гибридных и бесконтактных аппаратов, то расчет ее с высокой точностью позволяет выбирать наиболее оптимальные режимы работы этих коммутационных аппаратов, обеспечивая самый экономичный расход электрической энергии у потребителя.

1.Соскова І.О. Удосконалення методик розрахунку нестационарних процесів у напівпровідникових ключах електронних апаратів: Автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.09.01 / Національний техн. ун-т "ХПІ". – Харків, 2002. – 20 с.

2.Рабинерсон А.А., Ашкинази Г.А. Режимы нагрузки силовых полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

3.Корн Г, Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

4.Намитоков К.К., Сосков А.Г., Юрченко С.М. К методике расчета нестационарного температурного поля тиристоров // Электромеханика. – 1988. – №11. – С79-82.

Получено 14.02.2003

УДК 628.9

К.И.ЗУБРИЧ

Харьковская государственная академия городского хозяйства

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ СОВМЕЩЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Рассматриваются вопросы автоматизации управления внутреннего освещения об-