

УДК 621.382.33, 519.873.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА

© 2009 В.А. Сергеев, А.М. Ходаков

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Поступила в редакцию 13.01.2009

Представлена математическая модель разрушения контактных паяных соединений полупроводникового прибора в процессе эксплуатации, основанная на кинетической термофлуктуационной теории прочности твёрдых тел. В результате совместного решения стационарной задачи теплопроводности и кинетического уравнения, описывающего процесс распада межатомных связей в области контакта, получены зависимости долговечности наиболее напряжённого участка контактного паяного соединения кристалла с теплоотводом мощного биполярного транзистора от параметров материалов соединения и режима работы прибора.

Ключевые слова: математическая модель, полупроводниковый прибор, кинетическая термофлуктуационная теория прочности твёрдых тел, теплопроводность, паяное соединение кристалла, биполярный транзистор

Одной из причин отказов полупроводникового прибора (ППП) при эксплуатации является разрушение контактных соединений в его конструкции в результате воздействия термомеханических напряжений, вызванных, в частности, разностью коэффициентов теплового расширения контактирующих материалов. Механизм такого отказа состоит в изменении с течением времени механических, электрических и теплофизических характеристик материалов, входящих в состав контактного соединения, в результате нарушения целостности структуры этих материалов. Чаще всего это относится к сварным и паяным соединениям кристалла с теплоотводом и электрическим металлическим контактам ППП. Дegradацию материалов соединения в результате действия термонапряжений можно рассматривать как термоактивационный процесс [1], происходящий под действием нагрузок, величины которых могут быть меньше критических. С точки зрения оценки надёжности приборов, представляет интерес разработка математических моделей, которые связывали бы характеристики процесса разрушения контактного соединения с физическими свойствами составляющих его материалов и режимами работы прибора. Одной из интегральных характеристик механической прочности материала является его долговечность. Для её оценки чаще всего используют вероятностные и статистические методы [2, 3]. Их недостатком

является то, что величина долговечности не связывается непосредственно с физическими характеристиками структуры ППП и с воздействующими на них факторами режима эксплуатации.

В настоящей работе представлена математическая модель разрушения наиболее напряжённого (с точки зрения температурных условий) участка контактного паяного соединения в ППП, который в дальнейшем будем для краткости называть участком контактного соединения. Модель основана на кинетической термофлуктуационной теории прочности твёрдых тел [4]. Согласно этой теории, зависимость долговечности материала $\tau(\sigma, T)$ от механического напряжения σ и температуры T описывается формулой Журкова [5]:

$$\tau(\sigma, T) \cong \tau_0 \exp\left\{\frac{U(\sigma)}{k_B T}\right\}, \quad (1)$$

где k_B - постоянная Больцмана, $U(\sigma) = E_D - \gamma \cdot \sigma$ - величина потенциального барьера активации процесса разрушения, E_D - начальный потенциальный барьер процесса разрушения материала, γ - коэффициент, характеризующий локальные перенапряжения в твёрдом теле, τ_0 - средний период колебаний атомов в твёрдых телах $\approx 10^{-13} - 10^{-12}$ сек.

Распад металлических связей в материале контактного соединения, находящегося под действием механического напряжения, описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dn(x, y, t)}{dt} = \nu_R(1 - n(x, y, t)) - \nu_D n(x, y, t) \quad (2)$$

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, директор. E-mail: ufire@tv.ru
Ходаков Александр Михайлович, научный сотрудник. E-mail: ufire@tv.ru

с начальным условием $n(x,y,0) = 1$, где $n(x,y,t)$ - относительная поверхностная плотность неразорванных связей материала соединения, определяемая как отношение поверхностной плотности неразорванных связей в некоторый момент времени к её начальному значению, ν_D, ν_R - частоты процессов разрыва и рекомбинации (восстановления) связей материала, определяемые по формулам:

$$\nu_D = \tau_0^{-1} \exp\{-[E_D - \gamma\sigma \cdot n(x,y,t)]/k_B T\}, \quad (3)$$

$$\nu_R = \tau_0^{-1} \exp\{-[E_D - \gamma\sigma_0 \cdot n(x,y,t)]/k_B T\}. \quad (4)$$

Предположим, что по мере термофлуктуационных разрывов связей материала контактного соединения, нагрузка на соединение возрастает обратно пропорционально числу оставшихся связей, а коэффициент теплопроводности материала соединения уменьшается. Зависимости температуры перегрева контактного соединения и действующего механического напряжения от числа неразорванных связей материала соединения представим в следующем виде:

$$\Delta T(n) = \frac{K_\lambda \cdot \Delta T_0}{\{1 + (K_\lambda - 1)n(x,y,t)\}}, \quad (5a)$$

$$\sigma(n) = \sigma_D \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma_D}{\sigma_0} - 1 \right) n(x,y,t) \right\}^{-1}, \quad (5b)$$

где $\Delta T_0 = T - T_0$ - начальный перегрев контактного соединения; T_0 - температура окружающей среды; $K_\lambda = \lambda_s / \lambda_{sD}$ - модельный коэффициент, определяемый как отношение начального коэффициента теплопроводности материала контактного соединения к минимальному эффективному коэффициенту теплопроводности участка контактного соединения; σ_0, σ_D - максимальное начальное термонапряжение и величина разрывной прочности материала контактного соединения соответственно.

Введём безразмерные величины

$$G_D = \frac{E_D}{k_B T_0}, \quad \Sigma = \frac{\sigma}{\sigma_D}, \quad \Sigma_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_D},$$

$$\Delta \Theta_0 = \frac{\Delta T_0}{T_0}, \quad (6)$$

тогда соотношения (3) и (4), с учётом выражений (5a, 5b) и равенства $\gamma\sigma_D/E_D = 1$, будут выглядеть следующим образом

$$\nu_D = \tau_0^{-1} \exp\left\{-G_D \cdot \frac{1 - [1 + (\Sigma_0^{-1} - 1)n(x,y,t)]^{-1}}{1 + [1 + (K_\lambda - 1)n(x,y,t)]}\right\}, \quad (7)$$

$$\nu_R = \tau_0^{-1} \exp\left\{-G_d \cdot \frac{1 - \Sigma_0 n(x,y,t)}{1 + [1 + (K_\lambda - 1)n(x,y,t)]}\right\}. \quad (8)$$

Для определения величины максимального начального перегрева структуры ППП необходимо решить нелинейную стационарную задачу теплопроводности, с соответствующими граничными условиями и температурозависимой плотностью мощности теплового источника, расположенного в активной области структуры. В качестве примера рассмотрим решение задачи разрушения контактного соединения кристалла с теплоотводом в мощном биполярном ВЧ транзисторе. Этапы решения задачи будут следующими:

1. Построение тепловой модели для полупроводниковой транзисторной структуры, представляющей собой трёхслойную среду: кристалл (С), припой (S), теплоотвод (Н) (рис. 1). Источники тепла расположены в виде полосок на рабочей поверхности транзисторной структуры. Обычно толщина припоя много меньше толщины кристалла и теплоотвода $\delta \ll L_{zi}$, поэтому слой припоя рассматриваем как зону неидеального контакта, с термическим сопротивлением R_{th} .

Уравнения и граничные условия имеют вид:

- уравнение теплопроводности

$$T_{i_{xx}} + T_{i_{yy}} + T_{i_{zz}} = 0, \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

$$(x, y, z) \in V = \{(x, y, z) : 0 \leq x \leq L_x,$$

$$0 \leq y \leq L_y, L_{z(i-1)} \leq z \leq L_{zi}\} \quad ;$$

- граничные условия:

$$T_{i_x}(0, y, z) = T_{i_x}(L_x, y, z) = 0, \quad (10)$$

$$T_{i_y}(x, 0, z) = T_{i_y}(x, L_y, z) = 0, \quad (11)$$

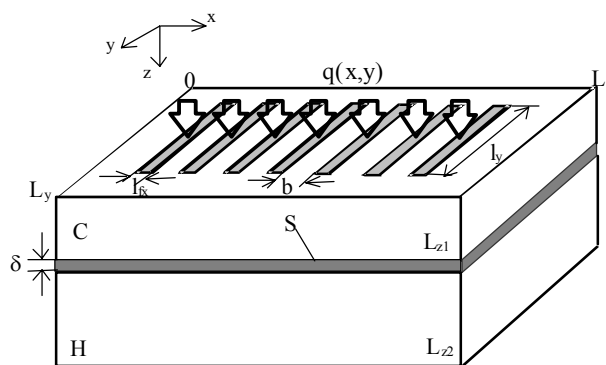


Рис. 1. Геометрия тепловой модели мощного СВЧ транзистора:
С – кристалл
(активная область эмиттера заштрихована),
S - припой, H - теплоотвод

$$-\lambda_c T_{1z}(x, y, 0) = \begin{cases} q(x, y), & (x, y) \in S_{ar} \\ 0, & (x, y) \in (S_c - S_{ar}) \end{cases}, \quad (12)$$

$$-\lambda_h T_{2z}(x, y, L_{z2}) = \alpha_c T_2(x, y, L_{z2}), \quad (13)$$

где $q(x, y) = j_{eb} \cdot U_{cb}$ – плотность потока тепла, j_{eb}, U_{cb} – плотность эмиттерного тока и напряжение коллектор-база, $S_c = L_x L_y, S_{ar} = f \cdot l_x \cdot l_y$ – площади поверхности кристалла и его активной области соответственно, f – число полосок эмиттера, λ_c, λ_h – коэффициенты теплопроводности кристалла и теплоотвода соответственно, α_c – коэффициент конвективного теплообмена с внешней средой;

- условия сопряжения в контактной области:

$$\begin{aligned} \lambda_c T_{1z}(x, y, L_{z1}) - \lambda_h T_{2z}(x, y, L_{z1}) &= 0, \\ T_2(x, y, L_{z1}) - T_1(x, y, L_{z1}) &= 0, \\ R_{th} \lambda_c T_{1z}(x, y, L_{z1}) & \end{aligned}$$

$$(x, y) \in S_s = \{(x, y) : 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y\}, \quad (14)$$

где $R_{th} = dd/\lambda_s, S_s$ – термическое сопротивление и площадь контактной зоны соответственно;

- уравнение положительной обратной связи, учитывающее зависимость плотности потока тепла, выделяемого активной областью кристалла, от температуры

$$q(x, y) = q_0 \exp\left\{-\frac{(E_g - eU_{eb} + (e\rho/U_{cb}) \cdot q(x, y))}{kT}\right\}, \quad (15)$$

где U_{eb} – напряжение эмиттер – база, $r_d \approx \rho = r \cdot S_{ar}$, r – входное омическое сопротивление транзистора, E_g – ширина запрещённой зоны полупроводника, q_0 – слабо зависящий от температуры параметр, e – заряд электрона;

- условие постоянства средней плотности тока по активной области структуры

$$\overline{J(x, y)} = \frac{1}{S_{ar}} \iint_{S_{ar}} J(x, y) dx dy = const. \quad (16)$$

2. Решение уравнения (9) при условиях (10) – (14) и постоянной плотностью теплового потока $q(x, y) = q^0$, которая принимается в качестве начального приближения итерационного процесса вычисления распределения температуры по структуре. Применяя интегральное косинус-преобразование Фурье к поставленной в п.1 задаче теплопроводности, получаем решение в виде ряда

$$\begin{aligned} \Delta T_0(x, y, L_{z1}) &= \frac{2}{\lambda_c L_x L_y} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm} B_{nm} q_{nm}, \\ &\otimes \cos(n\pi x/L_x) \cos(m\pi y/L_y) \end{aligned}$$

$$q_{nm} = \iint_{S_c} q(\xi, \eta) \cos(n\pi\xi/L_x) \cos(m\pi\eta/L_y) d\xi d\eta, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} A_{nm} &= A_{nm}(gg_{nm}), \quad B_{nm} = B_{nm}(aa_c, gg_{nm}, ll_c, ll_h, L_{z1}, \\ &L_{z2}), \quad \gamma_{nm}^2 = (n\pi/L_x)^2 + (m\pi/L_y)^2. \end{aligned}$$

Для учета тепловой обратной связи необходимо совместное решение уравнений (15) и (17) при условии (16). Это решение находилось численным итерационным методом. Начальное значение величины плотности теплового потока во всех точках структуры предполагалось одинаковым и равным q^0 , при этом средняя плотность тока определяется величиной рабочего тока I_0 в структуре: $j^0 = I_0 / S_{ar}$. Переменный шаг по напряжению U_{eb} на каждой итерации находился из условия сходимости алгоритма $-(q^r/q^{r-1}) < 1$, где r – номер итерации

3. Решение кинетического уравнения разрушения контактного соединения. Дифференциальное уравнение (2), с учётом выражений для частот разрушения и рекомбинации (7) и (8), решалось численным методом

Размеры полупроводниковой структуры соответствовали параметрам ВЧ транзистора типа КТ803: $L_x \times L_y \times L_z = 4.8 \times 4.8 \times 0.45$ мм; $f \times (l_x \times l_y) = 8 \times (0.2 \times 2.4)$ мм; толщина слоя припоя $\delta\delta = 0.02$ мм. Электрофизические характеристики полупроводниковой структуры: $E_g = 1.12$ эВ, $\rho_n = 0.026$ Ом·мм². Напряжение коллектор-база $U_{cb} = 25$ В, значение рассеиваемой мощности $W = 10 - 50$ Вт. Теплофизические и механические характеристики слоёв С и Н структуры приведены в табл. 1 [6]. Величина модельного коэффициента K_λ определялась по формуле [7]

$$K_\lambda^{-1} = (1 - P_0) \sqrt{1 - P_0}, \quad (18)$$

где P_0 – значение пористости, соответствующее порогу перколяции. Процедура определения значения P_0 представлена ниже. Рассчитанные пределы изменений величины $K\lambda = 1.0 - 2.0$. Диапазон значений безразмерной величины начального потенциального барьера принимался равным $G_D = 80 - 150$. Начальная температура $T_0 = 300$ К.

На рис. 2 представлены распределения безразмерных величин температуры перегрева и механического напряжения в контактной зоне кристалла и припоя ППП. Как уже упоминалось выше, дальнейшие расчёты долговечности контактного соединения проводились для его наиболее напряжённой точки, там, где температура T и термонапряжение σ_0 принимают максимальные значения. На рис. 3 показаны результаты численного решения дифференциального уравнения (2), при максимальных значениях безразмерных величин перегрева $\Delta\Theta_0^{max} = 0.45$ и термонапряжения $\Sigma_0^{max} = 0.43$. Модельная характеристика структуры $G_D = 135$ (эвтектика Au-Si). Характер кривых распада свя-

Таблица 1. Теплофизические и механические свойства материалов.

	λ , Вт/м·К	α , 10^{-6} , град $^{-1}$	ν	Е, ГПа
Кристалл - Si	130	3	-	160
Теплоотвод – Cu	390	17	0,38	120

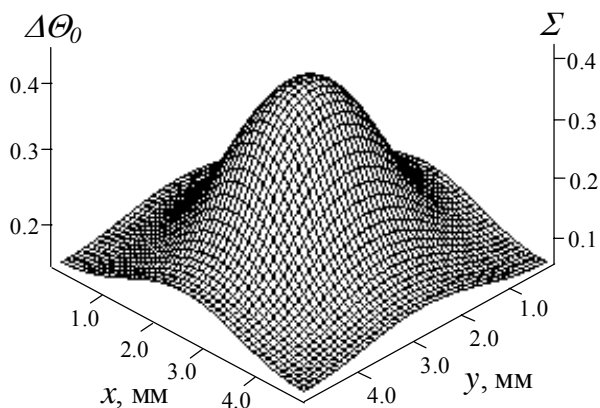


Рис. 2. Распределение величин перегрева и термонапряжения в слое припоя, $W = 50$ Вт, $G_D = 135$.

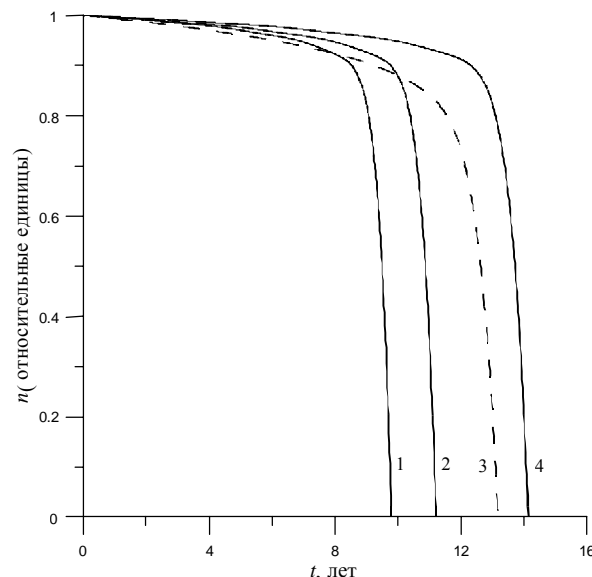


Рис. 3. Кинетика распада связей контактного соединения, $G_D = 135$, $K_l = 1.4$, W : 1 – 50, 2 и 3 – 30, 4 – 10 Вт

зей материала соединения будет аналогичным и для других значений параметров модели G_D и K_l . Критическое значение величины P_0 в выражении (18) определялось при помощи кривой распада $n(t)$ для случая независимости величины перегрева контактного соединения от числа разорванных связей (кривая 3 рис. 3). Согласно этой кривой, переход процесса разрушения материала от фазы медленного спада к катастрофическому спаду происходит при $n \approx 0.8$. Поэтому значение пористости выбиралось $P_0 = 0.2$, а со-

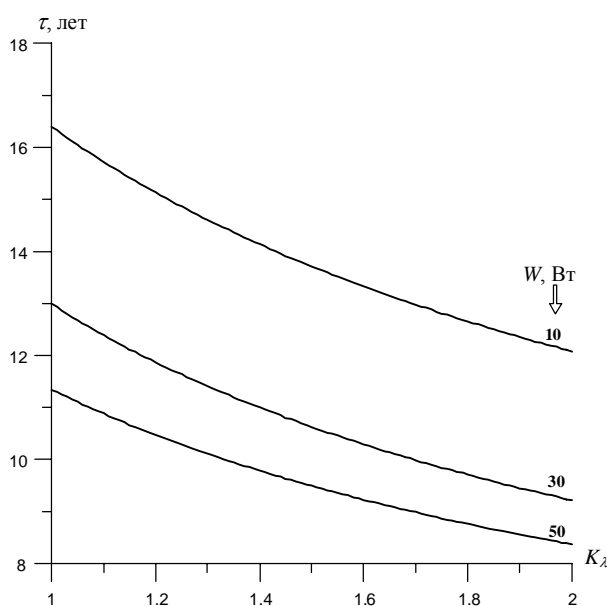


Рис. 4. Зависимость долголетия контактного соединения от модельного коэффициента относительной теплопроводности, $G_D = 135$

ответствующее значение коэффициента $K_l = 1.4$. По рассчитанным таким образом значениям порога перколяции, были получены зависимости величины долговечности контактного соединения от модельного коэффициента K_p при различных значениях величины рассеиваемой мощности W (рис. 4). Для рассматриваемого варианта материала контактного соединения в ППП увеличение величины рассеиваемой мощности в 5 раз приводит к уменьшению долговечности ППП примерно в 1.44 раза, для всего диапазона изменения величины коэффициента K_p . Нелинейность зависимости долговечности ППП от рассеиваемой мощности (рис. 5) определяется следующими причинами: 1) существованием положительной обратной связи между выделяемой активной областью кристалла плотностью потока тепла и температурой (см. выражение 15), которая приводит к нелинейной зависимости величины начального перегрева контактного соединения от рассеиваемой мощности; 2) введенными зависимостями (5а, 5б) величин перегрева контактного соединения и действующего термонапряжения от плотности оставшихся связей материала контактного соединения.

Представленная математическая модель деградационного разрушения контактных соединений в ППП, находящихся под длительным воз-

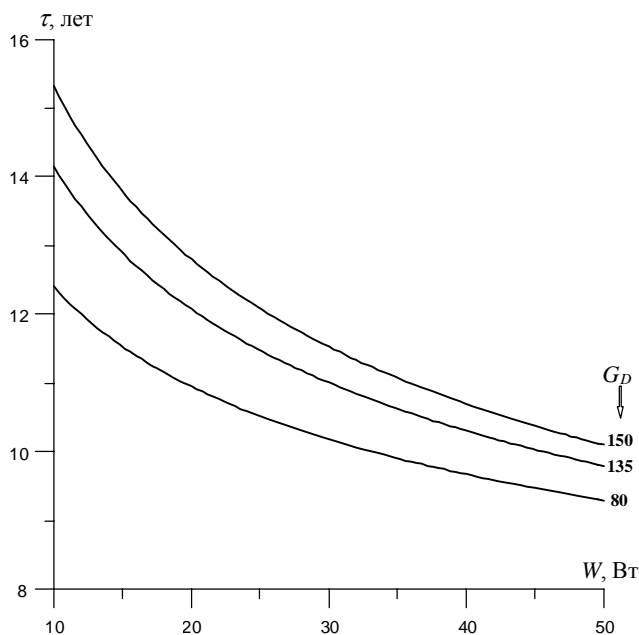


Рис. 5. Зависимость долголетия контактного соединения от рассеиваемой полупроводниковой структурой мощности, $KI_1 = 1.4$

действием рассеиваемой мощности и приведённые результаты расчётов долговечности контактных соединений могут быть использованы для разработки методики оценки надёжности контактных соединений ППП с учетом усталостных эффектов и режимов его работы.

Работа выполнена в рамках проекта №2.1.2/4006 целевой программы Рособразования РФ “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010) годы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меламедов И.М. Физические основы надёжности. - Л.: Энергия, 1970. - 152 с.
2. Кейджан Г.А. Прогнозирование надёжности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС. - М.: Радио и связь, 1990. - 142 с.
3. Александян И.Т., Черняев Н.В. Метод изучения надёжности интегральных микросхем // Микроэлектроника. - 1992. - Т.21. - Вып.2. - С. 56-62.
4. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твёрдых тел. - М.: Наука, 1974. - 560 с.
5. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твёрдых тел // Вестник АН СССР. - 1968. - №3. - С. 46 - 52.
6. Физические величины. Справочник. / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
7. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. - 248 с.

MATHEMATICAL MODEL OF DEGRADED DESTRUCTION OF CONTACT CONNECTIONS OF THE SEMI-CONDUCTOR DEVICE

© 2009 V.A. Sergeev, A.M. Hodakov

Ulyanovsk Branch of the Institute of Radioengineering and Electronics
named after V.A. Kotel'nikov, Russian Academy of Sciences

The mathematical model of destruction of contact connections of the semi-conductor device while in service, based on kinetic thermofluctuation theory of a failure of solids. As a result of the joint decision of a stationary problem of heat conductivity and the kinetic equation describing process of disintegration of nuclear connections in the field of contact, the dependencies of longevity of work of considered contact connection of the powerful bipolar transistor from scattered power by semi-conductor structure for various values of parameters of model are found.

Key words: mathematical model, semi-conductor device, kinetic thermofluctuation theory of a failure of solids, heat conductivity, considered contact connection, bipolar transistor

Vyacheslav Sergeev, Doctor of Technics, Director.

E-mail: ufire@mv.ru.

Alexander Hodakov, Research Fellow. E-mail: ufire@mv.ru.