

К ВОПРОСУ О ПОСТОЯНСТВЕ КАЖУЩЕЙСЯ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

1. Введение

Надежность изделий электронной техники (ИЭТ) всецело зависит от процессов деградации, протекающих в изделии и приводящих его в состояние отказа. Процессы деградации ИЭТ (электромиграция, интерметаллизация, коррозия, накопление зарядов, многоцикловая усталость и т.д.) характеризуются средней скоростью a_j и энергией активации E_{aj} . Скорость протекания многих химических реакций и физических процессов определяется уравнением Аррениуса вида

$$\vartheta = q \exp(-\Delta E/kT), \quad (1)$$

где q – коэффициент пропорциональности, определяющий интенсивность реакции, т.е. частоту актов взаимодействия в ней;

ΔE – энергия активации, которая определяет барьер различных состояний в реакции, эВ;

k – постоянная Больцмана ($8,616 \cdot 10^{-5}$ эВ/°К);

T – температура, °К.

Когда в ходе физического или химического процесса атом, ион или молекула материала компоненты ИЭТ переходит из одного энергетического состояния в другое путем преодоления ΔE , то вероятность того, что этот переход произойдет вследствие тепловой энергии материала ИЭТ, пропорциональна величине $\exp(-\Delta E/kT)$.

Проводя аналогию между химическими реакциями и процессами деградации ИЭТ, можно записать:

$$\alpha_j = A \exp(-E_{aj}/kT), \quad (2)$$

где α_j – средняя скорость процесса деградации;

E_{aj} – энергия активации процесса деградации;

A – коэффициент пропорциональности, который в реальном диапазоне температур от режима применения до режима испытаний принято считать постоянным.

Для определения величины E_{aj} проводятся двухступенчатые форсированные испытания двух выборок тестовых структур конкретного типа (технологии производства) ИЭТ.

Примечания. Электрическая нагрузка на испытуемых изделиях должна быть одинаковой и не должна превышать нагрузку в режиме применения.

Для получения точечной оценки E_{aj} необходимо определить две величины средних скоростей исследуемого процесса деградации $\alpha_{0j} < \alpha_{1j}$, соответствующие двум температурам $T_0 < T_1$. По результатам испытаний составляется система уравнений:

$$\begin{cases} \hat{\alpha}_{0j} = A \exp\left(-\hat{E}_{aj}/kT_0\right) \\ \hat{\alpha}_{1j} = A \exp\left(-\hat{E}_{aj}/kT_1\right) \end{cases} \quad (3)$$

Решая систему уравнений (3) относительно E_{aj} , получим точечную оценку энергии активации j -го процесса деградации:

$$\hat{E}_{aj} = \frac{k(\ln \hat{\alpha}_{1j} - \ln \hat{\alpha}_{0j})}{(1/T_0 - 1/T_1)}. \quad (4)$$

Введем следующие обозначения:

$\hat{K}_{\phi 01j} = \hat{\alpha}_{1j}/\hat{\alpha}_{0j}$ – коэффициент форсирования скорости j -го процесса деградации при переходе от температуры T_0 к температуре T_1 ;

$1/T_0 - 1/T_1 = \Delta_{01}$ – обратная величина базового интервала температур, на котором оценивается величина \hat{E}_{aj} .

Подставив принятые обозначения в (4), получим

$$\hat{E}_{aj} = \frac{k \ln \hat{K}_{\phi 01j}}{\Delta_{01}}. \quad (5)$$

Величины $\hat{\alpha}_{0j}$ и $\hat{\alpha}_{1j}$ определяются по экспериментальным данным методом квантилей. Причем, испытания выборок изделий могут проводиться при температурах, значительно меньших температур испытаний, необходимых для достижения заметного процента отказов (не менее 10%), необходимого для обработки результатов непараметрическим методом. Для оценки $\hat{\alpha}_{0j}$ и $\hat{\alpha}_{1j}$ методом квантилей, принимая в качестве теоретической модели надежности DN -распределение, достаточно по одному отказу на каждой из температурных ступеней. В связи с тем, что параметр E_{aj} находится в показателе степени экспоненты (2), точность его оценки решающим образом влияет на точность прогноза средней скорости процесса деградации в режиме применения.

2. Постановка задачи исследований

Использование аналогии, описываемой моделями (1) и (2), предпринималось многими исследователями. Например, рассмотрена возможность использования (2) для исследования надежности полупроводниковых приборов [1] и интегральных микросхем [2, 3]. В этом случае вместо E_{aj} применялась другая константа – кажущаяся энергия активации полупроводникового прибора в целом (E_a^*). Величина E_a^* с точностью до сотых долей электрон-вольт была определена для многих типов как зарубежных [4], так и отечественных [5] ИЭТ.

Практическое использование модели типа (2) предполагает, что величина E_a^* является постоянной и не зависит от величины базового интервала температур Δ_{01} , на котором она оценивалась. Подтверждение или опровержение данного постулата является предметом настоящих исследований.

3. Оценка кажущейся энергии активации

Большинство элементов электронной аппаратуры, включая и самые распространенные ИЭТ, имеют, как правило, сложный процесс деградации, состоящий из нескольких деградационных процессов с разными

значениями энергий активации. Изобразим деградационную картину изделия в виде диаграммы Парето. На рис. 1 в качестве примера приведена диаграмма Парето для изделия, в котором при $t_0=55^\circ\text{C}$ протекают три деградационных процесса с соответствующими характеристиками: $\{E_{a1} = 0,3; p_{01} = 0,64\}$, $\{E_{a2} = 0,8; p_{02} = 0,13\}$, $\{E_{a3} = 1,0; p_{03} = 0,23\}$.

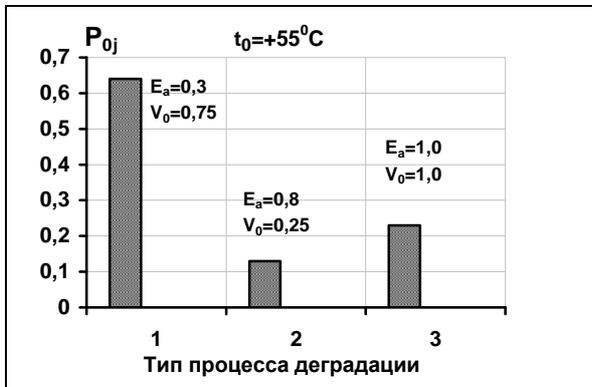


Рис. 1. Исходная диаграмма Парето для $t_0=55^\circ\text{C}$

В связи с тем, что рассматриваемые процессы деградации имеют разные энергии активации, то при любом изменении термической нагрузки относительно температуры t_0 происходит перераспределение долей отказов по каждому процессу деградации. Обозначив через p_{1j} долю отказов по j -му процессу деградации в режиме испытаний с температурой t_1 , отличным от режима испытаний с температурой t_0 и долевым участием p_{0j} , можно вычислить p_{1j} в зависимости от p_{0j} и $K_{\phi 1j}$ для любого форсированного режима [6].

В общем виде выражение для долевого участия составного процесса деградации в измененном режиме испытаний можно записать следующим образом:

$$p_{1j} = \frac{p_{0j} K_{\phi 1j}}{\sum_{j=1}^m p_{0j} K_{\phi 1j}}, \quad (6)$$

где $K_{\phi 1j}$ – коэффициент форсирования скорости деградации j -го процесса при переходе от t_0 к t_1 . Для термически активируемых процессов деградации коэффициент форсирования вычисляется по формуле

$$K_{\phi 1j} = \exp\left[\frac{E_{aj}}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right]. \quad (7)$$

Для процессов, не имеющих термической составляющей, коэффициент форсирования принимается равным единице.

Коэффициент форсирования обобщенного процесса деградации изделия при переходе от одного режима испытаний к другому вычисляется по формуле

$$K_{\phi 01} = \left[\left(\sum_{j=1}^m p_{1j}^2 \right) \left(\sum_{j=1}^m \frac{p_{1j}^2}{K_{\phi 1j}^2} \right)^{-1} \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Оценим величину E_a^* по формуле (5) в зависимости от величины базового интервала температур Δ_{01} (табл. 1).

Таблица 1. Расчетные значения кажущейся энергии активации

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_0=55^\circ\text{C}$		
	$K_{\phi 01}$	Δ_{01}	E_a^*
85	7,1	0,00026	0,65059
102	28,8	0,00039	0,74358
125	168,0	0,00054	0,81888
150	933,0	0,00069	0,85529

форсированных режимов испытаний второй ступени с температурой t_1 .

На рис. 2 изображена преобразованная диаграмма Парето. Преобразование производилось на основании (6) от температуры $t_0 = +55^\circ\text{C}$ к температуре $t_1 = +125^\circ\text{C}$.

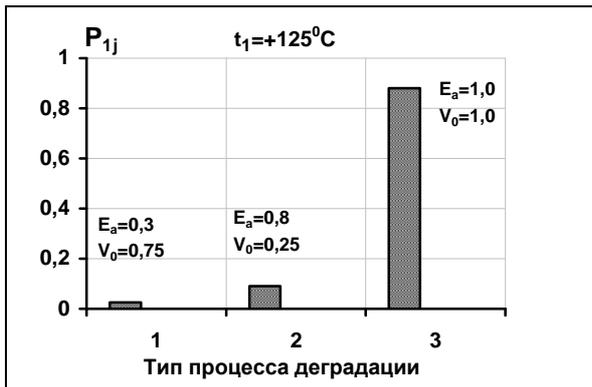


Рис. 2. Преобразованная диаграмма Парето к температуре испытаний $t_1 = +125^\circ\text{C}$

Не трудно видеть, что кажущаяся энергия активации E_a^* изделия в целом не является постоянной в широком диапазоне температур. Выясним, какую тенденцию имеет дрейф E_a^* . Для этого проведем преобразование диаграммы Парето для одного из

При повышении температуры до $+125^\circ\text{C}$ происходит смена доминирования [6] между первым и третьим процессами деградации. В режиме применения доминирует процесс с энергией активации $E_a = 0,3$ эВ, дающий 62% отказов. В режиме испытаний влияние первого процесса снизилось до 2,5%, в то время как влияние третьего процесса увеличилось до 88%. Следствием этого измеряемое значение кажущейся энергии активации E_a^* смещается в сторону доминирующего процесса деградации с $E_{aj} = 1,0$ эВ. На практике для оценки

E_a^* чаще всего используется режим с температурой испытаний $t_1 = +125^\circ\text{C}$. Поэтому, используя полученное значение кажущейся энергии активации $E_a^* = 0,81888$, спрогнозируем величину коэффициента форсирования

$K_{\phi 1}$ для $t_1 = +85^\circ\text{C}$ по формуле

$$K_{\phi 1} = \exp \left[\frac{E_a^*}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \right] = 11,84. \quad (9)$$

Ошибка в оценке коэффициента форсирования $K_{\phi 1}$ по отношению к соответствующему значению $K_{\phi 01}$ составила порядка 67%.

4. Выводы

Исследованиями установлено, что кажущаяся энергия активации не является постоянной величиной в широком диапазоне температур вследствие явления смены доминирования между составными деградационными процессами. Поэтому измерение и дальнейшее использование кажущейся энергии активации изделия для прогнозирования его надежности приводит к большим погрешностям в оценке коэффициента форсирования и, как следствие, к большим погрешностям в оценке средней наработки до отказа в режиме применения. Корректное применение модели (2) допустимо только для элементарного деградационного процесса, который может рассматриваться как один из составных процессов деградации в сложном обобщенном процессе деградации изделия в целом. Результаты работы могут быть использованы в

построении теоретической модели сложного процесса деградации изделия, в котором одновременно протекает несколько составных процессов деградации с разными энергиями активации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюнов Н. Н. Свойства полупроводниковых приборов при длительной работе и хранении. – М.: Энергия, 1970. – 102 с.
2. Физические основы надежности интегральных схем / Под ред. Ю.Г. Мюллера. – М.: Советское радио, 1976. – 320 с.
3. Robinson L.E. Life expectancy in electronic components and the 10^0 rule // Testing. – 1998. – № 1. – P. 16.
4. Blancs H.S. The Temperature Dependence of Components Failure Rate // Microelectronics and Reliability. – 1980. – № 3, Vol. 20. – P. 297 – 307.
5. Куликов И.В. Экспериментальное определение энергии активации процесса старения изделий по результатам их форсированных испытаний // Электронная техника. Сер. 8. – 1983. – Вып. 6(105). – С. 62 – 67.
6. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.