

О ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ НИЗКИХ ПОСТОЯННЫХ УРОВНЯХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ

к.т.н. Н.И. Коваленко, Г.В. Прохоров, д.ф.-м.н., проф. А.К. Гнап

Сравнивается влияние температурного воздействия с влиянием низких постоянных уровней высокоэнергетического облучения на надежность компонент твердотельной электроники.

Введение. Необходимость обеспечения надежности электронных технических средств в условиях низких уровней постоянного радиоактивного облучения ставит перед разработчиками задачу объективной оценки свойств и характеристик элементов твердотельной электроники, определяющих показатели надежности радиоэлектронного устройства в целом. Среди характеристик элементов следует выделить стабильность параметров при длительном функционировании, которая определяется физической природой материалов элементов и при использовании открывает возможность количественной оценки нового показателя надежности, а именно интенсивности деградации элементов. Этот показатель в настоящее время не входит в действующую систему оценки надежности, хотя является составной частью известной концепции параметрической надежности.

Ниже изложена методология количественной оценки интенсивности деградации элементов. Для этого используется явление необратимых изменений параметров критерия годности и термодинамический по форме анализ кинетики изменений параметров, включая анализ тенденции изменений или дрейфа и прогноз на этой основе ресурса элемента. При таком подходе показателя интенсивности деградации элементов обеспечивают возможность инженерного решения количественной оценки параметрической надежности технических средств. В частности, возможна оценка долговечности элементов и устройств в условиях постоянного во времени слабого облучения. Можно считать, что практическое использование концепции параметрической надежности является полезным дополнением к методологии оценки их безотказности, использующей положения статистической надежности.

Постановка задачи. Рассмотрим универсальный термодинамический подход, который обеспечивает однозначное описание процесса деградации элементов с учетом необратимых изменений. Он единственно возможен при решении задач прогноза ресурса высоконадежных элементов, а также

общей оценки долговечности объектов с длительными сроками хранения и эксплуатации. За основу принимаем наличие квазимонотонного длительного дрейфа параметров, что предполагает возможность линейного регрессионного прогноза ресурса элементов и устройств с учетом скорости дрейфа.

Интенсивность отказов $h(t)$ для некоторой совокупности изделий изменяется во времени [1], как показано на рис. 1. Для начального периода времени (от t_0 до t_1) характерны ранние отказы вследствие дефектов материала или производственных дефектов. Контроль качества и испытания первых образцов обычно позволяют исключить многие изделия, не отвечающие техническим требованиям, и тем самым избежать такой большой интенсивности отказов в начальный период.

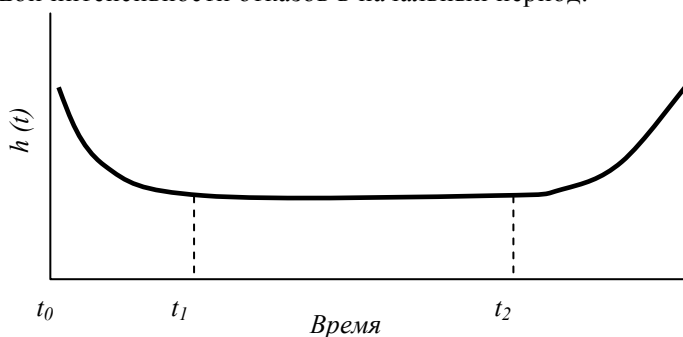


Рис. 1. Интенсивность отказов за период службы изделия

Периоду от момента t_0 до момента t_1 соответствует убывающая интенсивность отказов, характеризующая появления ранних отказов. Обычно после того, как система изготовлена или собрана и введена в эксплуатацию, в начальном периоде интенсивность отказов выше, чем в последующий период работы. Ранние отказы могут вызываться различными производственными дефектами или дефектами сборки, которые не были обнаружены системой контроля качества.

Второй отрезок кривой (от момента t_1 до момента t_2) изображает отказы, вызванные действием случайных факторов. Интенсивность отказов на этом интервале можно считать постоянной.

Отрезок кривой после точки t_2 изображает износовые отказы. Здесь интенсивность отказов возрастает по мере старения оборудования, по мере набора доз облучения. Если бы удалось достоверно предсказывать момент времени t_2 , то оборудование или его часть можно было бы заменять до начала этого периода. Это повысило бы надежность системы. В период постоянной интенсивности отказов ($t_1; t_2$) происходят случайные или внезапные отказы, и эти отказы нельзя объяснить ухудшением качества и прочности изделия с течением времени. Пусть интенсивность отка-

зов задана формулой для определения числа отказов в единицу времени

$$h(t) = \lambda,$$

здесь λ – постоянная. Подставляя значение $h(t)$ в формулу

$$f(t) = h(t) \exp \left(- \int_0^t h(\tau) d\tau \right)$$

получим

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}.$$

Тогда функция надежности имеет вид

$$R(t) = \frac{f(t)}{h(t)} = e^{-\lambda t}.$$

Таким образом, при постоянной интенсивности отказов наработка до отказа элемента имеет экспоненциальное распределение.

Монотонный дрейф параметров элементов обычно начинается после завершения периода приработки, который характеризуется нелинейными изменениями параметров изделий вследствие отжига дефектов материалов и стабилизации свойств. Линейный монотонный процесс длительного старения элементов и дрейфа их параметров вызван естественной физической деградацией материалов и их структур при длительной эксплуатации в условиях слабого облучения (соответственно второму закону термодинамики).

Изложим математическое описание длительного линейного (монотонного) начального нелинейного дрейфа параметров элементов с учетом базового варианта стационарной термодинамической модели и частного варианта нелинейной термодинамической модели их дрейфа в период приработки элементов.

Первая модель вытекает из второй. А обе модели обеспечивают анализ кинетики деградации элементов в ходе их старения. Они соответствуют положениям статистической термодинамики и подтверждаются в ходе экспериментов. Рассмотрим, как взаимосвязан предлагаемый модельный подход оценки показателей долговечности устройств с общей проблемой повышения их бездефектности. Проанализируем методический подход к пересчету показателей интенсивности старения элементов в параметрический ресурс устройств согласно положениям параметрической надежности.

Модель монотонного дрейфа. Экспериментальная проверка фактов монотонности изменений параметров различных классов элементов подтверждает постоянство средней скорости V их дрейфа выборки элементов при неизменной температуре и электрическом режиме испытаний. Дрейф параметров описывается зависимостью

$$V = A \exp(-E / \kappa T), \quad (1)$$

где A – масштабный коэффициент (в единицах параметра, в час.); E – энергия активации процесса старения элементов (в электронвольтах); κ – посто-

янная Больцмана; T – температура испытания.

Рассмотрим физические предпосылки монотонности дрейфа параметров элементов и детерминированного характера формулы (1), которая аналогична модели Аррениуса для оценки скорости химических реакций. Представим процесс теплового старения элементов при слабом облучении, как физико-химическое превращение структуры их материалов из более совершенного в состояние, которое по функциональному назначению элемента является деградированным, а с позиции термодинамики более устойчивым. Анализируемый материал элемента рассматриваем в виде открытой системы, которая после нелинейной приработки вошла в стационарное состояние и, оставаясь в нем, движется к предельному.

Процесс рассматриваем на атомарно-молекулярном уровне, как элементарный по сложности и изохорический с точки зрения термодинамики [2]. С учетом тепловых фазовых превращений приемлемо соотношение Гельмгольца

$$S = Q / T,$$

где S – энтропия системы, Q – связанная в ходе превращений энергия системы, T – температура той части системы, которая получила энергию Q .

При переходе из состояния A в B определяем разность энтропий:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}; \quad \Delta S = \int_A^{B_1} \frac{1}{T} dQ = S_A - S_B, \quad (2)$$

где dQ – тепло, получаемое системой при облучении за бесконечно малый промежуток времени; ΔQ – увеличение тепла за счет его выделения из термических пиков, образующихся при торможении первично смещенных атомов.

Рассмотрим указанные константы применительно к состоянию теплового старения с учетом необратимых изохорических превращений, т.е. $S = \Delta Q / T$. С учетом сравнения констант системы в переменных S , т.е. ΔQ и T при неизменных геометрических размерах, имеем

$$\begin{cases} F = U - T \cdot S = U - \Delta Q; \\ \Delta Q = U - F, \end{cases} \quad (3)$$

где F – свободная энергия тела, определяющая термодинамическое равновесие системы в ходе ее теплового взаимодействия с окружающей средой; U – внутренняя энергия тела, т.е. сумма энергий микроэлемента.

Представим основу нашего понимания концепции параметрической надежности элементов во взаимосвязи (1) и (3).

Рассмотрим энергетическую диаграмму необратимого изотермического процесса, частным случаем которого является изохорический процесс старения. Величина ΔQ является энергетическим барьером, который удерживает систему на энергетическом уровне F . Наличие в систе-

ме внутренней энергии U приводит к достижению некоторыми элементами системы вершины барьера и к необратимому фазовому переходу этих элементов на уровень $F_I < F$. Разность этих уровней определяет диссипированную (рассеянную) энергию.

Исходная часть диаграммы достигается системой после завершения периода приработки элементов. Система выходит на уровень F к моменту, когда деградация начинает идти в соответствии с (1). В дальнейшем уровень F обеспечивает стабильность свойств элементов при данной температуре. Активная часть диаграммы определяет динамику процесса деградации, хотя и не описывает ее. Для оценки хода этой деградации рассмотрим уравнение абсолютных скоростей физических процессов системы с учетом константы Q , то есть найдем скорость деградации системы при переходе с уровня F на уровень F_I :

$$1/\tau = \nu \exp(-\Delta Q/kT), \quad (4)$$

где τ – среднее время перехода материала микроэлементов системы из основного состояния в деградированное; ν – максимальная частота колебаний осцилляторов (микроэлементов) системы.

Результирующая часть диаграммы учитывает итог процесса старения. Для нашего случая важен вопрос дрейфа параметра, а не его энергетический результат в виде диссипативной энергии ($F - F_I$). Поэтому мы принимаем, что приращение энтропии системы опосредствовано дрейфом параметра элементов, а кинетику этого процесса по (4) определяет величина ΔQ .

Рассмотрим как формируется величина E_a для реальной системы материалов элемента при участии в ходе старения нескольких i -х простых процессов, каждый из которых идет в соответствии с (4). Для оценки величины S_i каждого простого процесса фазовых превращений в соответствии с уравнением Больцмана имеем:

$$S_i = k \ln W_i; \quad -S_i = k \ln P_i,$$

где $W_i \gg 1$ – термодинамическая вероятность i -го процесса превращений; $P_i \ll 1$ – вероятность i -го процесса фазовых превращений; $(1 - P_i)$ – вероятность стабильного состояния системы к i -му процессу. Значит:

$$-\Delta Q/kT = \ln P_i; \quad \exp(-\Delta Q/kT) = P_i.$$

Для одного масштаба времени и температуры общая вероятность стабильности системы материалов с учетом различных процессов меньше вероятности $(1 - P_i)$ для отдельного процесса. Считаем, что все i -е процессы взаимонезависимы и описываются принципом "И – И". Тогда

$$P = 1 - \prod (1 - P_i),$$

где P – общая вероятность процесса деградации системы материалов,

т.е. компонента твердотельной электроники.

По этой вероятности можно найти искомую величину условной энергии E_d активации процесса старения элемента, как системы материалов, подвергаемых воздействию всех i -х процессов:

$$E_d = kT \ln \{ 1 - \Pi [1 - \exp (\Delta Q_i / kT)] \} . \quad (5)$$

Расчеты по (5) показывают, что величина E_d формируется главным образом минимальными значениями ΔQ_i и зависит от количества i -х процессов, но слабо изменяется в рабочем диапазоне температур.

Эксперименты показывают, что величина ΔQ_i , например, для процессов диффузии и величины E_d для электронных компонент постоянна в широком диапазоне рабочих температур. Очевидно, что (4) не просто аналог модели (1), а основа ее универсальности для материалов элементов. Механизм (5) формирования E_d показывает статистическую природу (1).

С учетом рассмотренного, возможно преобразование формулы (1). Считаем, что скорость V определяет не только дрейф параметра, но и приводящую к дрейфу среднюю частоту актов фазового перехода, а коэффициент A фиксирует максимально возможное число актов фазового перехода единой общей системы элементов и их материалов в единицу времени. Тогда

$$V = A \cdot P = A / W , \quad (6)$$

где W – термодинамическая вероятность процесса деструктуризации материалов и элементов, выраженная дрейфом параметра.

В (6) термодинамическая вероятность, а в (1) экспонента определяют интенсивность старения в заданном масштабе времени. Они как бы задают время полной деградации системы элементов при фиксированной температуре и при постоянном уровне облучения. Этим устанавливается неформальная связь (1) и (3) и обосновывается термодинамический характер модели (1), которая детерминирована для выборки элементов, для всей их генеральной совокупности и, возможно, всей совокупности аналогов, близких по технологии изготовления и принципам функционирования элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем.* – М.: Мир, 1980. – 605 с.
2. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Том V. Теоретическая физика.* – М.: Наука, 1964. – 568 с.

Поступила 13.09.2002

КОВАЛЕНКО Николай Иосифович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики и физики Харьковского национального аграрного университета. Окончил ХГУ в 1971 году. Область научных интересов – радиофизика и электроника.

ПРОХОРОВ Григорий Валерьевич, аспирант Украинской Национальной академии связи (г. Одесса). Область научных интересов – радиофизика и электроника.

ГНАП Арлен Карлович, доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры высшей математики и физики Харьковского национального аграрного университета. Окончил ХГУ в

1965 году. Область научных интересов – радиофизика и электроника.