

УДК 621.039.573.001.5:621.382

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Бржезинский В.А.

Севастопольский национальный технический университет
Студгородок г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: rt.sevgtu@stel.sevastopol.ua

Экспериментально подтверждены выводы термодинамического анализа работоспособности микро- и оптоэлектронных приборов и устройств при воздействии дестабилизирующих факторов.

Для современных высоконадежных микроэлектронных устройств (МЭУ) возрастает роль индивидуальных характеристик надежности на всех этапах жизненного цикла (проектирование – производство – эксплуатация). При этом все большее значение приобретает не статистический, а причинный подход к оценке и прогнозированию надежности МЭУ, основанный на анализе причин и механизмов отказов. Связующим звеном между физическими процессами отказов и характеристиками надежности МЭУ являются модели расходования ресурса изделий при воздействии внешних дестабилизирующих факторов различной природы.

При условии независимости различных механизмов отказов интенсивности отказов $\lambda(t) = \sum \lambda_i(t)$, обусловленные i -ми механизмами, пропорциональны скоростям соответствующих физико-химических процессов. В МЭУ такими доминирующими процессами являются: электромиграция в пленочных проводниках межсоединений, диффузия примесей в p - n переходах, химические и электрохимические реакции (окисление, электролиз), механические повреждения контактов и навесных компонентов

Оценка интегральных (комплексных) показателей надежности МЭУ

осуществляется суммированием интенсивностей отказов по локальным

механизмам деградации и компонентам ненадежности (плата, кристалл,

корпус и т.д.). Но чем выше структурная сложность и разнородность

компонентов МЭУ, тем менее эффективными оказываются физико-

статистические модели.

Принципиально иная методология оценки надежности МЭУ основана на системно-физическом способе прогнозирования, основанном на переходе от локальных физических свойств и параметров к интегральным параметрам состояния системы. При этом классификация процессов по видам преобразования энергии (тепловой, электромагнитной, механической) остается, но эти процессы характеризуют уже не отдельные элементы МЭУ, а устройство в целом.

Причинами отказов приборов и устройств всегда являются неравновесные, необратимые процессы в материалах и элементах МЭУ, обусловленные наличием дефектов структуры, внутренних упругих напряжений, электрических и магнитных полей. Поэтому фундаментальной теоретической основой системно-физического подхода к прогнозированию надежности МЭУ должна быть термодинамика необратимых процессов, или неравновесная термодинамика (НТ) [1,2].

В отличие от классической термодинамики (термостатики), рассматривающей лишь равновесные состояния, соотношения НТ включают в явном виде фактор времени. Главной мерой неравновесности состояния в НТ является скорость изменения энтропии системы $\delta S = dS/dt$.

Ограничения, присущие НТ, состоят в том, что она рассматривает состояния, близкие к равновесным, и процессы, близкие к стационарным. Стационарность необратимого процесса означает постоянство и малую величину скорости его протекания при динамическом равновесии процессов, приводящих к изменению энтропии. Для открытых систем за счет обмена со средой веществом и энергией возможны процессы, при которых $dS > 0$ и $dS < 0$. Критерием устойчивости стационарного состояния [2] является минимальная скорость приращения энтропии: $\delta S_{\min}$ и $d(\delta S) = 0$.

При этих предположениях

$$\delta S = dS/dt = (1/T) \sum (X_k \cdot J_k), \quad (1)$$

где X_k – обобщенные силы, пропорциональные отклонениям интенсивных параметров от равновесных значений или градиентам этих параметров (таких, как давление, температура, напряженности электрических и магнитных полей); J_k – обобщенные потоки, т.е. скорости изменения экстенсивных параметров (таких, как масса, объем, внутренняя энергия, энтропия) [2].

Линейная НТ предполагает существование линейных зависимостей

$$J_k = \sum L_{ik} \cdot X_k, \quad (2)$$

где L_{ik} – кинетические коэффициенты. В физике известно множество закономерностей типа (2), одним из которых является закон Ома. При больших отклонениях от равновесия эти соотношения становятся нелинейными, но нелинейная НТ находится пока еще в стадии становления.

Одним из важнейших достижений линейной НТ является доказательство того, что эволюция термодинамических систем из неравновесного в стационарное состояние и далее в равновесное состояние происходит по экспоненциальному закону

$$f(y,t) = f(y,0) \cdot \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

с различными характерными временами релаксации τ_i .

Реальным процессам деградации МЭУ соответствует широкий набор времен релаксации: от 10^{-10} с до 10^6 ч. Величины τ_i можно рассматривать как интегральные параметры процессов различных уровней в МЭУ, а использование их в теории и практике надежности – как новый, «процессуально-временной» подход к диагностике и индивидуальному прогнозированию надежности МЭУ.

В задачах интегральной диагностики и оценки показателей надежности МЭУ необходимо раскрывать конкретное содержание кинетических уравнений (1) и (2). Абсолютная величина приращения энтропии не поддается непосредственному измерению, но ее можно выразить через величину рассеиваемой мощности $P(t)$ с помощью выражения

$$dS = (1/T) \int P(t) dt . \quad (4)$$

В термодинамике невозможно определение абсолютных величин таких функций состояния как энтропия или внутренняя энергия системы, но возможна оценка относительных изменений этих функций, исходя из выражений типа (1)-(4), а также из уравнений состояния, связывающих функции состояния с внутренними или внешними параметрами системы. Эти уравнения могут быть дополнены соотношениями между физическими и функциональными параметрами системы.

Решение базовых уравнений (1) и (2), представленное в виде суперпозиции функций типа (3), характеризует интегральный процесс деградации МЭУ, для которого $\delta S = \sum A_k \cdot \exp(-t/\tau_k)$. Для очень больших времен релаксации $\delta S = A = \text{const}$.

Наиболее активный этап существования каждого технического объекта – начальный этап его эксплуатации, на котором скорость приращения энтропии максимальна из-за максимального отклонения состояния системы от равновесного. На этапе нормальной эксплуатации величина δS минимальна, что означает стационарность процесса деградации. На этом этапе величина $\delta S \sim J_i = dy_i/dt$, где y_i – интегральный диагностический параметр МЭУ. Интересно и неслучайно совпадение кривых эволюции состояний объектов по критерию δS с кривой интенсивности отказов $\lambda(t)$. Это объясняется одинаковым характером

исходных процессов деградации и механизмов отказов, определяющих ход обеих кривых. Формально можно записать $\lambda(t) = dP/dt = (dP/dS) \cdot (dS/dt)$.

Анализ возможности применения НТ для оценки и прогнозирования надежности МЭУ приводит к следующим выводам:

1. Временной характер эволюции (деградации) сохраняется при переходе от уровня физических процессов – к интегральным показателям надежности, причем он инвариантен к видам и механизмам отказов. Чем сложнее физическая структура объектов, тем ближе процесс эволюции системы к интегральному и тем больше его зависимость от предыстории объекта.

2. Термодинамический подход оказывается более эффективным в случае сильной корреляционной связи или даже функциональной зависимости параметров диагностируемых объектов, каковыми являются МЭУ, созданные по групповой технологии. С ростом сложности и степени интеграции МЭУ перспективность методов НТ, очевидно, возрастает.

Далее рассмотрим основные результаты экспериментальных исследований, подтверждающих эти выводы и свидетельствующих о перспективности и более того – необходимости использования методов НТ для прогнозирования надежности микро- и оптоэлектронных приборов и устройств в процессе и после воздействия дестабилизирующих внешних факторов, в том числе – ионизирующих излучений и термотокковых нагрузок.

Проведенные нами исследования влияния облучения электронами и протонами высоких энергий на параметры кремниевых диодов показали, что в пределах линейной зависимости скорости рекомбинации носителей заряда в базе диодов от флюенса частиц (т.е. при достаточно малых флюенсах, когда взаимодействием радиационных дефектов можно пренебречь) имела место аддитивность изменений параметров диодов при последовательном облучении электронами, а затем протонами или наоборот (при одинаковых флюенсах частиц). Очевидно, что в этом случае имела место и марковость процессов деградации диодов – независимость скорости деградации от предыстории процесса и способа расходования ресурса в прошлом.

Однако в тех случаях, когда было априори известно, что результаты различных воздействий не могут быть независимыми, аддитивности и марковости процессов деградации не наблюдалось. Так комбинированное облучение светодиодов нейтронами и гамма-квантами в разной последовательности показало сильное влияние предварительного гамма-облучения на стойкость светодиодов к последующему облучению нейтронами. Предварительное облучение полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, оптронов, светодиодов) различными видами ионизирующих излучений приводило к увеличению интенсивности отказов

при последующих испытаниях приборов на безотказность в форсированных (по току и температуре) режимах по сравнению с аналогичными необлученными приборами. Если же испытания на безотказность в аналогичных режимах проводились до облучения, они практически не влияли на радиационную стойкость приборов.

При реакторном гамма-нейтронном облучении интегральных кремниевых транзисторов наблюдалась сильная зависимость степени их необратимой деградации от мощности дозы гамма-облучения и отношения мощности дозы гамма-излучения к плотности потока нейтронов (при равных общих дозах нейтронного и гамма-излучений). В этом случае имело место наложение объемных и поверхностных радиационных эффектов.

Исследования кинетики деградации оптронов и светодиодов на основе GaP и GaAlAs при гамма-облучении ^{60}Co и при ускоренных испытаниях в импульсном режиме прямого тока [3,4] показали, что в обоих случаях имеют место немонотонные зависимости интенсивности излучения светодиодов от дозы гамма-облучения или времени испытаний в импульсном режиме. На кривых наблюдалось несколько максимумов, объясняемых перестройкой дефектно-примесных комплексов в активной области светодиодов. Эти зависимости хорошо аппроксимировались суммой экспоненциальных членов, подобных (3). В предложенных ранее частных моделях различных деградационных процессов в светодиодах также фигурируют экспоненциальные выражения. Качественная аналогия кинетики деградации светодиодов при воздействии дестабилизирующих факторов различной природы свидетельствует о глубокой общности вторичных процессов перестройки дефектов и полностью подтверждает вывод об инвариантности кинетики процессов релаксации к механизму того или иного процесса.

Анализ радиационных эффектов в изделиях электронной техники с позиций НТ впервые был проведен нами в общем виде в работе [1]. Однако в ней и в последующих работах не был решен вопрос о выборе обобщенных сил и способе расчета приращения энтропии (1) при воздействии ионизирующих излучений (не решен он и в настоящее время). Исходным при подобном анализе должен быть вопрос об источниках приращения энтропии в системе.

Неоднородности являющиеся причинами неравновесных состояний и необратимых деградиационных процессов в МЭУ, могут иметь различную природу: 1) врожденные дефекты, расположенные беспорядочно в исходных материалах или сосредоточенные на границах разделов слоев (например, на границе Si-SiO₂); 2) специально созданные «сэндвичи» слоев из различных материалов (гетеропереходы МДП- и квантово-размерные структуры) или градиенты электрических полей, концентрации примесей и т.д.

Были проведены специальные исследования влияния локальных радиационных повреждений, создаваемых протонами в диодных структурах, на вольтамперные характеристики этих структур. Пучок протонов падал перпендикулярно плоскости *p-n* перехода и создавал максимум плотности дефектов в конце пробега, на разной глубине (в зависимости от энергии протонов). Так было показано, что наиболее чувствительной к воздействию ИИ является область базы, непосредственно примыкающая к *p-n* переходу.

Однако для данного анализа главным является то, что качественный характер изменений вольтамперных характеристик *p-n* переходов оставался одинаковым при любой ориентации образцов относительно пучка протонов, а также и при гамма-нейтронном облучении, образующем, как известно, равномерно распределенные дефекты в материалах.

Эти результаты свидетельствуют о том, что вносимые облучением неоднородности являющиеся причиной необратимых процессов деградации, не обязательно должны иметь пространственные градиенты интенсивных параметров, т.е. создавать дополнительные обобщенные силы. Известно, например, что гамма-облучение ускоряет все существовавшие в МЭУ (и не только в них) деградиационные процессы. Было, например, показано, что при гамма-облучении ускоряются окислительные процессы коррозии омических контактов в ИС, электромиграция атомов вещества в проводниках межсоединений и разрушение силиконовых защитных покрытий ИС.

Можно считать, что в результате воздействия ионизирующих излучений в веществе любых элементов МЭУ имеет место дополнительное приращение энтропии со скоростью

$$\delta S = (dS/d\Phi) \cdot (d\Phi/dt) = (1/T)(dE/d\Phi) \cdot \Phi,$$

где Φ – плотность потока частиц, а E – энергия, переданная излучением веществу.

Библиографический список

1. Сирота Н.Н. Анализ радиационных эффектов методами термодинамики необратимых процессов / Н.Н.Сирота, В.А.Бржезинский // Докл. АН БССР. Сер. физика. — 1978. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 314–317.

2. Воробьев В.Л. Термодинамические основы диагностики и надежности микроэлектронных устройств / В.Л.Воробьев. — М.: Наука, 1989. — 160 с.

3. Бржезинский В.А. Модель радиационной деградации светодиодов / В.А. Бржезинский, В.К. Макаров, А.С. Паранюк // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника: Сб. науч. тр. — К., 1992. — Вып. 22. — С. 27–32.

4. Бржезинский В.А. Деградация светоизлучающих диодов в импульсном режиме / В.А. Бржезинский, В.К. Макаров, А.С. Паранюк // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника: Сб. науч. тр. — К., 1993. — Вып. 25. — С. 41–46.

Поступила в редакцию 11.01.2001 г.