

УДК 621.396.96.019

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ТЕРМОЦИКЛОВ И ТЕРМОУДАРА

Н.С. ОБРАЗЦОВ, С.Ю. МАКАРЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 12 мая 2003

Описываются механизмы, приводящие к деградации электрофизических параметров микрополосковых линий при их ускоренных испытаниях на термостойкость. Предложена математическая модель изменения емкости микрополосковой линии под воздействием термоциклирования и термоудара.

Ключевые слова: микрополосковые линии, ускоренные испытания, термоциклирование, термоудар.

Введение

Оценка стабильности микрополосковых линий (МПЛ) с помощью выдержки при повышенной температуре требует большой длительности процедуры испытаний. Термоциклирование и термоудар представляют один из способов ускоренных испытаний изделий на термостойкость. Порядок и последовательность, а также интервал температур регламентированы ГОСТ. В электронной промышленности наибольшее распространение при испытаниях изделий электронной техники (ИЭТ) получил интервал температур от -60 до $+125^{\circ}\text{C}$.

Циклическое воздействие температур (ЦВТ) в ИЭТ приводит к растрескиванию кристаллов, деформации покрытий, обрывам и коротким замыканиям, потери герметичности корпусов, ухудшению электрических характеристик.

Проведение термоциклирования исследуемых структур МПЛ в диапазоне температур -65 – $+85^{\circ}\text{C}$, соответствующих предельным температурам рабочего температурного диапазона СВЧ ГИС, по 2 мин при максимальном числе циклов, равном 80, не приводит к заметному изменению электрофизических параметров (емкости C , диэлектрической проницаемости ξ , проводимости ρ_0).

Однако платы с МПЛ, подвергнутые термоудару путем внесения в нагретую до $+260^{\circ}\text{C}$ кремнийорганическую жидкость на 1 мин нагрева на каждый цикл с охлаждением $\tau=1$ мин в условиях комнатной температуры приводят к возрастанию параметров, но имеют тенденцию к их уменьшению с увеличением числа циклов термоудара.

Изменение емкости C исследуемых структур МПЛ при всех описанных видах термо воздействий обусловлено протеканием процессов деградации не только многослойной металлизации МПЛ, а также на границе раздела металлизации с диэлектриком и в самом диэлектрике поликоровой подложки. В такой системе присутствуют также внутренние напряжения, стимулирующие протекания деградационных процессов под температурными воздействиями [1].

Методика проведения эксперимента

При определении диапазона температур термоциклирования и скорости изменения температуры в процессе термоцикла исходим из того, чтобы величина создаваемых внутренних напряжений, с одной стороны, не превышала предел прочности материала элементов полосковой линии и не вызывала катастрофических изменений, с другой стороны, ускоряла деградационные процессы. Кроме того, время нагрева и охлаждения структуры должно быть достаточным для нагрева всего объема материала конструкции, чтобы произошло изменение его линейных размеров и создание в ней внутренних механических напряжений. Отсутствие видимых изменений электрофизических характеристик полосковых линий при проведении термоциклирования в диапазоне температур -65 – $+85^{\circ}\text{C}$ при времени нагрева и охлаждения 2 мин показывает, что за время термоцикла структура, очевидно, не успевает прогреться. Термоудар приводит к созданию в структуре больших градиентов температуры, а следовательно, и внутренних напряжений. Как следствие этого, наблюдается изменение свойств материалов и электрофизических характеристик полосковой линии.

Энергию активации E_a можно определить, применив следующий прием:

$$\ln C_j(T) = \ln K_c - E_a/kT, \quad (1)$$

где K_c — коэффициент емкости; E_a — энергия активации; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Представим $\ln K_c = b$; $-E_a/k = a$; $\ln C_j(T) = Y$; $1/T = X$. Тогда выражение (1) можно записать в виде линейной функции

$$Y = b + aX. \quad (2)$$

Это означает, что, построив по результатам экспериментальных исследований зависимости вида

$$\ln C_j(T) = \varphi(1/T), \quad (3)$$

где φ — символ линейной функциональной связи, по их наклону (коэффициенту $a = -E_a/k$) можно определить энергию активации деградационного процесса.

Проводился анализ результатов температурных испытаний четырех выборок ГИС. Две выборки подвергались длительному воздействию температуры. Первая в течение 164 ч при $T=+100^{\circ}\text{C}$ (рис. 1), а затем в течение 1030 ч при $T=+150^{\circ}\text{C}$ (рис. 2), вторая выборка сразу подверглась воздействию температуры в течение 1030 ч при $T=+150^{\circ}\text{C}$, т.е. без предварительной выдержки при $T=+100^{\circ}\text{C}$ (рис. 3).

Экспериментальная часть.

Из анализа экспериментальных данных следует вывод о том, что предварительная выдержка ГИС при $T=+100^{\circ}\text{C}$ практически не сказалась на характере изменения емкостей при дальнейшей выдержке ГИС в условиях температуры $T=+150^{\circ}\text{C}$ (рис. 4, 5). Поэтому есть основания предполагать, что энергия активации для диапазона температур $+20$ – $+100^{\circ}\text{C}$ и температуры $+150^{\circ}\text{C}$ различна.

Разрабатывались модели экспоненциального вида, аппроксимирующие изменение значения емкостей ГИС при выдержке ГИС в условиях температуры $T=+150^{\circ}\text{C}$ в течение различных периодов времени.

Экспоненциальные модели изменения емкостей полосковой линии ГИС строились в виде выражений

$$C_j = \alpha \exp(-\beta t), \quad (4)$$

где C_j — значение j -й рассматриваемой емкости для текущего времени t ; t — время выдержки в условиях температуры $T=+150^\circ\text{C}$; α, β — константы, определяемые на основе экспериментальных данных.

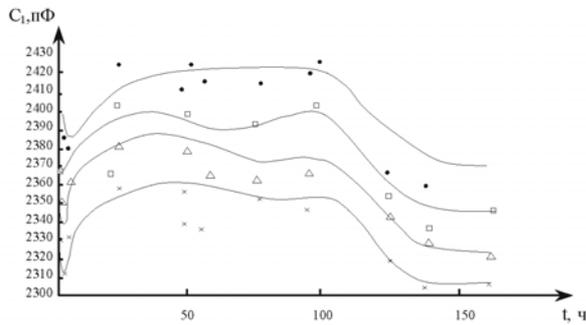


Рис. 1. Изменение емкости МПЛ на начальном этапе воздействия температуры $T=100^\circ\text{C}$ в течение 150 ч

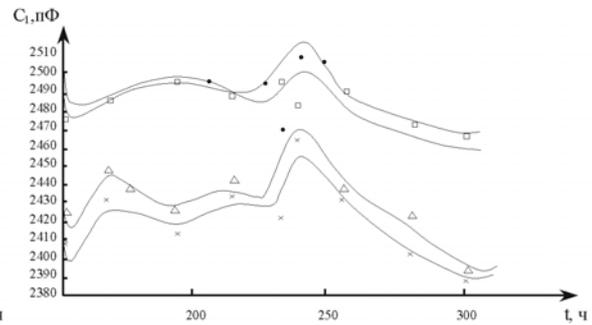


Рис. 2. Изменение емкости МПЛ на начальном этапе воздействия температуры $T=150^\circ\text{C}$, после предварительного воздействия $T=100^\circ\text{C}$ в течение 164 ч

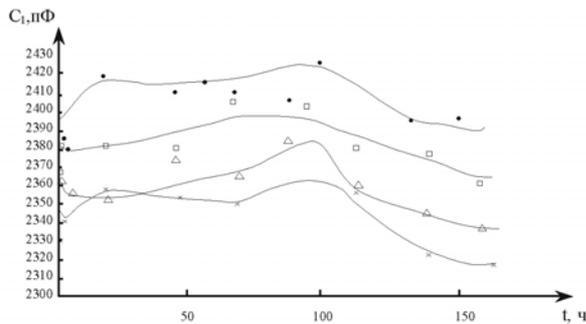


Рис. 3. Изменение емкости МПЛ на начальном этапе воздействия температуры $T=150^\circ\text{C}$

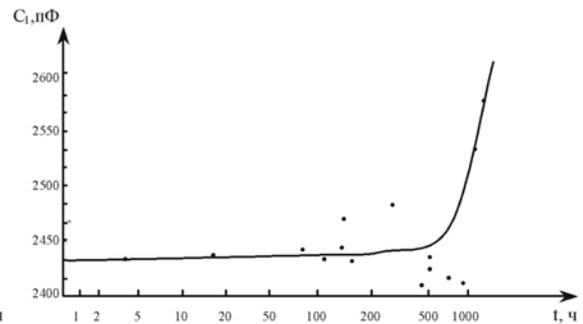


Рис. 4. Изменение емкости МПЛ под воздействием температуры $T=150^\circ\text{C}$

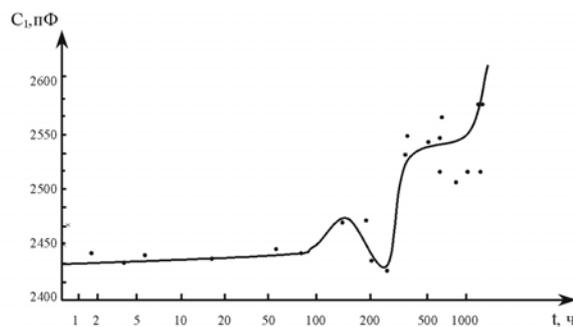


Рис. 5. Зависимость емкости МПЛ под воздействием температуры $T=100^\circ\text{C}$ в течение 164 ч и 150°C свыше 1000 ч

При построении моделей вида (4) коэффициенты α и β находились с помощью ЭВМ методом наименьших квадратов[3].

Поскольку (4) содержит два неизвестных коэффициента, то принять метод наименьших квадратов затруднительно. Для определения коэффициентов α и β использовался метод выравнивания зависимости (4). Логарифмируя уравнение (4), получим

$$\ln C_j = \ln \alpha - \beta t. \quad (5)$$

Введем обозначения: $\ln C_j = Y$; $\ln \alpha = b$; $-\beta = a$; $t = x$.

Тогда выражение (5) запишется в виде

$$Y = b + aX. \quad (6)$$

Значения коэффициентов a и b определяются по формулам

$$a = K_{xy}/D_x; \quad b = m_y - am_x, \quad (7)$$

$$\text{где } m_x = \frac{\sum_{d=1}^n x_j}{n}; \quad m_y = \frac{\sum_{d=1}^n y_j}{n}; \quad K_{xy} = \frac{\sum_{d=1}^n (x_j - m_x)(y_j - m_y)}{n}; \quad D_x = \frac{\sum_{d=1}^n (x_j - m_x)^2}{n}; \quad (8)$$

n — число экспериментальных точек.

Число экспериментальных точек n определялось числом дискретных моментов контроля значений емкостей C_j . Поскольку выборка исследуемых СВЧ ГИС была представлена несколькими экземплярами (образцами), то значение емкости C_j для каждой экспериментальной точки усреднялось. И эти значения использовались в дальнейшем для построения экспоненциальных моделей вида (5).

Для проведения процедуры проверки адекватности моделей можно оценить дисперсию емкости. Эта дисперсия будет обусловлена усреднением емкостей C_j для каждой экспериментальной точки, а также погрешностью измерения. Дисперсия $D_{\text{уср}}$, обусловленная усреднением емкости по всем испытываемым экземплярам, определена как среднее значение по трем наиболее заметным с точки зрения разброса емкости точкам. Для определения дисперсии, обусловленной погрешностью измерений, оценена предельная погрешность измерительного прибора типа Е7-12. Она составляет не более $\pm 0,01$ пФ. В случае нормального распределения погрешностей измерений на основании правила "трех сигм" для дисперсии можно определить

$$D_{\text{н\ddot{a}д}} = \frac{\delta^2(\tilde{N}_j)}{9}, \quad (9)$$

где $D_{\text{ногр}}$ — дисперсия емкости, обусловленная неточностью измерения; $\delta(C_j)$ — абсолютное значение погрешности измерения емкости.

С учетом того что погрешности емкости, обусловленные усреднением (по нескольким испытываемым экземплярам) и неточностью измерения, независимы, для суммарной дисперсии емкости можно записать

$$D(C_j) = D_{\text{о\ddot{н}д}} + D_{\text{н\ddot{а}д}} \quad (10)$$

Значения $\delta(C_j) = \sqrt{D(C_j)}$, подсчитанные для рассматриваемых случаев, представлены в таблице.

Расчетные данные проверки адекватности модели

Номер испытываемой партии	$D_{\text{уср}}$, пФ ²	$D_{\text{ногр}}$, пФ ²	$\delta(C_j) = \sqrt{D(C_j)}$
1	$0,105 \times 10^{-2}$	0,01	0,033
2	$0,496 \times 10^{-3}$	0,01	0,023
3	$0,121 \times 10^{-2}$	0,01	0,035
4	$0,153 \times 10^{-2}$	0,01	0,039

Проверка по критерию Фишера при значении доверительной вероятности 0,95 показывает, что построенные модели адекватны.

Доверительный интервал для значения емкости C_j в i -й точке

$$I_j = [(C_j)_i - \Delta C_j; (C_j)_i + \Delta C_j], \quad (11)$$

где ΔC_j — возможное отклонение емкости за счет действия случайных причин. Символ i при величине доверительного интервала подчеркивает тот факт, что величина доверительного интервала зависит от значения доверительной вероятности j . Величину ΔC_j определим в предположении, что ее распределение близко к нормальному:

$$\Delta C_j = t_j \delta(C_j), \quad (12)$$

где t_j — величина, показывающая, какое число среднеквадратичных отклонений $\delta(C_j)$ необходимо отложить вниз и вверх от экспериментального значения C_j , чтобы вероятность попадания теоретического значения емкости в этот диапазон была равна значению C_j . Из [2] известно, что

$$t_j = \arg \Phi^*(I + \gamma/2), \quad (13)$$

где Φ^* — стандартная функция нормального распределения.

Для доверительной вероятности $\gamma=0,99$ значение $t_j=-2,56$.

Значение величин ΔC_j для партии № 1 — 0,083 пФ, для партии № 2 — 0,058 пФ, для партии № 3 — 0,089 пФ, для партии № 1 — 0,100 пФ.

Используя значения ΔC_j , можно определить для каждой точки доверительные интервалы. Построив далее расчетный (по модели) график зависимости емкости C_j , посмотреть в какой степени он укладывается в доверительные границы.

Изменение емкости МПЛ обусловлено протеканием процессов деградации в многослойной металлизации, а также на границах раздела металлизации с диэлектриком и в самом диэлектрике. В используемой системе металлизации Cr–Cu–Ni–Au нижний слой хрома обеспечивает адгезию к диэлектрической подложке. Слой меди является разделяющим (барьерным) слоем между адгезионным слоем хрома и проводящим слоем золота. Слой никеля выполняет технологические функции, обеспечивая хорошее сцепление между металлическими слоями, а также улучшенное качество соединения проволочного вывода с контактной площадкой. Рассматриваемая система находится в неравновесном состоянии, характеризуется контактом разнородных материалов и предполагает их взаимную диффузию, что приводит к образованию новых фаз. В такой системе присутствуют также внутренние напряжения, стимулирующие протекание деградационных процессов.

Повышение температуры приводит к увеличению средней энергии частиц (атомов) материала металлизации. Это приводит к повышению скорости процессов взаимной диффузии между металлическими слоями. Наиболее вероятным является взаимодействие между верхними слоями рассматриваемой системы металлизации, т.е. никелем и золотом.

Увеличение емкости исследуемых структур происходит в результате изменения диэлектрических свойств поликоровой подложки, а также границы раздела металл–диэлектрик. Увеличение емкости связано с протеканием диффузии материала металлизации в диэлектрическую подложку и уменьшением в результате этого суммарной толщины диэлектрика. Хром, используемый в качестве адгезионного слоя, является активным металлом, имеет высокое значение свободной энергии образования окисла и поэтому легко взаимодействует с диэлектриком на основе Al_2O_3 .

Заключение

Проведена серия ускоренных экспериментов по оценке термостойкости микрополосковых линий.

Построена математическая модель изменения емкости микрополосковой линии под воздействием термоциклирования и термоудара.

Показано, что причиной отказа СВЧ ГИС является изменение частотных свойств МПЛ вследствие увеличения емкости исследуемых структур в результате изменения диэлектрических свойств поликоровой подложки, а также границы раздела металл–диэлектрик под влиянием термического воздействия.

RESEARCH OF A MICROSTRIPS THERMOSTABILITY AT AN OPERATION OF TEMPERATURE SHOCK AND TEMPERATURE CYCLING

N.S. OBRAZTSOV, S.YU. MAKAREVICH

Abstract

The mechanisms of physical properties degradation at accelerated tests of microstrips on a thermostability, under an operation of varying temperature are featured. The mathematical model of change of a microstrip's capacity under an operation of a temperature cycling and thermal shock is offered.

Литература

1. *Образцов Н.С., Макаревич С.Ю.* // Материалы II Междунар. науч.-техн. конф. "Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств". Т. 2. Новополоцк, 2002. С. 95–100.
2. *Бушминский И.П., Гудков А.Г., Дергачев В.Ф.* Конструкторское проектирование микросхем СВЧ. М., 1991.
3. Конструкторско-технологические основы проектирования полосковых микросхем / Под ред. И.П. Бушминского. М., 1987.