

УДК 621.319.4:621.3.019.3

ОБ ОДНОЙ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
 КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
 КОНДЕНСАТОРОВ ВО ВРЕМЕНИ

И.П. Михайловский

Известно, что широкому применению гибридных пленочных микросхем в радиоэлектронной аппаратуре часто препятствует недостаточная надежность тонкопленочных конденсаторов (ТПК) по сравнению с другими компонентами. Причем ненадежность ТПК резко возрастает с увеличением площади или с уменьшением толщины диэлектрического слоя. В обоих случаях повышается интенсивность катастрофических отказов, которые чаще всего проявляются в образовании короткого замыкания (КЗ) между электродами. Природа отказов такого типа еще недостаточно изучена. Определение закономерностей их возникновения в различных условиях эксплуатации позволяет осуществлять прогнозирование надежности ТПК путем построения физической модели развития отказа.

В данной работе на основе анализа экспериментальных данных по результатам испытаний ТПК в течение длительного периода времени, делается попытка систематизировать и количественно оценить те необратимые изменения в системе металл-диэлектрик-металл (М-Д-М), которые ответственны за возникновение отказов типа КЗ.

ТПК испытывались на хранение при различных температурах. Основное внимание при регистрации отказов было уделено измере-

нию величины τ - времени до образования КЗ каждого образца из исследуемой партии. Измерение времени τ начиналось непосредственно после окончания процесса изготовления ТПК. Главные трудности в проведении испытаний были связаны с необходимостью непрерывного контроля за состоянием ТПК. Этот контроль осуществлялся автоматически с помощью электромеханического переключателя и самопишущего прибора. Величина измерительного напряжения, подаваемого на ТПК, не превышала $4 \cdot 10^{-3}$ в.

В качестве образцов ТПК использовались структуры типа $Al-Al_2O_3-Al$, полученные на стеклянных подложках (площадь $0,1-0,5 \text{ см}^2$). Пленка алюминия осаждалась методом термического испарения в вакууме, окись алюминия получали анодированием [1]. Толщина диэлектрических пленок была равна 600 Å, металлических - 5000-8000 Å. Общий объем испытания составлял $3,6 \cdot 10^5$ элементо-часов.

Для определения места образования КЗ в системе М-Д-М измерялась температура поверхности отказавших образцов, через которые пропускали постоянный ток величиной до 200 ма. В месте образования КЗ наблюдалось повышение температуры. Измерение температурного поля проводилось с помощью инфракрасного микроскопа [2] или термоиндикаторов с интервалом рабочих температур от 60 до 250°C.

Изучение отказавших образцов ТПК показало, что с течением времени в некотором локальном участке площади системы М-Д-М образуется контактный металлический мостик (КММ) диаметром $(0,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-1}$ мкм. Величина электрического сопротивления КММ лежит в диапазоне 2-25 ом, температурный коэффициент сопротивления $\text{ТКС} = 4 \cdot 10^{-3}$ град.⁻¹. После возникновения первого КММ возможно образование еще нескольких КММ, случайным образом размещающихся по всей площади ТПК. Наблюдаемая средняя плотность образующихся КММ для данных образцов составляла $(0,05 \pm 0,2) \text{ мм}^{-2}$.

Одна из возможных причин появления металлических каналов в объеме диэлектрической пленки может быть связана с диффузионными явлениями в системе М-Д-М. Известно [3], что величина коэффициента диффузии D по границам зерен или дефектным участкам (микропорам и т.п.) может значительно превышать коэффициент диффузии в остальной части диэлектрической пленки. Обусловленный концентрационным градиентом процесс диффузии атомов ме-

талла из электродов, начавшийся на таком локальном участке, в дальнейшем может инициировать образование КММ между электродами.

Если допустить, что диффундирующие атомы металла поступают в диэлектрическую пленку толщиной d через обе границы раздела металл-диэлектрик, а их концентрация N в диэлектрической пленке в момент времени $t = 0$ равна $N = 0$ и в электродах $N_0 = 10^{22}$, то, используя решение диффузионного уравнения [4], получаем:

$$\tau = \frac{0,58 d^2}{D_0} e^{\frac{Q}{kT}}, \quad (1)$$

где $D_0 = \frac{D}{e^{-\frac{Q}{kT}}}$ - множитель в выражении для коэффициента диффузии $D = D_0 e^{-\frac{Q}{kT}}$; Q - энергия активации; k - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура.

Экспериментально наблюдаемые значения τ обычно имеют некоторое статистическое распределение, что может быть связано, например, с разбросом толщины диэлектрической пленки. Для исследуемых образцов ТПК было установлено, что распределение по $\lg d$ близко к нормальному закону со значением $3 \sigma_{\lg d}$, укладываемым в диапазоне 10%, и распределение по $\lg \tau$ при постоянной температуре с учетом первоначального разброса толщины диэлектрической пленки будет также нормальным:

$$\varphi(\lg \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\lg \tau}} e^{-\frac{(\lg \tau - m_{\lg \tau})^2}{2\sigma_{\lg \tau}^2}}, \quad (2)$$

где

$$m_{\lg \tau} = 2 m_{\lg d} + \lg B;$$

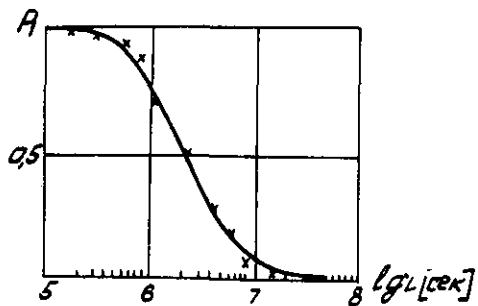
$$\sigma_{\lg \tau} = 2 \sigma_{\lg d};$$

$$B = \frac{0,58}{D_0} e^{\frac{Q}{kT}};$$

$m_{\lg \tau}$, $m_{\lg d}$ - математические ожидания распределения по $\lg \tau$ и $\lg d$; $\sigma_{\lg \tau}$, $\sigma_{\lg d}$ - среднеквадратичные отклонения.

Выражение (2) позволяет производить расчеты по прогнозированию вероятности безотказной работы $P = P(\lg \tau)$ при различных значениях температуры окружающей среды. Например, на ри-

сунке построена по формуле (2) расчетная кривая (сплошная линия) для логарифмически нормального распределения, соответствующая температуре



25°C. Значения $Q = 0,78$ эв и $D_0 = 1,8 \cdot 10^{-8} \frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$ были определены по прямой $\lg \tau = f(\frac{1}{T})$, полученной в результате испытаний при повышенных температурах ($T = 25^\circ + 500^\circ\text{C}$). Для сравнения на этом же рисунке на-

несены экспериментальные точки.

ВЫВОДЫ

1. Изучение природы отказов ТПК типа КЗ показало, что они представляют собой некоторые металлические каналы, прорастающие со временем в системе М-Д-М.

2. На основе предлагаемой диффузионной модели развития отказа получено выражение для времени безотказной работы ТПК. Показано, что в этом случае распределение отказов по времени соответствует логарифмически нормальному закону.

В заключение автор выражает благодарность Э.Г. Косцову за полезное обсуждение работы.

Л и т е р а т у р а

1. КОСЦОВ Э.Г., МИХАЙЛОВСКИЙ И.П. Тонкопленочные конденсаторы, - "Автоматрия", 1965, № 6, стр. 28-35.

2. НЕВСКИЙ Ю.А., АРАДЖИОНИ В.А. Исследование переходных тепловых процессов в пленочных микросхемах. - "Вычислительные системы", Новосибирск, "Наука" СО, 1969, № 32, стр. 59-66.

3. БЛИНОВ Г.А. К оценке влияния структурных несовершенств окисных диэлектрических пленок на их электрические свойства в

структуре М-Д-М. - "Вычислительные системы". Материалы II Всесоюзной конференции, Новосибирск, 1969, стр. 46-48.

4. БОЛТАКС Б.И. Диффузия в полупроводниках, М., Физматгиз, 1961.

Поступила в редакцию
10.1.1971.