

УДК 621.319.443.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК В ПРОЦЕССЕ СТАРЕНИЯ

И.П. Михайловский

Основные закономерности нарушения электрической прочности диэлектрических пленок в тонкопленочных системах М-Д-М были достаточно полно изучены в ряде работ [1-4]. Однако исследование процесса изменения электрической прочности во времени, необходимое для прогнозирования надежности ТПК (тонкопленочных конденсаторов), не проводилось.

В данной работе исследовалась электрическая прочность диэлектрических пленок во времени на основе изучения функций распределения пробивных напряжений [5-6] ТПК $Al-Al_2O_3-Al$.

Образцы ТПК хранились при комнатной температуре без электрической нагрузки в течение 3000 часов. Исследование функций распределения пробивных напряжений производилось через дискретные интервалы времени.

Определение электрической прочности ТПК проводилось в квазистационарном режиме способом измерения пробивных напряжений $V_{пр}$ отдельных микропробоев, возникающих при воздействии пилообразно возрастающего напряжения [7]. После нарушения электрической прочности напряжение автоматически снималось, то есть при каждом воздействии напряжения имел место только один микропробой, который регистрировался по порядковому номеру N и со-

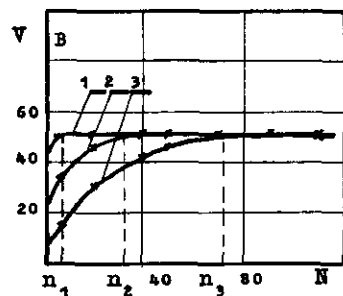


Рис. 1

ответствующей величине V_{np} . Типичная зависимость V_{np} от N имеет два характерных участка (рис. 1), длина которых определяется площадью образца S ($1-S=0,01\text{см}^2$; $2-S=0,05\text{см}^2$, $3-S=0,1\text{см}^2$). Для первых n микропробов обычно наблюдается постепенное возрастание V_{np} , связанное с наличием дефектных участков в системе М-Д-М, в то время как для всех последующих эта величина остается в среднем постоянной. По пробивным напряжениям ТПК с одинаковой толщиной диэлектрической пленки, но разной площадью отличаются только числом микропробов n на начальном участке. Учитывая случайность и независимость появления микропробов, может быть выбрана вероятность того, что образец имеет 0, 1, 2, ..., n микропробов на начальном участке (закон Пуассона):

$$P_n = \frac{(n_s S)^n}{n!} e^{-n_s S},$$

где n — число микропробов на единицу площади; $n_s S$ — среднее число микропробов на образец; $S = \frac{\pi D^2}{4}$ — площадь верхнего электрода, имеющего форму круга, D — его диаметр. Дважды логарифмируя обе части уравнения (для $n = 0$), получаем уравнение прямой линии:

$$\lg(-\ln P_n) = \lg \frac{\pi}{4} n_s + 2 \lg D \quad (1)$$

Зависимость n от толщины диэлектрической пленки может быть определена аналогичным образом. При этом введем в рассмотрение среднюю величину числа микропробов n_d , приходящуюся на единицу толщины, которая входит в соответствующее уравнение:

$$\lg(-\ln P_n) = \lg n_d + \lg d \quad (2)$$

Прямые (1) и (2) характеризуются различными углами наклона. Экспериментальные результаты укладываются на прямую линию в ко-

ординатах $\lg(-\ln P_n)$ и $\lg D$, $\lg d$ с наклоном, близким к 2. Это свидетельствует о преобладающей роли дефектов поверхности —ного типа n_s .

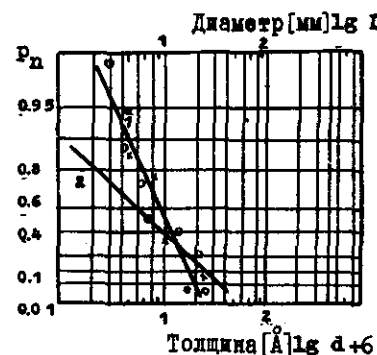


Рис. 2

2, 3). Сравнение экспериментальных данных с известными законами

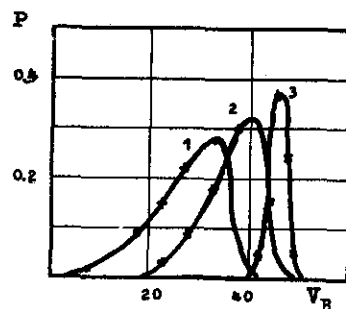


Рис. 3

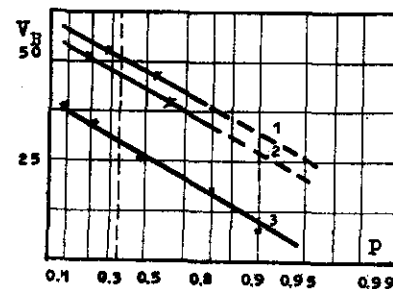


Рис. 4

распределения (по критериям Колмогорова, χ — квадрат) показывает, что для первых n микропробов характерно двойное показательное распределение вероятностей, а для последующих — нормальное. Параметры интегрального распределения

$$P(V) = 1 - \exp\{-\exp[a_n(V - V_m)]\},$$

где $1/\alpha_n$ - мера дисперсии, V_m - модальное значение двойного показательного закона, могут быть просто найдены на экстремально-вероятностной бумаге [8], рис.4. Прямая 1 соответствует распределению пробивных напряжений для первого микропробоя в начальный момент времени $t=0$, прямая 2 для $t=96$ час., прямая 3 для $t=2750$ час. Для $t=0$ параметры распределения соответственно равны $\frac{1}{\alpha_n} = 0,91$, $V_m = 50$.

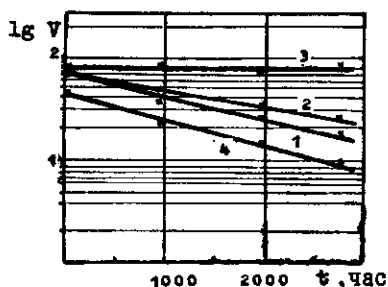


Рис.5

Видно, что со временем происходит уменьшение наиболее вероятного значения V_m . На рис.5 показано изменение значения V_m для первых (1,2) и последующих (3) микропробоев в логарифмическом масштабе.

С практической точки зрения важно выяснить вопрос о влиянии проведения предварительных n микропробоев (тренировок) на последующее изменение электрической прочности ТПК со временем. Характер этого влияния иллюстрируется на рис.5 (1,2 и 3 соответствуют тренированным, 4 - не тренированным образцам ТПК). Предварительно тренированные n микропробоями образцы имеют большие абсолютные значения V , напряжения первого микропробоя, однако скорость снижения пробивного напряжения практически не изменяется.

Одна из основных причин, ответственных за постепенное уменьшение пробивных напряжений ТПК, может быть связана с диффузией металла электродов в диэлектрическую пленку. Учитывая, в первую очередь, локальность развития этого процесса, связанную с наличием дефектных участков как в объеме диэлектрической пленки (микропоры и т.п.), так и на границе раздела (микровыступы), можно объяснить причину снижения пробивных напряжений отдельных микропробоев. Если образцы ТПК не подвергаются воздействию электрического поля (в том числе и во время изменения параметров), то со временем следует ожидать прорастания металлических нитей между электродами, что часто и наблюдается на практике.

На основании полученных экспериментальных данных могут быть сделаны следующие выводы:

1. Распределение вероятностей пробивных напряжений первых микропробоев ТПК соответствует двойному показательному закону.

2. Со временем происходит изменение модального значения пробивного напряжения только первых микропробоев, при этом среднее значение пробивных напряжений последующих микропробоев практически может не изменяться.

3. Качество диэлектрической пленки в системе М-Д-М может характеризоваться числом n первых микропробоев, имеющих пониженное значение пробивных напряжений. В процессе старения происходит ухудшение качества, проявляющееся в возрастании значения n .

4. Предварительное проведение первых n микропробоев в системе М-Д-М эквивалентно операции электрической тренировки, повышающей её качество.

Л и т е р а т у р а

1. КОСЦОВ Э.Г. О нарушении электрической прочности диэлектрических пленок. - "Вычислительные системы", Новосибирск, "Наука" СО, 1968, вып. 29, стр. 183.
2. ВОРОБЬЕВ Г.А., МУХАЧЕВ В.А., РУДНЕВ А.Н. О механизме пробоя диэлектрических пленок монооксида кремния. - ИТФ, 1968, №11; стр. 1966.
3. KLEIN N., LISAK Z. Electrical Breakdown in Thin Silicon Oxide Films. - Proc. IEEE, 1966, vol.54, p.979.
4. BUDENSYEIN P.P., HAYS P.J. Breakdown Conduction in Al-SiO-Al Capacitors. "J. Appl. Phys." 1967, vol.38, №7, p. 2837.
5. КОЙКОВ С.Н., ЦИКИН А.Н. О возможности расчета напряжения ионизации по "кривым жизни" изоляции. - Труды ЛПИ, "Энергия", 1965, №255, стр. 130.
6. КОЙКОВ С.Н., ЦИКИН А.Н. Электрическая прочность тонких слоев окисла алюминия. - ИТФ, 1956, Т. 26, № 110.
7. МАЛИНИН В.В., МИХАЙЛОВСКИЙ И.П. Способ измерения напряжения пробоя тонкопленочных конденсаторов. "Известия вузов, Приборостроение", 1971, № 5, стр.118.
8. ГУМБЕЛЬ Э. Статистика экстремальных значений, М., Мир, 1965.

Поступила в ред.-изд.отд.
3 августа 1972 г.