

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРЕНИРОВКИ
НА ПАРАМЕТРЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Методические указания к лабораторной работе 38

Куйбышев 1982

УДК 621.362.8:621.319.4

Изучаются дефекты тонкопленочных конденсаторов, проводится анализ причин их возникновения; определяется напряжение пробоя для конденсаторов с различными значениями площади перекрытия обкладок.

Исследуется также процесс электрической тренировки, оцениваются электрическая прочность, влияние тренировки на свойства тонкопленочных конденсаторов.

Рекомендуется студентам специальности 0705.

Составитель М.Н. П и г а н о в

Утверждены на редакционно-издательском совете института 16.12.1981г.

Ц е л ь р а б о т ы - исследование влияния электрической тренировки на электрическую прочность тонкопленочных конденсаторов (ТПК).

З а д а н и я :

1. Изучить типы дефектов ТПК и причины их возникновения.
2. Определить напряжение пробоя для ТПК с различными значениями площади перекрытия обкладок.
3. Провести тренировку ТПК импульсным напряжением.
4. Оценить значение электрической прочности ТПК после тренировки.
5. Оценить влияние тренировки на тангенс угла диэлектрических потерь ТПК.

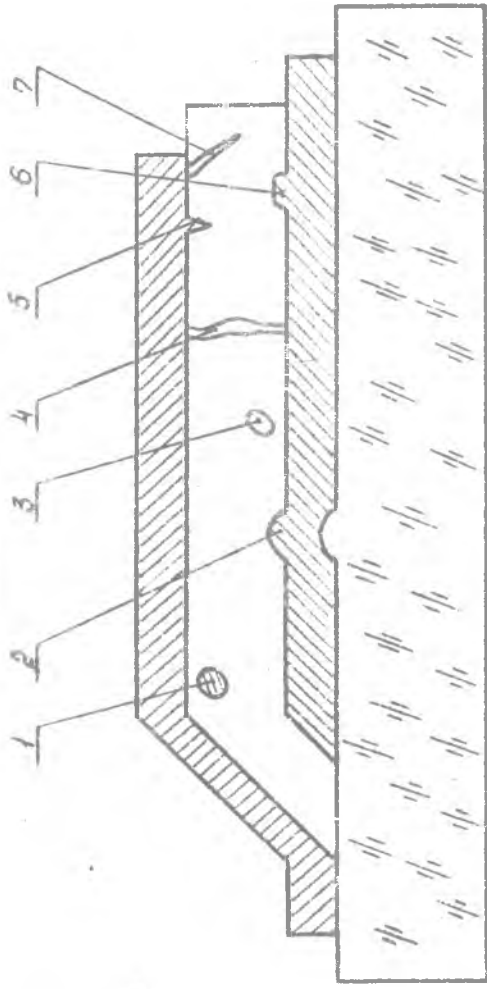
1. Т е о р е т и ч е с к и е о с н о в ы

1.1. Дефекты тонкопленочных конденсаторов

Тонкопленочные конденсаторы, полученные вакуумтермическим и другими методами, имеют пониженную электрическую прочность и стабильность свойств во времени из-за наличия дефектов как в объеме диэлектрической пленки, так и на границе раздела металл-диэлектрик (рис.1).

При толщине диэлектрического слоя $0,01...1$ мкм размеры внутренних неоднородностей этого слоя и неровностей на поверхности обкладок сравнимы с указанной толщиной и оказывают существенное влияние на электрическую прочность ТПК.

Неровности на нижнем электроде связаны с процессом роста металлической пленки. Рост пленки начинается с образования центров конденсации, которые затем превращаются в отдельные островки, сливающиеся при определенной толщине в сплошную пленку. Такой механизм роста пленки приводит к тому, что осадившиеся пленки никогда не обладают идеально ровными поверхностями. Экспериментальные исследования показали, что с ростом толщины пленки линейно увеличивается и площадь ее поверхности. Это обусловлено тем, что основные



Р и с. 1. Типы дефектов ТК: 1 - металлическое включение; 2, 6 - микровыступы в нижней обкладке; 3 - газовое включение; 4 - сквозная пора; 5 - микровыступ в верхней обкладке; 7 - трещина в диэлектрике.

структурные элементы пленок растут по определенным кристаллографическим направлениям. Поэтому пленка имеет пористую структуру с развинутой внутренней поверхностью. Различная скорость роста граней с разной кристаллографической ориентацией приводит к образованию выступов и ступеней на поверхности пленки. Шероховатость поверхности пленки существенно возрастает с увеличением угла между нормалью к поверхности подложки и направлением движения испаренных частиц.

Кроме неровностей, обусловленных процессом роста металлической пленки обкладки, на ее поверхности наблюдаются образования сферической формы, связанные с тем, что из испарителя вылетают не только атомы, но и капли расплавленного металла. На пленках алюминия образуются выступы различных размеров в виде конусов с закругленной вершиной - микроострия (микровыступы), высота которых достигает несколько десятков нанометров.

При осаждении диэлектрика на поверхность металлической пленки микроострия "входят" внутрь диэлектрической пленки и обуславливают искажения электрического поля в ней.

Диэлектрическая пленка также имеет дефекты. Наиболее характерные из них - поры. Пористость зависит от материала пленки, ее толщины, технологии получения. В диэлектрической пленке, так же как и в металлической, содержатся замкнутые поры, образующиеся за счет "замуровывания" молекул остаточных газов. Имеются также микротрещины, плотность которых может достигать 10^3 мм^{-2} . Появление этих микротрещин связано, видимо, с механическими напряжениями в пленках. Наблюдаются также дефекты в виде углублений цилиндрической формы. Появление этих дефектов связано с бомбардировкой растущей пленки крупными частицами, вылетающими из испарителя.

При осаждении верхнего электрода все углубления, имеющиеся в диэлектрике, будут заполняться металлом, создавая микроострия, свисающие вглубь диэлектрической пленки со стороны верхнего электрода.

В процессе осаждения верхней обкладки возможно появление дополнительных дефектов в диэлектрике. Например, при увеличении скорости осаждения верхнего электрода из алюминия в испаренном потоке возрастает количество капель алюминия. Капля алюминия, находясь некоторое время в расплавленном состоянии, вызывает локальный разогрев диэлектрика и соответственно механические напряжения, которые могут привести к появлению дополнительных трещин. В эти микро-

трещины может продифундировать металл из капли, за счет чего могут образоваться новые микроострия.

Вследствии высокой температуры возможно также химическое взаимодействие между металлом капли и материалом диэлектрической пленки.

Все дефекты, которые встречаются в ТПК делятся на два вида: макродефекты и микродефекты. К макродефектам относятся царапины и раковины на подложке, сквозные отверстия и раковины в диэлектрической пленке и др. К микродефектам относятся микроострия на поверхности электродов, каналы повышенной проводимости в диэлектрической пленке, обусловленные микронеоднородностью состава или структуры, и другие дефекты, которых нельзя избежать при получении тонких пленок.

Количество макродефектов ограничено. Так, например, количество пор может колебаться в пределах $10 - 10^2 \text{ мм}^{-2}$.

Количество микродефектов гораздо больше. Например, количество микроострий на поверхности алюминиевого электрода в зависимости от режимов получения может составлять $10^4 - 10^6 \text{ мм}^{-2}$.

1.2. Виды пробоев ТПК

Существует два вида пробоев ТПК на основе неорганических диэлектриков, сопровождающихся или разрушением диэлектрика и верхнего электрода по большому участку площади конденсатора (распространяющийся пробой), или локальным разрушением диэлектрика и верхнего электрода (частичный пробой).

Первый вид пробоев наблюдается при подаче на конденсатор напряжения от источников с малым внутренним сопротивлением. При этом происходит существенное изменение емкости конденсатора за счет выгорания электрода на большой площади или короткое замыкание обкладок.

В случае, когда внутреннее сопротивление источника намного больше канала пробоя, вслед за возникновением пробоя происходит падение напряжения на конденсаторе, выгорание электрода над каналом пробоя и локальное разрушение диэлектрика - пробой второго вида. Таким образом, в ТПК существует эффект "самозалечивания", т.е. восстановление электрической прочности после пробоя. Это обусловлено тем, что выгорание электрода вокруг места пробоя приводит к изо-

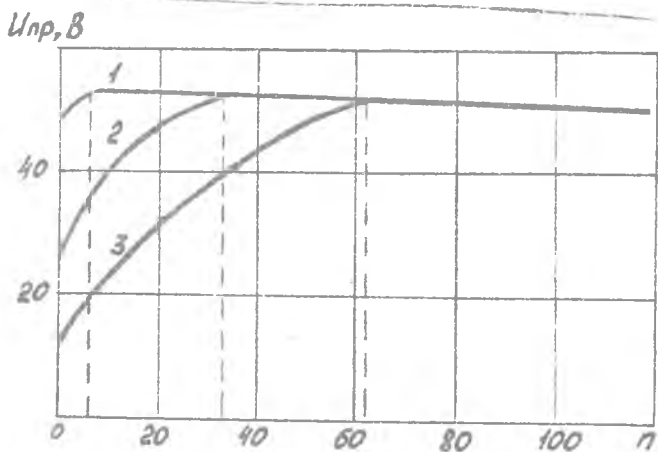
лящи его от остальной части тонкопленочной структуры. Использование этого эффекта позволяет производить многократный пробой диэлектрической пленки на одном образце.

С увеличением номера частичного пробоя возрастает величина пробивной напряженности поля. Это связано с последовательным разрушением дефектов с пониженной электрической прочностью.

Энергия, затрачиваемая на электрическую изоляцию места пробоя, зависит от материала диэлектрика и составляет $10^{-5} - 10^{-6}$ Дж.

Если число грубых дефектов в ТПК сравнимо с числом пробоев, которые можно произвести на одном образце, то зависимость $E_{пр} = f(n)$, где n - порядковый номер пробоя, должна давать информацию о числе таких дефектов и о степени их влияния на величину $E_{пр}$. Сопоставление зависимости $E_{пр} = f(n)$ с визуальными наблюдениями и другими измерениями может дать представление о том, какими дефектами обусловлено данное значение $E_{пр}$.

На рис. 2 представлены зависимости $U_{пр} = f(n)$ для системы $Al - Al_2O_3 - Al$ при различных площадях конденсаторов.



Р и с. 2. Зависимость $U_{пр}$ ТПК на основе $Al - Al_2O_3 - Al$ от числа пробоев n с различными значениями площадей перекрытия обкладок S : 1 - $S = 1 \text{ мм}^2$; 2 - $S = 5 \text{ мм}^2$; 3 - $S = 10 \text{ мм}^2$

Зависимости характеризуются двумя участками: возрастающим и участком, где $U_{пр}$ практически не зависит от n .

Можно считать, что возрастающий участок зависимости $U_{пр} = f(n)$ связан с пробоями по наиболее грубым дефектам, т.е. макродефектам. Подтверждением этому являются данные, представленные на рис.2, из которых видно, что длительность первого участка (число пробоев) возрастает с увеличением площади ТПК.

2. Электрическая тренировка ТПК

Процесс электрической тренировки заключается в пропускании импульса тока через ТПК для исключения короткого замыкания или удаления дефекта и в последующем многократном воздействии на образец испытательным напряжением.

Выбор электрического режима тренировки (амплитуда, длительность импульса и т.д.) определяется величиной сопротивления короткого замыкания и электрической прочностью ТПК.

Введение специальной операции - электротренировки ТПК путем пробоя структур металл-диэлектрик-металл в местах расположения дефектов - позволяет повысить электрическую прочность и соответственно расширить диапазон удельных емкостей.

Влияние различных дефектов на величину пробивной напряженности поля, определенной по первому частичному пробое $U_{пр1}$, для ТПК на основе монооксида германия, боросиликатного стекла (БСС), алюмосиликатного стекла (АСС), а также значение электрической прочности после электротренировки, показано в таблице.

Таблица

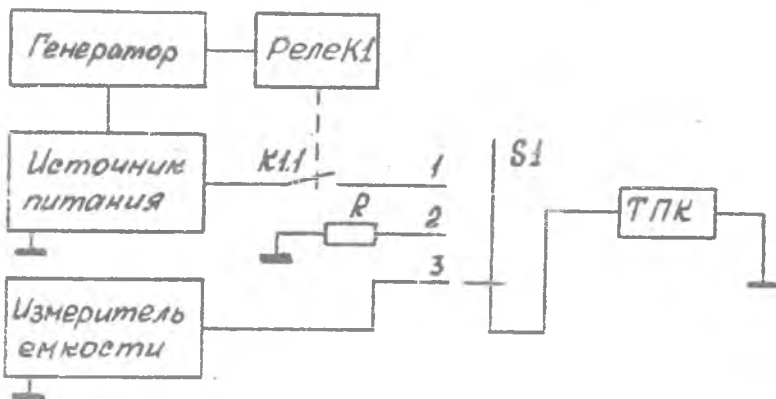
Тип дефекта	$E_{пр} \cdot 10^{-8}, В/м$	$E_{пр} \cdot 10^{-8}, В/м$	$E_{пр} \cdot 10^{-8}, В/м$
	$C_0 = 50 мкФ/м^2$	$C_0 = 100 мкФ/м^2$	$C_0 = 200 мкФ/м^2$
	AL-GeD-AL	AL-БСС-AL	AL-АСС-AL
1	2	3	4
Механические повреждения	0,3	0,5	0,8
Сквозные отверстия в диэлектрике	0,2	0,5	0,9
Раковины в диэлектрике	0,3	0,7	0,9
Загрязнения	0,4	0,7	1,0

1	2	3	4
Капли металла на верхней обкладке	0,5	1,0	1,0
Вспучивание обкладок	0,6	-	-
Царапины на подложке	0,7	1-2	1-2
без макродефектов	0,7	1-2	1-2
Тренированные ТПК	1-2	3-4	2-3

3. Описание лабораторной установки

1. устройство для тренировки;
2. измерительный зонд;
3. вольтметр;
4. измеритель емкости и $\operatorname{tg} \delta$;
5. набор исследуемых тонкопленочных конденсаторов.

Структурная схема установки приведена на рис.3.



Р и с. 3. Структурная схема установки для электрической тренировки ТПК

Устройство для тренировки содержит источник питания, генератор прямоугольных импульсов и реле. В качестве генератора прямо-

моугольных импульсов использован мультивибратор. Частота следования импульсов мультивибратора может изменяться от 1 до 100 Гц, длительность от 0,001 до 0,6 с. На выходе мультивибратора установлено реле, управляющее подачей напряжения на ТПК. Амплитуда импульсов изменяется от 10 до 90 В дискретно с шагом 10 В.

Передняя панель устройства для тренировки изображена на рис. 4.

Устройство имеет переключатель РОД РАБОТЫ на три положения: ТРЕНИРОВКА, РАЗРЯД, ИЗМЕРЕНИЕ.

На передней панели расположены гнезда для подключения зонда с тонкопленочным конденсатором и измерителя емкости, переключатель АМПЛИТУДА, РОД РАБОТЫ, ЧАСТОТА ГРУБО, ручки изменения частоты ПЛАВНО и длительности ДЛИТЕЛЬНОСТЬ, сетевой выключатель типа ТУМБЛЕР, индикаторная сигнальная лампочка.

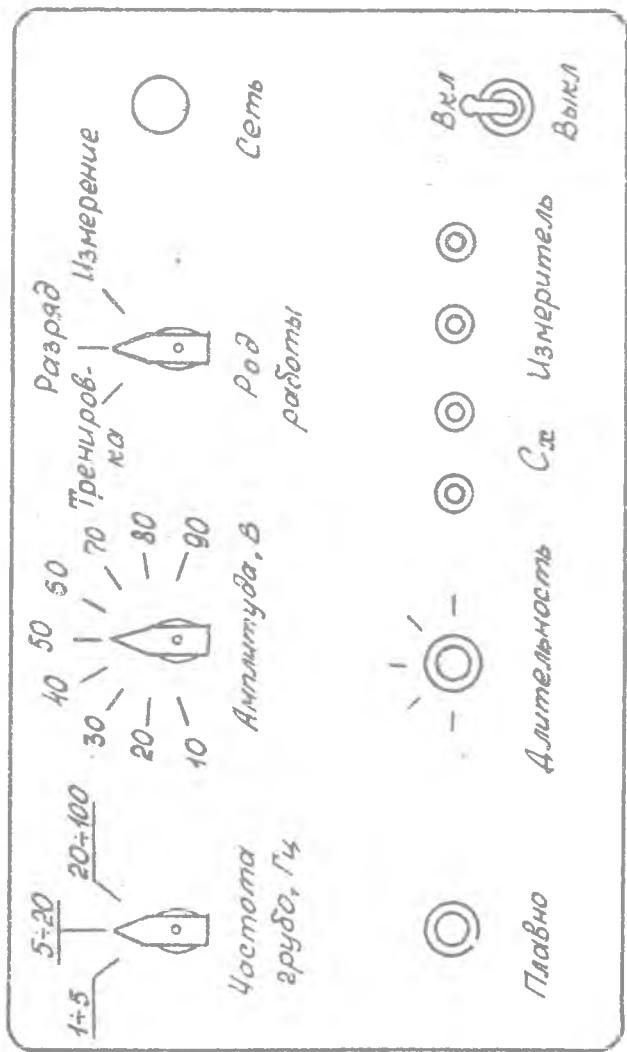
В качестве измерителя емкости использован мост Е7-4.

4. К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы д л я п р о в е р к и п о д г о т о в л е н н о с т и к в ы п о л н е н и ю р а б о т ы

1. Почему ТПК после изготовления имеют пониженную электрическую прочность?
2. Назовите возможные дефекты диэлектрической пленки.
3. Назовите типы дефектов обкладок.
4. Каковы причины возникновения дефектов?
5. Какие дефекты относятся к макродефектам? Какие к микродефектам?
6. В чем состоит сущность эффекта "самозалечивания"?
7. Характеристика различных видов пробоев ТПК.
8. Чему равна энергия, необходимая для удаления дефекта?

5. П о р я д о к в ы п о л н е н и я р а б о т ы

1. Получить у преподавателя образцы ТПК и уточнить режим тренировки (частота следования импульсов, начальное и конечное значение напряжения тренировки, длительность импульса, скорость нарастания амплитуды, время тренировки, время разряда).
2. Ознакомиться с лабораторной установкой.



Р и с. 4. Передняя панель устройства для электрической тренировки ТЭС

3. Выключить лабораторный макет в сеть. Сетевой выключатель на передней панели макета перевести в положение ВКЛ.

4. Подключить тонкопленочный конденсатор с помощью зонда к гнездам C_x на передней панели макета.

5. Переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение ИЗМЕРЕНИЕ.

6. К гнездам ИЗМЕРИТЕЛЬ подключить мост измерения емкости и $tg\delta$.

7. Произвести измерение емкости и $tg\delta$ всех конденсаторов.

8. С помощью переключателей ЧАСТОТА, АМПЛИТУДА и ручек ДИАПАЗОН и ДЛИТЕЛЬНОСТЬ установить заданный режим тренировки.

9. Переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение ТРЕНИРОВКА.

10. Определить напряжение пробоя для всех ТПК.

11. Произвести тренировку тонкопленочных конденсаторов. Для каждого значения напряжения тренировки подсчитать число кратеров (пробоев) и замерить их диаметр под микроскопом МЕС-9, а также определить значение емкости и величину $tg\delta$.

12. Переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение РАЗРЯД. Разрядить конденсаторы в течение заданного времени.

13. переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение ИЗМЕРЕНИЕ. Измерить значения емкости и $tg\delta$ конденсаторов.

14. Выключить лабораторный макет и измеритель емкости.

15. Произвести визуальный осмотр ТПК под микроскопом МЕС-9. Подсчитать число кратеров (пробоев) и измерить их диаметр для всех ТПК.

6. Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Структурная схема лабораторной установки.
3. Описание режима тренировки.
4. Таблица значений емкости и $tg\delta$ до и после тренировки.
5. Рисунок верхней обкладки до тренировки и после тренировки.
6. Вывод о виде пробоя.
7. Зависимости $E_{пр} = f(\omega)$, $C = f(\omega)$, $tg\delta = f(\omega)$.

8. Зависимости $E_{пр} = f(r)$, $U_{пр} = f(S)$

9. Вывод о влиянии тренировки на свойства ТПК.

7. Контрольные вопросы
для отчета по работе

1. Нарисуйте и объясните зависимость $E_{пр} = f(r)$ для ТПК с различными значениями площади перекрытия обкладок.

2. В чем заключается сущность электрической тренировки?

3. Нарисуйте структурную схему установки для электрической тренировки.

4. Каковы параметры устройства для тренировки?

5. Как влияет тренировка на тангенс угла диэлектрических потерь ТПК?

6. Как определить вид пробоя ТПК?

7. Изложите порядок выполнения работ.

Л и т е р а т у р а

1. В о р о б ь е в Г.А., М у х а ч е в В.А. Пробой диэлектрических пленок. М.: Сов.радио, 1977. - 72 с.

2. Электронная техника. Серия 3, Микроэлектроника, 1972, вып.2, с. 16-20; вып. 3, с.123-126.

3. К о р з о В.Ф., Ч е р н я е в В.Н. Диэлектрические пленки в микроэлектронике. М.: Энергия, 1977. - 368 с.

С о д е р ж а н и е

1. Теоретические основы	3
1.1. Дефекты тонкопленочных конденсаторов	3
1.2. Виды пробояв ТПК	6
2. Электрическая тренировка ТПК	8
3. Описание лабораторной установки	9
4. Контрольные вопросы для проверки подготовленности к выполнению работы	10
5. Порядок выполнения работы	10
6. Содержание отчета	12
7. Контрольные вопросы для отчета по работе	13
Литература	13

Составитель Михаил Николаевич Цыганов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРЕНИРОВКИ
НА ПАРАМЕТРЫ ТОНКОПЛЕЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Методические указания к лабораторной работе 35

Редактор Л. С о к о л о в а

Техн. редактор Н. М. К а л е н ь к

Корректор С. П. Ч е р н о в

Подписано в печать 21.09.82 г. Формат 60x84 1/16

Бумага оберточная белая. Печать оперативная.

Усл. п. л. 0,93. Учет.-изд. л. 0,86. Тираж 300 экз.

Заказ № 284..... Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С. П. Королева, г. Куйбышев, ул. Моло-
догвардейская, 151.

Офсетный участок КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.