Министерство общего и профессионального образования
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Северо-Западный заочный политехнический институт

С.Д. Ханин,
А.И. Адер, В.Н. Воронцов, О.В. Денисова, В.Ю. Холкин

ПАССИВНЫЕ РАДИОКОМПОНЕНТЫ

ЧАСТЬ I. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Санкт-Петербург
1998

С.Д. Ханин, А.И. Адер, В.Н. Воронцов, О.В. Денисова, В.Ю. Холкин

УДК 621.37:621.319.4.

Пассивные радиокомпоненты. Часть 1. Электрические конденсаторы: Учеб. пособие. - СПб., СЗПИ, 1998.- 86.

Представлены общие сведения о конденсаторных диэлектрических материалах и приборных структурах. Рассмотрены основные характеристики и требования, предъявляемые к конденсаторным диэлектрикам, физические принципы действия, конструкция и основы технологии изготовления основных классов конденсаторов постоянной емкости - конденсаторов с неорганическим диэлектриком, с органическим диэлектриком, конденсаторов с оксидным диэлектриком, ионисторов. Специально обсуждаются вопросы надежности и управления качеством пассивных радиокомпонентов.

Рекомендовано в качестве учебного пособия по курсу «Радиоматериалы и радиокомпоненты» для студентов специальности 200700-радиотехника, по курсам «Физические основы микроэлектроники» и «Электрорадиоэлементы» для студентов специальности 200800-проектирование и технология радиоэлектронных средств и направления 552500 - радиотехника.

Рассмотрено на заседании кафедры конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры 5 ноября 1997 г., одобрено методической комиссией факультета радиоэлектроники 4 декабря 1997 г.

Научный редактор: Карапетян Г.О., д-р хим. наук, проф.

Рецензенты : кафедра КиПРЭА СЗПИ (зав.каф. В.Н.Воронцов, к-т техн. наук, доцент),
Карапетян Г.О., д-р хим. наук, проф.

© С.Д. Ханин, А.И. Адер, В.Н. Воронцов, О.В. Денисова, В.Ю. Холкин., 1998 г.

Введение

Эксплуатационные характеристики радиоэлектронной аппаратуры определяются свойствами составляющих ее деталей. Детали аппаратуры, выполняющие определенные функции по отношению к электрической энергии, называют компонентами (или элементами) радиоэлектронной аппаратуры.

Различают активные и пассивные компоненты. К активным относят компоненты, способные усиливать, генерировать или преобразовывать входной электрический сигнал, в том числе электронные лампы, транзисторы, интегральные микросхемы и другие полупроводниковые приборы.

Пассивные компоненты (или, как их часто называют, радиодетали) предназначены для перераспределения электрической энергии. К ним относят конденсаторы, резисторы, индуктивные и коммутационные элементы.

Важно отметить, что несмотря на развитие микроэлектроники дискретные пассивные компоненты не утеряли своего значения. Это обусловлено следующими причинами:

1. Интегральная электроника по ряду позиций до настоящего времени не в состоянии достигнуть свойств дискретных пассивных компонентов. Это относится, например, к емкости конденсаторов, которая у интегральных емкостных элементов не превышает 0,1 мкФ. Конденсаторы больших емкостей являются дискретными (навесными элементами). Аналогичная ситуация имеет место и в отношении резисторов высокого сопротивления. Принципиальные трудности испытывает микроэлектроника в создании индуктивных элементов. В резуль-

тате на одну интегральную схему приходится, как правило, от 2 до 5 дискретных элементов. Если учесть, что применение интегральных схем привело к общему увеличению производства радиоэлектронной аппаратуры, становится ясной причина неуклонного роста объема производства дискретных пассивных компонентов.

2. Дискретные пассивные компоненты часто обладают большей точностью, лучшей температурной и временной стабильностью параметров, чем элементы интегральных схем.

3. Выпускаемая мировой промышленностью обширная номенклатура номиналов дискретных пассивных компонентов в целом достаточна и доступна для потребителя.

4. В последнее время значительно уменьшились габариты дискретных компонентов, что достигнуто благодаря связанному с развитием микроэлектроники изменению номенклатуры изделий в пользу компонентов, рассчитанных на низкие напряжения и мощности, использованию новых технологических приемов (в первую очередь, групповой технологии), а также применению новых материалов.

Выпускаемые промышленностью бескорпусные и безвыводные дискретные компоненты обладают как готовые изделия коэффициентом заполнения объема, близким к единице.

5. Стоимость дискретных пассивных компонентов была и остается ниже стоимости элементов интегральной электроники.

Все это приводит к тому, что интерес к пассивным дискретным компонентам, несмотря на высказываемые в отношении них на заре развития микроэлектроники мрачные прогнозы, не только не уменьшается, но и возрастает.

Вместе с тем, в отличие от активных компонентов, которым посвящена обширная литература, книг по пассивным компонентам издано крайне мало. Практически отсутствует учебная литература, отражающая современное состояние радиодеталестроения.

Данное пособие призвано восполнить в определенной степени этот пробел. Оно посвящено конденсаторам и резисторам, являющимся самыми распространенными элементами электронной аппаратуры (на долю конденсаторов приходится ≈ 25%, а доля резисторов составляет от 15 до 50% компонентов аппаратуры) и соответственно самыми массовыми изделиями электронной промышленности.

Содержание пособия отражает современные тенденции развития радиодеталестроения, к числу которых следует отнести:

* поиск новых материалов и технологических приемов, обеспечивающих возможность создания конденсаторов и резисторов с высокими удельными характеристиками и стабильностью свойств;
* создание технологии контроля качества, обеспечивающей повышение надежности конденсаторов и резисторов;
* переход на чип-компоненты для монтажа на поверхность.

Имея в виду учебные цели, авторы ставили себе задачу изложить главным образом основные подходы, идеи и методы радиодеталестроения, владея которыми можно самостоятельно изучать современную научно-техническую литературу.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНДЕНСАТОРНЫМ ДИЭЛЕКТРИКАМ

Конденсатор - это устройство, предназначенное для получения необходимых величин электрической емкости и способное накапливать и отдавать (перераспределять) электрические заряды.

Конденсатор состоит из двух (в ряде конструкций - более) проводящих тел (обкладок), разделенных диэлектриком. Как правило, расстояние между обкладками, равное толщине диэлектрика, мало по сравнению с линейными размерами обкладок. Поэтому электрическое поле, возникающее при подключении обкладок к источнику внешнего напряжения U, практически полностью сосредоточено между обкладками.

Как следует из определения, важнейшей характеристикой конденсатора является его **емкость** C , численно равная заряду q одной из обкладок при разности потенциалов между ними U, равной единице:

$$C = \frac{q}{U}, \qquad (1.1)$$

и измеряемая в СИ в фарадах. На практике используются более мелкие единицы емкости: микрофарада (мкФ), нанофарада (нФ) и пикофарада (пФ): 1 Ф = 10^6 мкФ = 10^9 нФ = 10^{12} пФ.

Емкость конденсатора зависит от диэлектрической проницаемости рабочего диэлектрика ε, конструкции конденсатора и его геометрических размеров. Емкость плоского конденсатора, представляющего собой две проводящие плоские параллельные пластины, разделенные диэлектриком, равна:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \qquad (1.2)$$

где S - площадь обкладки, d - толщина диэлектрика, ε - диэлектрическая проницаемость рабочего диэлектрика, ε_o - электрическая постоянная, равная $8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Емкость, значение которой указано на конденсаторе, называют **номинальной емкостью**. Номинальные значения емкостей стандартизированы и выбираются из определенных рядов чисел. В отечественной практике наиболее часто используются ряды Е3, Е6, Е12 и Е24.

Фактические значения емкостей конденсаторов могут отличаться от номинальных в пределах допустимых отклонений, которые приводятся в нормативно-технической документации в процентах.

Наряду с номинальной емкостью, на конденсаторе указывается значение напряжения, при котором он может работать в заданных условиях в течение срока службы с сохранением параметров в допустимых пределах. Это значение напряжения называется **номинальным напряжением**.

Величина номинального напряжения зависит от физических свойств материалов, используемых в конструкции конденсатора, и самой конструкции. Оно устанавливается с необходимым запасом по отношению к пробивному напряжению диэлектрика, исключающим деградацию его свойств в течение гарантированного срока службы.

К числу других основных характеристик конденсатора, приводимых в нормативно-технической документации, относятся следующие.

Тангенс угла потерь tgδ, характеризующий рассеяние электрической энергии в конденсаторе, связанное с переходом этой энергии в тепловую (нагревом конденсатора) и рассеянием в окружающей среде. Напомним, что δ - угол потерь, дополняющий до 90^o угол сдвига между током и напряжением в цепи конденсатора и отличный от нуля в силу наличия у реального диэлектрика конечного, а у обкладок - отличного от нуля сопротивления постоянному току и запаздывания поляризации диэлектрика по отношению к изменению внешнего поля. Значение tgδ при заданных внешних условиях зависит от свойств диэлектрика (на не слишком высоких частотах) и материала обкладок. Определяющими величину tgδ процессами в диэлектрике являются его электропроводность и релаксационная поляризация.

Сопротивление изоляции конденсатора $R_{из}$ - сопротивление конденсатора постоянному току определенного напряжения. Данный параметр измеряется при напряжениях 10, 100 и 500 В соответственно для конденсаторов с номинальным напряжением до 100 В, 100 - 500 В и свыше 500 В. Величина сопротивления изоляции конденсатора определяется, главным образом, электроизоляционными свойствами рабочего диэлектрика (его удельным сопротивлением).

Для ряда конденсаторов сопротивление постоянному току характеризуют другим, сопряженным с $R_{из}$ параметром, - **током утечки $I_{ут}$**, т.е. током, проходящим через конденсатор при постоянном напряжении на его обкладках. Измерение тока утечки проводят через 1 - 5 минут после подачи на конденсатор номинального напряжения. Как и сопротивление изоляции, этот параметр определяется, главным образом, изоляционными свойствами рабочего диэлектрика в приборной структуре. Отметим, что в силу характерного для конденсаторов явле-

ния падения тока со временем измеренные указанным образом $I_{ут}$ и $R_{из}=U/I_{ут}$ могут на 2 - 3 порядка отличаться от установившихся значений ($I_{ут}$ в большую, а $R_{из}$ - в меньшую сторону). В этой связи часто различают "измеренные" и "истинные" значения $I_{ут}$ и $R_{из}$. Последние определяются в результате долговременной выдержки конденсатора под напряжением или при использовании специальных измерительных методик, позволяющих сократить длительность спада тока со временем.

Коэффициент абсорбции. Диэлектрической абсорбцией называют явление восстановления напряжения на обкладках после кратковременной разрядки конденсатора и обусловленное рядом физических процессов - накоплением и релаксацией заряда, релаксационной поляризацией в диэлектрике. Коэффициент абсорбции $К_а$ определяется как отношение остаточного напряжения к напряжению зарядки при оговоренных условиях измерения: времени зарядки, времени, в течение которого конденсатор был закорочен, и времени, прошедшего после этого. Величина $К_а$ зависит от свойств диэлектрика и конструктивных особенностей конденсатора и должна учитываться в связи с функционированием конденсаторов в качестве накопителей энергии в импульсных режимах, а также электробезопасностью в случае применения высоковольтных конденсаторов, отключенных от источников питания.

Следующие 2 параметра определяют рабочий диапазон частот конденсаторов.

Полное сопротивление конденсатора (импеданс) Z - сопротивление конденсатора переменному синусоидальному току определенной частоты, обусловленное наличием у реального конденсатора на-

ряду с емкостным также активного и индуктивного сопротивлений. Последние зависят от свойств используемых материалов и конструктивного исполнения конденсатора. Представляя реальный конденсатор в виде последовательно соединенных собственной емкости C, индуктивности L и активного сопротивления R (рис.1) и учитывая сдвиг фаз между током и напряжением на емкости (ток опережает по фазе напряжение на $\pi/2$) и индуктивности (ток отстает по фазе от напряжения на $\pi/2$), полное сопротивление конденсатора на частоте f определяется как

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C} - 2\pi f L\right)^2} \,. \qquad (1.3)$$

Активное сопротивление R (этот параметр часто нормируют, называя его **эквивалентным последовательным сопротивлением** конденсатора) зависит от удельного сопротивления диэлектрика, материала обкладок и выводов, формы и размеров конденсатора, частоты и температуры. Индуктивность L зависит в основном от формы и размеров конденсатора.

Резонансная частота конденсатора $f_{рез}$ - частота, при которой полное сопротивление конденсатора минимально и является чисто активным. Как видно из формулы для полного сопротивления Z, резонансная частота конденсатора

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\,C}} \,. \qquad (1.4)$$

На частотах ниже $f_{рез}$ конденсатор ведет себя как емкостный элемент (с повышением f величина Z уменьшается), а на частотах выше $f_{рез}$ - как индуктивность (с повышением f величина Z возрастает). Как

правило, конденсаторы используются в области частот ниже резонансной, где их индуктивность можно не учитывать.

Реактивная мощность конденсатора P_p, используемая для характеристики высокочастотных высоковольтных конденсаторов. Полагая, что угол сдвига фаз между током и напряжением близок к 90^o, т.е. полное сопротивление конденсатора имеет емкостный характер, величина реактивной мощности :

$$P_p = 2\pi f C U^2 . \qquad (1.5)$$

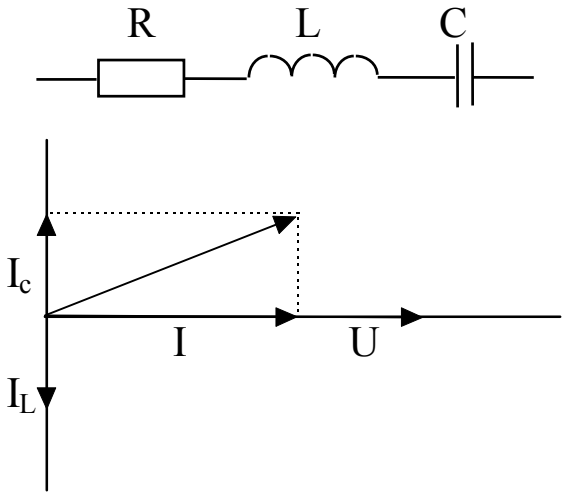


Рис. 1. Последовательная схема замещения конденсатора

Величина P_p служит для определения допустимых электрических режимов эксплуатации высокочастотных высоковольтных конденсаторов. Так, амплитуда переменного напряжения не должна превышать значения напряжения, рассчитанного исходя из допустимой реактивной мощности:

$$U = \sqrt{\frac{P_p}{2\pi f C}} . \qquad (1.6)$$

Энергия W, **запасаемая конденсатором** при приложении постоянного напряжения:

$$W = \frac{CU^2}{2}. \qquad (1.7)$$

Этот параметр используется для характеристики энергонакопительных конденсаторов.

Вопрос о применении конденсатора решается исходя из его электрических параметров и массогабаритных показателей. В этой связи для сравнения конденсаторов используют удельные характеристики, представляющие собой отношение основных параметров конденсатора к его объему V (или массе m).

Основными удельными параметрами низкочастотных конденсаторов являются **удельная емкость**

$$C_{уд} = \frac{C}{V} \qquad (1.8)$$

и **удельный заряд**

$$q_{уд} = \frac{CU}{V}, \qquad (1.9)$$

а высокочастотных высоковольтных конденсаторов - **удельная реактивная мощность**

$$P_{уд} = \frac{2\pi f C U^2}{V}. \qquad (1.10)$$

Для характеристики энергоемких накопительных конденсаторов используется **удельная энергия**:

$$W_{уд} = \frac{CU^2}{2V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}, \qquad (1.11)$$

где E - напряженность электрического поля в диэлектрике.

Требования к конденсаторным диэлектрическим материалам вытекают из условий их эксплуатации. Приведем несколько характерных примеров использования конденсаторов в электрических схемах.

На рис.2 показана так называемая емкостная связь между двумя цепями А и В. Назначение конденсатора здесь состоит в том, чтобы препятствовать прохождению постоянного тока (идеальный конденсатор с $R_{из} = \infty$ представляет собой разрыв цепи постоянного тока) и в то же время обеспечить беспрепятственное прохождение переменной составляющей сигнала, т.е. конденсатор осуществляет в этом случае защитную (демпферную) функцию.

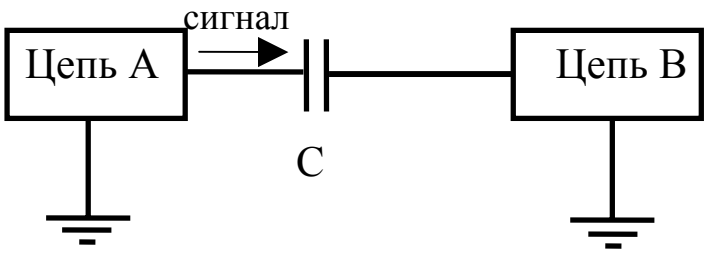


Рис. 2. Включение конденсатора, предназначенного для защиты от постоянного тока

При включении конденсатора, показанного на рис.3, он служит фильтром переменной составляющей напряжения и, кроме того, позволяет сгладить изменения постоянного напряжения: любое резкое изменение напряжения не проходит из цепи А в цепь В. Учитывая, что реактивное емкостное сопротивление $X_c=1/(2\pi fC)$, для выполнения указанных функций конденсатор должен обладать большой емкостью и / или способностью работать на высоких частотах. Кроме того, очевидно, что конденсатор должен "выдерживать" приложенное к нему напряжение, т.е. обладать достаточно высоким номинальным напряжением.

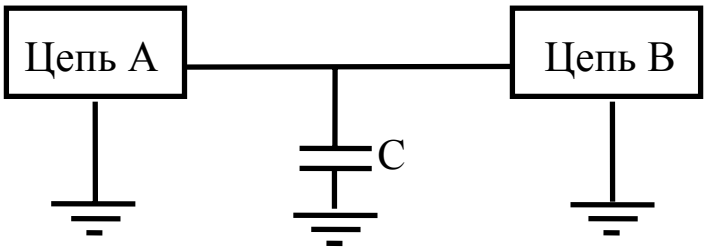


Рис. 3. Включение конденсатора, предназначенного для фильтрации переменной составляющей напряжения

На рис.4 представлена схема включения энергонакопительного конденсатора. Разомкнутое положение переключателя *K* соответствует режиму зарядки конденсатора, а замкнутое - режиму разрядки конденсатора на нагрузку. В случае индуктивной нагрузки и соответственно образования колебательного контура в разрядной цепи будет протекать периодически (рис.5) либо апериодически меняющийся со временем ток в зависимости от соотношения C, L и R (условием периодического изменения тока со временем является $R^2/(4L^2)<1/(LC)$.
Ясно, что для такого применения конденсаторов важнейшим параметром является удельная энергия конденсатора $W_{уд}$ и соответственно высокие диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность рабочего материала.

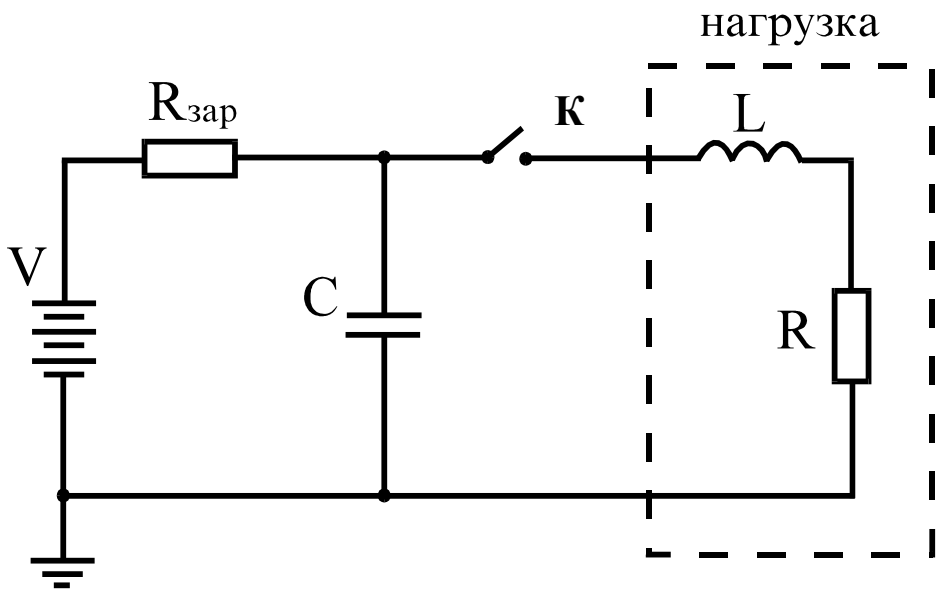


Рис. 4. Схема включения энергонакопительного конденсатора

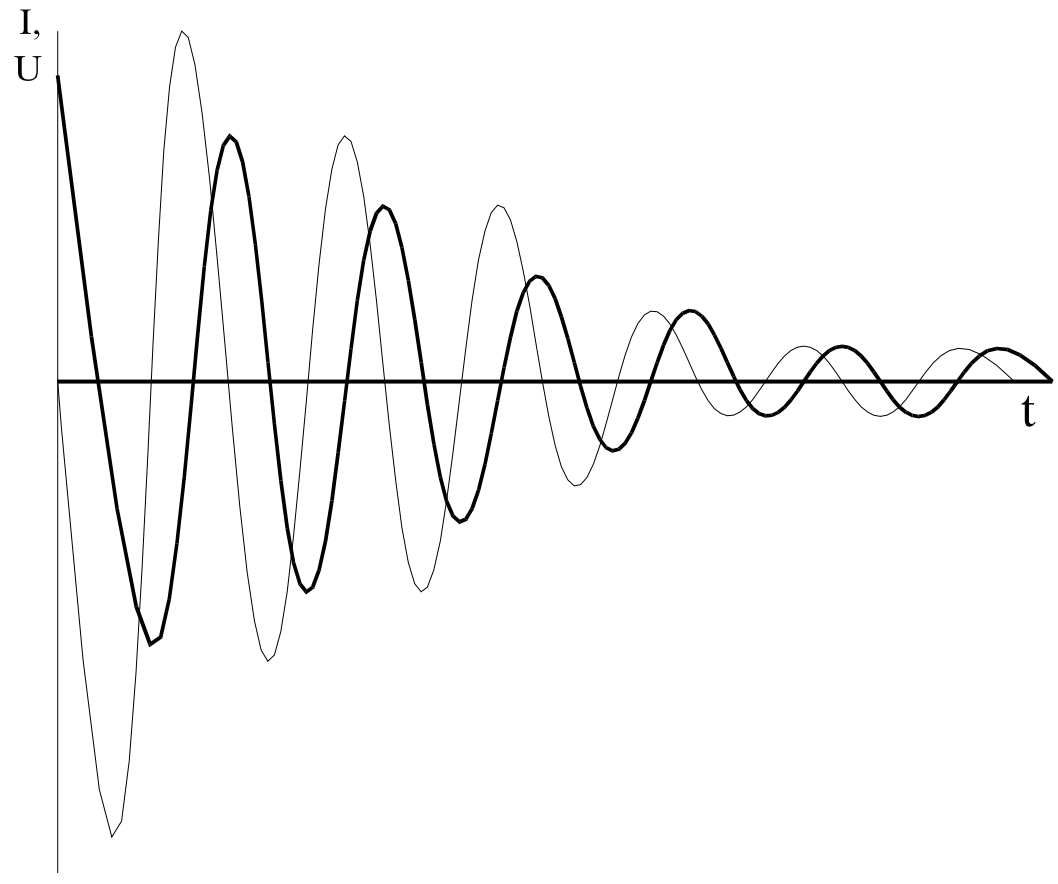


Рис. 5. Зависимости напряжения (▬▬) на конденсаторе и тока(———), протекающего через конденсатор, в процессе разряда в случае индуктивно-активной нагрузки

Кроме того, при конструировании энергонакопительных конденсаторов необходимо предусмотреть возможность импульсного прохождения через конденсатор большого тока (как говорят, высокого токоотбора).

На все это накладывается стремление к миниатюризации элементной базы радиоэлектронной аппаратуры, что применительно к конденсаторам означает необходимость в первую очередь достижения заданной не только номинальной, но и удельной емкости (заряда).

Для конденсаторов, предназначенных для использования в резонансных колебательных контурах устройств радиосвязи, принципиальное значение имеет малость тангенса угла потерь (высокая добротность контура) и высокая стабильность емкости в рабочем диапазоне температур и частот.

Исходя из сказанного можно сформулировать требования к используемым в конденсаторостроении диэлектрическим материалам. Основными из них являются следующие:

1. Большая величина диэлектрической проницаемости ε;

2. Малая величина тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$;

3. Высокое сопротивление изоляции (малая величина тока утечки);

4. Высокая электрическая прочность - кратковременная, определяемая $E_{пр} = U_{пр}/d$ ($U_{пр}$ - напряжение пробоя) и долговременная, определяемая с учетом снижения $E_{пр}$ диэлектрика вследствие деградационных процессов в течение гарантированного срока службы.

5. Высокая стабильность свойств диэлектриков в рабочем диапазоне температур и частот конденсатора.

6. Высокая временная стабильность функциональных свойств диэлектрика.

7. Возможность получения диэлектрического материала в тонких слоях на больших площадях поверхности обкладок.

В качестве рабочего диэлектрика в конденсаторах используются органические и неорганические материалы.

В зависимости от материала рабочего диэлектрика все конденсаторы постоянной емкости делятся на три класса:

- конденсаторы с неорганическим диэлектриком;
- конденсаторы с оксидным диэлектриком (последний также является неорганическим, но конденсаторы на его основе обладают специфическими свойствами, что заставляет выделять их в отдельную группу);
- конденсаторы с органическим диэлектриком.

Рассмотрим каждый из этих классов конденсаторов в отдельности.

2. КОНДЕНСАТОРЫ С НЕОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

В качестве рабочего диэлектрика конденсаторов этого типа используется керамика (керамические конденсаторы, рассчитанные на номинальное напряжение ниже 1600 В обозначаются К10, а на более высокое напряжение - К15), стекло (конденсаторы К22) и слюда (конденсаторы К31 или К32 в зависимости от мощности). Электроды (обкладки) выполняются в виде тонкого слоя металла, вжигаемого в диэлектрик, или в виде тонкой металлической фольги. В качестве материала электродов конденсаторов используют тугоплавкие благородные металлы - палладий, платину и их сплавы друг с другом и с се-

ребром. Необходимость применения дорогостоящих металлов вызвана тем, что в процессе высокотемпературного обжига керамики с уже нанесенными электродами или одновременного с обжигом керамики вжигания электродов, производимого в воздушной среде, электроды из неблагородного металла окисляются и теряют высокую проводимость. Обжиг в газовых средах, защищающих электроды из неблагородных металлов от окисления (например, в водороде, смеси CO - CO_2 и др.), приводит, как правило, к существенной потере керамикой изоляционных свойств.

Наиболее массовым типом являются керамические конденсаторы. Доля их выпуска в общем мировом выпуске электрических конденсаторов составляет более 50 %, а в абсолютном исчислении объем производства керамических конденсаторов превышает 100 млрд. штук в год.

Широкое распространение керамических конденсаторов обусловлено рядом их достоинств, в том числе:

- возможностью реализации широкой шкалы емкостей - от долей пикофарад до сотен микрофарад;
- высокими и разнообразными эксплуатационными характеристиками;
- простотой конструкции, не требующей специального корпуса, и связанной с этим сравнительно низкой стоимостью;
- конструктивной совместимостью с гибридными интегральными схемами, плоскими модулями и другими узлами радиоэлектронной аппаратуры, приспособленностью к прогрессивным высокопроизводительным методам монтажа компонентов.

По назначению керамические конденсаторы подразделяются на три типа.

Конденсаторы 1-го типа - конденсаторы, предназначенные для использования в резонансных контурах и других цепях радиоэлектронной аппаратуры, где принципиальное значение имеют малые потери и высокая стабильность емкости. Конденсаторы этого типа часто называют высокочастотными конденсаторами, хотя они могут применяться как при высоких, так и при низких частотах.

Классификационным признаком конденсаторов этого типа является **температурный коэффициент емкости**

$$ТКЕ = \frac{1}{C} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta T}, \qquad (2.1)$$

где С - емкость конденсатора, Т - температура.

Необходимость в компенсации температурных зависимостей параметров компонентов контуров (цепей) требует наличия большого числа групп конденсаторов 1-го типа по ТКЕ.

В отечественной документации значение ТКЕ кодируется буквами П (плюс) или М (минус) в соответствии со знаком ТКЕ и цифрой, обозначающей номинальное значение ТКЕ, выраженное в миллионных долях обратных градусов. Последнее выбирается из предпочтительных чисел типа Е, а допускаемое отклонение от номинального значения устанавливается в связи с классом точности конденсатора. Выпускаются конденсаторы с ТКЕ по группам М2200, М1500, М750, М470, М330, М220, М150, М75, М47, М33, МП0 (номинальное значение ТКЕ = 0), П33, П100. Наиболее широкое применение находят конденсаторы групп М1500, М750, М47, МП0, П33.

Исходя из известного выражения для емкости конденсатора нетрудно показать, что

$$ТКЕ = ТК\varepsilon + \alpha_{\ell}, \qquad (2.2)$$

где $ТК\varepsilon = (1/\varepsilon) .(\Delta\varepsilon/\Delta T)$ - температурный коэффициент диэлектрической проницаемости;

α_{ℓ} - температурный коэффициент линейного расширения.

Поскольку величина α_{ℓ} у керамических диэлектриков не превышает $10 .10^{-6}$ $К^{-1}$, можно считать (за исключением группы МП0), что $ТКЕ \sim ТК\varepsilon$ и аналогично конденсаторам 1-го типа классифицировать высокочастотные керамические материалы. Использование в качестве классификационного признака конденсаторных материалов, ТКЕ обусловлено близостью температурной зависимости их диэлектрической проницаемости к линейной.

Общие требования, предъявляемые к высокочастотной керамике, включают необходимое значение диэлектрической проницаемости, низкие диэлектрические потери (на частоте 1 МГц тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta \le 6\cdot10^{-4}$), высокое сопротивление изоляции (удельное объемное сопротивление керамики $\rho_v > 10^{11}$ Ом см).

Конденсаторы 2-го типа - конденсаторы, предназначенные для использования в цепях фильтрации, блокировки или других цепях, где малые потери и высокая стабильность емкости не имеют существенного значения. Конденсаторы этого типа называют низкочастотными (хотя они могут применяться, в принципе, при любых частотах тока).

Для изготовления конденсаторов 2-го типа применяют сегнетоэлектрики (сегнетокерамику) с высокими значениями диэлектриче-

ской проницаемости и немонотонной ее температурной зависимостью. Последнее обстоятельство не позволяет использовать для классификации конденсаторов 2-го типа величину ТКЕ. Классификационным признаком для них является **температурная стабильность емкости**

$$\text{ТСЕ} = (\Delta C/C_{20^\circ C})\cdot 100\ \%\ , \qquad (2.3)$$

где ΔC - допустимое изменение емкости в рабочем диапазоне температур.

Значение ТСЕ кодируется буквой Н и соответствующим группе по ТСЕ числом. Выпускаются конденсаторы групп Н90, Н70, Н50, Н30, Н20.

На той же основе классифицируют в отечественной практике и сегнетокерамику для конденсаторов 2-го типа. Общие требования к сегнетокерамике состоят в необходимом значении диэлектрической проницаемости, $tg\delta \le 3{,}5\cdot 10^{-2}$ и удельного сопротивления $\rho_v \ge 10^9$ Ом/см.

В последнее время осуществляется переход к принятой в промышленно развитых странах единой классификации керамических диэлектриков в зависимости от величины и температурной стабильности диэлектрической проницаемости. Используемая в мировой практике конденсаторная керамика относится к одному из следующих 4-х классов:

- NPO - материалы с диэлектрической проницаемостью до 75 и ТКε не выше $30\cdot 10^{-6}$ в температурном интервале от –55 до 125^0 С;

- X7R - материалы с диэлектрической проницаемостью в интервале от 1000 до 4000 и изменяющейся в температурном диапазоне от -55 до 125 ^{0}C не более, чем на 15 %;
- Z5U - материалы с диэлектрической проницаемостью от 5000 до 8000, изменяющейся в температурном диапазоне от 10 до 85 ^{0}C не более, чем на 22 ÷ 56 % от значения при 25 ^{0}C;
- Y5V - материалы с диэлектрической проницаемостью от 10000 до 15000, изменяющейся в температурном диапазоне от -30 до 85 ^{0}C не более, чем на 22 ÷ 56 % от значения при 25 ^{0}C.

Конденсаторы 3-го типа - конденсаторы, предназначенные для работы в тех же цепях, что и конденсаторы 2-го типа, но имеющие по сравнению с ними несколько меньшее значение сопротивления изоляции и большее значение тангенса угла диэлектрических потерь, что практически ограничивает область их применения низкими частотами.

Основным элементом конденсаторов этого типа служит полупроводниковая керамика с барьерными или оксидными слоями.

Классифицируют конденсаторы 3-го типа так же, как и конденсаторы 2-го типа.

В качестве компонентов основной кристаллической фазы керамических диэлектриков конденсаторов 1-го типа используются соединения с электронной упругой и ионной упругой поляризацией, обладающие, как известно, небольшой величиной ТКε - отрицательной и положительной соответственно. Особенно привлекательны здесь титаносодержащие соединения, кристаллизующиеся в структуре рутила (TiO_2), перовскита ($CaTiO_3$, $SrTiO_3$) и барийлантаноидного тетратитаната ($BaNd_2Ti_{34}O_{12}$) и обладающие усиливающим электронную поляризацию сильным внутрикристаллическим полем и, как следствие,

сравнительно высокой диэлектрической проницаемостью - от 80 до 250 (для сравнения, диэлектрическая проницаемость соединений с ионной упругой поляризацией не превышает 30: у цирконата кальция $CaZrO_3$ величина ε= 28 при ТКε=$65 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$, у алюмината лантана $LaAlO_3$ ε = 22 при ТКε= $100 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$). Следует отметить, однако, что за увеличение ε приходится «расплачиваться» повышением ТКε.

Индивидуальные соединения не охватывают всего диапазона необходимых для конденсаторных диэлектриков величин ε и ТКε. Технические материалы основаны, как правило, на бинарных или более сложных твердых растворах или механических смесях указанных выше соединений с различными значениями ε и ТКε. При условии, что температурные коэффициенты ε входящих в состав керамики соединений имеют противоположные знаки, удается достигнуть требуемого эффекта температурной стабильности емкости.

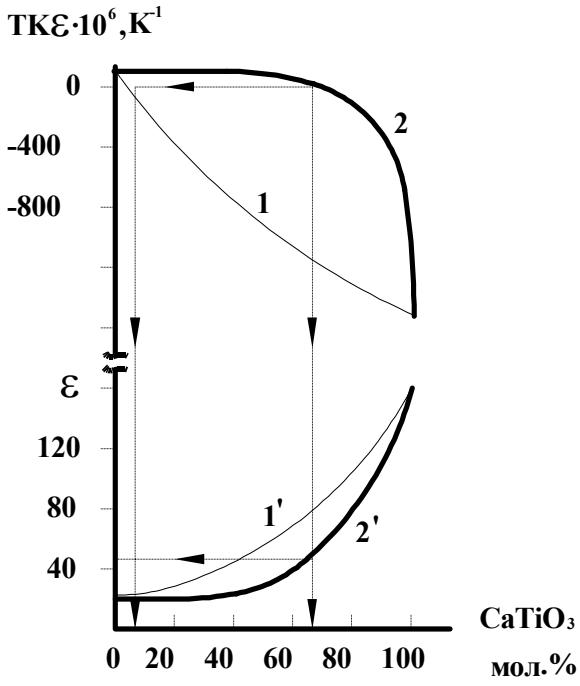


Рис. 6. Зависимость ТКε (кривые 1, 2) и ε (кривые 1’, 2’) от состава в системах $CaTiO_3$ - $CaZrO_3$ (1, 1’) и $CaTiO_3$ - $LaAlO_3$ (2, 2’)

Наибольшее применение получили твердые растворы в системах $CaSnO_3$ - $CaZrO_3$ - $CaTiO_3$, $CaTiO_3$ - $LaAlO_3$ (со структурой перовскита), $BaNd_2Ti_4O_{12}$ - $BaBiTi_4O_{12}$, $BaNd_2Ti_4O_{12}$ - $BaSm_2Ti_4O_{12}$ (структура барийлантаноидных тетратитанатов, близкая к структуре перовскита). Использование указанных систем позволяет в значительной степени унифицировать состав конденсаторных диэлектриков, регулируя величины ε и ТКε посредством изменения состава (рис.6).

В табл. 1 представлены состав и свойства основной кристаллической фазы ряда керамических материалов для конденсаторов 1-го типа.

Наличие для ряда групп по ТКε материалов с различными значениями ε вызвано необходимостью обеспечить в пределах данной группы возможность изготовления конденсаторов различных емкостей.

К перспективным системам здесь следует отнести барийлантаноидные тетратитанаты, образующие твердые растворы замещения в широкой области концентраций компонентов, что дает

Таблица 1

Свойства и состав основной кристаллической фазы некоторых керамических материалов для конденсаторов 1-го типа

Группа по ТКε	**ε при 20 ^{0}C и f=1 МГц**	**Интервал рабочих температур, ^{0}C**	**Основная Кристаллическая Фаза**
М1500	150	-60 ÷ +155	$CaTiO_3$
М750	100	-60 ÷ +315	$CaTiO_3$ - $LaAlO_3$
	80	-60 ÷ +85	TiO_2
М75-МПО	40-50	-60 ÷ +315	$CaTiO_3$ - $LaAlO_3$
	17-20	-60 ÷ +155	$CaSnO_3$ - $CaZnO_3$ –$CaTiO_3$
М47-МПО	80	-60 ÷ +125	$Ba(NdBi)_2Ti_4O_{12}$
П33	35	-60 ÷ +315	$CaTiO_3$ - $LaAlO_3$
	15	-60 ÷ +155	$CaSnO_3$ - $CaZnO_3$ –$CaTiO_3$

возможность получения керамики с термостабильными свойствами и диэлектрической проницаемостью до 120.

Основой сегнетокерамических материалов для конденсаторов 2-го типа являются оксидные соединения, главным образом, титанаты, цирконаты и ниобаты щелочноземельных металлов.

Ограничиться индивидуальными соединениями, однако, не удается из-за неблагоприятной температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Напомним, что последняя име-

имеет острый максимум в точке Кюри, т.е. при температуре перехода из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу. Поэтому если точка Кюри соединения - сегнетоэлектрика находится вне рабочего диапазона температур конденсатора, достигнуть необходимой величины ε материала не удается. Кроме того, наличие острого максимума $\varepsilon(T)$ недопустимо с точки зрения температурной стабильности емкости конденсатора.

В качестве основы технических материалов используют сегнетоэлектрики со сглаженной зависимостью $\varepsilon(T)$. Для ее получения используют эффект размытия фазовых переходов и получаемые материалы называют сегнетоэлектриками с размытым фазовым переходом (РФП).

Хотя этот принцип является общим для всей конденсаторной сегнетокерамики, подходы к получению материалов с максимально высокой диэлектрической проницаемостью (группа Н90) и повышенной температурной стабильностью ε (группы Н50, Н30 и др.) имеют особенности.

Для получения диэлектриков с максимальной ε создают однофазные твердые растворы с РФП. В отечественной практике наиболее распространены твердые растворы в бинарных системах $BaTiO_3$-$BaZrO_3$, $BaTiO_3$-$BaSnO_3$, $BaTiO_3$-$CaSnO_3$, $BaTiO_3$-$CaZrO_3$. При нахождении в одном и том же кристаллографическом положении в элементарной ячейке ионов различного сорта, например, Ti^{4+} и Zr^{4+} в твердом растворе $BaTiO_3$ - $BaZrO_3$, в случае неупорядоченного их расположения возможны различия состава отдельных микрообластей кристалла,

которые будут обладать соответственно разными температурами фазового перехода (рис.7).

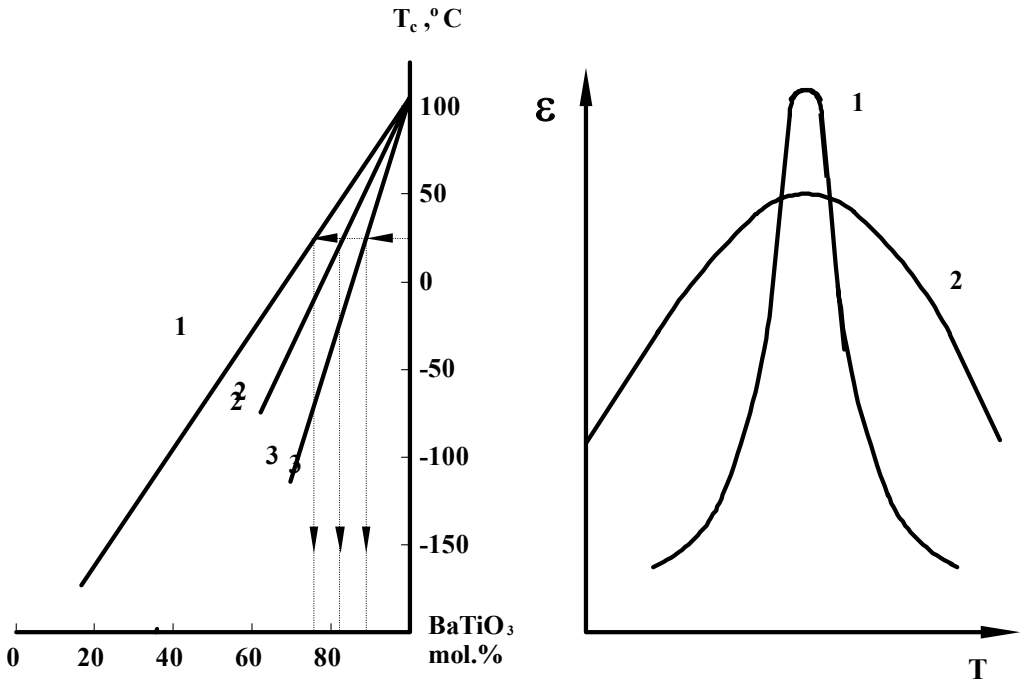


Рис.7. Зависимость температуры точки Кюри твердых растворов в системах $BaTiO_3$ - $SrTiO_3$ (1), $BaTiO_3$ - $CaZrO_3$ (2) и $BaTiO_3$ - $BaSnO_3$ (3) от концентрации компонентов. Пунктиром показана схема выбора состава с температурой точки Кюри 20 ^oC (а);

Схематическое изображение температурной зависимости сегнетоэлектрика при неразмытом (1) и размытом (2) фазовых переходах (б)

Фазовый переход во всем объеме кристалла, представляющего собой совокупность микрообластей различного состава, распространяется на некоторый интервал температур, т.е. является размытым (рис.7,б).

Наличие, наряду с $BaTiO_3$, второго компонента при соответствующей его концентрации смещает T_c в желаемую область комнатной температуры (рис.7,а), что позволяет достигнуть необходимой вели-

чины ε. Наиболее высокие значения ε могут быть достигнуты в случае крупнозернистого строения керамики, способствующего развитию доменной структуры зерен и ослаблению механических напряжений, препятствующих доменной поляризации.

В отечественной практике для создания технических конденсаторных материалов наиболее часто применяют твердые растворы $BaTiO_3$ и несегнетоэлектрических соединений, понижающих точку Кюри. Основные характеристики этих материалов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Состав и свойства основной кристаллической фазы керамических материалов для конденсаторов 2-го типа

Группа стабильности	**ε**	**Интервал рабочих температур, ^{0}C**	**T_C, ^{0}C**	**Основная кристаллическая фаза**
Н90	8000 - 10000	-60 ÷ +85	20 - 40	$BaTiO_3$-$BaZrO_3$
	12000 - 14000	-60 ÷ +85	10 - 20	$BaTiO_3$-$CaZrO_3$
	10000 - 11000	-60 ÷ +85	0 - 10	$BaTiO_3$-$CaSnO_3$

Для всех указанных материалов характерно высокое значение удельного сопротивления $\rho > 10^{11}$ Ом см и значение $tg\delta \sim 0{,}01$- 0,02 при частоте 1 кГц.

Большие перспективы для создания сегнетокерамических материалов с еще более высокой диэлектрической проницаемостью открывают твердые растворы на основе свинецсодержащих соединений типа $Pb(B_1B_2)O_3$, где B_1: Mg^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, Fe^{2+}; B_2: Nb^{5+}, Ta^{5+}, W^{5+}.

Величина ε таких материалов может достигать 30000. Примером материалов этого класса являются твердые растворы магнийниобата свинца $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$, обладающего $T_c<0$ °C, и сегнетоэлектриков $PbTiO_3$, $PbFe_{1/2}Nb_{1/2}O_3$ и других, повышающих точку Кюри конечного материала. Так, добавление к магнийниобату свинца титаната свинца в количестве 6 - 8 мол.% смещает T_c к комнатной температуре.

Важным достоинством этих материалов является низкая, по сравнению с керамикой на основе $BaTiO_3$, температура спекания (не более 1000 °C), что позволяет заменить драгоценные металлы для обкладок конденсаторов на серебросодержащие материалы. Однако возможности широкого использования соединений свинца в конденсаторной промышленности ограничены ввиду их высокой токсичности.

Однофазные твердые растворы с РФП не обладают высокой температурной стабильностью ε в рабочем интервале температур конденсатора. Для создания конденсаторной сегнетокерамики, отличающейся повышенной температурной стабильностью ε, используют смеси двух фаз - титаната бария с точкой Кюри 120 °C и твердого раствора с РФП и точкой Кюри в интервале -10 ...+10 °C. Вторая фаза представляет собой твердый раствор гетеровалентного замещения титаната бария с добавками простых или сложных оксидов трех- и пятивалентных металлов, ионы которых замещают ионы Ba или Ti соответственно.

Зерна такой керамики имеют зонально-оболочечную структуру: каждое зерно состоит из центральной части - титаната бария и оболочки - твердого раствора с РФП (рис.8). Тот факт, что гетерогенная

система реализуется в пределах одного зерна, обеспечивает малые изменения ε в широком интервале температур (рис.8).

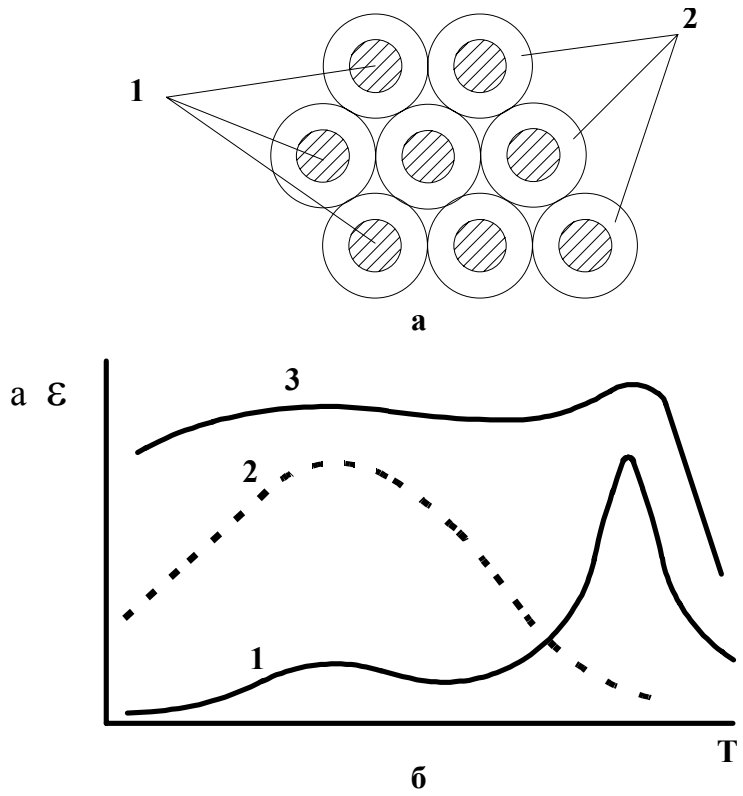


Рис. 8 Керамические материалы со сглаженной зависимостью ε (T): а - схема керамики с зонально-оболочечной структурой зерен (1 - сердцевина зерен $BaTiO_3$; 2 - оболочка зерен - твердый раствор с размытым фазовым переходом);

б - схематическое изображение температурной зависимости материала (1 - $BaTiO_3$; 2 - твердый раствор с размытым фазовым переходом; 3 - керамический материал с зонально-оболочечной структурой зерен)

В настоящее время получены материалы с зонально-оболочечной структурой зерен, отвечающие группе стабильности Н50 и обладающие ε ~ 3500 и группам Н30 и Н20, обладающие ε ~ 2500. Основные характеристики промышленных сегнетокерамических материалов с

повышенной стабильностью диэлектрической проницаемости приведены в табл. 3.

Таблица 3

Состав и свойства основной кристаллической фазы керамических материалов с зонально-оболочечной структурой зерен для конденсаторов 2-го типа

Группа стабильности	ε	Интервал рабочих температур, ^{0}C	Основная кристаллическая фаза
Н50	3500 - 4000	-60 ÷ +125	$BaTiO_3$ + тв. раствор $BaTiO_3$-Nb_2O_5-Al_2O_3
Н30	2000 - 2200	-60 ÷ +125	$BaTiO_3$ + тв. раствор (Ba,Bi)TiO_3-Nb_2O_5
	2500 - 2700	-60 ÷ +125	$BaTiO_3$ + тв. раствор BaTiO_3-Sm_2O_3-Nb_2O_5
Н20	1600 - 1800	-60 ÷ +125	$BaTiO_3$ + тв. раствор (Ba,Bi)TiO_3

Следует отметить, что свойства спеченного керамического материала определяются не только химическим составом его основной кристаллической фазы, но и технологией приготовления керамической массы и обжига, определяющих степень образования твердых растворов, соотношение фаз, размер зерен керамики и другие важные структурные параметры материала.

В качестве примера рассмотрим влияние технологических факторов на свойства температурно-стабильной сегнетокерамики с зонально-оболочечной структурой зерен на основе системы $BaTiO_3$ + тв.раствор Ba(Ti,Nb)O_3. На рис. 9, 10 приведена температурная зависимость диэлектрической проницаемости одного из материалов этой

системы $BaTiO_3$ - $Ba_{0,5}NbO_3$. Видно, что с повышением температуры обжига присущий $BaTiO_3$ максимум ε подавляется, максимум ε твердого раствора растет, а соответствующая ему температура повышается. Это обусловлено большим количеством $BaTiO_3$, прореагировавшего с ниобатом бария (рис. 9). К аналогичному эффекту приводит и повышение дисперсности компонентов керамической массы (рис.10).

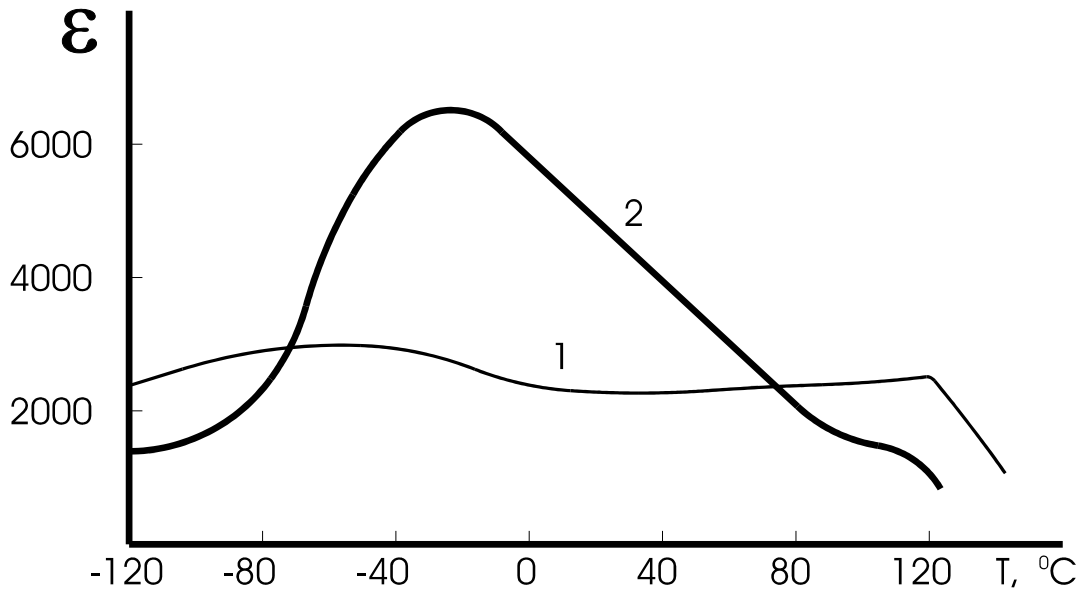


Рис. 9. Температурная зависимость ε керамического материала с зонально-оболочечной структурой зерен на основе твердого раствора $BaTiO_3$ - $Ba_{0,5}NbO_3$ при разных температурах обжига:
1 -1280 °С; 2 - 1420 °С

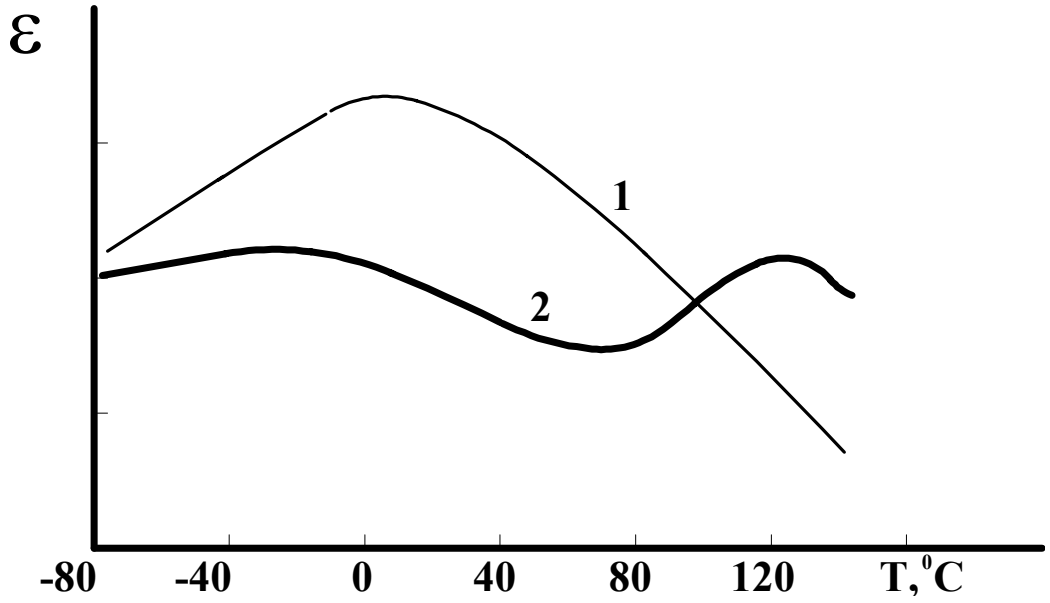


Рис. 10. Температурная зависимость ε керамического материала с зонально-оболочечной структурой зерен на основе твердого раствора $BaTiO_3$ - $Ba_{0,5}NbO_3$ при разной дисперсности порошка керамической массы: 1- $S_{уд}$=0,3 м^2/г; 2 - $S_{уд}$=1,3 м^2/г.

Из сказанного следует, что в производстве конденсаторной керамики необходимо строгое соблюдение технологических режимов на всех стадиях процесса.

Исходным материалом конденсаторов 3-го типа является полупроводниковая сегнетокерамика на основе $BaTiO_3$, получаемая посредством обработки диэлектрической керамики. Повышение проводимости титаната бария до уровня, присущего полупроводникам, достигается переводом части ионов переходного металла Ti^{4+}в Ti^{3+} и "включением", как следствие, прыжкового механизма электропроводности, состоящего в перескоках носителей заряда между разновалентными катионами титана. Это осуществляется различными технологическими методами:

1. Восстановлением диэлектрической керамики при нагреве до температур свыше 1000 ^{o}C в восстановительной среде, например, в водороде:

$$BaTiO_3 + xH_2 \rightarrow BaTiO_{3-x} + xH_2O\ . \qquad (2.4)$$

При этом в силу сохранения электронейтральности часть ионов титана переходит в трехвалентное состояние:

$$BaTiO_{3-x} = Ba^{2+}Ti^{4+}_{1-2x}\ Ti^{3+}_{2x}\ O_{3-x}\ . \qquad (2.5)$$

2. Легированием титаната бария оксидами элементов B_1 и B_2 с образованием твердых растворов замещения $(BaB_1)(TiB_2)O_3$, где B_1 - трехвалентные катионы (Bi^{3+}, $La^{3+} \div Er^{3+}$), B_2 - пятивалентные катионы (Nb^{5+}, Ta^{5+} и др.), что, как и в первом случае, делает необходимым (для обеспечения электронейтральности) перевод части ионов титана в трехвалентное состояние, например:

$$BaTiO_3 + xNb_2O_5 \rightarrow Ba^{2+}(Ti^{4+}_{1-2x}\ Nb^{5+}_{x}\ Ti^{3+}_{x})O_3\ ; \qquad (2.6)$$

$$BaTiO_3 + xLa_2O_3 \rightarrow (Ba^{2+}_{1-x}\ La^{3+}_{x})(Ti^{4+}_{1-x}\ Ti^{3+}_{x})O_3\ . \qquad (2.7)$$

В обоих случаях происходит повышение проводимости титаната бария на $10 \div 12$ порядков (рис.11, 12).

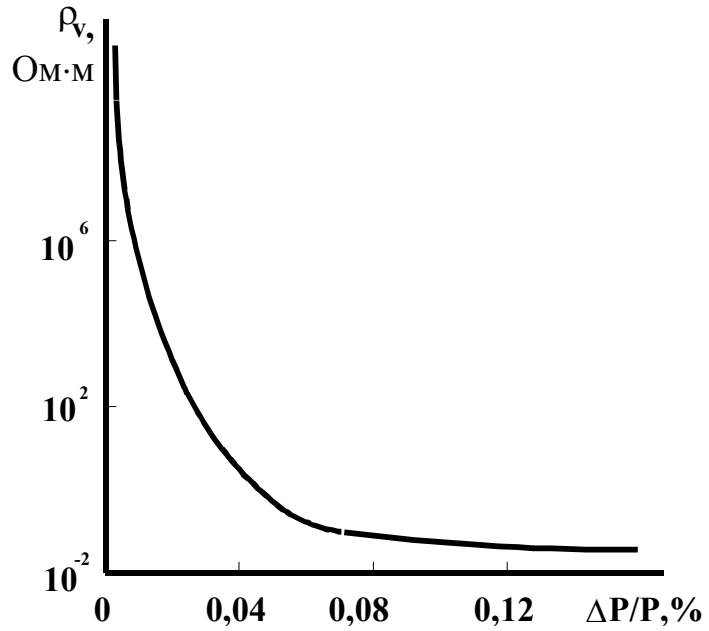


Рис. 11. Зависимость удельного объемного сопротивления титаната бария от потери кислорода (ΔP/P) при востановлении в среде водорода. Температура при восстановлении - 1300 °С

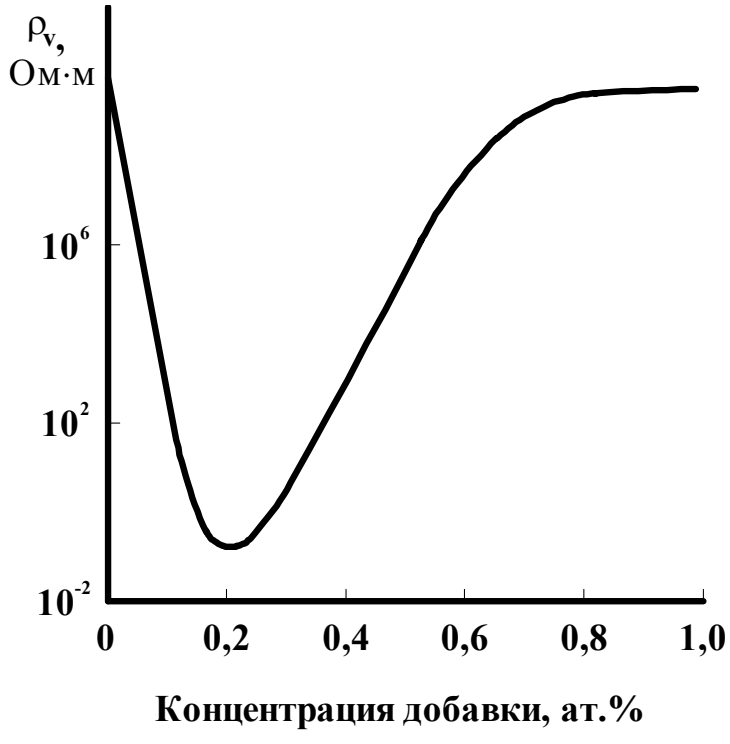


Рис. 12. Зависимость удельного сопротивления титаната бария с добавками оксидов металлов, переводящими его в состояние полупроводника

Ясно, что сам по себе полупроводниковый титанат бария в силу отсутствия электроизоляционных свойств использоваться в качестве конденсаторного диэлектрика не может. Рабочим диэлектриком конденсаторов 3-го типа служат образуемые в приповерхностной области керамических заготовок или вокруг каждого зерна тонкие изолирующие слои или гетерогенная система полупроводник - диэлектрик.

Существуют три типа конденсаторных структур на основе полупроводниковой керамики.

1. Структуры с барьерным слоем Шоттки, где тонкие высокоомные слои образуются в приповерхностной области заготовок полупроводниковой керамики в процессе вжигания в них серебряных электродов. Предполагается, что при этом происходит захват электронов на поверхностные состояния, обусловленные растворяемым в серебре кислородом. Электрическое поле образуемого на поверхности отрицательного заряда приводит к формированию в приповерхностной области слоев толщиной 1 - 3 мкм, обедненных носителями заряда и обладающих высоким сопротивлением. Рабочие напряжения конденсаторов этого типа не превышают 3,2 В.

2. Структуры реоксидированного типа, получаемые посредством термического окисления заготовок восстановленной полупроводниковой керамики на воздухе при T = 1000 - 1100 ^{o}C с образованием на поверхности диэлектрических слоев $BaTiO_3$

толщиной 10 - 50 мкм. Максимальное рабочее напряжение составляет при этом 50 В. Эти конденсаторы отличаются простотой конструкции, малыми трудоемкостью и материалоемкостью при высоких значениях удельных емкостей. В то же время технологический процесс их производства недостаточно стабилен: изделия часто имеют недопустимо

малое сопротивление изоляции, что обусловлено наличием в диэлектрических слоях дефектов, главным образом, локальных участков неполного окисления полупроводникового титаната бария.

3. Структуры с межзерновыми изолирующими слоями (МЗС), т.е. тонкими изолирующими слоями на поверхности каждого из полупроводниковых зерен керамики (рис.13).

Керамика с МЗС получается посредством одновременного легирования титаната бария или изоморфных твердых растворов на его основе двумя видами добавок. Первый вид добавок ответственен за придание зернам керамики полупроводниковых свойств. Это оксиды элементов с валентностью, большей, чем у Ba^{+2} или Ti^{4+}, способные замещать последние в кристаллической решетке (см. выше). Второй вид добавок обусловливает формирование диэлектрических свойств межзеренных слоев. Это компенсирующие добавки оксидов металлов, имеющих валентность меньше 2 или 4 при замещении Ba^{2+} или Ti^{4+} соответственно (оксиды меди, железа и др.). Образование МЗС происходит , например, по следующей схеме:

$$BaTiO_3 + xNb_2O_5 + xFe_2O_3 \rightarrow Ba^{2+}(Ti^{4+}_{1-2x}\, Nb^{5+}_{x}\, Fe^{3+}_{x})O_3 \,. \quad (2.8)$$

Для получения конденсаторных структур с МЗС необходимо, чтобы добавки первого вида входили в глубину зерна посредством объемной диффузии, а добавки второго вида (компенсирующие) распространялись бы больше по границам зерен путем поверхностной диффузии. На рис. 14 представлена температурная зависимость коэффициента диффузии добавок обоих видов и показано, как следует выбирать температуру обжига керамики.

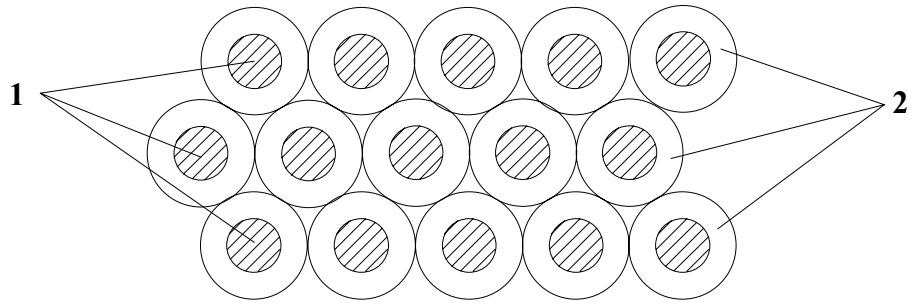


Рис. 13. Схема строения керамики с межзерновыми изолирующими слоями: 1 - сердцевина зерен (полупроводник); 2 - оболочка (диэлектрический изолирующий слой)

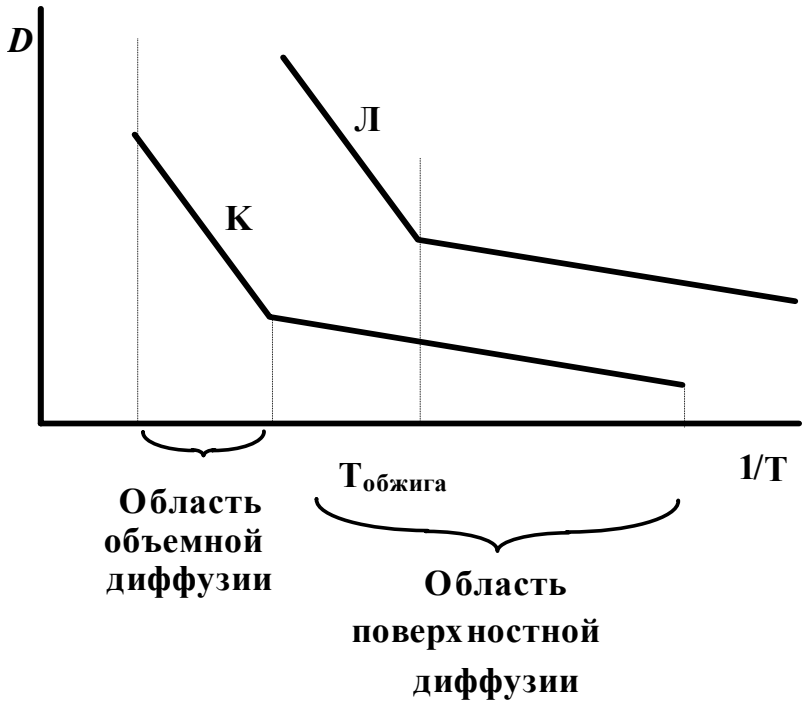


Рис. 14. Температурная зависимость коэффициента диффузии (*D*) добавок при обжиге титаносодержащей керамики: легирующей добавки (Л); компенсирующей добавки (К)

Величина эффективной диэлектрической проницаемости полупроводниковой керамики с МЗС может на порядок превышать ε традиционных материалов, используемых для изготовления конденсаторов 2-го типа, достигая значений 100000 - 150000.

В табл. 4 представлены данные, позволяющие сравнить характеристики различных типов конденсаторных структур на основе полупроводниковой сегнетокерамики.

Таблица 4

Характеристики конденсаторов 3-го типа

Конденсаторная структура	**Максимальная удельная емкость, мкФ/см^3**	**tgδ**	**Сопротивление изоляции при U=U$_н$, Ом**	**U$_н$, В**	**Группа по ТСЕ**
С барьерным слоем	2,0	0,05-0,1	10^6 - 10^7	3,2	Н50
Реоксидированного типа	0,8	0,05-0,1	10^7 -10^9	10 - 50	Н30, Н50, Н90
С межзерновыми слоями	0,8	0,05-0,1	10^8 -10^9	10 - 63	Н70

При изготовлении керамических конденсаторов используются, главным образом, две базовые конструкции - однослойные конденса-

торы плоской конструкции (дисковые, пластинчатые) и многослойные конденсаторы монолитной конструкции (рис.15).

Керамические монолитные конденсаторы представляют собой спеченный пакет из чередующихся друг с другом слоев керамического диэлектрика и металлического электрода, причем обкладки соединены параллельно (рис.16).

Толщина слоев диэлектрика составляет 10 - 250 мкм, число слоев достигает 60 (обычно 20 - 40 слоев).

Эта конструкция является наиболее перспективной для конденсаторов низкого напряжения в плане получения максимальной удельной емкости, технологичности, а также отсутствия ограничений по толщине диэлектрика, обусловленных хрупкостью керамики.

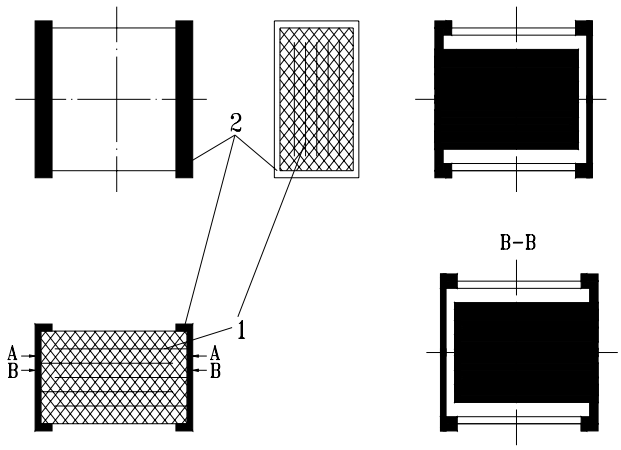


Рис. 15. Конструкция монолитного конденсатора: 1 - внутренние электроды: 2 - контактные электроды

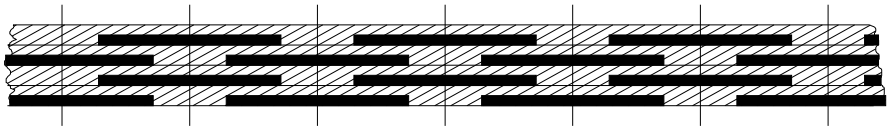


Рис. 16. Схема сборки пакета - матрицы заготовок монолитных конденсаторов. Вертикальными линиями показаны места разреза матрицы на отдельные заготовки

Важные перспективы развития керамических конденсаторов связаны с получением высокочастотных керамических материалов с ε до 150 (термостабильные) и 300 (термокомпенсирующие), сегнетокерамических материалов с ε = 25000 - 30000, полупроводниковых с межзерновыми изолирующими слоями с ε до 300000. Применение новых материалов может позволить повысить удельную емкость монолитных конденсаторов до сотен микрофарад на кубический сантиметр, а номинальные значения емкости - до сотен микрофарад.

Другой путь повышения удельной емкости керамических конденсаторов - уменьшение толщины керамических слоев до единиц микрон и в перспективе - использование слоев диэлектриков толщиной ~ 1 мкм с высокой ε, получаемых методами пленочной технологии (вакуумные, химические, "золь-гель" технология).

Наряду с улучшением электрических характеристик керамических конденсаторов, существует проблема снижения их материалоем-

кости и, в первую очередь, сокращения расходования драгоценных металлов в их производстве. Проблема удешевления электродов монолитных конденсаторов имеет несколько путей решения. Одним из них является применение вместо палладия сплавов серебра с палладием, что требует снижения температуры спекания конденсаторных заготовок до 1100 ^{o}C и менее (например, при использовании свинецсодержащих керамических материалов). Однако серебряно-палладиевый электрод остается достаточно дорогим.

Следует отметить, что снижение температуры спекания конденсаторных заготовок позволяет решить и другую важную задачу их производства - снижение энергозатрат.

В настоящее время разработана технология изготовления монолитных конденсаторов со стеклокерамическим диэлектриком с низкой температурой спекания (до 500 ^{o}C), что позволяет применять в них в качестве электродов алюминиевую фольгу. Однако диэлектрическая проницаемость стеклокерамики гораздо ниже, чем у керамики, и эти конденсаторы обладают невысокой удельной емкостью.

Радикальным решением проблемы является разработка таких керамических диэлектриков, которые бы практически не восстанавливались при обжиге в защитных (не содержащих кислород) газовых средах и при этом обладали столь же высокими характеристиками, что и конденсаторная керамика, обжигаемая в воздушной среде.

3. КОНДЕНСАТОРЫ С ОКСИДНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Диэлектриком конденсаторов этого класса являются тонкие оксидные пленки Ta_2O_5, Al_2O_3 и Nb_2O_5, формируемые на поверхности соответствующего металла, используемого в качестве одной из обкладок конденсатора – анода, методом электрохимического оксидирования и называемые анодными оксидными пленками (АОП). По величине диэлектрической проницаемости АОП уступают многим керамическим материалам: на частоте 1 кГц у Ta_2O_5 $\varepsilon = 27,6$; у Al_2O_3 $\varepsilon = 8,5$; у Nb_2O_5 $\varepsilon = 41,4$. Тем не менее оксидные конденсаторы, реализующие емкость в системе металл - оксид металла - катодный материал, обладают рекордно высокими значениями удельной емкости и удельного заряда. Своим преимуществом они обязаны сочетанию малой (субмикронной , микронной) толщины диэлектриков, обладающих при этом высокой электрической прочностью, и особенностям конструкции - специально развитой поверхности анода и использованию катодного материала, обеспечивающего эффективную реализацию в емкости площади оксидированного анода.

Наличие оксидных конденсаторов, рассчитанных на рабочие напряжения от 1,6 до 500 В и емкость от единиц микрофарад до 1,3 Ф, обусловливает широкое применение оксидных конденсаторов в фильтрах источников электропитания, цепях развязки и т.п.

В зависимости от катодного материала конденсаторы с оксидным диэлектриком подразделяются на электролитические (алюминиевые К50- и танталовые К52-) и оксидно-полупроводниковые (К53-).

Особое место занимают оксидно-металлические и оксидно-полупроводниковые конденсаторы интегральных схем, изготовленные с применением методов пленочной технологии.

Развитие поверхности с целью увеличения площади поверхности анода осуществляется одним из двух способов.

В первом варианте анод представляет собой объемно-пористое тело, получаемое посредством высокотемпературного нагрева заготовки из порошка металла в вакуумированной камере. Частицы металла при этом спекаются, что обеспечивает необходимую механическую прочность анода. Образующиеся во всем объеме анода поры повышают реализуемую в емкости площадь поверхности диэлектрика, которая может составлять квадратные метры в расчете на 1 $см^3$ объема.

После оксидирования анода его поры заполняют проводящим катодным материалом - жидким электролитом (водным раствором серной кислоты в танталовых конденсаторах типа К52- и растворами на основе этиленгликоля, диметилформамида, смеси γ-бутиролактона и N-метилпирролидона и др. в алюминиевых конденсаторах К50-) или твердофазным полупроводником (диоксид марганца, а в последние годы и органическим полупроводником в конденсаторах К53-). Полупроводниковый диоксид марганца получают путем термического разложения (пиролиза) раствора нитрата марганца при $T \approx 300\ ^oC$.

Конструкция оксидно-электролитического конденсатора с объемно-пористым анодом показана на рис. 17.

Второй вариант анода конденсатора представляет собой травленую металлическую фольгу. Технология электрохимической обработ-

ки алюминия дает возможность повышать площадь анодной фольги до 100 раз по сравнению с площадью гладкой фольги, что в сочетании с конструктивным оформлением фольговых конденсаторов в виде намотанного рулона, позволяет приблизиться к соизмеримым с объемно-пористыми анодами значениям удельной емкости. Вторая обкладка в фольговых конденсаторах изготавливается из специальной бумаги (или полимерной пленки), пропитанной электролитом, смачивающим поверхность АОП, либо из стеклоткани с твердым полупроводником.

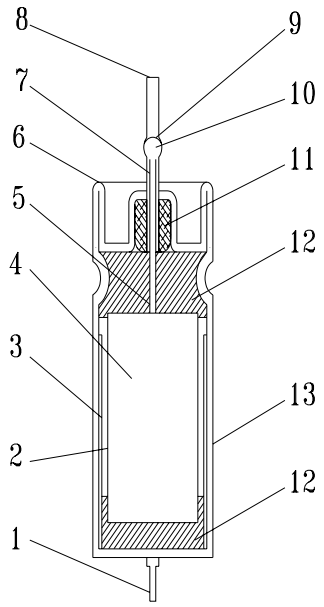


Рис. 17. Танталовой оксидно-электролитический конденсатор в танталовом корпусе, фирма Sprague (вид в разрезе): 1 - никелевый катодный вывод; 2 - сернокислый электролит; 3 - спеченный танталовый катод; 4 - танталовый анод; 5 - танталовый вывод анода; 6 - герметичный сварной шов; 7 - танталовая трубка; 8 - никелевый анодный вывод; 9 - сварка встык; 10 - сварка вольфрамом в инертном газе; 11 - уплотнение тантал-стекло-тантал; 12 - антивибрационная прокладка (тефлон); 13 - танталовый корпус

Особенности конструкции обусловливают ряд специфических для оксидных конденсаторов проблем. Первая из них состоит в том, что оксидные конденсаторы полярны. Полярность приложенного к ним напряжения должна соответствовать положительному потенциалу на аноде, так как при приложении напряжения обратной полярности через конденсатор протекает ток большой величины (рис. 18). Это обусловлено инжекцией в оксидный диэлектрик избыточных носителей заряда - электронов из базового металла и протонов из водородсодержащего материала противоэлектрода (рабочего электролита, сорбирующей влагу пористой двуокиси марганца). Подобно диодам оксидные конденсаторы имеют асимметричную вольт-амперную характеристику, в связи с чем используемые базовые металлы часто называют вентильными.

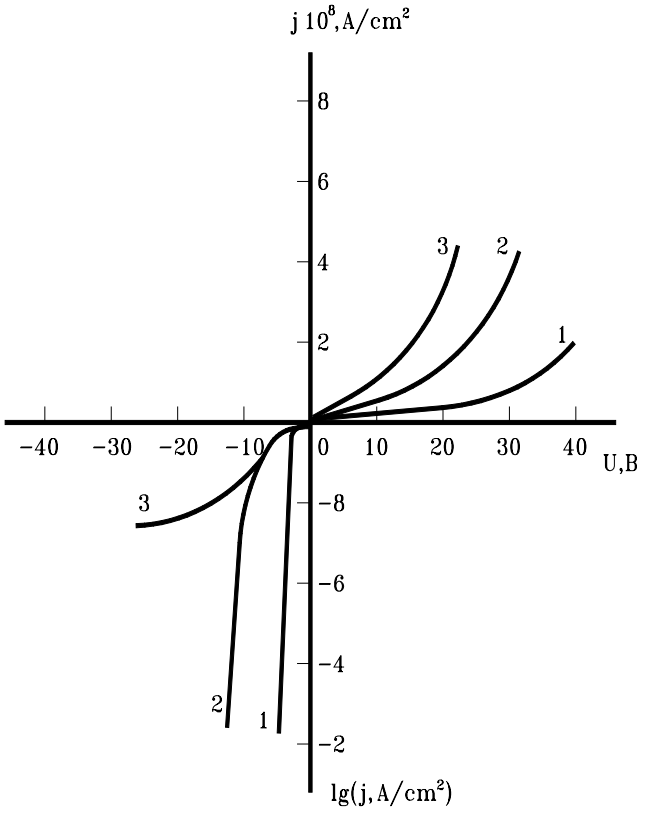


Рис. 18. Типичные вольт-амперные характеристики рабочих структур танталовых электролитических (1),оксидно-полупроводниковых (2) и оксидно-металлических (3) конденсаторов.

Вторая проблема - ограниченный диапазон рабочих частот и температур. Вследствие сравнительно высокого сопротивления катодной обкладки (электролита, полупроводника) величина tgδ оксидных конденсаторов даже на частоте 50 Гц при нормальной температуре достаточно велика: $tg\delta \approx 0{,}05 \div 0{,}20$. С ростом частоты tgδ линейно возрастает. Диапазон рабочих частот оксидного конденсатора принципиально ограничен величиной так называемой критической частоты $f_{кр}$, при превышении которой необходимо учитывать свойства объемно-пористого анода как системы с распределенными параметрами, что проявляется в резком уменьшении емкости конденсатора и возрастании tgδ.

С понижением температуры tgδ оксидных конденсаторов резко возрастает в связи с увеличением сопротивления катодного материала,

что ограничивает температурный диапазон снизу. Верхняя граница рабочих температур , кроме физических свойств катодного материала, определяется экспоненциальным ростом проводимости оксидного диэлектрика с увеличением температуры. Как правило, даже у конденсаторов герметизированной конструкции максимальная рабочая температура не превышает 125 ^{o}C.

Поскольку двуокись марганца обладает более высокой проводимостью, чем жидкий электролит, оксидно-полупроводниковые конденсаторы имеют лучшие частотные и температурные характеристики, чем оксидно-электролитические конденсаторы.

К числу важнейших задач улучшения потребительских свойств конденсаторов с оксидным диэлектриком относятся:

- дальнейшее повышение удельного заряда и для энергонакопительных конденсаторов - удельной энергии;
- уменьшение тока утечки и увеличение допустимых значений рабочего напряжения;
- расширение рабочих диапазонов температур и частот.

Указанные технические проблемы имеют очевидный экономический аспект, состоящий в необходимости уменьшения расхода дефицитного и дорогостоящего тантала.

Остановимся на видимых путях совершенствования оксидных конденсаторов.

Увеличение удельного заряда танталовых конденсаторов достигается, главным образом, применением порошков новых типов с повышенным отношением площади поверхности к объему (мелкодисперсных, с развитой поверхностью частиц и др.). Решение этой задачи, требующее серьезных исследований в области порошковой металлургии, позволяет значительно снизить расход тантала в расчете на единицу емкости конденсатора, что обеспечивает снижение себестоимости конденсаторов. Достижения отечественного конденсаторостроения 80-х годов в этом направлении представлены на рис. 19.

Зарубежные фирмы-изготовители выпускают танталовые порошки около 20-ти классов. Это порошки с частицами осколочной формы, крупно- и мелкодисперсные, порошки с развитой формой зерна (губчатые, агломерированные, так называемые танталовые хлопья) и др. В каталогах фирм-производителей танталовых конденсаторных порошков в настоящее время имеются сведения о порошках, обеспечивающих удельный заряд до 40000 мкКл/г.

Повышение удельной емкости оксидных конденсаторов может быть достигнуто и за счет использования в качестве рабочего диэлектрика пленок соединений, обладающих существенно большей диэлектрической проницаемостью. С 70-х годов ведутся исследования возможностей создания титановых конденсаторов (ε оксида титана может достигать 100), конденсаторов на основе сплавов титана с рядом металлов (алюминий, ниобий и др.).

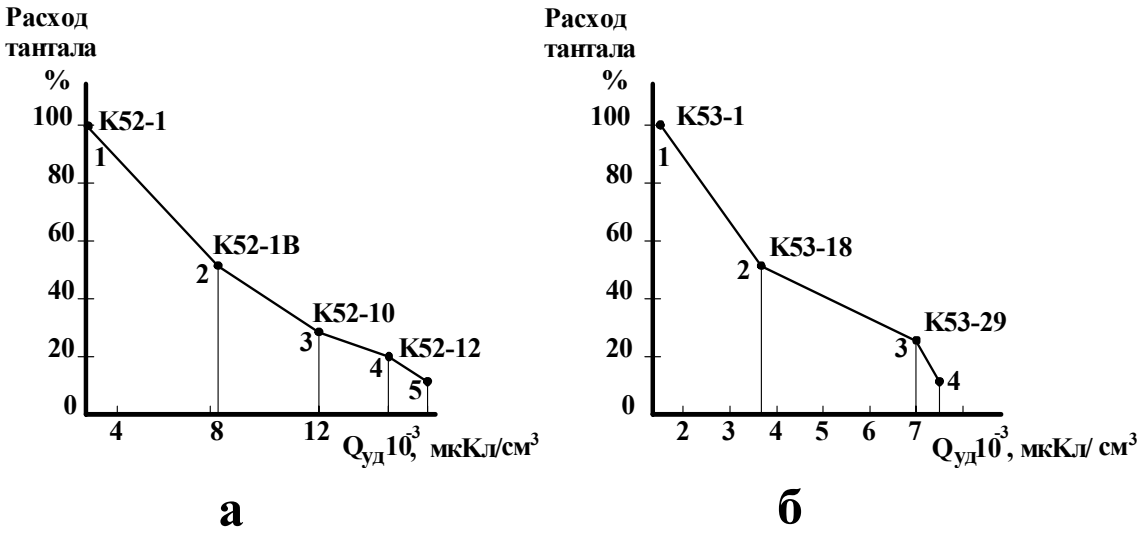


Рис. 19. Сокращение расхода тантала и повышение удельного заряда ТЭОПК (а) и танталовых ОПК (б) при использовании порошков новых типов по сравнению с танталовым порошком II класса (1): порошка V класса (2), натрийтермического (3), натрийтермического агломерированного (4) (а). Точки 5 на рис.а и 4 на рис.б соответствуют перспективе использования натрийтермических порошков с повышенными удельными зарядами

В частности, представляет интерес технология изготовления объемно-пористых анодов из смеси алюминия и титана, основанная на эффекте Киркендалла. Оба металла в виде порошков с диаметром частиц 2 - 3 мкм при спекании диффундируют друг в друга, оставляя многочисленные микроскопические поры, благодаря чему получают объемно-пористое тело с большой удельной поверхностью. Наилучшие результаты по емкостным свойствам, току утечки и тангенсу угла потерь дает система Al - Ti с содержанием ~55 % Al.

Предпринимаются попытки создания на поверхности объемно-пористого анода сегнетоэлектрических титаносодержащих соединений с использованием химических методов синтеза.

Вместе с тем, достигнуть уровня электроизоляционных свойств диэлектрических пленок и, как следствие, токовых характеристик конденсаторных структур, сравнимых с танталовыми, как видно из табл. 5 , пока не удается.

Таблица 5

Основные свойства вентильных металлов и их анодных оксидных пленок

Металл	**$T_{плав}$, °C**	**Плотность,г/см^3**	**ε оксида**	**Удельный ток утечки анода, мкА/мкФ·В**
Тантал	3000	16,6	27,6	0,01
Алюминий	660	2,7	8,5	0,1
Ниобий	2470	8,6	41,4	0,05
Титан	1660	4,54	100	0,1

За некоторый выигрыш в емкости приходится расплачиваться снижением допустимого рабочего напряжения, что не позволяет в результате решить задачу повышения удельного заряда.

Величина удельной емкости фольговых конденсаторов опреоделяется строением травленой фольги (размеры пор, их концентрация, распределение пор по поверхности), которое в свою очередь зависит от структурно-химических особенностей исходной фольги (элементный состав, текстура и др.) и методов травления. Разработка технологии получения исходной алюминиевой фольги необходимого качества и совершенствование методов ее электрохимической обработки по-

зволили достигнуть существенного увеличения удельной емкости фольги и удельного заряда конденсаторов (рис. 20). Динамика уменьшения с годами объема алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов показана на рис.21.

Повышение удельной емкости "высоковольтной" (т.е. рассчитанной на анодирование при высоком напряжении) фольги позволяет довести удельную энергию накопительных конденсаторов до величин порядка единиц Дж/см^3.

Важным стимулом в повышении удельных параметров алюминиевых конденсаторов является их более низкая, по сравнению с танталовыми и ниобиевыми конденсаторами, стоимость.

Представляет интерес использование для электродов фольговых оксидно-электролитических конденсаторов сплава алюминий - титан. Применив оригинальный способ быстрого охлаждения твердого раствора, японские исследователи получили микрокристаллический сплав Al - Ti, обладающий достаточной пластичностью для проката фольги. Содержание титана было доведено до 10 ат. %, что позволило повысить в 1,5 раза удельный заряд и, кроме того, что особенно важно для алюминиевых электролитических конденсаторов, добиться улучшения временной стабильности тока утечки.

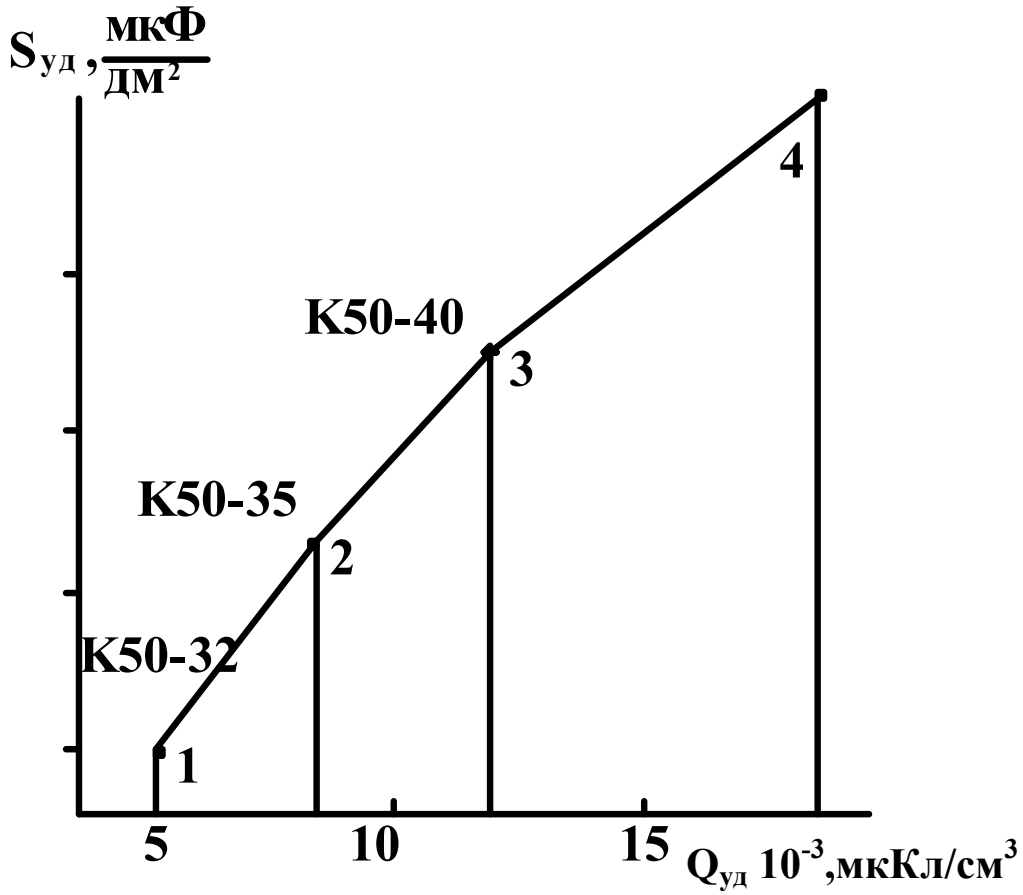


Рис. 20. Повышение удельной емкости анодной низковольтной алюминиевой фольги и удельного заряда конденсаторов при использовании новых видов фольг по сравнению с фольгой АН-4 (1): фольги АН-5 (2), АН-6 (3). Точка 4 соответствует перспективе использования фольги АН-7

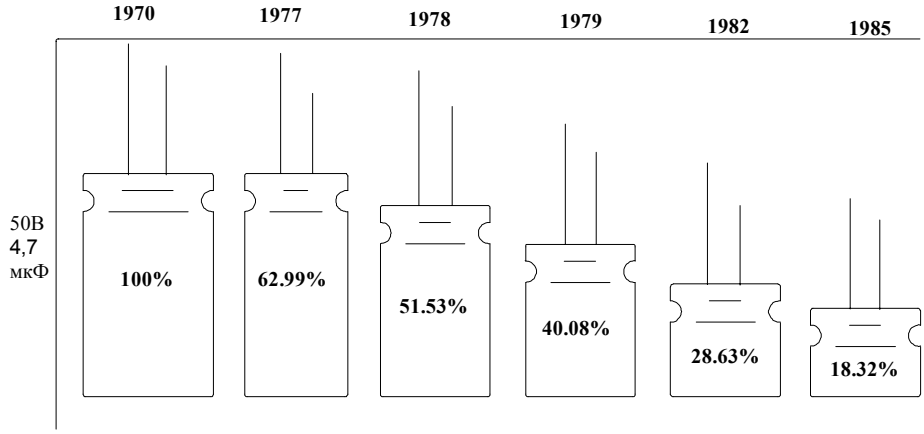


Рис. 21. Динамика уменьшения с годами объемов алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов (данные фирмы Nippon ChemiCon, Япония).

Результаты отечественных исследований в этом направлении обнаруживают перспективы использования в качестве анодного материала целого ряда не содержащих тантала микрокристаллических (аморфных) материалов.

Решение проблемы уменьшения тока утечки и повышения рабочего напряжения потребовало углубленных физических исследований механизмов переноса заряда в рабочих структурах оксидных конденсаторов.

Величина тока утечки складывается из нескольких составляющих:

$$I_{ут} = I_{деф} + \sigma E S + I_{инж}, \qquad (3.1)$$

где $I_{деф}$ - ток, протекающий по дефектным участкам оксидного диэлектрика, занимающим несоизмеримо малую площадь по сравнению с площадью поверхности анода S;

σ - удельная электрическая проводимость однородного оксида;

E - средняя напряженность электрического поля в диэлектрике, соответствующая рабочему напряжению конденсатора;

$I_{инж}$ - инжекционный ток в диэлектрике, обусловленный поставкой неравновесных носителей заряда в диэлектрик из электродов.

Относительный вклад указанных составляющих в общий ток различен для разных типов оксидных конденсаторов и зависит от условий их нагружения.

В случае хорошо сформированного оксидного слоя, при его анодной поляризации в контакте с неинжектирующим катодным материалом (электролитом, двуокисью марганца) величина тока $I_{ут}$ определяется главным образом проводимостью оксидного слоя, то есть второй составляющей в правой части формулы. Установлено, что ответственным за электрическую проводимость анодных оксидов тантала и ниобия является прыжковый электронный перенос, осуществляемый посредством термически активированных перескоков носителей заряда между разновалентными катионами основы, создающими в запрещенной зоне диэлектрика глубокие локализованные состояния.

Фактором первого порядка, влияющим на электронную проводимость, является степень отклонения состава оксидного соединения от стехиометрического. В стехиометрическом оксиде с повышенной концентрацией низковалентных (с непредельной степенью окисления) катионов основы плотность и степень заполнения локализованных состояний увеличиваются, что приводит к экспоненциально сильному росту электронной проводимости. Установленные закономерности процессов электропереноса показали возможности улучшения токовых характеристик посредством уменьшения концентрации дефектов нестехиометрии в окисном слое.

Практически такую возможность удалось реализовать в технологии производства конденсаторов легированием анодного оксида

веществом формовочного электролита (фосфор-, фторсодержащие анионы и др.), введением в операцию формовки термических воздействий, снижением температуры разложения азотнокислого марганца в процессе формирования полупроводникового катода.

Наличие в анодном материале неконтролируемых примесей, способствующих образованию в оксидной пленке макродефектов, а также разрушающее воздействие на оксидный диэлектрический слой такой операции, как пиролитическое осаждение двуокиси марганца в технологии изготовления оксидно-полупроводниковых конденсаторов и взаимодействие вещества оксида с рабочим электролитом в случае алюминиевых электролитических конденсаторов, заставляют учитывать токопрохождение по участкам с повышенной проводимостью, то есть составляющую тока $I_{деф}$, и искать технологические пути ее уменьшения. В связи с этим укажем на необходимость использования в качестве анодного материала высокочистых порошков и фольги, повышения температуры вакуумного спекания объемно-пористых анодов с применением безмасляной откачки, контроля степени увлажнения секций оксидно-полупроводниковых конденсаторов, термоэлектротренировок и др.

Специальные высокочистые порошки осколочной формы, позволяют получать высокооднородные оксидные слои с низким уровнем тока утечки и создавать на их основе оксидно-полупроводниковые конденсаторы, рассчитанные на напряжение до 125 В.

Эти порошки используются в производстве конденсаторов с повышенными требованиями для военной и аэрокосмической техники.

Следует отметить, что требование низкого уровня тока утечки часто идет вразрез с требованием достижения высокой удельной емкости. Так, при использовании высокоемких порошков необходимо проводить их спекание при температурах ниже 1700 ^{o}C (в противном случае происходит резкое уменьшение емкости вследствие уменьшения открытой пористости анода), что приводит в свою очередь к ухудшению чистоты поверхности анода и, как следствие, к росту тока утечки.

Величина инжекционного тока в оксидном диэлектрике особенно важна при обратном включении конденсатора, когда, как уже говорилось, в диэлектрике протекает электронно-протонный инжекционный ток, что существенно ограничивает допустимое обратное напряжение, то есть делает конденсатор полярным.

Уровень тока в пропускном направлении может быть уменьшен посредством уплотнения структуры анодного оксида и повышения его структурной однородности, в первую очередь уменьшения концентрации дефектов типа локальных утоньшений, являющихся в условиях протекания инжекционного тока каналами повышенной проводимости. Поэтому снижению катодного тока способствуют те же технологические приемы, что позволяют уменьшить собственную проводимость оксида.

Другой путь состоит в ограничении инжекции в оксид электронов из базового металла. Этого можно добиться, в частности, посредством использования в качестве базового металла сплавов тантала с молибденом, эмиссионная способность которых ниже, чем у "чистого" металла. Еще одна возможность состоит в легировании АОП из формовочного электролита анионами фтора, концентрирующими-

ся вблизи межфазовой границы раздела оксид - базовый металл, что создает барьер для электронов, инжектируемых из базового металла.

Изменение свойств и структуры оксидного диэлектрика с помощью указанных технологических приемов позволяет добиться снижения уровня тока оксидно-полупроводниковых конденсаторов в пропускном направлении ~ в 10 раз и обеспечить их работоспособность при напряжении катодной поляризации до 20 % от номинального напряжения.

Проблема расширения диапазона рабочих частот оксидных конденсаторов решается главным образом посредством усовершенствования конструкции. Так, были разработаны танталовые и ниобиевые оксидно-полупроводниковые конденсаторы с плоскими объемно-пористыми анодами, что позволило расширить область рабочих частот до 10 МГц (конденсаторы типа К53-25, 28). Такие аноды были изготовлены с помощью оригинального способа формообразования объемно-пористого тела путем электрофоретического осаждения танталового порошка из суспензии на плоский танталовый носитель. Применение этого способа обеспечивает более однородную структуру объемно-пористого анода по сравнению с традиционными методами его формообразования, что улучшает частотные характеристики конденсатора. Увеличение рабочей частоты конденсатора при заданном его импедансе ведет к значительному уменьшению необходимой емкости, улучшению массогабаритных показателей изделий (до 10 раз) и экономии дорогостоящего тантала.

Улучшение частотных характеристик алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов достигается за счет образования пакета чередующихся между собой анодных и катодных пластин, а

также повышенного качества бумаги, обеспечивающей ее высокую впитывающую способность и использования новых рабочих электролитов с пониженным значением удельного сопротивления. В этом случае сопротивление прокладок существенно понижается и величина импеданса на частоте собственного электрического резонанса может быть снижена до 0,001 Ом (конденсатор типа К50-41). Снижению величины индуктивности конструкционных элементов конденсатора, которая начинает сказываться на самых высоких частотах, способствуют такие конструктивные решения, как увеличение количества выводов, минимизация длины выводов в пределах секций и расстояния между ними, а также такое взаимное расположение выводов вне секции, при котором направления токов в паре ближайших выводов противоположны (конденсатор типа К50-33А).

Расширение диапазона рабочих температур алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов осуществляется посредством применения соответствующих трудноиспаримых электролитов. Обычно в качестве основы высокотемпературных электролитов используются диметилформамид, а низкотемпературных - гликолиборат.

Существуют разработки, включающие в себя технологию изготовления анодной фольги с повышенной температурной стабильностью емкости и соответствующие рецептуры рабочих электролитов (например, на основе смеси γ- бутиралактана и N - метилпирролидона), дающие возможность создать низковольтный высокочастотный конденсатор с рабочим диапазоном температур -60 ... +155 ^{0}С.

Успешное решение проблем совершенствования конденсаторов с оксидным диэлектриком позволило к настоящему времени сформировать широкую номенклатуру изделий этого класса, отвечающую

всей совокупности требований к компонентам радиоэлектронной аппаратуры.

4. КОНДЕНСАТОРЫ С ОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Конденсаторы этого типа изготавливают обычно намоткой тонких длинных лент органического диэлектрика, разделенных металлическими электродами.

На протяжении многих лет в качестве рабочего диэлектрика конденсаторов этого типа использовалась главным образом специальная конденсаторная бумага в виде длинных и тонких листов, пропитанная минеральным маслом с целью заполнения воздушных пор и повышения электрической прочности материала (бумажные конденсаторы с фальговыми электродами КБГ, БМ, БГМ, БМТ, КБГП и др., металлобумажные конденсаторы с пленочными металлическими электродами МБГП, МБГЦ, МБГО, МБМ и др.).

Это было обусловлено рядом достоинств конденсаторной бумаги: высокими прочностными свойствами, дешевизной, возможностью создания на ее основе широкой номенклатуры конденсаторов по величинам номинальных напряжений и емкости. Так, диапазон номинальных емкостей бумажных конденсаторов составляет от сотен пикофарад до сотен микрофарад. Важной особенностью работы металлобумажного конденсатора является его способность к самовосстановлению электрической прочности после пробоя. В местах пробоя

диэлектрика выделяется энергия, достаточная для расплавления и испарения тонкого слоя металла, в результате чего пробитый участок изолируется и электрическая прочность восстанавливается.

Вместе с тем, бумага обладает и рядом недостатков, не приемлемых в условиях возросших требований к параметрам конденсаторов: точности и стабильности емкости, величине и стабильности постоянной времени, коэффициенту диэлектрической абсорбции, тангенсу угла потерь и др. Эти требования могут быть удовлетворены при использовании в качестве рабочего диэлектрика конденсаторов синтетических высокомолекулярных пленочных материалов, обладающих лучшими характеристиками по сравнению с бумагой. Параметры органических конденсаторных диэлектриков приведены в табл. 6.

Таблица 6

Основные параметры

органических конденсаторных диэлектриков

Рабочий диэлектрик	**ε при 1 кГц**	**ρ_v, Ом·см**	**tgδ при 1 кГц, 10^{-4}**	**$E_{пр}$, кВ/мм**	**T_{max}, °С**	**Тип конденсатора**
Полистирол	2,5	10^{20}	3	150-300	60-70	$К70_ф$, $К71_ф$
Политетрафторэтилен (фторопласт)	2,0	10^{20}	2	150-200	250	К72
Полипропилен	2,1	10^{17}	8	140-200	100-110	К78
Полиэтилентерефталат (лавсан)	3,2	10^{15}	50	160-300	125	$К73_м$, $К74_ф$
Поликарбонат	3,0	10^{15}	12	180-250	140	К77
Конденсаторная бумага	2-6	10^{15}	60	120-160	85	К40,$К41_ф$, $К42_м$

в таблице обозначены: ф - фольговые обкладки,

м - металлизированные обкладки.

Кроме того, синтетические пленки изготавливаются значительно меньших толщин, отличаются высокой степенью однородности и обладают высокими прочностными характеристиками.

В современном конденсаторостроении применяется бумага и ряд пленочных диэлектриков толщиной 4 - 7 мкм, а при использовании специальных технологических приемов - толщиной 1,5-3

мкм. Использование диэлектрика малой толщины при высоких значениях рабочих напряженностей электрического поля, несмотря на небольшие значения диэлектрической проницаемости у органических материалов, позволяет получать на их основе относительно высокие значения удельной емкости и удельной энергии конденсатора. Механизированный способ изготовления секций таких конденсаторов путем намотки их на специальных станках (полуавтоматах или автоматах) дает возможность получения конденсаторов больших емкостей, достигающих сотен микрофарад.

Бумага и синтетические пленки полярных материалов (полиэтилентерефталат, поликарбонат) имеют сравнительно большие величины тангенса угла диэлектрических потерь, что ограничивает частотный диапазон конденсаторов. Конденсаторы на основе этих диэлектриков предназначаются в основном для включения в цепи постоянного тока и низкой частоты. Значительный интерес здесь представляют синтетические пленки поливинилиденфторида (ПВДФ), обладающего существенно большей, по сравнению с другими материалами, диэлектрической проницаемостью (ε= 10 - 12) и электрической прочностью 600 - 800 кВ/мм. К недостаткам ПВДФ с точки зрения конденсаторного применения следует отнести значительный тангенс угла диэлектрических потерь ($\sim 1{,}5 \cdot 10^{-2}$) и низкую нагревостойкость (T_{max} = +60 °С) этих пленок.

В каталогах фирм стран, где налажено промышленное производство пленок ПВДФ приборного качества, имеются сведения о конденсаторах на основе ПВДФ и его сополимеров.

У конденсаторов на основе пленочных неполярных диэлектриков (полистирол, политетрафторэтилен, полипропилен), благодаря

малой величине угла потерь, существенно расширен диапазон рабочих частот, а также значительно выше значения постоянной времени. Появившаяся в 70-х годах полипропиленовая пленка, близкая по электрическим характеристикам к полистирольной, отличается большей нагревостойкостью, что позволяет использовать ее в качестве рабочего диэлектрика конденсаторов, работающих в режиме переменного и импульсного напряжений. Рабочие частоты таких конденсаторов достигают десятков мегагерц.

Особенно перспективным диэлектриком для создания конденсаторов, предназначенных для работы при высоких (~ 250 °С) температурах, является полиимидная (полипиромелитимид-ная) пленка.

При современном уровне технологии наименьшая толщина пленок составляет 2 мкм, а механическая прочность превышает 1000 кг/см^2. Использование диэлектриков столь малых толщин даже при сравнительно небольшой диэлектрической проницаемости позволяет получать высокие значения удельной емкости и удельной энергии конденсаторов.

Промышленностью налажен выпуск конденсаторов в металлических и пластмассовых корпусах прямоугольной и цилиндрической форм. Кроме того, изготавливаются бескорпусные конденсаторы, защищенные липкой лентой или покрытые слоем эпоксидного компаунда ("окукленные").

Совершенствование конденсаторов с органическим диэлектриком в соответствии с современными требованиями изготовителей радиоэлектронной аппаратуры направлено на повышение их удельных характеристик и расширение функциональных возможностей. Стратегические подходы здесь, как и вообще в конденсаторостроении, со-

стоят в поиске новых диэлектрических материалов и конструктивно-технологических решений. Так, применение в качестве конденсаторного диэлектрика полиэтилентерефталатной пленки толщиной до 1,5 - 2,0 мкм позволило создать конденсаторы с удельным зарядом более 180 мкКл/см^3, а использование поликарбонатной пленки, наряду с достаточно высоким удельным зарядом (~ 120 мкКл/см^3), достигнуть повышенной температурной стабильности и расширения диапазона рабочих частот.

Наибольшей удельной емкостью среди конденсаторов с органическим диэлектриком обладают лакопленочные конденсаторы со сверхтонкими металлизированными полярными пленками, например лак на основе триацетата. Недостатком однослойных конденсаторов этого типа является проникновение металла в тонкие поры пленки, приводящее к потере сопротивления изоляции.

Существенное повышение удельных параметров и стабильности эксплуатационных характеристик конденсаторов может быть достигнуто посредством использования комбинированных (многослойных) диэлектрических структур. В таких структурах используют три разновидности последовательного и параллельного включения диэлектриков: полярной пленки и конденсаторной бумаги; неполярной пленки и конденсаторной бумаги; полярной и неполярной пленки.

При последовательном включении двух слоев в комбинированном диэлектрике, как известно, емкость конденсатора

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \qquad (4.1)$$

где $C_1 = \varepsilon_o \varepsilon_1 S / h_1$ и $C_2 = \varepsilon_o \varepsilon_2 S / h_2$ - емкости, обусловленные первой пленкой толщиной h_1 и второй пленкой толщиной h_2 соответственно

(ε_1 и ε_2 - диэлектрическая проницаемость первого и второго материалов соответственно), а сопротивление $R = R_1+R_2$.

При параллельном включении слоев $C= C_1+C_2$;

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \qquad (4.2)$$

Подбирая диэлектрические пленки разного типа при различном соотношении их толщин и реализуя в конструкции определенные схемы включения слоев, можно создавать пленочные конденсаторы с различными и широко меняющимися значениями ТКЕ, в том числе и температурно-стабильные конденсаторы.

Улучшение удельных характеристик конденсаторов при использовании комбинированного диэлектрика обусловлено тем, что дефектные участки одного слоя ("генетические" или ″биографические″, например, возникающие при вакуумной металлизации) перекрываются другим, бездефектным слоем диэлектрика, что позволяет обеспечить более высокие значения рабочего напряжения. Так, использование комбинированного бумажно-лавсанового диэлектрика с масляной пропиткой позволило существенно повысить удельную энергию конденсаторов. Двухслойное покрытие комбинацией лаков в лакопленочных конденсаторах позволяет существенно ослабить влияние на их свойства дефектов каждого из слоев лака.

Перспективны комбинированные диэлектрики для создания стабильных пленочных конденсаторов, предназначенных для работы в высокоомных низковольтных цепях, когда не может быть реализовано присущее конденсаторам с металлизированными обкладками полезное свойство самовосстановления ("выгорание"металлического электрода в месте пробоя) в силу малости величины тока. Использо-

вание в качестве диэлектрика поликарбонатной пленки толщиной 2 мкм, взятой в два слоя, позволило повысить удельный заряд конденсаторов до 250-300 мкКл/см^3 и обеспечить высокую стабильность сопро-тивления изоляции при их эксплуатации.

Особенно ощутим эффект при сочетании материаловедческих и конструкторско-технологических решений. Использование комбинированного диэлектрика в сочетании с усовершенствованной базовой конструкцией - переходом к цилиндрической конструкции с монолитным изоляционным (эпоксидным) корпусом - позволяет рассчитывать на повышение удельных параметров высоковольтных конденсаторов с органическим диэлектриком в 1,5 - 2 раза. Это решение реализовано, в частности, в отечественных сериях конденсаторов общего применения К75-47 и К75-54, охватывающих диапазоны номинального напряжения от 2,5 до 100 кВ, номинальной емкости от 0,001 до 10 мкФ и рабочей температуры от -60 до +85° С.

Наряду со слоистыми диэлектрическими структурами, интерес для конденсаторостроения представляют композиционные материалы на основе органических диэлектриков с наполнителем, обладающим высокой диэлектрической проницаемостью, например полимер - сегнетокерамика. В предельном случае - это металлодиэлектрические композиционные материалы, обнаруживающие резкий рост диэлектрической проницаемости при концентрации металлического наполнителя вблизи порога протекания. Проблема здесь состоит в критичности проводимости и tgδ к изменению содержания наполнителя в пороговой области концентраций. Для ее решения , по-видимому, необходимы новые технологические приемы изготовления конденсаторного диэлектрика.

5. ИОНИСТОРЫ

Изделия этого типа занимают особое место среди конденсаторов, поскольку их емкость реализуется без участия диэлектрика. В основе принципа действия ионисторов - формирование на границе двух фаз двойного электрического слоя (ДЭС) тонкого (молекулярной толщины) слоя, сформированного двумя пространственно разделенными слоями электрических зарядов разного знака. По этой причине изделия данного типа охватывают диапазон емкостей до 100 Ф.

Существующие типы ионисторов часто называют конденсаторами с двойным электрическим слоем.

В качестве иллюстрации рассмотрим возникновение ДЭС на границе раздела металл - электролит. Выход из металла некоторой части электронов приводит к его положительному заряжению и, как следствие, притяжению к поверхности металла подвижных отрицательно заряженных ионов из электролита. При высокой концентрации ионов в растворе электролита ($\sim 10^{22}$ см$^{-3}$) поле заряда металла экранируется в электролите на расстояниях порядка единиц ангстрем. Возникающее между разноименно заряженными слоями электрическое поле препятствует выходу электронов из металла и при наступлении динамического равновесия на границе металл - электролит возникает скачок потенциала, составляющий доли вольта.

Таким образом, ДЭС представляет собой молекулярный конденсатор, роль обкладок в котором играют заряженные слои. В силу малости расстояния d между ними ДЭС обладает весьма высокой емкостью: в расчете на 1 см^2 она составляет порядка 10 - 100 мкФ.

Следует отметить, что емкость ДЭС давно уже нашла применение в конденсаторостроении в качестве катодной емкости оксидно-электролитических конденсаторов , где ее большая величина позволяет практически полностью реализовать анодную емкость (анодная и катодная емкости конденсатора соединены последовательно).

Использовать же высокую емкость ДЭС как емкость конденсатора длительное время не удавалось из-за низкого рабочегонапряжения, что связано с низким напряжением разложения электролита. Положение изменилось в 70-х годах в связи с развитием низковольтной электроники и соответственно потребностей в низковольтных конденсаторах с различной и охватывающей широкий диапазон емкостью. К этому времени были созданы новые материалы, обеспечивающие возможность создания ионисторов.

В зависимости от рабочего материала электролита существующие ионисторы можно классифицировать следующим образом:

- ионисторы на основе водных растворов кислот и щелочей (так называемые суперконденсаторы);

- ионисторы на основе апротонных электролитов;

- ионисторы на основе твердого электролита.

На рис. 22, представлены схема ионистора первого типа на основе 38 %- го водного раствора H_2SO_4 в отсутствии и при наличии приложенного напряжения и эквивалентная электрическая схема ионистора.

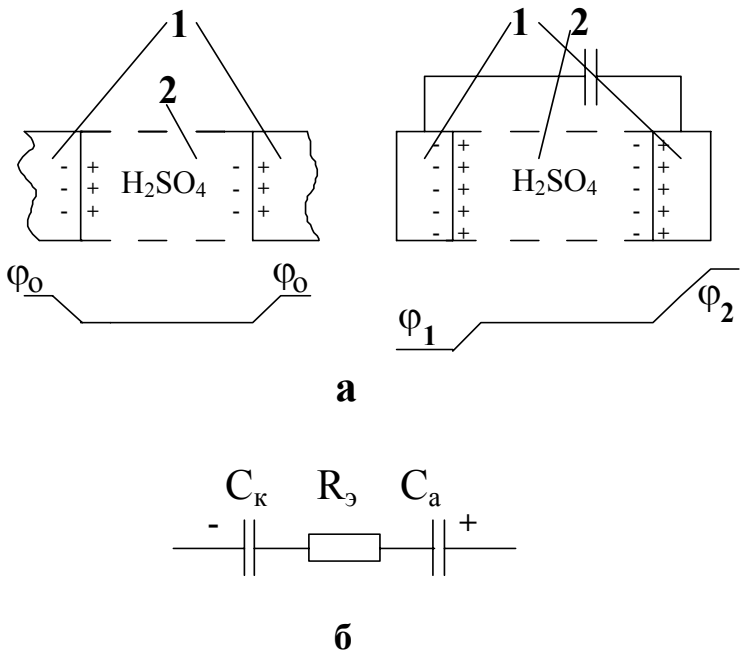


Рис.22. Схема неполярного ионистора (а): 1 - симметричные электроды с электронной проводимостью, 2 - электролит; б - простая эквивалентная электрическая схема

Емкость здесь создается двумя ДЭС на границах раздела электролита с симметричными электродами с электронной проводимостью. Последние обладают высокоразвитой поверхностью, что дает соответствующий выигрыш в емкости.

Ионисторы этого типа представляют собой по существу два последовательно включенных конденсатора с ДЭС и различным ионным составом обкладок, расположенных в электролите, и являются неполярными.

Высокая ионная проводимость (~1 $Ом^{-1}$ $см^{-1}$) и широкий диапазон рабочих температур электролита обеспечивают возможность создания на его основе ионисторов с низким эквивалентным последовательным сопротивлением , пригодных для использования в качестве

энергонакопительных импульсных конденсаторов, рассчитанных на рабочие токи порядка 10^1-10^3 А и большое количество циклов зарядки - разрядки.

К недостаткам ионисторов данного типа следует отнести ограничение рабочего напряжения значением 1 В (напряжение разложения воды ~1 ,2 В) и жесткие требования к кислотостойкости конструкционных и электродных материалов. Последнее снимается при использовании щелочных электролитов, уступающих, однако, серной кислоте по проводимости и диапазону рабочих температур.

Использование апротонных электролитов в ионисторах второго типа позволяет добиться повышения рабочего напряжения до 2 - 2,5 В. Это обусловлено более высоким напряжением их разложения .

Повышение значения рабочего напряжения обеспечивает этим ионисторам рекордно высокую энергоемкость. Вместе с тем, ионисторы данного типа проигрывают первым по величине эквивалентного последовательного сопротивления. Основной за- дачей развития ионисторов второго типа является дальнейшее повышение рабочего напряжения на основе синтеза новых апротонных материалов.

Рабочим электролитом ионисторов третьего типа являются твердые электролиты (ионные суперпроводники) - вещества, обладающие в твердом состоянии высокой ионной проводимостью, сравнимой с проводимостью жидких электролитов и расплавов солей (на уровне 10^{-1} $Ом^{-1}$ $см^{-1}$).

Высокая ионная проводимость твердых электролитов обусловлена полной или частичной разупорядоченностью подрешетки атомов одного сорта при сохранении упорядоченной структуры подрешеток остальных атомов. При этом ионы в разупорядоченной решетке одно-

го сорта атомов могут занимать не одно фиксированное в элементарной ячейке положение, а несколько таких положений, и легко мигрировать между ними, что и обеспечивает высокую проводимость. Моделью ионного суперпроводника может служить жесткокристаллический каркас (матрица), пропитанный "ионной жидкостью".

Основой современных твердофазных ионисторов является $RbAg_4J_5$ - рубидий-серебро пентаиодистое - ионный суперпро-водник, обладающий высокой проводимостью (~0,25 $Ом^{-1}см^{-1}$ при Т = 300 К), обусловленной переносом ионов Ag^+, и стабильностью в интересном для практики диапазоне температур.

На рис. 23 представлена схема ионистора на основе ионного суперпроводника $RbAg_4J_5$. Принцип действия такого ионистора в упрощенном виде представляется следующим образом. При приложении к ионистору напряжения полярности, соответствующей отрицательному потенциалу на серебряном электроде, ионы Ag^+ из твердого электролита разряжаются на катоде ($Ag^+ + e \rightarrow Ag$) и оседают на нем. В результате ухода положительно заряженных ионов Ag^+ обнажается отрицательно заряженный жесткий остов твердого электролита, состоящий из ионов J^-. На границе раздела твердого электролита с графитовым анодом, являющимся блокирующим электродом (электродная реакция на нем полностью заторможена) образуется ДЭС и, как следствие, формируется высокая емкость. Последняя увеличивается также за счет развития поверхности графитового электрода, изготавливаемого из порошка.

Разрядка ионистора сопровождается обратным процессом - растворением серебра в электролите ($Ag \rightarrow Ag^+ + e$) и соответственно уменьшением заряда на обкладках ДЭС.

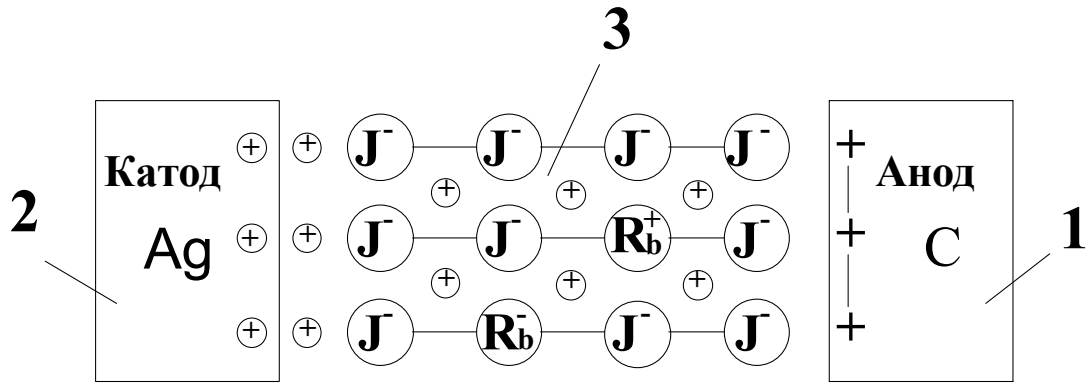


Рис.23. Схема полярного ионистора на основе ионного суперпроводника $RbAg_4J_5$; 1 - поляризуемый угольный анод, 2 - неполяризуемый серебряный катод, 3 - твердый электролит

Ионисторы данного типа обладают рядом полезных качеств: высокими величинами номинальной емкости и накапливаемого заряда, малыми токами утечки, достаточно широким диапазоном рабочих температур, высокой надежностью.

Сочетание этих свойств открывает возможность использования ионисторов как энергонакопительных конденсаторов - резервных источников питания. Однако твердотельные ионисторы остаются низковольтными приборами, что обусловлено низким напряжением разложения твердого электролита (при напряжении ~0,67 В происходит выделение на угольном электроде свободного иода). С целью повышения рабочего напряжения создаются батареи последовательно соединенных ионисторов, что приводит, разумеется, к потере в суммарной емкости, по сравнению с единичным элементом.

Дальнейший прогресс в области твердотельных ионисторов связан с успехами в создании новых твердых электролитов, обладающих высоким потенциалом разложения и не содержащих дорогих и дефицитных металлов.

В заключение отметим, что развивающейся низковольтной радиоэлектронике необходимы как сверхвысокоемкие ионисторы (источники тока порядка 10^1 - 10^3 А), так и сравнительно низкоемкие ионисторы, способные заменить при низких напряжениях оксидные конденсаторы, где последние обнаруживают нестабильность параметров. Развитие этого направления конденсаторостроения требует создания новых материалов и технологий.

6 КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНТАЖА НА ПОВЕРХНОСТЬ (ЧИП-КОНДЕНСАТОРЫ)

Перспективным направлением развития производства современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является применение технологии монтажа электрических компонентов поверхностно на печатные платы, что позволяет упростить и автоматизировать сборку РЭА. Для автоматизированного поверхностного монтажа используются чип-компоненты, отличающиеся специальной конфигурацией выводов, пригодной для такой технологии.

В отличие от обычной конструкции чип-конденсаторы не имеют внешних проволочных выводов (поэтому их часто называют безвыводными); функции внешних присоединительных выводов выполняют наружные контакты, которые представляют собой металлические

площадки, расположенные на теле конденсатора. В процессе монтажа на поверхность чип-конденсаторы устанавливают с помощью высокопроизводительного автоматизированного оборудования непостредственно на поверхность печатных плат (подложек), фиксируют с помощью отверждаемого адгезива и осуществляют групповую пайку, чаще всего волной припоя.

Технология монтажа на поверхность дает возможность на 30% уменьшить затраты времени на монтаж РЭА, причем процесс монтажа может быть практически полностью автоматизирован.

В дополнение к отмеченным выше возможностям упрощения и автоматизации монтажа использование чип-компонентов позволяет получить еще ряд преимуществ, важнейшими из которых являются:

- повышение плотности монтажа РЭА, обусловленное отсутствием у компонентов выступающих выводов и возможностью монтажа с обеих сторон плат, что дает возможность уменьшить массу и габаритные размеры РЭА на 30-40%;

- улучшение электрических характеристик РЭА вследствие уменьшения длины соединений, снижения паразитных емкостей и индуктивности;

- лучшая воспроизводимость параметров схем при их серийном производстве;

- повышение надежности РЭА за счет отказа от монтажных отверстий печатных плат и автоматизации пайки.

Потребности в чип-конденсаторах и объемы их производства в мире растут быстрыми темпами. По мере увеличения объема производства заметно снижается цена на чип-конденсаторы (кроме того, по понятным причинам, снижается и стоимость печатных плат). По

оценкам ведущих специалистов к 2000 году большая часть компонентов (до 70%) с обычными конфигурациями выводов будет заменена чип-компонентами.

Монтаж чип-компонентов на поверхность печатных плат рассматривается как 4-я революция в электронике (после изобретения электронной лампы, транзистора и интегральной схемы).

Внедрение технологии монтажа поверхностью возможно при наличии широкой номенклатуры чип-конденсаторов.

В настоящее время разработаны и производятся керамические, оксидные и пленочные чип-конденсаторы прямоугольной и цилиндрической форм, удовлетворяющие основным требованиям: теплоустойчивости, возможности закрепления на контактных площадках печатных плат, унификации размеров.

У керамических конденсаторов необходимая для поверхностного монтажа конфигурация выводов формируется естественным образом как этап в процессе изготовления, следующий за сборкой пакетов и разрезания их на заготовки.

Первые безвыводные монолитные керамические конденсаторы были разработаны в конце 50-х годов. За прошедшие 40 лет по мере роста спроса и расширения объемов их производства произошла дифференциация предъявляемых к ним требований. К настоящему време-

ни сложились четыре основных направления развития чиповых монолитных керамических конденсаторов:

- уменьшение габаритных размеров;

- увеличение емкости;

- повышение номинальных напряжений, в том числе создание высоковольтных конденсаторов;

- снижение стоимости.

Пути решения этих задач рассмотрены в разделе 2.

Проблема "чипизации" оксидных и металлопленочных конденсаторов значительно сложнее и предполагает решение задач по созданию новых конструкций, технологических процессов формирования контактных узлов и другие.

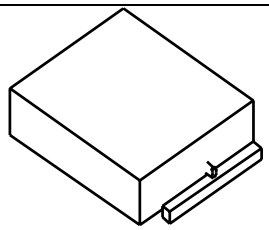
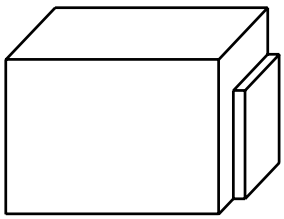
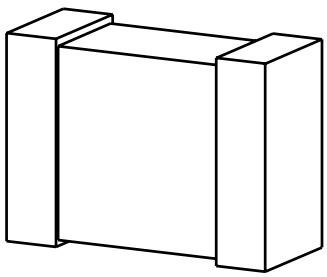
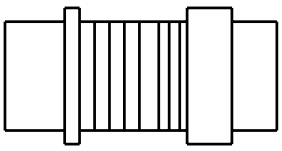
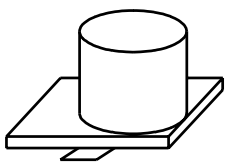
Создание чиповых танталовых конденсаторов - достижение конца 70-х - начала 80-х годов. К настоящему времени удельный вес чип-конденсаторов в структуре производства всех танталовых конденсаторов составляет ~60%. Преимущественное применение безвыводные танталовые конденсаторы находят в РЭА с высокой плотностью монтажа, когда требуется получать большие емкости при малых габаритных размерах компонентов.

Основные конструктивные варианты чип-конденсаторов с оксидным диэлектриком представлены в табл. 7.

Наиболее перспективными конструкциями оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов являются опрессованные пластмассой с формованными (методами химического или гальванического осаждения никеля) контактными площадками и с торцевыми контактными площадками.

Таблица 7

Основные конструктивные варианты зарубежных чиповых конденсаторов с оксидным диэлектриком

Внешний вид	Особенности конструкции	Группа изделий
1. Прямоугольные чиповые конденсаторы		
	С Т-образным выводом (незащищенный вариант)	Танталовые оксидно-полупроводниковые
	В пластмассовом корпусе или опрессованные пластмассой с формованными контактными площадками	Танталовые оксидно-полупроводниковые. Алюминиевые оксидно-электролитические
	Торцевые контактные площадки	Танталовые оксидно-полупроводниковые. Алюминиевые оксидно-полупроводниковые
2. Цилиндрические чиповые конденсаторы		
	Торцевые колпачки	Танталовые оксидно-полупроводниковые
	Вертикальная Конструкция	Алюминиевые Электролитические

Сложной проблемой при разработке пленочных чип-конденсаторов является обеспечение их устойчивости к тепловым режимам пайки на платы. При использовании одного из наиболее распространенных способов пайки - пайки волной припоя - компоненты подвергаются воздействию расплавленного припоя с температурой ~ 250 °С в течение 2 - 4 секунд.

Учитывая сказанное, а также необходимость достижения максимально возможных удельных электрических характеристик, в качестве диэлектрика металлопленочных чип-конденсаторов используются полиэтилентерефталатные пленки. Последние отличаются сравнительно высокими нагревостойкостью и диэлектрической проницаемостью. Кроме того, они сравнительно дешевы и благодаря высокой механической прочности могут изготавливаться в виде тонких и узких лент. Перспективными (в первую очередь для обеспечения более стабильных электрических характеристик) являются и некоторые другие синтетические полимерные пленки, например поликарбонатная.

В связи с высокими требованиями к теплоустойчивости в конструкции пленочного чип-конденсатора необходима защитная оболочка, предохраняющая конденсаторную секцию от прямого воздействия высокой температуры при пайке на платы. Наличие защитной оболочки требует в свою очередь специальных контактных элементов, осуществляющих надежное электрическое соединение конденсаторной секции с внешними контактными площадками чип-конденсатора.

Первые сообщения о разработке безвыводных пленочных конденсаторов появились в начале 80-х годов, а промышленное их производство в развитых странах началось с 1985 года.

7. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Под технологией контроля качества понимают совокупность методов и средств контроля и обеспечения качества изделий на всех этапах их жизненного цикла - разработки, производства, применения и эксплуатации.

Схема технологии контроля качества пассивных компонентов радиоэлектронной аппаратуры, являющаяся результатом обобщения накопленного опыта в радиодеталестроении, представлена на рис.24.

Контроль качества на этапах разработки (рис.24, пп 1.1-1.5), применения и эксплуатации, контрольные и отбраковочные испытания изделий в процессе производства основываются на знании основных факторов, дестабилизирующих параметры изделий. К числу последних относятся:

- климатические факторы (температура, влажность окружающей среды и др.);

- механические воздействия (вибрация, ударные нагрузки, линейное ускорение);

- электрические воздействия;

- факторы открытого космоса (низкие температуры, глубокий вакуум, радиационные воздействия).

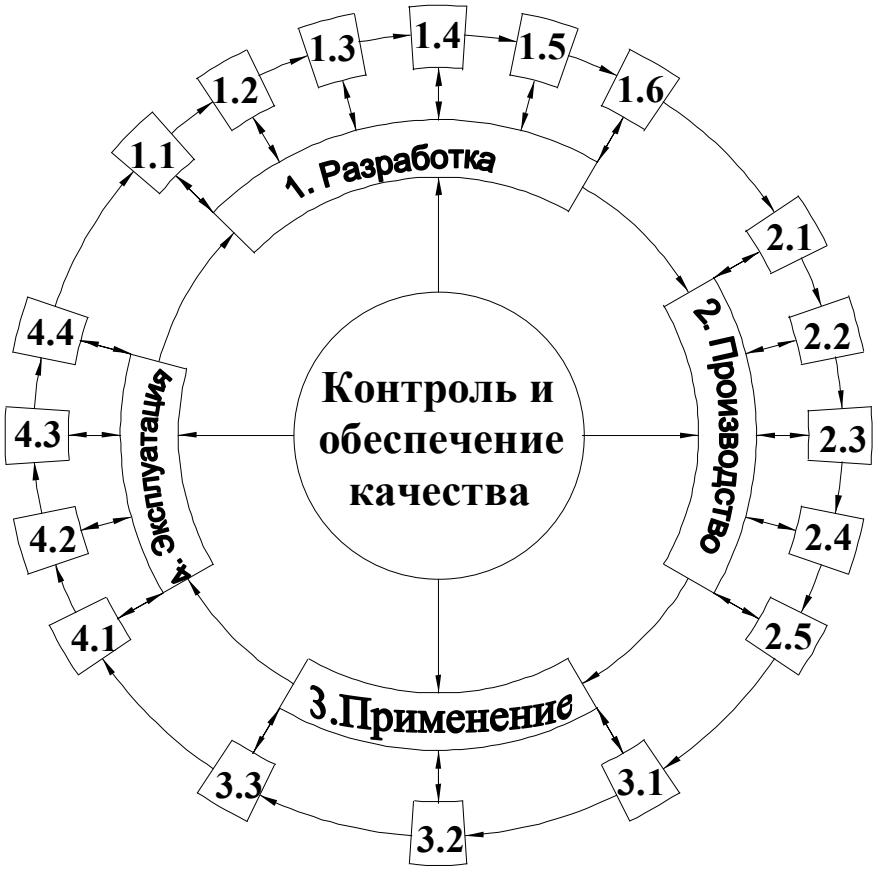


Рис.24. Схема технологии контроля качества пассивных компонентов РЭА:

1.1 - поиск материалов и технологии изготовления;

1.2 - расчет и оптимизация параметров и геометрических размеров пассивного компонента и его элементов;

1.3 - выбор конструктивного оформления с учетом конкретных условий эксплуатации;

1.4 - определение показателей качества и надежности;

1.5 - разработка рекомендаций по допустимым режимам и условиям применения;

1.6 - создание методов и средств неразрушающего контроля качества и анализа отказов;

2.1 - входной контроль сырья, материалов и полуфабрикатов;

2.2 - операционный статистический приемочный контроль;

2.3 - неразрушающий контроль качества заготовок и готовых изделий;

2.4 - контрольные и отбраковочные испытания;

2.5 - анализ отказов, разработка и реализация мероприятий по их устранению;

3.1 - неразрушающий контроль качества пассивных компонентов;

3.2 - рекомендации по применению компонентов в аппаратуре;

3.3 - контроль правильности применения;

4.1 - контроль соблюдения режимов и условий эксплуатации компонентов;

4.2 - рассмотрение возможности эксплуатации в режимах и условиях, не предусмотренных ТУ;

4.3 - анализ результатов эксплуатации компонентов и выработка дополнительных требований к ним;

4.4 - анализ отказов и выдача разработчикам и изготовителям рекомендаций по их устранению.

Расчеты конструктивных и эксплуатационных параметров изделий проводятся дифференцированно, с учетом конкретных условий их эксплуатации. Так, с точки зрения эксплуатации конденсаторов электрические цепи можно условно разбить на две группы.

1. Цепи, где в конденсаторах под действием переменного или импульсного напряжения происходит заметное тепловыделение; к значениям и стабильности электрических параметров в этих случаях жестких требований не предъявляется. Основные требования состоят

в том, чтобы электрические нагрузки не приводили к разрушению конденсатора в течение всего срока службы. Отправной точкой для расчетов в этом случае является перегрев конденсатора за счет электрической нагрузки.

2. Цепи, где конденсаторы используются при малых электрических нагрузках. В этом случае к изделиям предъявляются жесткие требования по электропараметрам и их стабильности. При проведении расчетов исходят из необходимости сохранения критичных параметров в заданных нормах.

Разработанные к настоящему времени инженерные методики расчета позволяют определить допустимые уровни электрических нагрузок для подавляющего большинства типов конденсаторов.

Система анализа отказов направлена на достижение высокой достоверности при определении причин и механизмов отказов и разработку действенных мер по их предупреждению и устранению. Она базируется на знании реальных физических и химических процессов деградации конденсаторных структур и их элементов, использовании современных физических методов анализа элементного состава, строения и свойств конденсированных сред. К числу последних относятся:

- микроскопические методы (оптическая микроскопия, растровая электронная микроскопия, рентгенотелевизионная микроскопия);

- для анализа целостности конструкции, выявления отдельных ее дефектов, обнаружения фазовой неоднородности);

- спектроскопические методы (эмиссионный спектральный анализ, инфракрасная спектроскопия, микрорентгеноспектральный анализ, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, оже-электронная

спектроскопия, вторично-ионная масс-спектрометрия) - для анализа элементного состава материалов, в том числе тонких слоев и приповерхностных областей;

- дифракционные методы (рентгеноструктурный анализ, электронография, нейтронография) - для анализа структуры и фазового состава материала;

- ядерно-физические (активационный анализ, ядерная спектроскопия, спектрометрия обратного рассеяния) - для анализа элементного состава, в том числе неразрушающего анализа распределения легких элементов по глубине.

Важное место в технологии контроля качества занимают методы оценки и прогнозирования (группового и индивидуального) надежности конденсаторов. К настоящему времени для основных типов конденсаторов разработаны модели прогнозирования срока службы (интенсивности отказов), методы группового прогнозирования надежности по результатам нормальных испытаний, по результатам форсированных испытаний, а также индивидуальное прогнозирование надежности с использованием методов неразрушающего контроля качества.

Для решения этих задач необходимы специальные исследования по изучению причин и механизмов отказов различных типов конденсаторов, выявлению информативных параметров для диагностики качества и надежности конденсаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таиров Ю.М., Цветков В.Я. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов.- М.: Высш.школа, 1990. - 423 с.

2. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков.-М.: Энергия, 1976.- 336 с.

3. Полонский Ю.А., Ротенберг П.А., Ханин С.Д. Неорганические диэлектрики для конденсаторостроения: Учеб. пособие.- СПб.: СПбГТУ, 1993.- 80 с.

4. Петропавловский В.С., Хухлович З.В., Трухина И.О. Состояние и проблемы развития конденсаторов с оксидным диэлектриком за рубежом. Обзоры по электронной технике. Сер.5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1988, Вып.1 (1340).:- М.: ЦНИИ "Электроника".- 82 с.

5. Радиокерамика / Богородицкий Н.П., Кальменс Н.В., Нейман М.И. и др. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.- 555 с.

6. Справочник по электрическим конденсаторам. Общие сведения, выбор и применение / В.П.Берзан, Б.Ю.Геликман, М.Н.Гураевский и др. - Кишинев: Штиинца, 1982.- 309 с.

7. Справочник по электрическим конденсаторам / Под ред. И.И.Четверткова , В.Ф.Смирнова - М.: Радио и связь,1983.-576 с.

8. Закгейм Л.Н. Электролитические конденсаторы. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.- 274 с.

9. Ханин С.Д. Проблемы электрофизики металлооксидных конденсаторных диэлектриков.. Обзоры по электронной технике. Сер.5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1990, Вып.1 (1524).- М7: ЦНИИ "Электроника" - 57 с.

10. Вопросы качества радиодеталей / Б.Ю.Геликман, Г.А.Горячева, Л.Л.Кристалинский, В.В.Стальбовский.- М.: Сов.радио, 1980.- 328 с.

11. Воронцов В.Н., Геликман Б.Ю., Кристалинский Л.Л. Прогнозирование надежности радиодеталей (резисторов и конденсаторов).- Л.: Изд. ЛДНТП6 1982.- 28 с.

12. Основные причины и механизмы отказов конденсаторов / Б.Ю.Геликман, Л.Л.Кристалинский, Л.А.Столов, С.Д.Ханин: Обзоры по электронной технике. Сер.8 Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. - М.: Изд. ЦНИИ "Электроника", 1989. - вып.3 (1445).- 64 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ____ *3*

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНДЕНСАТОРНЫМ ДИЭЛЕКТРИКАМ ____ *6*

2. КОНДЕНСАТОРЫ С НЕОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ ____ *17*

3. КОНДЕНСАТОРЫ С ОКСИДНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ ____ *43*

4. КОНДЕНСАТОРЫ С ОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ ____ *60*

5. ИОНИСТОРЫ ____ *68*

6 КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНТАЖА НА ПОВЕРХНОСТЬ (ЧИП-КОНДЕНСАТОРЫ) ____ *74*

7. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ80

ЛИТЕРАТУРА ____ *85*