

ТАНТАЛОВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ – ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Появившиеся более полувека назад танталовые конденсаторы, диэлектриком которых является оксид тантала Ta_2O_5 , прочно вошли в номенклатуру современных емкостных элементов для радиоэлектронной аппаратуры. От своих "старших собратьев" – алюминиевых конденсаторов – танталовые конденсаторы выгодно отличаются более широким температурным диапазоном, повышенными надежностью, долговечностью и сохраняемостью. В последние годы танталовые конденсаторы совершенствовались в направлении повышения их удельного заряда. Целью разработчиков было улучшение массогабаритных характеристик конденсаторов. Однако такое решение приводит к ухудшению их высокочастотных характеристик. Рассмотрим эту проблему подробнее.

Как известно, высокие удельные характеристики оксидных конденсаторов достигаются благодаря высокоразвитой поверхности исходного электрода из вентильного металла, на котором после формовки образуется необходимый слой соответствующего оксида. В алюминиевых конденсаторах высокоразвитая поверхность электрода образуется относительно просто в результате травления поверхности специальной алюминиевой фольги. В отличие от алюминия, повышенная химическая стойкость тантала вызывает технологические трудности, когда его подвергают травлению, чтобы получить развитую поверхность фольгового электрода. Кроме того, технология травления танталовой фольги экологически далеко не безопасна. Поэтому в традиционном базовом конструктивно-технологическом решении наиболее массовых типов танталовых конденсаторов высокоразвитая поверхность электрода реализована в виде внутренней поверхности спрессованного из специальных танталовых порошков объемно-пористого тела, в центре которого расположен проволочный анодный вывод конденсатора.

До недавнего времени совершенствование конденсаторов этого вида в части улучшения их массогабаритных ха-

рактеристик основывалось на применении все более мелкодисперсных танталовых порошков, имеющих все более развитую поверхность и, соответственно, все более высокий исходный удельный заряд. Если в конце прошлого века наиболее распространенными были порошки с удельным зарядом порядка нескольких тысяч микрокулон на грамм, то в современных танталовых порошках удельный заряд уже превышает 100 тыс. мкКл/г. В результате удельные заряды танталовых конденсаторов выросли более чем на порядок. Однако анализ тенденций и направлений в сфере применения танталовых конденсаторов показывает, что указанный путь развития конденсаторов недостаточно эффективен и не может полностью удовлетворить современные требования разработчиков радиоэлектронной аппаратуры. Так, в последние годы существенно расширился диапазон рабочих частот преобразователей в источниках вторичного электропитания аппаратуры (ИВЭП) – традиционной области применения танталовых конденсаторов. Танталовые конденсаторы теперь должны работать и в импульсных режимах, в частности как высокоэффективные накопители энергии для питания приемно-передающих модулей активных фазированных антенных решеток (АФАР). Повысились требования к быстродействию вычислительных блоков аппаратуры, где танталовые низковольтные конденсаторы используются в качестве резервных источников питания. Если ранее традиционная область рабочих частот танталовых конденсаторов реально ограничивалась единицами и десятками килогерц, то сегодня спектр рабочих частот этих конденсаторов расширился до порядков сотен килогерц – единиц мегагерц. Таким образом, возникла объективная предпосылка для повышения частотной стабильности параметров, и в первую очередь – емкости конденсаторов. Однако практикуемый способ повышения удельного заряда конденсаторов за счет использования высокозарядных порошков (в рамках традиционного конструктивно-технологического решения с центральным анодным выводом) дает, к сожалению, совершенно обратный результат.

Эта проблема объективно связана с физической природой формирования емкости конденсаторов на основе объ-

Б.Беленький, к.т.н., Н.Горбунов, к.т.н.
giricond@giricond.ru



емно-пористого тела. Дело в том, что общая емкость таких конденсаторов складывается из параллельно соединенных емкостей, сформированных на отдельных зернах объемно-пористого тела. Аноды этих элементарных емкостных элементов соединяются с проволочным анодным выводом конденсатора, расположенным в центре объемно-пористого тела, через низкоомные контакты спеченных зерен танталового порошка. Катоды же этих элементарных емкостей соединяются с катодным выводом конденсатора, реализованным на периферии объемно-пористого тела, либо тонкими прослойками электролита в порах (оксидно-электролитические конденсаторы), либо тонкими слоями полупроводника в оксидно-полупроводниковых конденсаторах. Очевидно, что у элементарных емкостей зерен, расположенных близко к периферии объемно-пористого тела, катодные соединения имеют существенно меньшие сопротивления, чем у зерен, расположенных, например, непосредственно у анодного вывода. Относительно большие сопротивления таких катодных соединений и зависимость этих сопротивлений от расположения отдельных зерен приводят к тому, что частотные зависимости рассматриваемых конденсаторов определяются многорелаксаторной эквивалентной схемой замещения (рис.1).

На схеме замещения (см. рис.1): $C_{эл}$ – элементарные емкости отдельных зерен (приблизительно равные между собой); $R_1 - R_n$ – значительно различающиеся между собой сопротивления соединений катодов этих емкостей с общим катодным выводом конденсатора.

При существенной разнице величин постоянной времени отдельных релаксаторов (RC-цепочек), образующих схему замещения конденсатора, его емкость и эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС) являются частотно зависимыми параметрами. Чем больше (при прочих равных условиях) номинальная емкость конденсатора, тем больше его размеры и, следовательно, больше различие постоянных времени отдельных релаксаторов, тем сильнее зависимость его эффективной емкости от частоты приложенного напряжения. Именно поэтому разработчики высокочастотных устройств предпочитают использовать параллельное соединение нескольких оксидно-полупроводниковых конденсаторов меньшей емкости вместо установки одного оксидно-электролитического конденсатора соответствующей емкости.

Несколько слов об особенностях использования рассматриваемых конденсаторов в накопительных импульсных режимах, где в спектре воздействующего напряжения содержатся, в том числе, высокие частоты, вплоть до единиц мегагерц. На относительно медленной зарядной стадии энергия накапливается почти во всех релаксаторах (см. рис.1) и её величина определяется, соответственно, номинальной емкостью конденсатора. На более быстрой разряд-

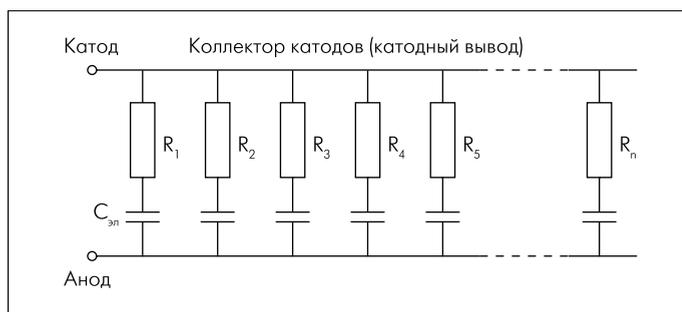


Рис. 1. Эквивалентная схема конденсаторов с объемно-пористым анодом

ной стадии релаксаторы с большими постоянными времени просто "не успевают" сколько-нибудь значимо разрядиться, и, соответственно, далеко не вся накопленная в конденсаторе энергия отдается в нагрузку. В этом случае результат, по сути, эквивалентен снижению эффективной емкости конденсатора. Это особенно заметно в оксидно-электролитических конденсаторах при отрицательных температурах, поскольку в таких условиях резко снижается удельная электропроводность электролита.

Говоря о перспективах данного вида конденсаторов, следует отметить еще одно важное обстоятельство.

К сожалению, физика рассматриваемых явлений такова, что по мере использования все более высокозарядных и, следовательно, мелкодисперсных порошков для повышения удельного заряда конденсаторов, размеры пор, заполненных электролитом или полупроводником, заметно уменьшаются. В результате возрастают сопротивления катодных соединений. Именно поэтому повышение удельного заряда рассматриваемых конденсаторов неминуемо приводит к ухудшению их частотных характеристик и, соответственно, к снижению эффективности их применения в высокочастотных блоках аппаратуры. При этом, естественно, возрастает и ЭПС конденсаторов. Это заставляет задуматься об эффективности применения таких конденсаторов и в традиционном, относительно низкочастотном диапазоне режимов.

Сказанное подтверждается, например, тем обстоятельством, что разработчики современных ИВЭП на высоко-

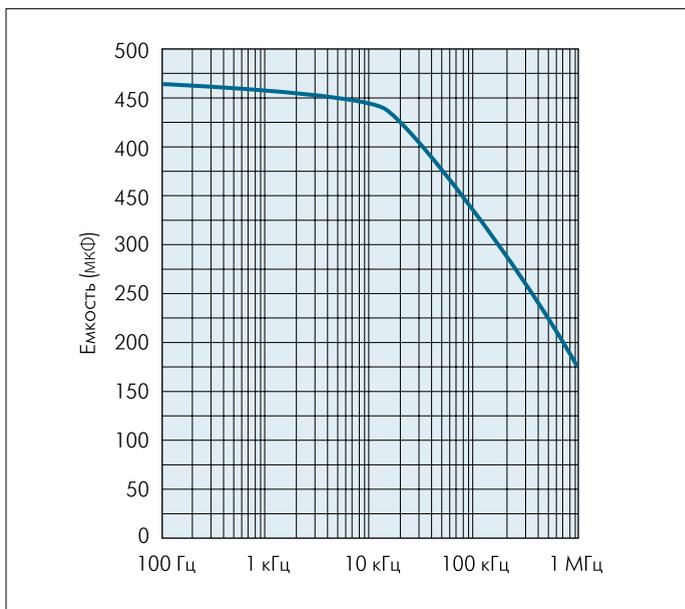


Рис. 2. Зависимость емкости конденсатора фирмы KEMET от частоты приложенного напряжения

частотных преобразователях предпочитают использовать вместо современных малогабаритных чип-конденсаторов конденсаторы K53-22, разработанные более четверти века назад и не отвечающие в полной мере современным требованиям поверхностного монтажа. Из-за низкого исходного удельного заряда порошков эти конденсаторы имеют низкий собственный удельный заряд, но при этом (и это оказывается главное!) относительно большие размеры пор в рабочем теле обеспечивают конденсатору удовлетворительную частотную стабильность емкости и низкое ЭПС. В мировой практике рассматриваемую проблему применительно к оксидно-полупроводниковым чип-конденсаторам частично решают, переходя на так называемую мультианодную конструкцию конденсаторов. В ней вместо одного анода применяют параллельное соединение, например, трех анодов с соответственно уменьшенной емкостью. Эффективность подобного решения можно оценить, рассмотрев приведенную в каталоге фирмы KEMET частотную характеристику емкости современного мультианодного чип-конденсатора

Т510X477M006AS с номинальным напряжением 6,3 В и номинальной емкостью 470 мкФ (рис. 2).

Как видим, в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц емкость конденсатора снижается практически в три раза. Можно ли предлагать такой конденсатор в качестве фильтра в диапазоне частот десятки – сотни килогерц? Ответ очевиден.

Возникает другой вопрос: в чем же эффективность декларируемого повышения удельного заряда конденсатора, скажем, на 30%, если этот заряд оценивается по номинальной емкости, измеренной на частоте 50 Гц, а на рабочих частотах от этого повышения не остается и следа? Ответ однозначен: декларируемое повышение удельного заряда при сохранении традиционных конструктивно-технологических решений не только не повышает, но и снижает эффективность применения таких конденсаторов в высокочастотных режимах, а сам так называемый "повышенный удельный заряд" конденсаторов остается "вещью в себе"!

Что же дальше?

Для начала следует признать тот факт, что для удовлетворения существующих и будущих требований разработчиков аппаратуры нужна самостоятельная номенклатура высокочастотных танталовых оксидно-электролитических и оксидно-полупроводниковых конденсаторов. Эта номенклатура должна основываться на новых базовых конструктивно-технологических решениях, которые обеспечат существенное снижение сопротивления катодных соединений ($R_1 - R_n$ на рис. 1) и выравнивание их значений по объёму рабочего тела конденсатора. Кроме того, следует принять меры по снижению собственной индуктивности конденсаторов, чтобы повысить их резонансную частоту. Только в этом случае удастся обеспечить приемлемую частотную стабильность емкости конденсаторов, низкое значение их ЭПС и, в конечном итоге, низкое полное сопротивление конденсаторов в широком диапазоне частот. Конденсаторы на основе традиционного базового конструктивно-технологического решения, какими бы красивыми эпитетами ("с низким ЭПС" или даже "со сверхнизким ЭПС") их ни награждали, не могут быть в полной мере признаны высокочастотными.

К сожалению, НИОКР по поиску и реализации современных конструктивных и технологических решений высокочастотных танталовых конденсаторов в последние годы всерьез не проводились в связи с отсутствием финансирования. При формировании перспективных планов и долгосрочных программ в области конденсаторов чрезвычайно важно рассматривать и финансировать эти работы как приоритетные.

Следует отметить, что обсуждаемые в статье проблемы отнюдь не новы. Еще в конце 70-х годов прошлого века, предвидя необходимость улучшения частотных характеристик танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов, НИИ "Гириконд" разработал не имеющую мировых аналогов



электрофорезную технологию формирования тонкого объемно-пористого анода непосредственно на фольговом носителе. На основе этой технологии была разработана и освоена в производстве первая серия высокочастотных конденсаторов К53-25, которые и сегодня применяются в аппаратуре. В конце 1980-х – начале 1990-х годов в НИИ "Гириконд" был проведен комплекс НИОКР, основной целью которых было создание специальных высокочастотных танталовых оксидно-электролитических конденсаторов напряжением 63 В и емкостью порядка десятков – сотен микрофарад, пригодных в качестве накопителей энергии в импульсных модуляторах бортовой РЛС. На этапе НИР было показано, что существующее базовое решение танталовых оксидно-электролитических конденсаторов не позволяет удовлетворить требованиям по температурной и частотной зависимости емкости, а также по величине и температурной стабильности ЭПС. В результате была разработана и реализована в производстве специальная технология формирования тонкого объемно-пористого слоя на танталовой фольге. Это послужило основой для создания в 1992 году специальных высокочастотных танталовых оксидно-электролитических конденсаторов К51-2. НИИ "Гириконд" и сегодня – единственное в России предприятие, которое владеет по-

добными технологиями. Аналогичные зарубежные конденсаторы на отечественном рынке электронных компонентов отсутствуют, и сведения о них в периодических изданиях и каталогах не публикуются.

Конечно, упомянутые выше технологии и решения морально устарели и не соответствуют в полной мере требованиям времени по уровню технологичности, частотным и массогабаритным характеристикам.

В НИИ "Гириконд" есть идеи, есть предварительно проработанные и апробированные новые решения по созданию современных высокочастотных танталовых конденсаторов с требуемыми характеристиками. Эти решения основаны на реализации плоской геометрии объемно-пористого анода, формируемого на фольговом носителе. Такой подход позволяет решить задачу, о которой говорилось выше: снизить сопротивления катодных соединений и выровнять их значения по объему конденсатора, и за счет этого уменьшить зависимость емкости конденсатора от частоты приложенного напряжения. Подробно об этих решениях писать пока рано, но надеемся, они будут реализованы в ближайшие годы в соответствующих комплексах НИОКР и освоены в отечественном производстве.

Но это уже совсем другая история...

