

Конденсаторы для ВЧ/СВЧ.

Часть 4

Василий ГОРБАЧЕВ
Виктор КОЧЕМАСОВ,
к. т. н.
Леонид ТАЛАЛАЕВСКИЙ

В четвертой части публикации приведены свойства и применение стеклянных и слюдяных конденсаторов (Glass & Mica capacitors). Данные типы конденсаторов относятся к классу изделий с твердым неорганическим диэлектриком. К этому же классу принадлежат и пленочные конденсаторы с диэлектриком из твердых неорганических пленок.

Стеклянные конденсаторы

Но, тем не менее, многие компании-производители выделяют стеклянные конденсаторы в отдельный класс. Это связано с особенностями стекла как диэлектрика. Исторически стеклянные конденсаторы создавались взамен слюдяных конденсаторов (Mica capacitors), поскольку стекло обладает более высокой электрической прочностью при меньших толщинах и имеет более высокую диэлектрическую постоянную. Кроме того, стекло более термостойкое и отличается хорошей свариваемостью с металлами. С развитием новых технологий производства стекла появились новые соединения, такие как стеклокерамика (другие названия: «пирокерамика» или «фотокерамика») или стеклоэмаль. Это дало возможность изготавливать конденсаторы на основе стекла для самых разных областей применения. Особенностью стекла как диэлек-

трика является его высокая термостойкость и линейная зависимость диэлектрической постоянной от температуры. Поэтому стеклянные конденсаторы имеют практически линейный ТКЕ (рис. 1).

Кроме того, стекло, в отличие от других материалов, применяемых при производстве конденсаторов, очень устойчиво к внешнему радиационному воздействию, что позволяет эксплуатировать стеклянные конденсаторы в таких условиях, когда другие типы конденсаторов выходят из строя. Это хорошо видно на рис. 2.

Конструктивно стеклянные конденсаторы изготовлены так же, как пленочные или многослойные керамические конденсаторы. С тем отличием, что чаще всего внутренние электроды в них выполняются напылением серебра. Это делает стеклянные конденсаторы более дорогими, чем пленочные или керамические. На рис. 3 видно, что наряду со слюдяными стеклянные конденсаторы занимают по своим параметрам промежуточное положение между керамическими и пленочными конденсаторами.

Основным производителем стеклянных конденсаторов признана компания AVX. Ее специалисты справедливо считают простоту конструкции одной из составляющих надежности изделия, поэтому для

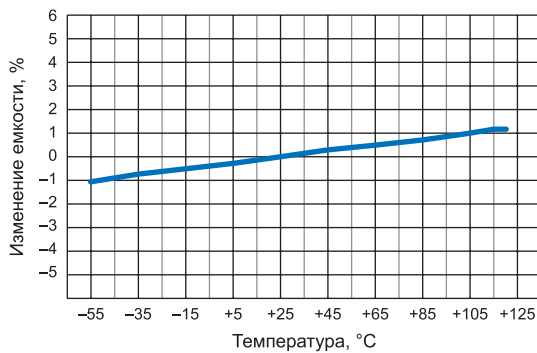


Рис. 1. Зависимость изменения емкости стеклянного конденсатора от температуры



Рис. 2. Область работоспособности материалов под воздействием внешнего излучения

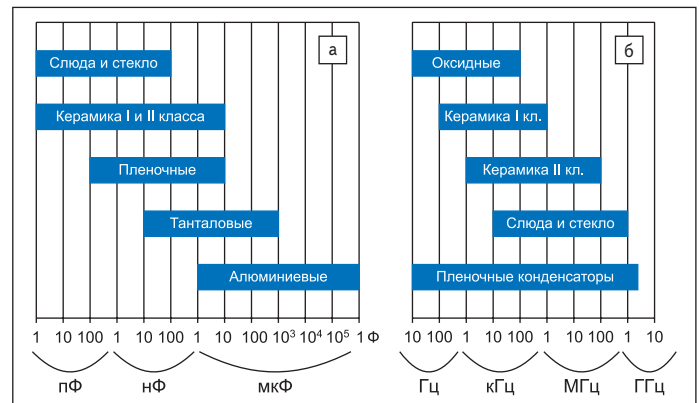


Рис. 3. Распределение конденсаторов: а) по номиналу; б) по рабочей частоте

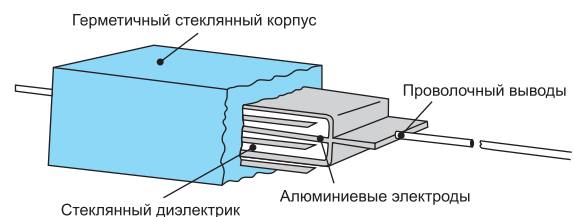


Рис. 4. Конструкция стеклянного конденсатора AVX

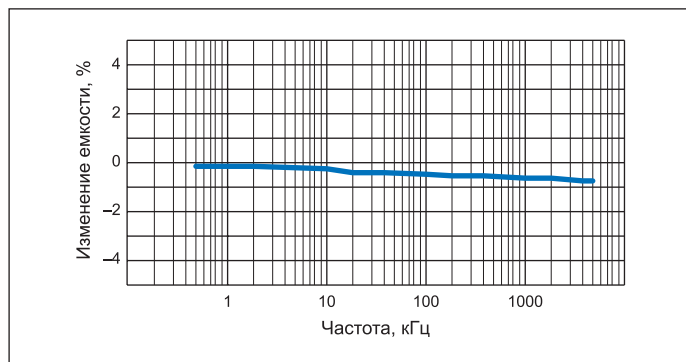


Рис. 5. Зависимость изменения емкости от частоты (AVX)

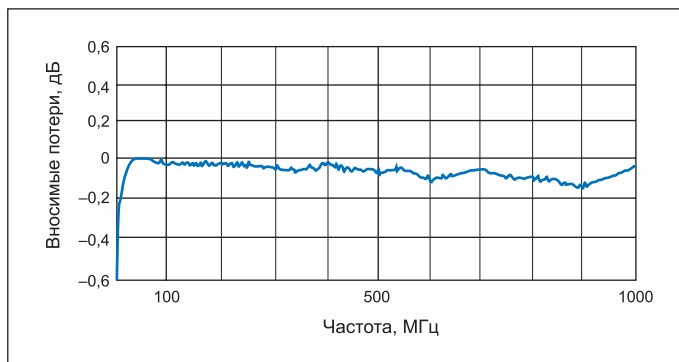


Рис. 7. Вносимые потери в частотном диапазоне. Cornell Dubilier

выпуска стеклянных конденсаторов используется самая простая классическая конструкция многослойного конденсатора (рис. 4). Например, в [1] подчеркивается, что в аксиальных конденсаторах предусмотрено только три материала: стекло для диэлектрика и корпуса, алюминиевая фольга для электродов и проволока для выводов. Радиальные конденсаторы содержат дополнительно материал покрытия корпуса.

AVX предлагает три линейки конденсаторов. Все они в выводных корпусах. Первая линейка содержит высоковольтные (до 500 В) изделия в прямоугольных корпусах с аксиальными и радиальными выводами (серии изделий с обозначением CY, CYFR, CYR). Частотный диапазон этой серии достигает 3 ГГц и температурный $-55...+125$ °С. Вторая серия имеет в обозначении аббревиатуру ET (Elevated Temperature — ET6, ET7, ET8, ET10, ET15) и, соответственно, расширенный температурный диапазон $-75...+200$ °С. Эта серия также выпускается в прямоугольных корпусах с аксиальными и радиальными выводами. Рабочий диапазон напряжений до 50 В, частотный до 300 МГц. Если две первые серии характеризуются диапазоном емкостей до 2400 пФ, то третья серия (имеет в обозначении букву К) изготавливается в цилиндрических корпусах только с аксиальными выводами и анонсировалась как серия с улучшенным соотношением емкость/форм-фактор. Имея меньшие размеры, конденсаторы этой серии выпускаются на диапазон емкостей до 100 000 пФ. В серии есть как образцы с расширенным температурным диапазоном (ET31, ET32), так и с обычным (серии СК, СКР). Рабочее напряжение до 50 В и частотный диапазон до 300 МГц.

Одним из преимуществ стеклянных конденсаторов является высокая стабильность параметров, в том числе изменение емкости в частотном диапазоне. Для всех трех линеек конденсаторов от AVX этот параметр представлен на рис. 5 и составляет менее 1%.

Слюдяные конденсаторы

Хотя выше уже акцентировалось, что стеклянные конденсаторы появились как замена

слюдяным, тем не менее в производственных линейках некоторых фирм присутствуют и слюдяные. Причины долгожительства слюдяных конденсаторов (напомним, что исторические слюдяные конденсаторы появились одними из первых) в востребованности их свойств в современной электронной индустрии — они имеют «прекрасные температурные свойства, низкие потери на всех частотах, высокую диэлектрическую прочность и стабильность параметров» [2]. Так, в продуктовой линейке промышленной группы EHXELIA есть серии конденсаторов NT72, NT96 из восстановленной слюды, пропитанной резиной. Заявленный температурный диапазон $-55...+125$ °С, диапазон напряжений 630–25 000 В. Изделия используются в высоковольтных фильтрах и годны к применению в военной и аэрокосмической электронике. Другая серия на основе посеребренной слюды не такая высоковольтная — до 5000 В (CA1, CA2, CA17, CA19), имеет лучшее по сравнению с предыдущей линейкой допустимое отклонение емкости: 1–10% против 5–20% при том же температурном диапазоне. Эта серия рекомендована к применению в фильтрах, линиях задержки, высокочастотных генераторах, блокировании DC и также удовлетворяет стандартам MIL.

Некоторый сумбур в представлении этих изделий потребителю вносит тот факт, что в [2] слюдяные конденсаторы представлены в одной таблице с Film-конденсаторами на основе полимеров, хотя слюда по типу диэлектрика, конечно же, должна быть отнесена к классу неорганических материалов. Понятно, что классификационным параметром в данном случае выбрана «пленочность», и тем не менее этот факт еще раз подчеркивает уже упоминавшийся тезис о том, что в мировой конденсаторной индустрии отсутствует общепринятая классификация конденсаторов.

Значительный набор слюдяных конденсаторов присутствует и в продуктовой линейке фирмы Cornell Dubilier. Производителем они позиционируются в основном как замена керамическим и фарфоровым конденсаторам в приложениях с жесткими по механическим нагрузкам условиями эксплуатации.



Рис. 6. Слюдяные конденсаторы в окукленных корпусах Cornell Dubilier [3]

Наряду с изделиями для энергетических приложений Cornell выпускает конденсаторы в окукленных корпусах с радиальными выводами для VHF/UHF-диапазонов и чип-конденсаторы для RF.

Одной из основных серий выводных изделий является CD17–18. Это конденсаторы с низкими вносимыми потерями до 1 ГГц (рис. 6).

Серия имеет несколько расширенный температурный диапазон $-55...+150$ °С, низкое допустимое отклонение емкости не более 5% и высокую линейность емкости, сравнимую с керамикой первого класса. Производителем подчеркиваются низкие вносимые потери, не превышающие 0,2 дБ в рабочем диапазоне (рис. 7).

Интересны для разработчиков аппаратуры и две серии слюдяных чип-конденсаторов Cornell Dubilier — MC и немагнитная MCN (рис. 8).



Рис. 8. Слюдяные чип-конденсаторы Cornell Dubilier [4]

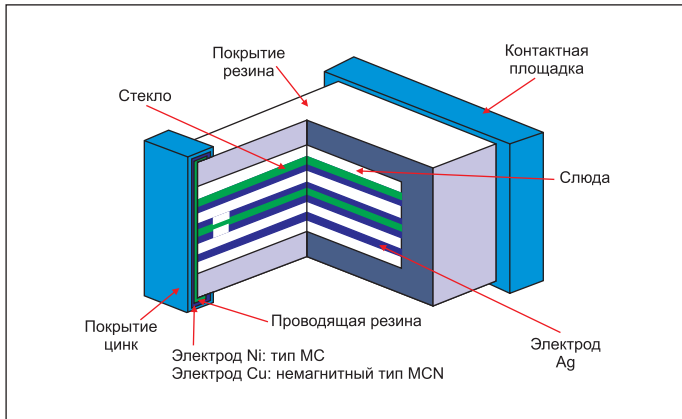


Рис. 9. Конструкция слюдяного чип-конденсатора Cornell Dubilier

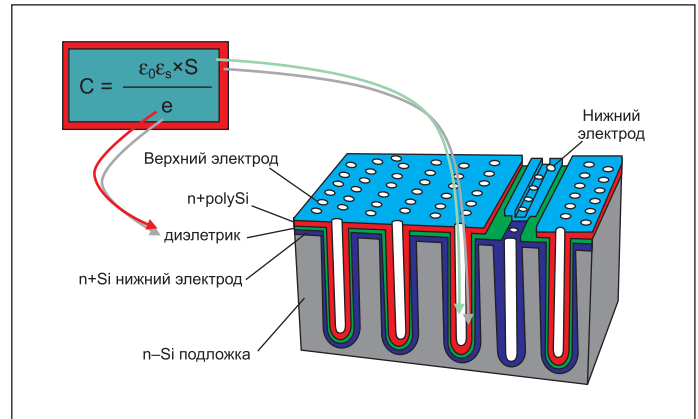


Рис. 12. 3D кремниевый конденсатор первого поколения от IPDiA

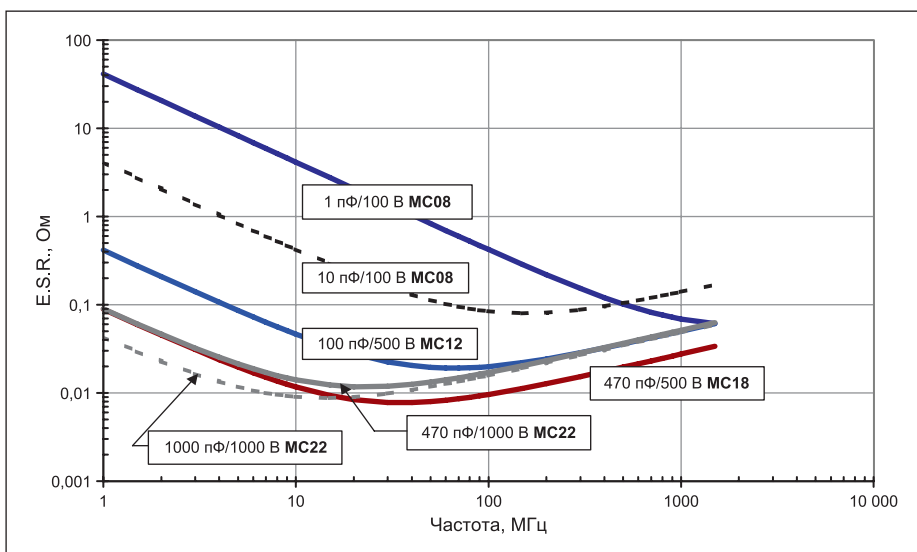


Рис. 10. Зависимость ESR от частоты для серий MC и MCN Cornell Dubilier

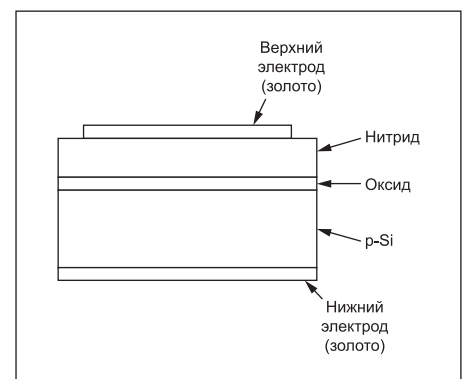


Рис. 11. Устройство MNOS-конденсатора

в отдельный тип изделий и активно применяются в микроволновой технике. Как уже отмечалось, технология MNOS является развитием MIS/MOS-технологии. На рис. 11 представлена упрощенная конструкция MNOS-конденсатора.

В MOS-технологии на положительно легированную полупроводниковую кремниевую подложку (p-Si) методом химического осаждения из паровой фазы наносится тонкий слой диоксида кремния. При изготовлении MNOS-конденсатора поверх диоксида наносится еще слой нитрида кремния. Появление второго слоя диэлектрика снижает потери и температурный коэффициент емкости. Типовое значение температурного коэффициента составляет 40–50 ppm/°C. Двухслойный диэлектрик, так же как классический «сэндвич», применяемый в механических конструкциях, сокращает зависимость от механических нагрузок и резонансов и повышает стабильность параметров конденсатора. MNOS-конденсаторы выпускаются как в виде чипов, так и с выводами и применяются в диапазоне до 20 ГГц.

Еще одна интересная конструкция кремниевого конденсатора предложена и реализована в изделии фирмы IPDiA (в 2016 году приобретена фирмой Murata, с 2017-го называется Murata Integrated Passive Solutions). Формально это однослойный кремниевый конденсатор. Но фактически структура этого единствен-

Они одинаковы по конструкции и различаются только материалом наружных электродов. В серии MC они выполнены из никеля, а MCN — из меди (рис. 9).

Обе серии имеют четыре форм-фактора: 0805, 1210, 1812, 2220 (EIA) и рабочее напряжение до 1000 В. Зависимость сериального сопротивления от частоты представлена на рис. 10.

Наиболее известными производителями стеклянных и слюдяных конденсаторов являются AVX (стеклянные), EXXELIA и Cornell Dubilier (слюдяные). К производителям слюдяных также можно отнести фирму Custom Electronics, Inc., которая выпускает несколько серий выводных высоковольтных конденсаторов для военных, ракетных, спутниковых, низкотемпературных и медицинских приложений.

Конденсаторы с использованием кремния

Рассмотрение кремниевых конденсаторов начнем с замечания о том, что технология изготовления этих устройств базируется

на хорошо отработанных методах создания силиконовых подложек в микроэлектронной промышленности.

Первое из рассматриваемых изделий можно назвать полупроводниковым конденсатором с усложненной структурой диэлектрика. Речь идет о технологии MNOS (metal-nitride-oxide-semiconductor), которая является развитием широко известной технологии MIS (metal-insulator-semiconductor). В случае когда в качестве диэлектрика используется оксид или диоксид кремния, технология называется MOS (metal-oxide-semiconductor). Конденсаторы этого типа производятся фирмами MACOM Technology Solutions и Vishay. Исторически полупроводниковые конденсаторы в основном использовались в микросхемах, поскольку технология их производства позволяла формировать емкость на одной подложке с активными компонентами. Обычно добротность таких конденсаторов невелика, но низкая стоимость производства в данном случае становилась определяющей. Со временем, в силу взрывного развития технологий производства полупроводниковых подложек, MIS-конденсаторы выделились

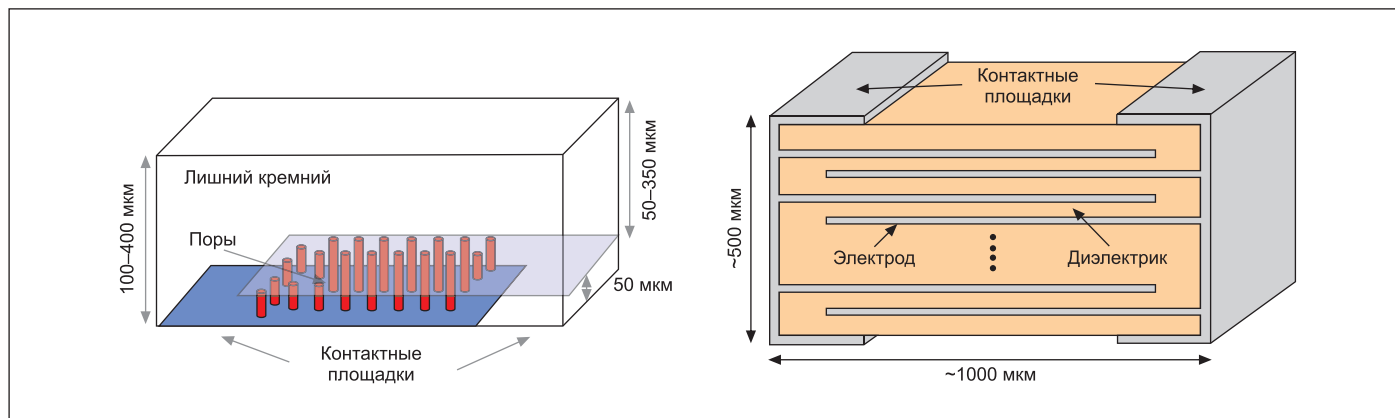


Рис. 13. Относительные размеры 3D- и MLCC-конденсаторов

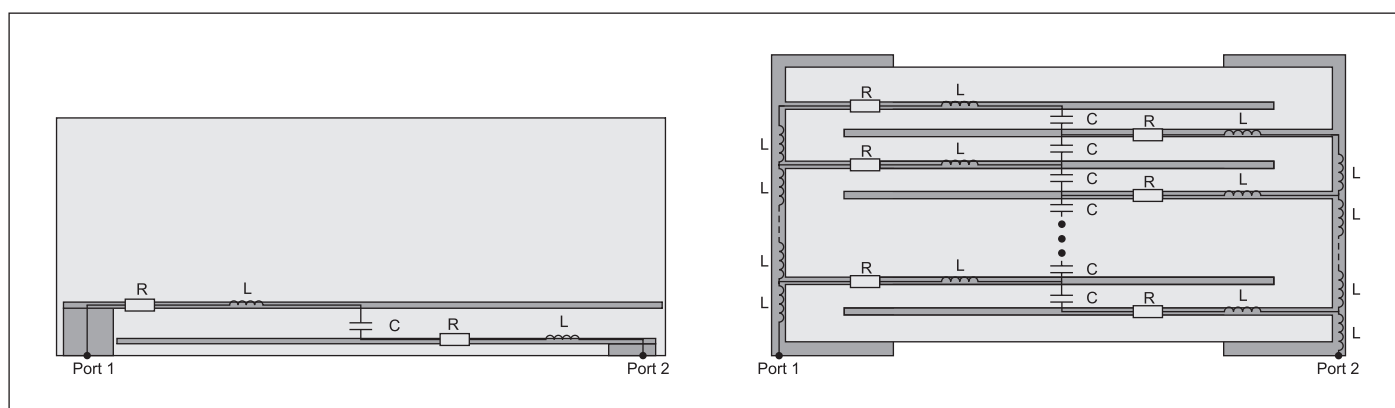


Рис. 14. Распределенные паразитные параметры 3D- и MLCC-конденсаторов

ного слоя столь сложна, а выгоды от его создания столь существенны, что данный тип конденсаторов сравнивают не с «одноклассниками» из класса SLCC, а с многослойными конденсаторами (MLCC). В документации фирмы-изготовителя такой тип конденсатора называется трехмерным конденсатором высокой плотности (The 3D high-density capacitor). На рис. 12 представлено устройство трехмерного конденсатора первого поколения.

Суть конструкции трехмерного конденсатора состоит в том, что в объеме силиконовой подложки посредством технологии сухого травления создается регулярная структура калиброванных пор. Затем в этих порах легированным кремнием формируется нижний электрод конденсатора. Потом идет тонкий слой диэлектрика, поверх которого посредством термовакuumного испарения с последующим осаждением формируется верхний электрод также из легированного кремния [5]. На рис. 12 присутствует выноска с хорошо известной формулой, связывающей емкость конденсатора с тремя основными конструктивными параметрами: площадью обкладок (S), толщиной диэлектрика (e) и диэлектрической проницаемостью материала диэлектрика (ϵ_s). Представленная конструкция использует сразу два из трех возможных компонентов формулы (указаны стрелками) для увеличения емкости.

Необходимо отметить, что в настоящее время производится уже третье поколение 3D-конденсаторов. Для количественного разделения поколений используется такой параметр, как емкость в пересчете на 1 мм^2 площади конденсатора. Устройства первого поколения имели плотность емкости 25 нФ/мм^2 , второго — 80 нФ/мм^2 , а современное, третье поколение обладает емкостью 250 нФ/мм^2 [5]. Специалисты фирмы особенно подчеркивают тот факт, что при производстве этих конденсаторов применяются только стандартные процессы и зарекомендовавшие себя материалы.

Размещение высокой емкости в ограниченном объеме однослойного конденсатора позволяет сравнивать эти конденсаторы с многослойными. В документе [5] сравнивается 3D кремниевый конденсатор IPDiA, выполненный в виде СМД чип-компонента, и стандартный многослойный чип-конденсатор 0402 (EIA) (рис. 13).

На рис. 13 видно, что для набора заявленной емкости стек слоев многослойного конденсатора должен иметь высоту 500 мкм, в то время как такая же емкость трехмерного конденсатора занимает лишь 50 мкм. На рис. 14 показано, как сама конструкция многослойного конденсатора порождает паразитные распределенные параметры емкости по сравнению с таковыми же у конструкции от IPDiA.

В документе [6] сравниваются температурные свойства 3D- и MLCC-конденсаторов и их отношение к постоянному смещению (DC-bias) (рис. 15, 16).

Обратит внимание, что конденсаторы IPDiA не только имеют ярко выраженную линейную зависимость емкости от температуры, но и в отличие от керамик первого класса (C0G) и второго класса (X7R) сохраняют температурную стабильность емкости до $+200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Сравнение DC-bias показывает, что конденсаторы IPDiA имеют свойства, сравнимые с керамиками первого класса.

Основной диапазон применения трехмерных конденсаторов высокой плотности от IPDiA достигает 67 ГГц. В производственной линейке IPDiA (Murata Integrated Passive Solutions) имеется более десяти серий 3D кремниевых конденсаторов. Среди них низкопрофильные (80 мкм), высокотемпературные ($+200 \text{ }^\circ\text{C}$), сверхвысокотемпературные ($+250 \text{ }^\circ\text{C}$), конденсаторы для проводного монтажа и сверхширокополосные до 67 ГГц [6].

Кроме того, из изделий, выпускаемых компанией IPDiA, следует отметить:

- высокостабильные кремниевые конденсаторы серии HSSC423, имеющие температурную стабильность $\pm 0,5\%$ в диапазоне температур $-55 \dots +150 \text{ }^\circ\text{C}$;

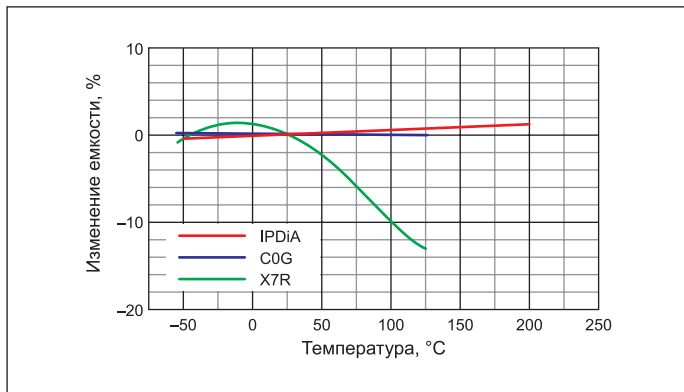


Рис. 15. Изменение емкости от температуры 3D и MLCC

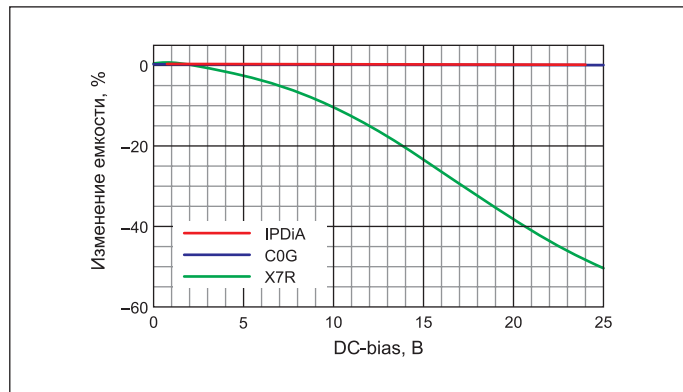


Рис. 16. Изменение емкости от приложенного постоянного напряжения

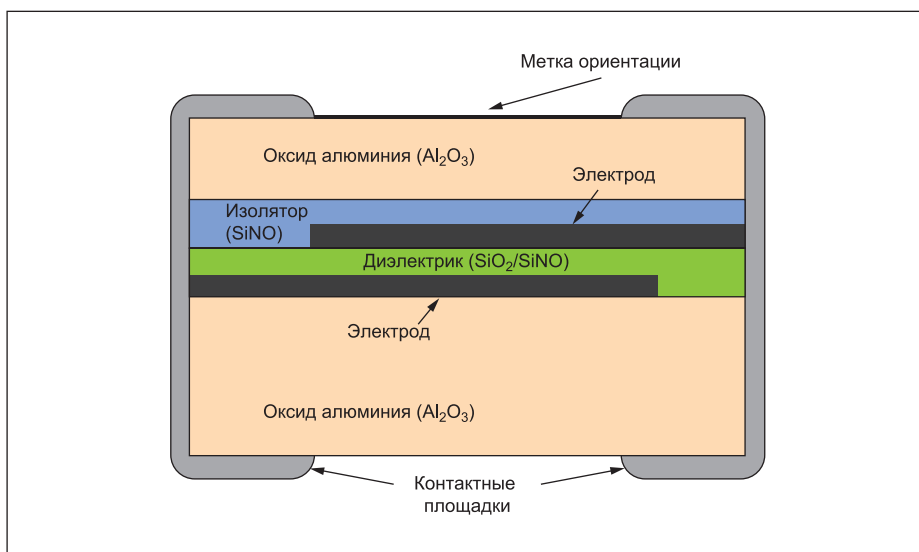


Рис. 17. Структура слоев конденсатора серии ACCU-P (AVX)

саторов. Процесс термической обработки (спекания) керамических слоев совместно с металлическими приводит к увеличению потерь, снижению диэлектрической константы и сопротивления изоляции. Также возрастает вариативность проводимости электродов конденсатора от изделия к изделию и уменьшается точность размеров. Использование высокоточных технологий, заимствованных из полупроводникового производства, таких как осаждение металла в условиях высокого вакуума, фотолитография с контролем толщины линии менее чем в 2 мкм, химическое осаждение диэлектриков из паров сред, позволило создать серию тонкопленочных конденсаторов с точными параметрами. Упрощенно конструкция конденсатора серии ACCU-P приведена на рис. 17.

В качестве изолирующих материалов с низкими потерями в этом изделии использованы оксинитрид и диоксид кремния (рис. 17). В сочетании с высокопроводящими электродами это позволило получить высокочастотные конденсаторы с низким ESR.

Исследование двух наборов конденсаторов, в каждом из которых было по пять образцов конденсаторов емкостью 3,3 пФ, представлено на рис. 18. В первый набор входят

- вертикальные конденсаторы серии WTSC144, имеющие температурную стабильность $<\pm 1,5\%$ в диапазоне температур $-55...+200$ °C;
- низкопрофильные конденсаторы серии LPSC424 толщиной до 80 мкм номиналом 0,68–100 нФ;
- встраиваемые кремниевые конденсаторные сборки с проволочными перемычками серии ETSC, выпускаемые толщиной до 250 мкм и предназначенные для работы при температуре до +200 °C;
- бескорпусные кремниевые конденсаторы серии XTSC427, предназначенные для работы при температуре до +250 °C и имеющие номинал 10 нФ – 1 мкФ.

И в завершение рассмотрения экспансии кремния в конденсаторную индустрию приведем два примера от компании AVX (Kyocera Group). В настоящее время в производственной линейке этой фирмы широко представлены тонкопленочные¹ конденсаторы серии ACCU.

ACCU — это не аббревиатура, а сокращение от слова ассигасу — «точность» [7]. Предпосылкой к созданию новой технологии производства конденсаторов послужила недостаточная, по мнению специалистов AVX, точность параметров керамических конден-

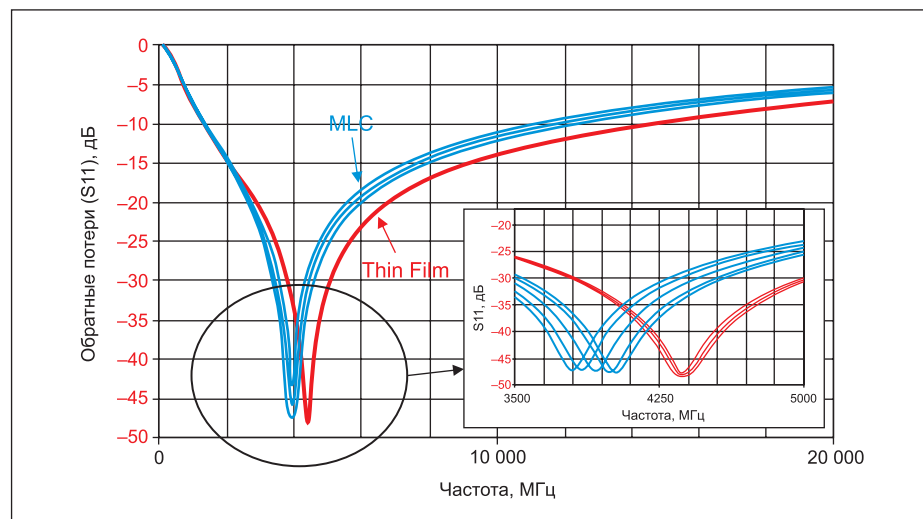


Рис. 18. Сравнение MLCC и ACCU-P конденсаторов 3,3 пФ (AVX)

¹ Термин «тонкопленочные» (Thin Film, TF) использован производителем как название технологии с применением кремния, в то время как в отраслевой традиции термином Film обозначаются пленочные конденсаторы с диэлектриком на основе органических полимеров.

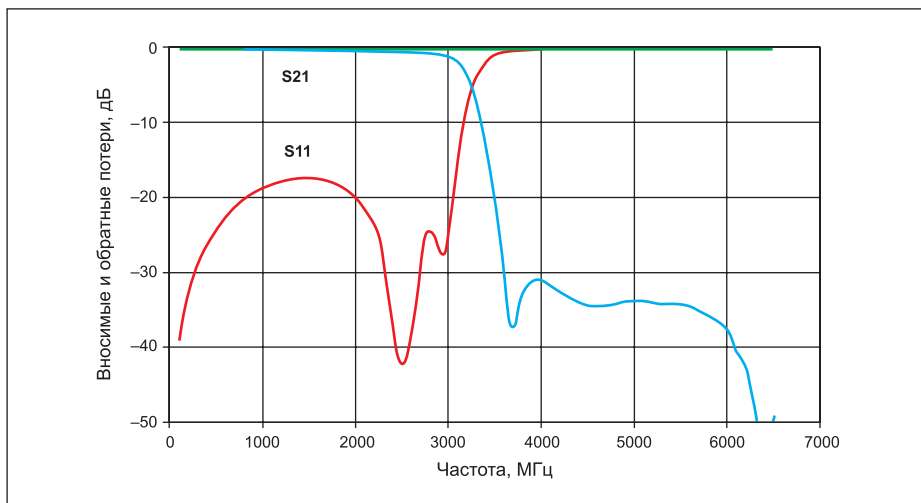


Рис. 19. Вносимые (S21) и обратные (S11) потери тонкопленочного чип-фильтра AVX

В контексте основной темы статьи упоминание о фильтре не будет выглядеть эклектично, поскольку понятно, что конструкция фильтра содержит конденсатор. Линейка чип-ФНЧ 0805 имеет фильтры с частотами 750 МГц – 4 ГГц с низким уровнем вносимых потерь и импедансом 50 Ом. Рабочая температура $-40...+85$ °С. Изделия отвечают требованиям RoHS. На рис. 19 представлены зависимости вносимых и обратных потерь фильтра LP0805H2900ASTR от частоты. Рабочая частота фильтра 2900 МГц. ■

Литература

1. AVX Glass Dielectric Capacitors. Version 15.2.
2. Product & Solutions. EXXELIA. Overview of all Exxelia product lines. www.exxelia.com/us/technical-center
3. www.cde.com/resources/catalogs/CD17-CDV18.pdf
4. www.cde.com/resources/catalogs/MC.pdf
5. Silicon Capacitors Benefits for Phase Sensitive Broadband Applications. White Piper. Rev. 2. IPDiA, 2015.
6. 3D Silicon Capacitors. Product Line Leaflet. IPDiA, 2016.
7. www.datasheets.avx.com/Accu-P.pdf
8. AVX Thin Film Product Update. December 2016.

MLCC-изделия, во второй ACCU-P. Графики обратных потерь показывают, что конденсаторы, сделанные по кремниевой технологии, имеют не только лучшую повторяемость свойств от изделия к изделию, но и лучшие частотные характеристики.

И у этих конденсаторов имеется чип-форма, что, конечно же, наряду с частот-

ными свойствами тонких пленок облегчает их использование в высокочастотном оборудовании. Очень наглядно миниатюризация кремниевых компонентов представлена в примере, где в чип-форму облекается даже не отдельный конденсатор, а фильтр нижних частот. Это ФНЧ фирмы AVX, выпускаемый в чип-корпусе 0805 ($2,03 \times 1,55 \times 0,8$ мм) [8].