

Конденсаторы для ВЧ/СВЧ.

Часть 1

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

В статье дан обзор разных типов конденсаторов. В первой части публикации приведены свойства керамических конденсаторов и их классификация, а также рассмотрена классификация однослойных керамических конденсаторов.

Применение конденсаторов в ВЧ и СВЧ

В высокочастотных приложениях наибольшее распространение получили конденсаторы на основе керамических, стеклянных и органических диэлектриков. Из числа последних наибольшее распространение получили изделия на основе диэлектриков из поликарбоната, полиэстера и полипропилена. Также в текущем десятилетии нынешнего века получили значительное развитие конденсаторы с использованием кремниевых материалов и технологий.

Рассмотрим наиболее распространенные и широко применяющиеся сегодня типы конденсаторов. В связи с развитием новых технологий микроминиатюризации и широким распространением их не только в специальных отраслях промышленности, но и в бытовой технике одним из самых распространенных типов конденсаторов являются керамические конденсаторы.

Керамические конденсаторы

Типы и свойства керамики

Данный тип конденсаторов относится к конденсаторам с неорганическим диэлектриком. Керамические конденсаторы — это самый массовый вид конденсаторов, что обусловлено их высокими и стабильными характеристиками, простотой производства, пригодностью для автоматизированного монтажа [1]. Керамические конденсаторы получили свое название потому, что в качестве диэлектрика в них применяется радиочастотная керамика на основе титана, циркония и оксидов других материалов. Чаще всего радиочастотная керамика производится из диоксида титана (TiO_2), титаната бария (BaTiO_3) или титаната стронция (SrTiO_3), хотя точные формулы керамики у разных производителей различаются.

Теперь необходимо сказать несколько слов о классификации керамических конденсаторов. Достаточно часто «сверхцелью» обзорной статьи по электронным компонентам становится попытка дать разработчику

универсальный инструмент по выбору компонентов для использования в конкретном применении, основанный на классификации по различным параметрам. Применительно к керамическим конденсаторам попытки создать классификацию «в помощь разработчику» надо признать скорее неудачными. У этого есть не одна причина, и в «сухом остатке» правильнее будет признать, что самый надежный способ выбора керамических конденсаторов для конкретного применения — читать даташит.

Достаточно упомянуть, что свои версии классификации предложены двумя инженерными сообществами: IEC (International Electrotechnical Commission) и EIA (Electronic Industries Alliance). Классификации имеют различия. Так, EIA разделяет керамику на четыре класса, а IEC — на три. Тот факт, что значительная часть производителей (в основном американских) использует в маркировке своих изделий классификацию EIA, а другая — IEC, лишь усложняет задачу по выбору компонентов. Сюда нужно добавить, что кодировку IEC также называют Industrial, хотя по смыслу обе кодировки работают в индустриальном диапазоне температур. Имеется и отдельная Military-кодировка. В этом разделе статьи будут упоминаться в основном кодировки EIA и Industrial.

Были попытки классификации, основанные на разделении конденсаторов по применению, в которых, тем не менее, можно увидеть, что разделение по применению преимущественно связано с частотой. Та же EIA предлагает делить керамические конденсаторы на два больших класса. Можно условно выделить более высокочастотные применения (резонансные контуры и т. п. аппаратуры), где немалое значение имеют малые потери и высокая стабильность емкости, и менее высокочастотные применения (цепи фильтрации и прочее), где эти параметры не столь значимы ([1], EIA).

Керамические конденсаторы относятся к конденсаторам с нормируемым значением ТКЕ. Как уже упоминалось, Ассоциация производителей электронного оборудования (EIA) разделяет керамику на четыре класса

и типы внутри каждого класса. Чем меньше номер класса, тем выше общие характеристики конденсатора, но больше размер для данной емкости. Типы в пределах каждого класса определяют рекомендуемый диапазон рабочих температур и ТКЕ, включая температурный дрейф и допуск в указанном температурном дрейфе. EIA определяет основные параметры конденсаторов для каждого класса и методы их измерения. Это касается сопротивления изоляции, тангенса угла диэлектрических потерь, диэлектрической абсорбции и других основных параметров конденсаторов.

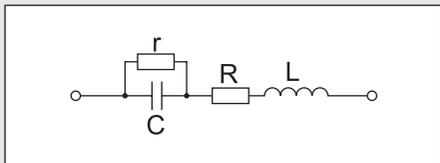
Разделение керамических конденсаторов на классы в достаточной степени условное, поскольку не указано жестких требований на каждый класс. Например, конденсаторами 1-го класса принято считать «точные конденсаторы с температурной компенсацией, с высокой стабильностью по напряжению, температуре и частоте». Конденсаторы 1-го класса характеризуются температурным коэффициентом не хуже $\pm 3\%$ на градус при $+25 \dots +85^\circ\text{C}$. Для конденсаторов 1-го класса может быть достигнута точность в 1%, хотя наиболее типичной считается точность 5–10%. Температурная зависимость емкости для конденсаторов 1-го класса считается линейной. Разделение керамических конденсаторов на классы производится по типу керамики, которая использована при их изготовлении. Для обозначения типов керамики EIA ввела набор кодов. Коды керамических конденсаторов 1- и 2-го классов различаются. Кроме того, существует два варианта обозначения типа керамики — в соответствии со стандартом EIA-RS-198 и упомянутым выше промышленным стандартом Industrial. В таблице 1 представлена расшифровка кодировки EIA для керамики 1-го класса.

Например, наиболее часто в конденсаторах 1-го класса применяется керамика C0G. Это означает, что в температурном диапазоне $+25 \dots +85^\circ\text{C}$ наклон температурной кривой будет нулевым (0), то есть зависимости емкости от температуры не будет. Это можно увидеть на рис. 1, 2, где конденсаторы C0G обозначены как NP0 (обозначение,

Основные характеристики конденсаторов

Конденсатор представляет собой пассивный радиоэлемент, состоящий из двух и более металлических пластин (обкладок), разделенных диэлектриком, и способный накапливать электрические заряды на обкладках, если к ним приложена разность потенциалов. Простейший конденсатор — это двухполюсник, состоящий из двух пластин (обкладок), которые разделены диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами пластин. В цепи постоянного тока конденсатор проводит ток в момент его включения в электрическую цепь, при этом происходит заряд или перезаряд конденсатора. После окончания переходного процесса ток через конденсатор не протекает, так как его обкладки разделены диэлектриком. В цепях переменного тока конденсатор проводит колебания переменного тока посредством своей циклической перезарядки, замыкаясь так называемым током смещения.

Основной характеристикой конденсатора является его емкость — способность накапливать и отдавать электрический заряд. Эквивалентная схема реального конденсатора представлена на рисунке, где C — собственная емкость конденсатора; g — сопротивление изоляции конденсатора; R — эквивалентное последовательное сопротивление; L — эквивалентная последовательная индуктивность.



Собственная (номинальная) емкость конденсатора определяется его конструктивным исполнением и обозначена на самом конденсаторе или в нормативно-технической документации. Номинальные значения емкостей конденсаторов и их обозначение, в том числе графическое, стандартизованы, их выбирают из определенного набора значений в соответствии со стандартом IEEE SA 315-1975. Номинальная емкость конденсатора является исходной для отсчета допустимых отклонений, которые также указаны либо на самом конденсаторе, либо в документации на изделие.

Сопротивление изоляции — это сопротивление конденсатора постоянному току утечки при данном приложенном к конденсатору напряжении.

Эквивалентное последовательное сопротивление (ESR — Equivalent Series Resistance) обусловлено электрическим сопротивлением материала обкладок, выводов конденсатора и контактов между ними, а также потерями в диэлектрике. Эквивалентное последовательное сопротивление возрастает с увеличением частоты тока, протекающего через конденсатор. Этот параметр не менее важен, чем собственно емкость конденсатора, при определении пригодности того или иного конденсатора в цепях ВЧ или СВЧ. Это связано с влиянием данного параметра на фазово-частотные характеристики цепей обратной связи, определяющих устойчивость и качество переходных процессов. Кроме того, этот параметр критически важен при определении возможности использова-

ния конденсатора в той или иной цепи — сохранит он работоспособность или гарантированно выйдет из пределов допустимых отклонений.

Эквивалентная последовательная индуктивность (ESL — Equivalent Series Inductance (L)) определяется собственной индуктивностью обкладок и выводов конденсатора. Это паразитная распределенная индуктивность, в силу которой конденсатор превращается в колебательный контур с собственной резонансной частотой. Частота обычно указана в параметрах конденсатора в явном виде или в виде рекомендованной максимальной рабочей частоты.

Кроме вышеперечисленных параметров, конденсаторы имеют еще ряд характеристик, на которые необходимо обратить внимание.

Удельная емкость — это отношение емкости конденсатора к объему или массе диэлектрика. Максимальное значение удельной емкости достигается при минимальной толщине слоя диэлектрика, но при этом уменьшается значение напряжения пробоя конденсатора.

Номинальное напряжение — это напряжение, при котором конденсатор может работать в течение заявленного срока службы с сохранением параметров в допустимых пределах. Обычно данный параметр указан на самом конденсаторе либо в документации к нему. Значение номинального напряжения зависит от конструкции конденсатора и физических свойств материалов, примененных при его изготовлении. Номинальное напряжение устанавливается с необходимым запасом по отношению к электрической прочности диэлектрика, исключающим возникновение в течение гарантированного срока службы интенсивного старения диэлектрика, которое приводит к ухудшению параметров конденсатора и его выходу из строя. Номинальное напряжение многих типов конденсаторов уменьшается с ростом температуры окружающей среды, поскольку повышение температуры приводит к ускорению процессов старения диэлектрика.

Тангенс угла диэлектрических потерь. Этот параметр характеризует потери энергии в конденсаторе и определяется отношением активной мощности к реактивной при синусоидальном напряжении определенной частоты. Конкретное значение тангенса угла потерь зависит от типа диэлектрика и его свойств, от температуры окружающей среды и частоты переменного тока, на которой он измеряется. Как правило, тангенс угла потерь имеет минимум в области комнатных температур. С ростом частоты значение тангенса потерь увеличивается. С течением времени при длительном хранении или наработке, а также при эксплуатации во влажной среде тангенс потерь растет и может увеличиться в несколько раз. В англоязычной документации этот параметр называется Dissipation Factor (D. F.).

Температурный коэффициент емкости (ТКЕ). При изменении температуры окружающей среды изменяются размеры обкладок конденсатора, расстояние между ними, а также значение диэлектрической постоянной диэлектрика. Зависимость емкости конденсатора от температуры, как правило, нелинейная, но для некоторых типов конденсаторов (высокочастотных

керамических, полистирольных и других) она приближается к линейной. Поэтому ТКЕ может быть определен как относительное изменение емкости конденсатора при изменении температуры окружающей среды на один градус Цельсия (Кельвина). ТКЕ применяется для характеристики конденсаторов со значительной линейной зависимостью емкости от температуры. Для конденсаторов с нелинейной зависимостью емкости от температуры, а также с большим уходом емкости при изменении температуры обычно указывают относительное изменение емкости в диапазоне рабочих температур, чаще всего $-55...+85$ °С. Следует отметить, что по типу ТКЕ конденсаторы делятся на три основные группы: конденсаторы с линейным ТКЕ, с нелинейным ТКЕ и с ненормируемым ТКЕ. В частности, для оксидных (электролитических) конденсаторов ТКЕ, как правило, не нормируется, поскольку они заводом не предназначены для работы в высокочастотных цепях, а для пленочных низковольтных или высокочастотных керамических конденсаторов ТКЕ является одним из главных параметров, по которым принимается решение по использованию конденсатора в той или иной электрической схеме.

Диэлектрическая абсорбция конденсаторов — это явление, обусловленное замедленными процессами поляризации в диэлектрике, приводящими к возникновению напряжения на обкладках после кратковременной разрядки конденсатора. Напряжение, появляющееся на обкладках конденсатора, существенно зависит от времени зарядки конденсатора, времени, в течение которого он был закорочен, и времени, прошедшего после того, как конденсатор был закорочен. Количественное значение абсорбции определяется коэффициентом абсорбции, который измеряется в стандартных условиях. Этот эффект особенно важен при применении конденсаторов в измерительных цепях постоянного тока, прецизионных интегрирующих усилителях, устройствах выборки-хранения, схемах на переключающих конденсаторах.

Коэффициент (показатель) рассеяния (Q-factor). Этот параметр связывает значение емкости конденсатора на определенной частоте с общими (комбинированными) потерями сигнала из-за утечки, эквивалентного последовательного сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь. Следует отметить, что коэффициент рассеяния учитывает также сдвиг фазы между током и напряжением, возникающий при прохождении сигнала через диэлектрик. Этот дополнительный параметр имеет английское обозначение $\tan\delta$ и является составной частью показателя Q-factor. В общем виде Q-factor рассчитывается исходя из формулы:

$$Q = X_C / R_C = 1 / (\omega C R_C),$$

где X_C — реактивное сопротивление конденсатора; R_C — активное сопротивление конденсатора; C — собственная (номинальная) емкость конденсатора; ω — рабочая частота.

Чем выше показатель Q , тем ближе считается конденсатор к так называемому идеальному конденсатору, не имеющему потерь и искажений сигнала.

Таблица 1. Кодировка EIA-RS-198 керамики по наклону температурной кривой (класс 1)

Температурный коэффициент (наклон температурной кривой)		Множитель температурного коэффициента		Допустимое отклонение температурного коэффициента, +25... +85 °С	
Буква	Rpp/°С	Цифра	Множитель	Буква	Rpp/°С
C	0	0	-1	G	±30
B	0,3	1	-10	H	±60
L	0,8	2	-100	J	±120
A	0,9	3	-1000	K	±250
M	1	4	+1	L	±500
P	1,5	6	+10	M	±1000
R	2,2	7	+100	N	±2500
S	3,3	8	+1000		
T	4,7				
V	5,6				
U	7,5				

Таблица 2. Сравнительная кодировка EIA и Industrial

Industry	P100	NP0	N030	N075	N150	N220	N330	N470	N750	N1500	N2200
EIA	M7G	C0G	B2G	U1G	P2G	R2G	S2H	T2H	U2J	P3K	

используемое в стандарте Industrial). Множитель температурного коэффициента вместе с самим коэффициентом также определяет наклон температурной кривой и соответственно степень изменения емкости от вариации температуры. В нашем примере (C0G) коэффициент 1 не изменит наклон температурной кривой, заданный основным температурным коэффициентом (0), который в англоязычной литературе часто называется Significant Figures. Знак перед множителем температурного коэффициента определяет направление изменения емкости: знак «-» говорит о том, что с повышением температуры емкость будет уменьшаться. Действие знака при множителе температурного коэффициента наглядно демонстрируется на рис. 1. К рисунку необходимо сделать пояснение. Промышленное обозначение керамики, основанное на Negativ/Positiv-обозначениях, считается более устаревшим по отношению к обозначениям EIA, но при этом более интуитивно понятным и состоит из буквы (N — для обозначения отрицательного температурного коэффициента, P — для обозначения положительного температурного коэффициента) и числа, указывающего температурную погрешность. Сравнение кодировки по EIA и промышленной кодировки видно из таблицы 2.

Теперь, собственно, рис. 1, о котором упоминалось выше. На нем представлено изменение емкости от температуры для керамики 1-го класса. Различные керамические материалы на этом рисунке имеют кодировку Industrial (выделено цветом), и по таблице 2 можно найти соответствие им в кодировке EIA (черные обозначения в рамках). При сравнении таблиц 1 и 2 видно действие знака множителя температурного коэффициента, проиллюстрированное на рис. 1.

Основное отличие керамики 2-го класса от 1-го — нелинейная зависимость емкости от температуры. Это хорошо видно на рис. 2, где сравнивается керамика 1-го класса C0G (NP0) с двумя образцами 2-го класса (X7R, Y5V). В общем и целом конденсаторы 2-го класса обладают большей объемной эффективностью, что связано с высокой диэлектрической проницаемостью керамики 2-го класса и напрямую отражается на размерах конденсаторов.

Температурная кодировка EIA конденсаторов 2-го класса приведена в таблице 3.

Кроме описанной выше зависимости от температуры, керамика 2-го класса также имеет явную зависимость емкости от приложенного постоянного или медленно меняющегося напряжения. Суть этого явления заключается в том, что при приложении постоянного напряжения к сегнетоэлектрикам, используемым в качестве керамики в конденсаторах 2-го класса, происходит снижение диэлектрической проницаемости из-за эффектов поляризации. Как следствие, уменьшается и связанная с диэлектрической проницаемостью емкость.

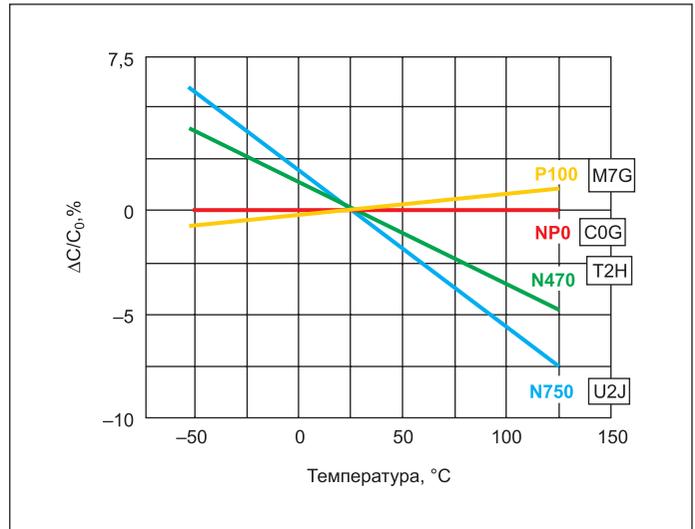


Рис. 1. Идеализированные кривые зависимости емкости от температуры керамики 1-го класса

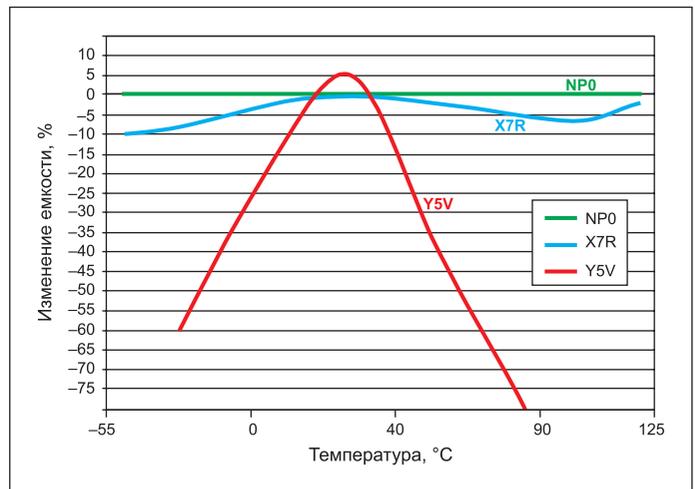


Рис. 2. Сравнение температурных характеристик керамики 1-го и 2-го классов

В англоязычной документации это явление часто описывается термином DC-bias (смещение по постоянному току).

Это свойство практически никогда не упоминается при попытках классификации конденсаторов, и конкретные значения изменения емкости могут быть получены в основном при изучении технической документации на конкретное изделие.

Таблица 3. Кодировка EIA-RS-198 керамики без температурной компенсации (класс 2 и выше)

Наименьшая рабочая температура		Наибольшая рабочая температура		Изменение емкости	
Буква	Температура, °С	Цифра	Температура, °С	Буква	в %
X	-55	4	+65	A	±1
Y	-30	5	+85	B	±1,5
Z	+10	6	+105	C	±2,2
		7	+125	D	±3,3
		8	+150	E	±4,7
		9	+200	F	±7,5
				P	±10
				R	±15
				S	±22
				T	+22/-33
				U	+22/-56
				V	+22/-82

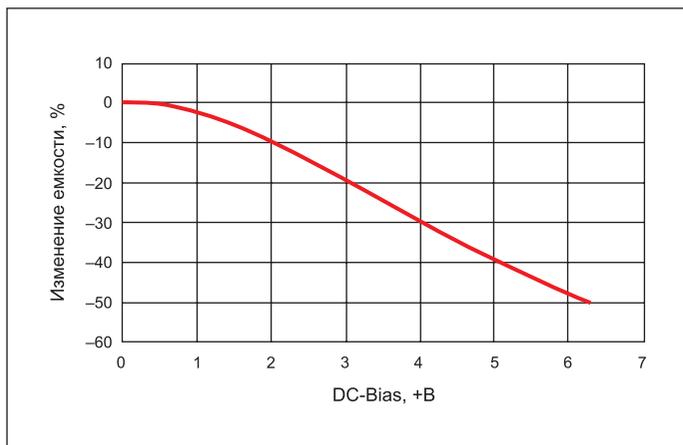


Рис. 3. Пример зависимости емкости керамики X5R, X7R от приложенного постоянного напряжения (Murata)

Таблица 4. Сравнение керамики 1-го и 2-го классов

	10 пФ	100 пФ	1 нФ	10 нФ	100 нФ	1 мкФ
COG (класс 1)	1550 МГц	460 МГц	160 МГц	55 МГц		
X7R (класс 2)			190 МГц	56 МГц	22 МГц	10 МГц

Также необходимо отметить, что значительный вклад в описание данного явления внесен сотрудниками японской фирмы Murata. Ими были проведены исследования доменных структур керамики и предложены интерактивные программные средства для инженеров — разработчиков аппаратуры, позволяющие учесть DC-bias при проектировании. На рис. 3 можно увидеть пример от Murata — здесь представлена зависимость емкости от постоянного напряжения для керамических конденсаторов 2-го класса (X5R, X7R).

Прямое соответствие между типом керамики и частотным диапазоном указывается в технической документации на тот или иной конденсатор. Считается, что конденсаторы 1-го класса являются более высокочастотными и имеют в верхнем высокочастотном диапазоне наименьшие потери и наименьшее рассеяние. Тем не менее конденсаторы 1-го класса имеют прямую зависимость максимальной рабочей частоты от номинала конденсатора. Это можно увидеть в таблице 4 при сравнении двух видов керамики в частотной области.

И следует иметь в виду, что диэлектрики 2-го, 3-го и 4-го классов являются пьезоэлектриками, а потому конденсаторы данных классов подвержены микрофонному эффекту. Это обязательно необходимо учитывать при решении о применении конденсаторов указанных классов на частотах выше 200 МГц. Но при использовании подобных конденсаторов в источниках питания, даже импульсных, микрофонный эффект проявляется не так явно, за исключением случаев, когда рабочая частота находится в звуковом диапазоне. Влияние пьезоэффекта на керамику 2-го класса меньше, чем на керамику 3-го и 4-го классов. Наличие пьезоэффекта у большинства типов керамики, применяемой при производстве керамических конденсаторов, требует при проектировании электрических цепей с керамическими конденсаторами обязательного учета реактивной мощности, рассеиваемой на конденсаторах, поскольку в условиях, когда реактивная мощность равна или превышает активную мощность, рассеиваемую на конденсаторах, происходит быстрое старение керамики с последующим ее разрушением. Это особенно важно, когда керамические конденсаторы используются в силовых или фильтрующих цепях, например в цепях питания процессоров компьютеров.

Кроме классификации по типу керамики, керамические конденсаторы ранжируются по конструктивному исполнению. Различают следующие группы керамических конденсаторов:

- дисковые конденсаторы с полимерным покрытием для печатного монтажа (disk);

- однослойные керамические конденсаторы (single layer);
- многослойные прямоугольные конденсаторы для поверхностного монтажа (multilayer);
- бескорпусные дисковые конденсаторы для поверхностного монтажа для использования в УВЧ-диапазоне (дециметровый диапазон волн);
- трубчатые конденсаторы для печатного монтажа, в настоящее время применяются крайне редко.

Однослойные (монокристаллические) керамические конденсаторы (Single Layer Ceramic Capacitor, SLCC)

В классе керамических конденсаторов следует отметить тип так называемых однослойных, или монокристаллических, конденсаторов.

Поскольку для производства SLCC используются те же керамики, те же проводящие материалы и во многом схожие технологии, что и для производства многослойных конденсаторов, имеется значительное сходство свойств MLCC и SLCC по отношению к температуре и частоте.

Однослойные керамические конденсаторы представляют собой в некотором роде элементарный классический конденсатор, поскольку их конструкция состоит из двух электродов, между которыми расположен слой высокочастотной керамики (рис. 4).

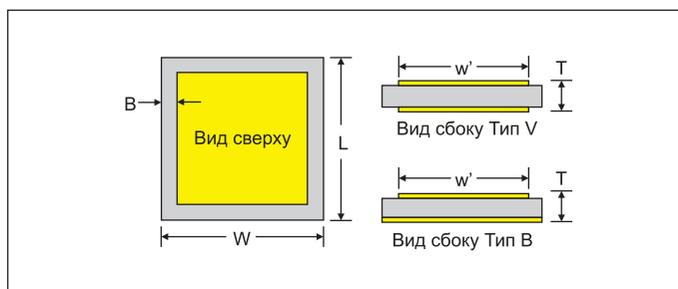


Рис. 4. Конструкция однослойного конденсатора компании Dielectric Laboratories

Конденсаторы этого типа производятся по технологии спекания разнородных материалов и представляют собой, по сути, композитный сплав керамика-металл. Поэтому они предназначены в первую очередь для применения в интегральных сборках, в том числе сверхвысокочастотных. Хотя некоторые производители, например компания Vishay, по этой же технологии выпускают дисковые конденсаторы (Disk) для печатного монтажа. К несомненным преимуществам однослойных монокристаллических конденсаторов относятся:

- очень низкие потери на прохождение и малое рассеяние на частотах до 50 ГГц;
- диапазон рабочих частот: до 100 ГГц;
- надежная и прочная конструкция, в том числе на излом;
- номинальная емкость: 0,04–6200 пФ;
- диэлектрическая постоянная керамики: 14–25000;
- рабочее напряжение: до 100 В.

Классификация однослойных конденсаторов

Существует несколько вариантов классификации однослойных конденсаторов. Один из них использует компания Dielectric Laboratories. Он включает следующие типы:

- Border Cap — обычные плоские широкополосные конденсаторы с уменьшенной на одной или двух сторонах металлизацией. Уменьшение площади металлизации помогает предотвратить замыкание обкладок при монтаже и улучшает визуальный контроль Внешний вид и типы таких конденсаторов представлены на рис. 4.
- Di-Cap — обычные плоские широкополосные конденсаторы, площадь металлизации которых равна площади керамики. Используются в диапазоне частот 100 кГц – 80 ГГц. Этого же типа конденсаторы могут быть выводными (рис. 5).
- Cap Cap — два последовательно соединенных конденсатора на одной керамической пластине (рис. 6). Конденсаторы этого типа могут по-

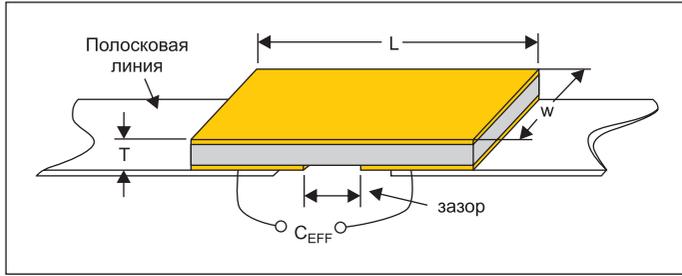


Рис. 6. Gap-Cap от Dielectric Laboratories

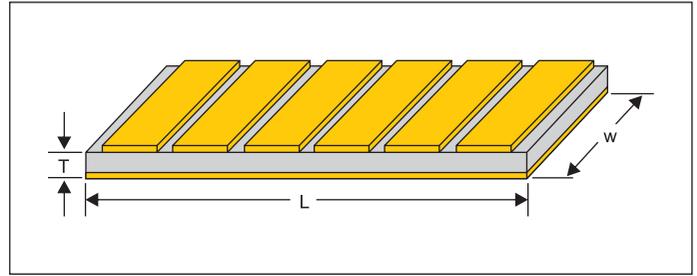


Рис. 7. Bar-Cap от Dielectric Laboratories

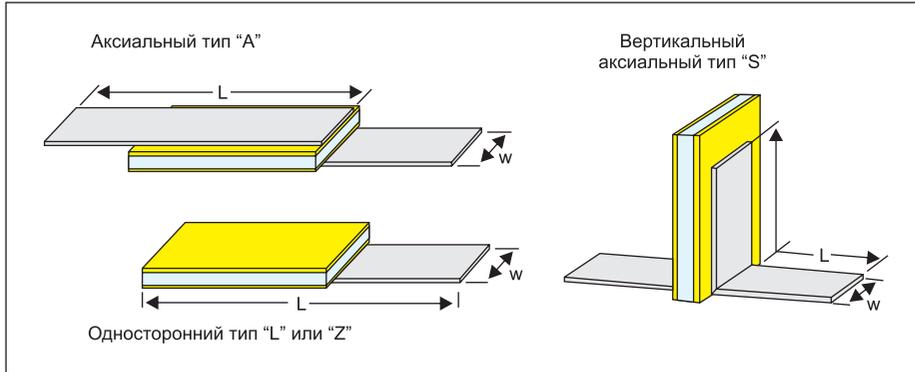


Рис. 5. Выводные конденсаторы Di-Cap от Dielectric Laboratories

- следовательно включаться в микрополосковую линию без использования проводников.
- Bar Cap¹ — конденсаторные сборки. Основной диапазон применений до 30 ГГц. Производятся для использования, в том числе, в монолитных сверхвысокочастотных микросхемах (monolithic microwave integrated circuit — MMIC), рис. 7.
 - Bi-Cap (Binary-Cap) — несколько конденсаторов на одной керамической пластине. Емкости соотносятся как степени двойки. Основной диапазон применений до 30 ГГц. Используются при прототипировании и тонкой настройке схем. Имеют размеры, сравнимые с геометрией компонентов, используемых в СВЧ-устройствах. Конденсаторы на одной пластине могут применяться как одиночно, так и в комбинации (рис. 8).
 - T-Cap — серия конденсаторов, аналогичная Di-Cap. Имеет другой размерный ряд.
 - Milli-Cap — конденсаторы для поверхностного монтажа.

Представляет интерес сравнительная частотная характеристика нескольких типов однослойных конденсаторов, представленная на рис. 9. Далее подобная диаграмма будет представлена для многослойных конденсаторов.

Применение SLCC

В силу обусловленных конструкцией классического однослойного конденсатора небольших значений емкости и выдающихся частотных свойств керамик, SLCC полу-

чили максимальное распространение в высокочастотных и сверхвысокочастотных приложениях. Применение видов керамики с большими значениями диэлектрической постоянной позволяет поддерживать тренд на перманентную миниатюризацию данного класса конденсаторов. Наглядную иллюстрацию этому можно найти в материалах компании AVX [2] (рис. 10).

Типичным примером свойств, удовлетворяющих современным требованиям к СВЧ-компонентам, можно считать серию сверхширокополосных блокирующих однослойных керамических конденсаторов GX от AVX [2]. Изделия характеризуются сверхмалыми вносимыми потерями и малыми обратными потерями. Используются в диапазоне частот до 40 ГГц и напряжений до 50 В, имеют емкости до 100 нФ и форм-фактор 0603-0201. На рис. 11 представлен типичный график вносимых потерь для серии GX0S.

Конструкции однослойных конденсаторов

Если продолжить разговор о типах и классах, необходимо обратить внимание на тот факт, что в современной высокочастотной индустрии используются конденсаторы,

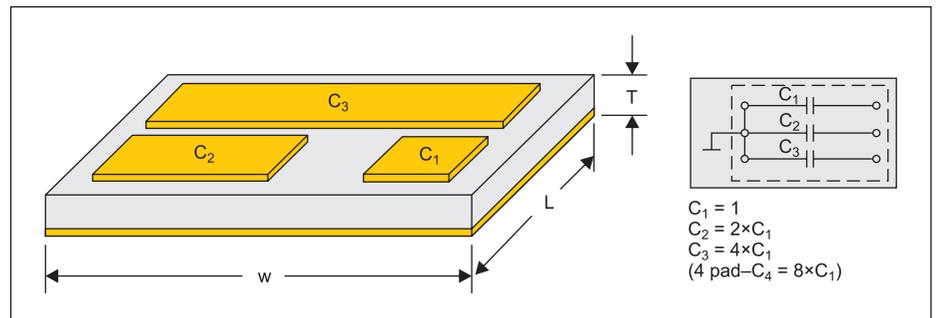


Рис. 8. Bi-Cap от Dielectric Laboratories

¹ У AVX соответствующий Gap Cap-дизайн называется Dual-Cap, а аналогом Bar Cap является Multi-Cap.

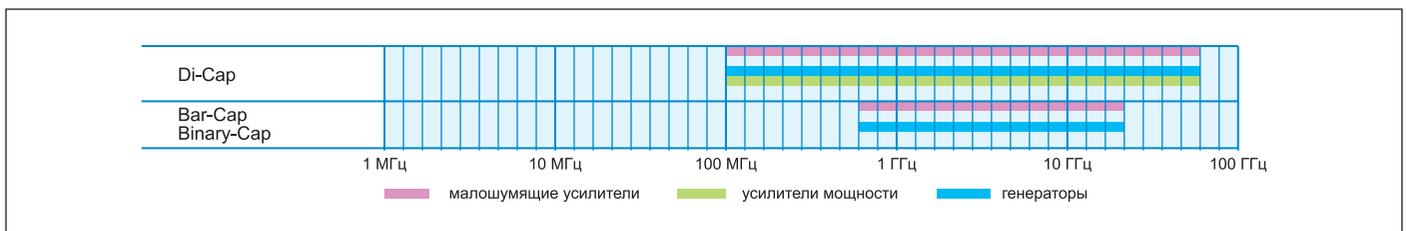


Рис. 9. Сравнительная частотная характеристика разных типов однослойных конденсаторов

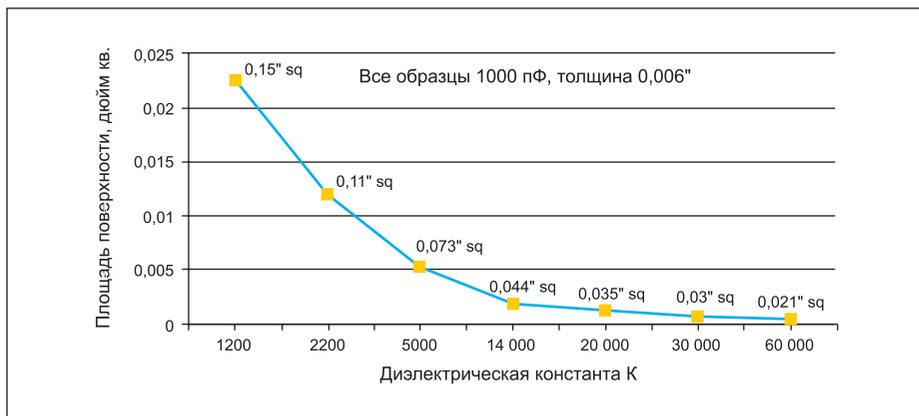


Рис. 10. Миниатюризация SLCC [1]

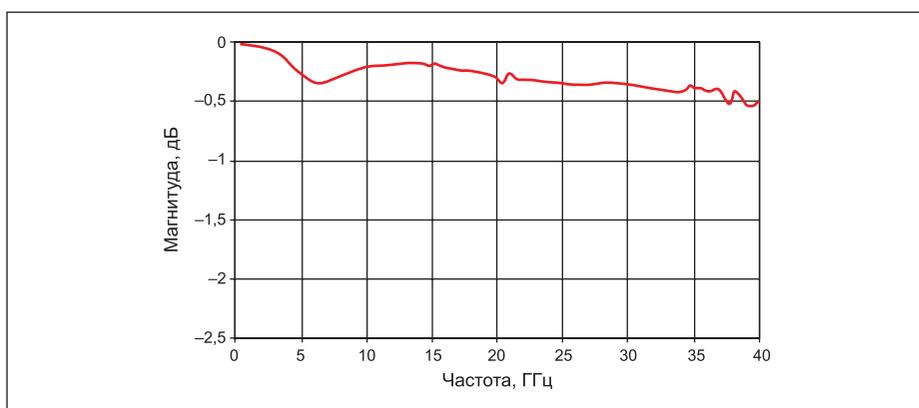


Рис. 11. Вносимые потери (S21) для серии блокирующих конденсаторов GX0S (AVX)

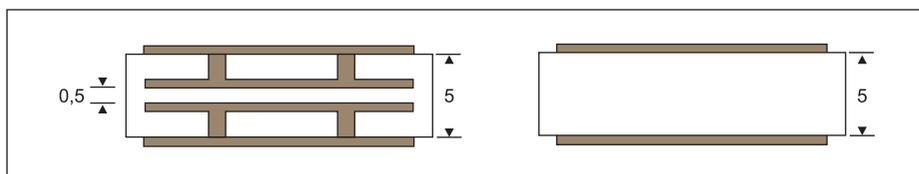


Рис. 12. Конденсаторы со скрытыми электродами от Presidio и их сравнение с обычными

которые по своей конструкции нельзя однозначно отнести к классам многослойных или однослойных изделий. Можно условно называть такие конденсаторы представителями промежуточного класса.

Так, фирма Presidio Component Inc. запатентовала технологию конденсаторов со скрытыми в керамическом диэлектрике электродами (buried electrodes — дословно «похороненными»), рис. 12.

Как утверждается в каталоге этой компании [3], такая конструкция дает десятикратное преимущество по сравнению с обычной. Разработчики технологии отмечают, что подобная конструкция конденсатора позволяет расширить частотный диапазон при одновременном увеличении емкости, увеличить температурную стабильность емкости и повысить емкость при одновременном уменьшении размеров изделия для повышения плотности монтажа. Соединение внутренних электродов с внешними происходит по-

средством заливки переходных отверстий. Все металлические соединения выполнены золотом с чистотой 99,95%, что позволяет использовать проводной монтаж при установке конденсаторов.

Значительное количество фирм, выпускающих пассивные компоненты, и среди них уже упомянутая Presidio, имеют в сво-

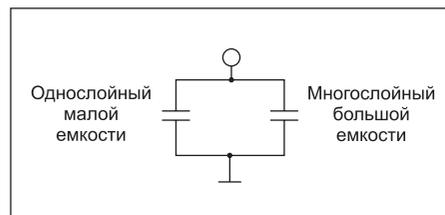


Рис. 13. Схемное обозначение совмещенного MLCC+SLCC

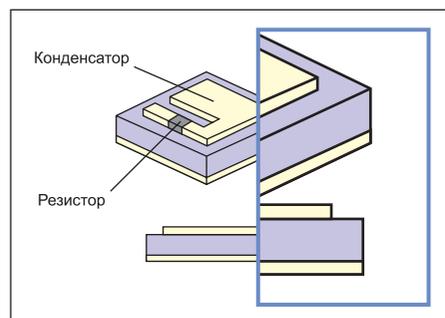


Рис. 14. Integrated Resistor-Capacitor (IRC) от Teccia

ей линейке изделия, в которых в одном чипе собраны однослойный и многослойный конденсаторы. У Presidio это, например, серия VB и изделие MVB4080X104ZGH5C3 [4]. Это чип-конденсатор, предназначенный для проводного монтажа, в том числе в монокристаллических СВЧ-микросхемах, и содержащий на одной пластине многослойный конденсатор емкостью 0,1 мкФ и однослойный — 100 пФ (рис. 13).

Еще одним представителем класса, условно обозначенного как промежуточный, является пассивный компонент из производственной линейки компании Teccia. Это чип, по классификации DLI относящийся к типу Border-Cap и содержащий на одной керамической пластине последовательно соединенные однослойный конденсатор и чип-резистор (рис. 14).

В конденсаторе использована керамика X7S (класс 4 EIA) с диэлектрической проницаемостью 16000. В торговой линейке фирмы имеются изделия с форм-фактором от 2525 до 4035 (EIA), емкостью 220–680 пФ и резисторами 50, 100 и 200 Ом. Заявленные преимущества применения этого конденса-

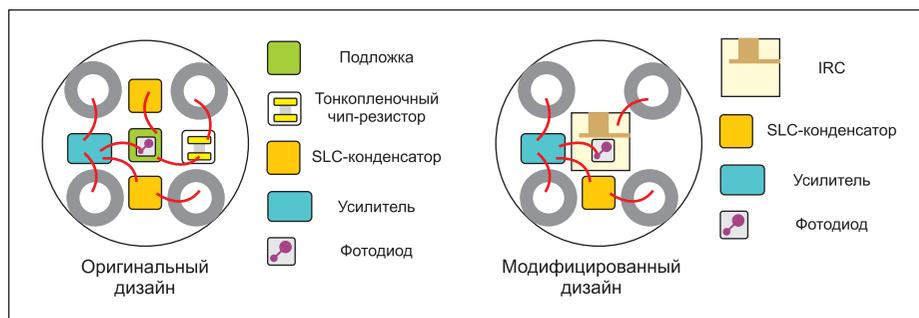


Рис. 15. Пример упрощения дизайна при использовании IRC

тора: экономия места, количества компонентов и проводных соединений. В [5] специалисты фирмы показывают пример такой экономии (рис. 15).

На рис. 15 представлена плата устройства между четырьмя терминальными контактами. Исходный дизайн содержит шесть компонентов, поскольку для закрепления фотодиода на плате приходится использовать подложку (Submount). Кроме того, в исходном дизайне предусмотрено восемь проводных соединений. Дизайн с использованием IRC имеет только четыре компонента и шесть проводных соединений. Фотодиод закреплен на обкладке конденсатора посредством проводящего клея на эпоксидной основе.

Наиболее известными производителями интегральных однослойных монокристаллических конденсаторов являются компании Dielectric Laboratories, Murata Manufacturing Co. (IPDiA — Murata Integrated Passive Solutions), AVX, ATC Corp. (куплена фирмой AVX, но название

сохранила), Johanson Technology, Compex Corp., Vishay Intertechnology, Teccia, Micrometrics Inc., Presidio Components Inc., Ion Beam Milling Inc., Metelics Corporation, MACOM Technology Solutions. ■

Литература

1. Ханин С. Д., Адер А. И., Воронцов В. Н., Денисова О. В., Холкин В. Ю. Пассивные радиокомпоненты. Часть 1. Электрические конденсаторы. СПб. 1998.
2. AVX Ultra-Broadband Capacitors. www.avx.com
3. www.presidiocomponents.com/catalog/BrochurePDFs-Images/MW-FO-RF-Files/MW-WireBondBuriedSingleLayerJan2016.pdf
4. www.presidiocomponents.com/catalog/BrochurePDFs-Images/MW-FO-RF-Files/MW-BireBondVerticalElectrodeMarch2015.pdf
5. www.us.tecdia.com/casestudies/space-saving-with-rc-circuit/