

Особенности применения и критерии выбора конденсаторов и резисторов для работы в цепях ВЧ/СВЧ

Любой специалист, хотя бы немного знакомый со схемотехникой, знает, что проектирование схем, работающих в области высоких и сверхвысоких частот, сильно отличается от разработки обычных низкочастотных цепей. При работе на высоких частотах приходится учитывать гораздо больше параметров элементов схемы, чем при работе на низких частотах. В связи с этим подбор и применение таких, в общем-то несложных, электронных компонентов, как резистор и конденсатор, имеет свою специфику.

Станислав Дидилев

sd@may.ru

Конденсаторы в цепях ВЧ/СВЧ

Прежде чем рассматривать конкретные примеры использования конденсаторов в тех или иных приложениях, приведем некоторые характеристики конденсаторов, на которые следует обратить внимание при расчете ВЧ/СВЧ-цепей.

ESR (Equivalent Series Resistance) — эквивалентное последовательное сопротивление. Является суммой всех потерь в конденсаторе. Можно выделить две основные составляющие, формирующие ESR: потери в диэлектрике (R_{sd}) и потери в проводнике (R_{sm}). Иными словами, $ESR = R_{sd} + R_{sm}$.

Потери в диэлектрике (R_{sd}) определяются характеристиками материала диэлектрика. Каждый материал характеризуется тангенсом угла диэлектрических потерь, по значению равным коэффициенту рассеивания (DF — Dissipation Factor), который определяет долю энергии, приводящую к нагреву диэлектрика при нахождении последнего в переменном электромагнитном поле. Как правило, значения DF определяются на низких частотах (порядка 1 МГц), где вклад данного фактора в потери в конденсаторе является доминирующим.

Потери в проводнике (R_{sm}), в свою очередь, определяются не только проводящими свойствами металлических элементов конструкции конденсатора (омические потери), но и частотно-зависимыми потерями в этих элементах (пластинах, барьерных слоях, терминаторах и т. д.) за счет скин-эффекта. Указанные потери также приводят к нагреву элементов конденсатора. Следует отметить, что потери в проводнике начинают значительно влиять на потери в конденсаторе на частотах более 30 МГц (данное утверждение верно для большинства многослойных керамических конденсаторов).

Хорошо иллюстрирует вышесказанное таблица 1, в которой приведены значения R_{sd} , R_{sm} и ESR для конкретного конденсатора на различных частотах. В качестве примера взят конденсатор АТС (American Technical Ceramics) емкостью 22 пФ (тип АТС180R220).

Как видно из таблицы, на низких частотах наибольший вклад в ESR вносят потери в диэлектрике. С возрастанием частоты их влияние на ESR уменьшается, но возрастают потери в проводнике (R_{sm}). Данная тенденция характерна и для любых других конденсаторов, с той лишь разницей, что соотношение между R_{sd} и R_{sm} будет иным.

Таблица 1. Значения потерь в диэлектрике (R_{sd}) и потерь в проводнике (R_{sm}) на различных частотах для конденсатора АТС180R220 емкостью 22 пФ

Частота, МГц	Тип конденсатора	R_{sd} , мОм	R_{sm} , мОм	ESR, мОм
1	180R220	145	7	152
3	180R220	48,2	7,8	56
30	180R220	4,82	9,18	14
300	180R220	0,48	28,51	29

Значение ESR тесно связано с такими параметрами конденсатора, как добротность Q , коэффициент рассеивания DF и емкостное сопротивление X_c . Это хорошо иллюстрирует график, приведенный на рис. 1, на котором показано фазовое соотношение между напряжением и током в конденсаторе, а также таблица 2, в которой приведены формулы, связывающие указанные выше параметры.

В идеальном конденсаторе ток (I_c) опережает напряжение (V_c) по фазе на 90° (рис. 1). В реальных ус-

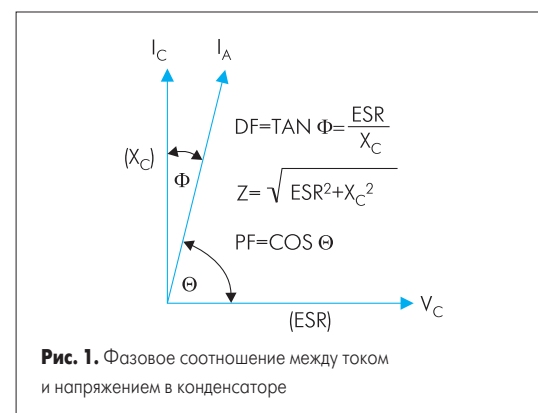


Таблица 2. Взаимосвязь между эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR), добротностью (Q), коэффициентом рассеивания (DF) и емкостным сопротивлением (Xc)

ESR	Q	DF	Xc
Xc-DF	1/DF	1/Q	1/2π·F·C
Xc/Q	Xc/ESR	ESR/Xc	ESR/DF
Xc-tg Φ	1/tg Φ	tg Φ	ESR·Q

ловиях это не так. Как видно из того же рисунка (1а), вектор, характеризующий реальный ток (Ia), отличается от идеального положения на угол потерь Φ, тангенс которого равен коэффициенту рассеивания DF. Также следует отметить, что соотношение между Ia и Vc пропорционально соотношению между Xc и ESR.

Остальные характеристики конденсаторов мы приведем чуть позже, по ходу рассмотрения конкретных примеров использования данных приборов в том или ином типе схем, а начнем свой обзор с конденсаторов связи (разделительных конденсаторов).

Конденсаторы связи (разделительные конденсаторы) предназначены для передачи ВЧ/СВЧ-сигнала из одной части схемы в другую. Попутно они блокируют постоянную составляющую сигнала, препятствуя нарушению режима работы схемы по постоянному току. Поскольку функционирование конденсатора в данном типе схем зависит от большого числа частотно-обусловленных параметров, выбор подходящего прибора не так прост, как кажется на первый взгляд. Необходимо заранее определить такие параметры конденсатора, как частоты последовательного и параллельного резонанса, импеданс, вносимые потери, а также эквивалентное последовательное сопротивление. В таблице 3 приведены практические примеры использования разделительных конденсаторов с указанием типа прибора, рабочей частоты схемы и некоторых других параметров.

На рис. 2 изображены два каскада усиления (RF AMP.1 и RF AMP.2), работающие в 50-омном тракте и связанные конденсатором Со. Конденсатор связи Со на данном рисунке представлен своим эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR), обозначенным Rs, эквивалентной последовательной индуктивностью (ESL), обозначенной Ls, и паразитной параллельной емкостью, обозначенной Cp.

Одним из важных параметров конденсатора в подобном типе цепей является **частота последовательного резонанса Fsr**, вычисляемая по формуле: $F_{sr} = 1/(2\pi(LsCo)^{1/2})$. На данной частоте реактивная составляющая сопротивления равна нулю и импеданс (полное сопротивление) конденсатора равен ESR. Например, для конденсатора АТС100А101 емкостью 100 пФ частота последовательного резонанса Fsr составляет 1000 МГц, при этом ESR данного конденсатора будет 0,072 Ом

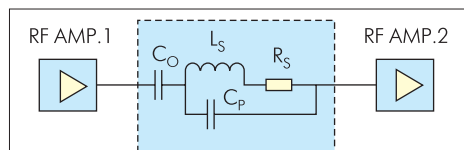


Рис. 2. Конденсатор связи (разделительный конденсатор) в ВЧ-тракте

Таблица 3. Практические примеры использования и параметры конденсаторов АТС в качестве конденсаторов связи трактов ВЧ/СВЧ, работающих на различных частотах

Рабочая частота, МГц	Тип конденсатора и емкость	Частота последовательного резонанса Fsr, МГц	Вносимые потери S21, дБ	Эквивалентное последовательное сопротивление ESR, Ом	Тип корпуса
900	100A101–100 пФ	1000	< 0,1	0,072	55×55 мил
	600S101–100 пФ	1340	< 0,1	0,070	0603
1900	100A270–27 пФ	1870	< 0,1	0,161	55×55 мил
	600S560–56 пФ	1890	< 0,1	0,085	0603
2400	100A160–16 пФ	2410	< 0,1	0,218	55×55 мил
	600S390–39 пФ	2340	< 0,1	0,140	0603

(табл. 3). На данной частоте конденсатор обладает минимальным сопротивлением, что весьма важно для цепей связи.

По сравнению с низкими значениями импеданса конденсатора на частоте последовательного резонанса, на частоте **параллельного резонанса Fprg**, которая приблизительно вдвое выше частоты последовательного резонанса, значения импеданса могут быть существенно выше. Это обстоятельство должно обязательно учитываться, если частота параллельного резонанса конденсатора связи попадает в диапазон рабочих частот ВЧ-тракта. При работе ВЧ-тракта на частотах, ненамного превышающих частоту последовательного резонанса конденсатора связи, небольшим увеличением импеданса можно пренебречь, если это увеличение находится в допустимых пределах. Таким образом, для определения пригодности использования того или иного конденсатора необходимо знать зависимости его импеданса Z и вносимых им потерь (S21) от частоты. Рассмотрим эти зависимости подробнее.

Полное сопротивление (импеданс) конденсатора можно вычислить по формуле $Z = ((ESR)^2 + (X_L - X_C)^2)^{1/2}$. Как видно из данной формулы, полное сопротивление в значительной степени зависит от его реактивной составляющей ($X_L - X_C$).

На рис. 3 показан график зависимости импеданса конденсатора АТС100А101 (100 пФ) от частоты. Как видно из графика, на частотах ниже частоты последовательного резонанса Fsr импеданс носит емкостной характер и зависит от соотношения $1/\omega C$ (гипербола в левой части графика). И, наоборот, на частотах выше Fsr преобладает индуктивное сопротивление, определяемое соотношением ωL (линейная зависимость в правой части графика).

Еще одной важной зависимостью, на которую следует обратить внимание при подборе конденсатора связи, является зависимость вносимых им потерь (S21) от частоты. Анализируя данную зависимость, разработчик может четко определить, удовлетворяет конденсатор его требованиям или

нет. При анализе потерь важно учитывать наличие одного (или нескольких) параллельных резонансов конденсатора, особенно если они оказываются в полосе рабочих частот разрабатываемого тракта. На графике вносимых потерь данные резонансы проявляются в виде характерных провалов вблизи соответствующих частот.

На рис. 4 показана зависимость вносимых потерь (S21) конденсатора АТС100А101 (100 пФ) от частоты. Измерение проводилось в диапазоне частот 50 МГц – 4 ГГц при расположении выводов конденсатора параллельно подложке. Как видно из рисунка, вносимые потери конденсатора не превышают 0,1 дБ на частотах 200 МГц – 1,5 ГГц. Однако при перпендикулярном расположении выводов первый параллельный резонанс конденсатора на частоте 1,6 ГГц может быть подавлен. Таким образом, данный конденсатор может эффективно использоваться на частотах вплоть до 2,4 ГГц, что важно для широкополосных трактов.

Необходимо также упомянуть про такой параметр конденсатора, как **добротность Q**. Следует отметить, что добротность тесно связана с эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR) и реактивной составляющей сопротивления конденсатора ($|X_C - X_L|$), а точнее, $Q = |X_C - X_L|/ESR$. Из данного соотношения видно, что добротность Q обратно пропорциональна ESR и прямо пропорциональна реактивной составляющей сопротивления конденсатора. Чем ниже ESR и выше реактивное сопротивление конденсатора, тем выше его добротность.

Далее перейдем к рассмотрению особенностей применения конденсаторов в цепях шунтирования.

Конденсаторы, используемые в цепях шунтирования, служат для отвода ВЧ/СВЧ-сигнала из определенной точки схемы на землю. Несомненно, конденсатор как шунтирующий элемент должен обладать минимальным импедансом (в идеале — нулевым), однако на практике данное условие невыполнимо, поскольку у реального конденсатора всегда присутствует реактивная составляющая сопротив-

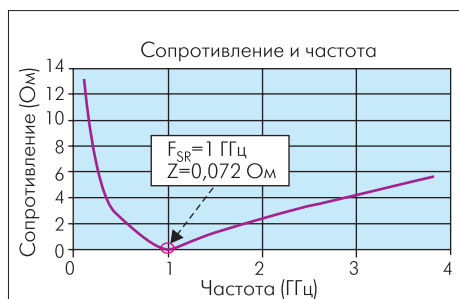


Рис. 3. Зависимость импеданса конденсатора АТС100А101 (100 пФ) от частоты

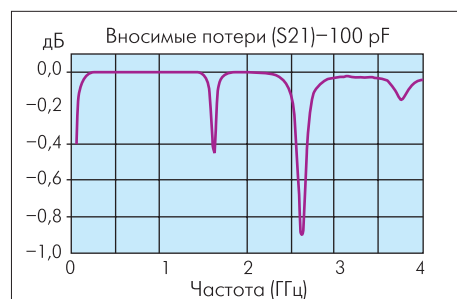
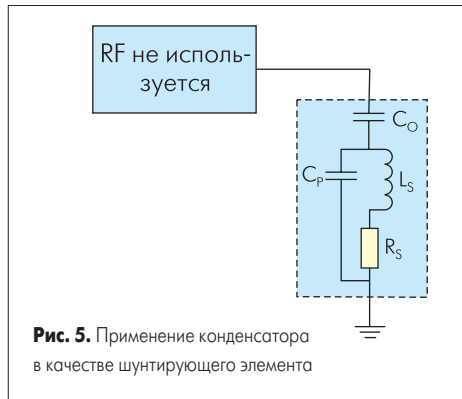


Рис. 4. Зависимость вносимых потерь (S21) конденсатора АТС100А101 (100 пФ) от частоты



ления и паразитные элементы (паразитная индуктивность и емкость).

Так же, как и в случае с конденсаторами связи, при выборе шунтирующего конденсатора необходимо тщательно анализировать такие параметры, как частота последовательного резонанса, эквивалентное последовательное сопротивление и значение импеданса анализируемого прибора, особенно в окрестностях рабочей частоты схемы.

Рис. 5 показывает применение конденсатора в качестве шунтирующего элемента. Шунтирующий конденсатор C_o на данном рисунке представлен своим эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR), обозначенным R_s , эквивалентной последовательной индуктивностью (ESL), обозначенной L_s , и паразитной параллельной емкостью, обозначенной C_p .

Шунтирование имеет очень большое значение при разработке ВЧ/СВЧ схем. Поэтому к выбору и грамотному использованию элементов шунтирования нужно подходить со всей возможной тщательностью. Поясним это на примере. На рис. 6 представлена упрощенная схема широкополосного усилителя диапазона 1,9 ГГц с элементами предвскажения в цепи создания смещения для стока полевого транзистора. Элементы схемы, показанные на этом рисунке, призваны препятствовать попаданию высокочастотной составляющей сигнала в цепь питания (V_{dd}) и в то же время должны обеспечивать высокое значение импеданса в цепи стока транзистора (для обеспечения необходимого усиления в диапазоне рабочих частот). Кроме того, данные элементы препятствуют попаданию шумов и наводок от источника питания в цепь стока транзистора.

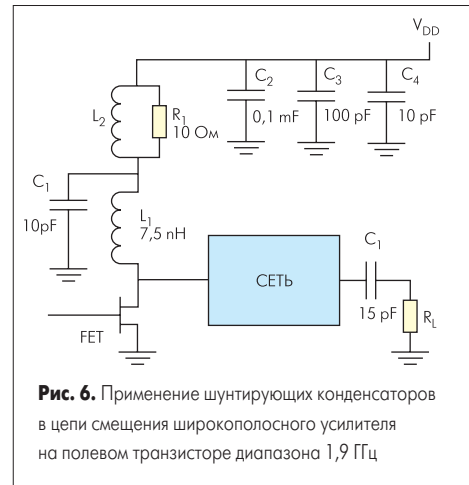
В случае использования импульсного источника питания не отфильтрованные должным образом пульсации напряжения на его выходе могут привести к появлению шумов в тракте усилителя. Причем частоты некоторых составляющих данных шумов могут достигать нескольких сот мегагерц. Как правило, высокочастотный шум, вызываемый пульсациями напряжения импульсного источника питания, содержит компоненты с частотами, не превышающими $0,35/P_E$, где P_E — время нарастания (или спада) импульса в секундах. Так, например, если длительность фронта импульса составляет 1,5 нс, то это порождает шумы с частотами паразитных составляющих вплоть до 233 МГц.

Вернемся к цепи шунтирования. Как видно из того же рисунка, данная цепь состоит из нескольких последовательно соединенных индуктивностей (имеющих импеданс ωL) и не-

скольких шунтирующих конденсаторов (обладающих импедансом $1/\omega C$). Излишне напоминать, что выбор шунтирующих элементов данной цепи крайне важен, поскольку они должны обеспечивать минимальное сопротивление для ВЧ составляющей в широкой полосе частот. Как уже упоминалось выше, за счет наличия паразитной емкости и индуктивности каждый конденсатор обладает частотами последовательного и параллельного резонанса. Причем на частоте последовательного резонанса импеданс конденсатора минимален, тогда как на частоте параллельного резонанса он может достигать достаточно высоких значений. В связи с данной особенностью необходимо так подбирать шунтирующие элементы, чтобы их импеданс в полосе рабочих частот был минимальным. Если же СВЧ-тракт имеет достаточно широкую полосу, то вместо каждого из шунтирующих конденсаторов используют группу из нескольких конденсаторов различной емкости, подобранных таким образом, чтобы частоты их последовательных резонансов равномерно располагались в полосе рабочих частот тракта, и, следовательно, обеспечивали бы приемлемое значение импеданса в вышеуказанной полосе. (Так называемый Multiple capacitor approach — подход, предполагающий использование составных конденсаторов. Количество и параметры единичных элементов, формирующих подобный составной конденсатор, подбираются в зависимости от полосы рабочих частот и желаемого значения импеданса.)

Схемотехническое решение цепи шунтирования выглядит следующим образом: индуктивности L_1 и L_2 включены последовательно в цепь стока полевого транзистора (см. рис. 6). В сочетании с шунтирующими конденсаторами C_1 — C_4 они препятствуют появлению ВЧ составляющей в цепи питания. Элементы L_1C_1 подавляют ВЧ напряжение рабочего диапазона усилителя (1,9 ГГц) — L_1 является сопротивлением для ВЧ составляющей, а C_1 отводит прошедшее L_1 ВЧ напряжение на землю. Элементы L_2 , C_2 , C_3 и C_4 подавляют ВЧ напряжение с частотами, которые меньше рабочей частоты усилителя.

Данная мера необходима, поскольку усиление каскада на этих частотах гораздо выше, чем на рабочей частоте. Конденсатор C_1 подобран таким образом, чтобы частота его последовательного резонанса была близка к 1,9 ГГц. Конденсаторы C_2 , C_3 , C_4 подобраны так, чтобы их импеданс и индуктивная реактивность были минимальны на каждом частотном интервале в диапазоне частот, которые меньше рабочей частоты усилителя.



Рассказывая о применении конденсаторов в различных типах цепей, нельзя не упомянуть об использовании высокочастотных конденсаторов в цепях согласования.

Добротность Q является одним из наиболее важных параметров конденсатора при использовании последнего в цепях согласования трактов ВЧ/СВЧ. Поскольку мощность, рассеиваемая конденсатором, обратно пропорциональна его добротности Q и прямо пропорциональна его эквивалентному последовательному сопротивлению (ESR), то выбор конденсаторов с большим значением добротности позволяет значительно снизить рассеиваемую ими мощность. Поясним это на примере. Входная цепь согласования является неотъемлемой частью любого ВЧ/СВЧ-усилителя. Ее задачей является согласование относительно низкого импеданса активного элемента с импедансом входного тракта. Входной импеданс активного элемента обычно колеблется от 0,5 до 2 Ом, тогда как импеданс входного тракта составляет 50 Ом (одно из стандартных значений). Предположим, что входной импеданс транзистора усилителя составляет 1 Ом. Это потребует трансформации импеданса 50:1. Следовательно, мы должны пересчитать напряжение в ток, так как цепь согласования трансформирует импеданс с 50 до 1 Ом. Это приведет к тому, что циркулирующий ток I_3 будет более чем в семь раз больше входного тока I_{IN} (рис. 7).

В случае, если конденсатор C_3 обладает большими потерями, он может нагреться настолько, что просто отпадет от печатной платы. Поскольку C_3 физически расположен весьма близко к активному элементу (транзистору), то выделяемое данным конденсатором тепло частично передается транзистору, что также не способствует увеличению надежности работы схемы в целом. Тем не менее для обеспечения хороших параметров СВЧ схемы кон-

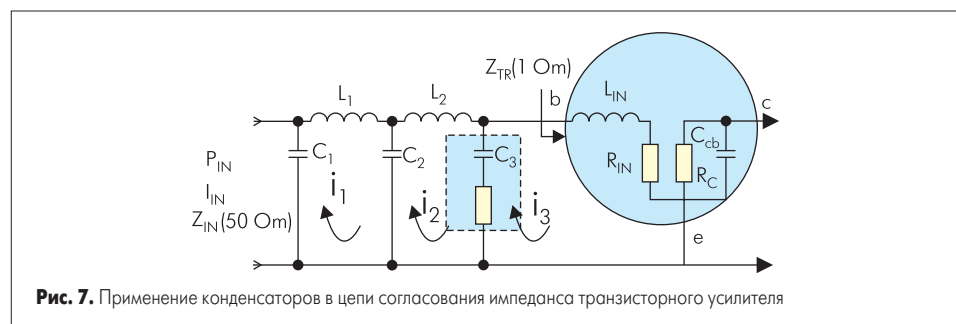


Таблица 4. Зависимость рассеиваемой мощности от ESR для различных конденсаторов на частотах, связанных октавным соотношением

Частота, МГц	ESR, Ом (АТС 80R 220 пФ)	Рассеиваемая мощность, Вт (АТС 100 В 220 пФ)	ESR, Ом (типовой конденсатор в корпусе 0805 с диэлектриком NPO 220 пФ)	Рассеиваемая мощность, Вт (типовой конденсатор в корпусе 0805 с диэлектриком NPO 220 пФ)
150	0,025	0,200	0,08	0,640
300	0,035	0,280	0,113	0,904
600	0,049	0,392	0,159	1,272
1200	0,069	0,552	0,224	1,792

денсаторы согласования стараются разместить как можно ближе к активному элементу, что подразумевает тщательный их подбор. Например, мы имеем усилитель мощности, работающий на частоте 150 МГц с выходной мощностью 400 Вт и согласованный на нагрузку 50 Ом. При этом выходной ток данного усилителя составит: $I = (P/Z)^{1/2}$, то есть $I = (400/50)^{1/2}$, откуда $I = 2,83$ А (среднеквадратическое значение). Предположим, что выходной согласующий конденсатор имеет ESR, равный 0,0022 Ом. Тогда рассеиваемая им мощность составит $I^2 \cdot ESR$, то есть $2,83^2 \cdot 0,022$, или 176 мВт. Данный пример наглядно демонстрирует зависимость рассеиваемой мощности от ESR, делая высокодобротные конденсаторы с низким эквивалентным последовательным сопротивлением практически незаменимыми в цепях подобного типа. Это хорошо видно из таблицы 4, в которой приведены значения рассеиваемой мощности и ESR для двух различных типов конденсаторов.

Применение высокодобротных конденсаторов с низкими потерями оправдано и в малосигнальных усилителях, например, в маломощных усилителях систем приема спутникового телевидения. Низкодобротные конденсаторы с большими потерями значительно увеличивают тепловой шум усилителя, тем самым существенно ухудшая его характеристики в целом (за счет уменьшения соотношения «сигнал — шум»).

Говоря о применении конденсаторов с высокой добротностью, нельзя не затронуть тему увеличения надежности работы схемы в связи с использованием подобных приборов. Как было показано автором ранее [1], использование подобных компонентов позволяет добиться облегчения теплового режима работы устройства, что положительно образом сказывается на его надежности.

Резисторы в цепях ВЧ/СВЧ

В последнее время требования, предъявляемые к резисторам в цепях ВЧ/СВЧ, существ-

венно ужесточились. Увеличение мощности и рабочих частот трактов, а также уменьшение размеров компонентов налагают свои ограничения на конструкцию и технологию изготовления подобных приборов.

Как правило, в современных СВЧ-цепях используются чип-резисторы и терминаторы, выполненные в основном по толсто- или тонкопленочной технологии. Конструкция типового чип-резистора приведена на рис. 8.

Как видно из рисунка, резистор состоит из резистивной пленки (Resistive film), помещенной между двумя контактными площадками (Conductive contact), сформированными на верхней грани подложки. Нижняя грань подложки (Groundplane) полностью покрыта проводящим слоем. В качестве материала подложки обычно используется нитрид алюминия (AlN), поскольку данный материал обладает хорошей теплопроводностью, низким коэффициентом теплового расширения (близким к коэффициенту расширения резистивной пленки) и неплохими диэлектрическими параметрами (диэлектрической постоянной и тангенсом угла потерь). Ранее в качестве материала подложки использовался оксид бериллия (BeO), но в последнее время от него стали отказываться в силу его токсичности.

Резистивная пленка может быть выполнена как по толсто-, так и по тонкопленочной технологии. В случае применения толстопленочной технологии проводящая или резистивная паста наносится на подложку через трафарет и затем спекается по заданному временно-температурному циклу. Толщина пленки, получаемой данным методом, составляет порядка 0,5–1 мил (mil — одна тысячная дюйма). В качестве материала проводников используется серебро (Ag) или его сочетание с платиной (Pt) или палладием (Pd). Резистивная паста изготавливается на основе диоксида рутения. Различные номиналы сопротивления достигаются за счет изменения пропорций компонентов резистивной пасты (резистивного вещества, стеклянного припоя и органического связующего ве-

щества), а также за счет изменения параметров процесса спекания. Окончательное значение номинала резистора достигается путем лазерной подгонки.

Тонкие резистивные пленки в основном наносятся путем распыления или вакуумного испарения. В последнем случае материал, который необходимо нанести, нагревают в герметичной камере до тех пор, пока давление его насыщенных паров не достигнет 10^{-2} торр, и атомы вещества не начнут испаряться на расположенную в камере подложку. В случае распыления подложка и мишень, изготовленная из материала, который следует нанести, помещаются в герметичную камеру, которую заполняют инертным газом при низком давлении. К подложке прикладывается большой положительный потенциал, а к мишени — отрицательный. Высокий отрицательный потенциал мишени вызывает ее бомбардировку положительно заряженными ионами газа, выбивающими из мишени атомы (или фрагменты молекул) вещества, которые затем попадают на подложку. Толщина пленки, полученной таким образом, составляет порядка сотых — тысячных долей ангстрема. Большие значения толщины достигаются путем наращивания пленки (отдельный процесс). Проводники в данном типе резисторов выполняются из меди, покрытой серебром. Резистивным материалом служит нитрид тантала (Ta_2N). Желаемое значение сопротивления достигается за счет изменения толщины и способа нанесения пленки. Одним из важных свойств нитрида тантала является возможность образования пленки его оксида на поверхности резистивного слоя для защиты последнего от внешних воздействий. Так же, как и в случае с толстопленочными резисторами, окончательное значение номинала резистора достигается путем лазерной подгонки.

Конструкция чип-терминаторов незначительно отличается от конструкции резисторов. Как видно на рис. 9, чип-терминатор отличается от резистора в основном наличием дополнительного согласующего элемента (Impedance matching structure), который призван согласовать импеданс резистивного элемента со стандартным значением (обычно 50 Ом). Еще одно отличие заключается в том, что один из концов терминатора соединен проводящим слоем (Wraparound) с нижней гранью подложки (Groundplane).

Помимо указанных выше, существует достаточно много других конструкций резисто-

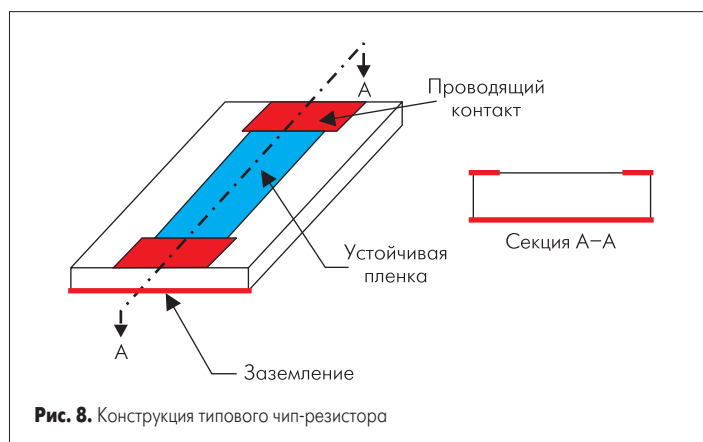


Рис. 8. Конструкция типового чип-резистора

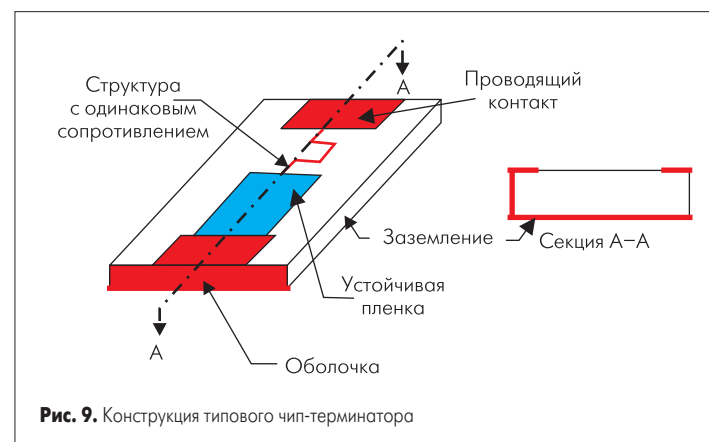


Рис. 9. Конструкция типового чип-терминатора

ров и терминаторов: например, выпускаются приборы, выполненные в керамическом корпусе со специальным металлическим фланцем, облегчающим их крепление и обеспечивающим теплоотвод.

Существует несколько тесно взаимосвязанных между собой параметров резисторов, которые необходимо учитывать в цепях ВЧ/СВЧ. Данными параметрами являются:

1. Изменение сопротивления резистора в зависимости от времени (долгосрочное).
2. Максимальная температура резистивной пленки.
3. Изменение сопротивления от температуры (краткосрочное).
4. Изменение сопротивления в зависимости от приложенного напряжения (краткосрочное).
5. Изменение КСВН в зависимости от частоты (терминаторы) или изменение емкости в зависимости от частоты (резисторы).

Свойство (1) обычно называется старением (или стабильностью сопротивления) и характеризует изменение сопротивления резистора в процессе работы за достаточно продолжительный отрезок времени (сотни или тысячи часов). Данное свойство зависит от температуры резистивной пленки и приложенного к резистору напряжения. В свою очередь, температура резистивной пленки определяется множеством параметров. Среди последних можно выделить теплопроводящие свойства поверхности, на которую устанавливается сопротивление. Свойство (2) во многом определяет режимы работы и поведение приборов, находящихся в непосредственной близости от резистора. Свойства (3) и (4) отражают краткосрочное изменение параметров (в течение нескольких минут) и называются, соответственно, температурным коэффициентом сопротивления (TCR — Temperature Coefficient of Resistance) и коэффициентом сопротивления, зависящим от напряжения (VCR — Voltage Coefficient of Resistance). Свойство (5) является основополагающим при анализе возможности применения резистора в том или ином типе СВЧ-цепей.

При использовании резистора необходимо учитывать сразу все пять параметров. На практике проблемы возникают обычно с параметрами (1), (2) и (5): конечные пользователи порой затрудняются точно определить условия измерения тех или иных параметров. Также поступают и производители, специфицируя тот или иной прибор.

Например, значение мощности, которую может рассеивать тот или иной резистор, указывается при размещении последнего «на идеальном теплоотводе» или «на бесконечно большом теплоотводе» без указания, каким образом пользователь может пересчитать эти значения при использовании конкретного теплоотвода в реальных условиях. Также порой забывают, что температура резистивной пленки несколько отличается от температуры в месте, где резистор соприкасается с подложкой. При этом никто не указывает, в каком конкретно месте температура должна быть измерена, не говоря уже о том, что резисторы в керамических корпусах вообще не позволяют произвести измерение температуры резистивного слоя.

Еще одной ошибкой является использование различных методик по определению изменения сопротивления резисторов из-за старения последних. Иногда производители указывают данные, полученные при тестировании постоянным током. Конечные же пользователи могут использовать ВЧ напряжение и, естественно, их результат будет несколько отличаться от полученного производителями. Та же картина наблюдается и при измерении КСВН: как правило, все заказчики указывают КСВН, но редко указывают, каким образом резистивный элемент соединяется с их платой, каковы толщина подложки их платы, конфигурация используемых микрополосковых линий, диэлектрическая проницаемость материала подложки и т. д. Так же ведут себя и производители, часто не указывая, в каких условиях был измерен КСВН.

Чтобы избежать подобных ошибок, необходимо придерживаться некоторой последовательности при подборе того или иного резистора:

- Необходимо выбрать, по какой технологии будет изготавливаться тот или иной резистор: по толсто пленочной или тонко пленочной.
- Необходимо определиться с допустимым изменением номинала резистора из-за процесса старения (в рабочем диапазоне температур и при прикладывании рабочего напряжения).
- Необходимо выяснить, какой из факторов (температура или напряжение) будет оказывать доминирующее влияние на процесс старения. Следует отметить, что указанные факторы могут взаимодействовать между собой. Так, например, старение резистора в зависимости от рабочего напряжения может вдобавок иметь температурную зависимость.
- Если температура резистивного слоя не должна превышать определенного значения при заданном значении рассеиваемой мощности и известных параметрах материала подложки, то следует определить минимальную площадь резистивного слоя. (Для резисторов необходимо определить еще и емкость данного слоя по отношению к подложке.)
- Необходимо определить размеры резистивного слоя и параметры структуры согласования импеданса для обеспечения требуемого коэффициента отражения.

- Провести корректировку параметров резистора с учетом практических требований и ограничений технологического характера (габаритов корпуса, площади контактных площадок и т. д.).

Безусловно, большинство из приведенных выше рекомендаций не нужны, если вы выбираете стандартный продукт. Однако в СВЧ-цепях часто требуются нестандартные элементы, и в этом случае данные рекомендации позволят сэкономить вам много времени и сил.

Рассмотрим некоторые из параметров резисторов более подробно.

В качестве наглядной демонстрации эффекта старения резистора приведены графики, представленные на рис. 10, 11 и 12. На рис. 10 приведено изменение сопротивления (в процентах от номинала) четырех групп резисторов (отличающихся толщиной резистивного слоя), произошедшее в течение 1000 часов.

Испытываемые резисторы были помещены в термощкаф и находились там при температуре 150 и 200 °С (рис. 10). К резисторам не прикладывалось никакого напряжения. Следует отметить, что изменение сопротивления резистора в условиях повышенной температуры в основном обусловлено окислением поверхности резистивной пленки. Более тонкие пленки (с большим поверхностным сопротивлением) изменяют свое сопротивление быстрее, чем толстые, за счет того, что слой оксида составляет значительную часть толщины пленки в целом.

Для сравнения на рис. 11 и 12 показано изменение сопротивления резисторов при воздействии на последние переменным и постоянным напряжением. Как видно из графиков на этих рисунках, при приложении переменного напряжения старение резисторов приводит к увеличению их сопротивления (как и в случае только температурного воздействия), однако при воздействии постоянного напряжения мы имеем обратный эффект — в начале цикла старения сопротивление резистора уменьшается за счет объединения отдельных резистивных частиц в группы с низким сопротивлением. Обычно данный эффект проявляется в толстых пленках, однако в некоторых случаях он может возникнуть и при использовании тонкопленочной технологии.

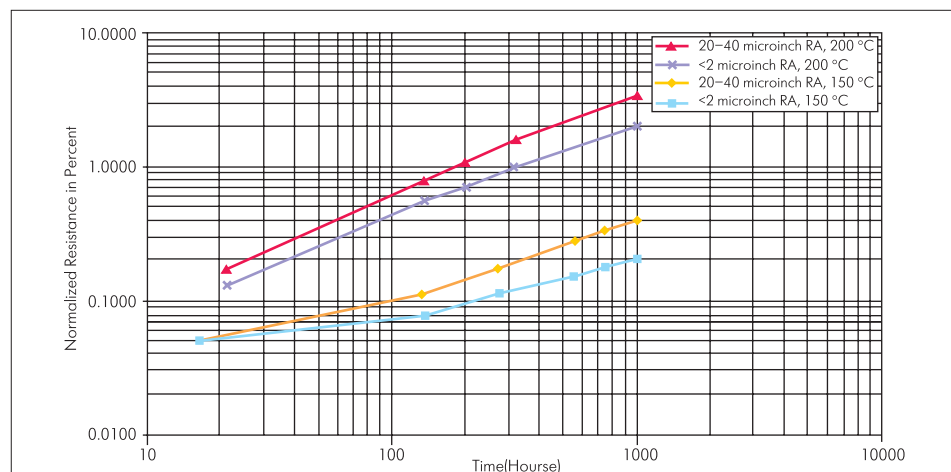
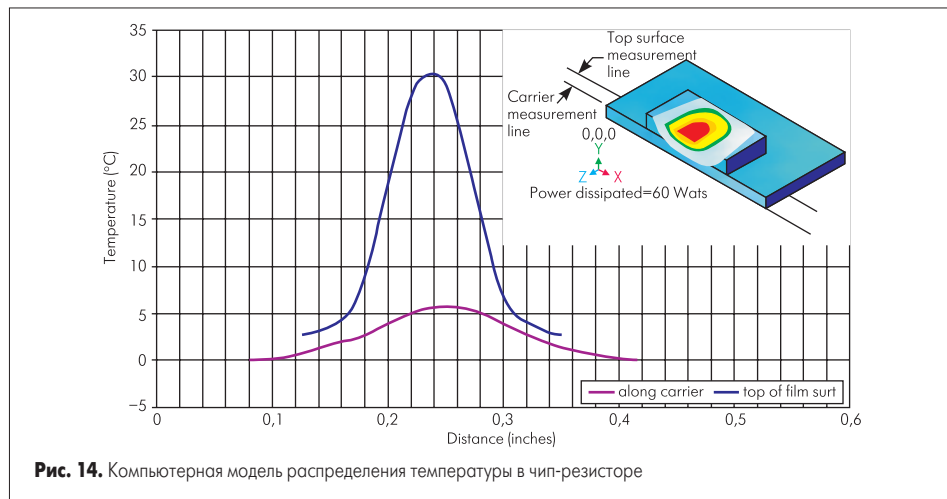
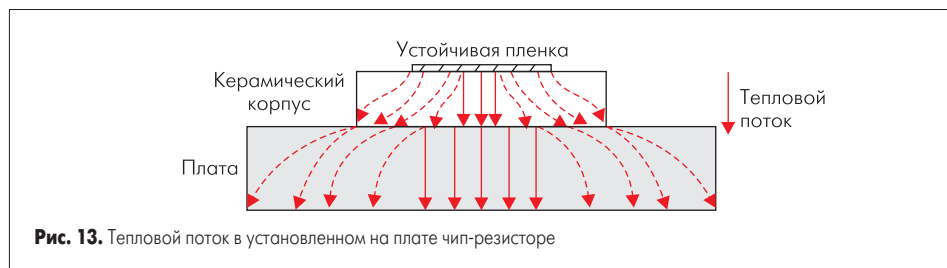
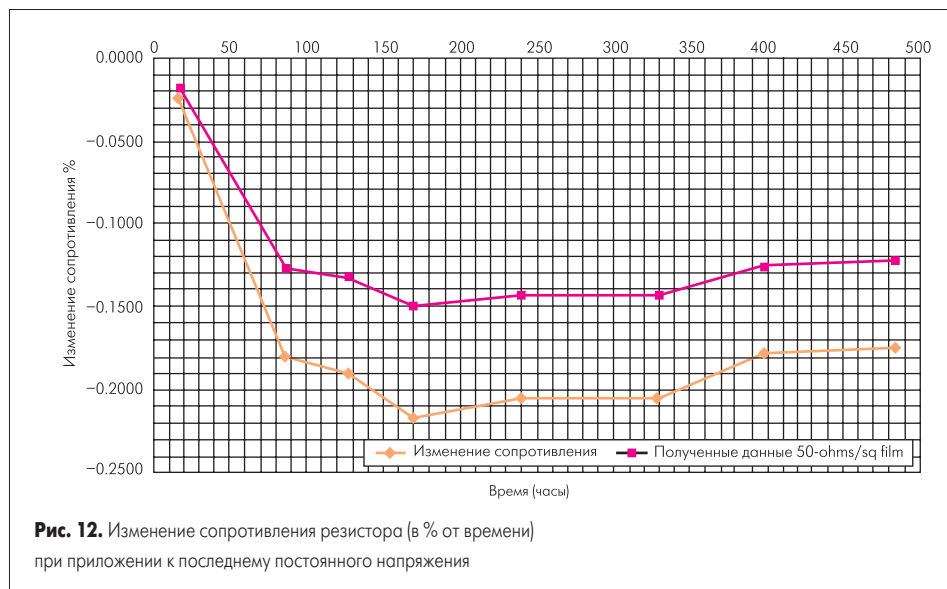
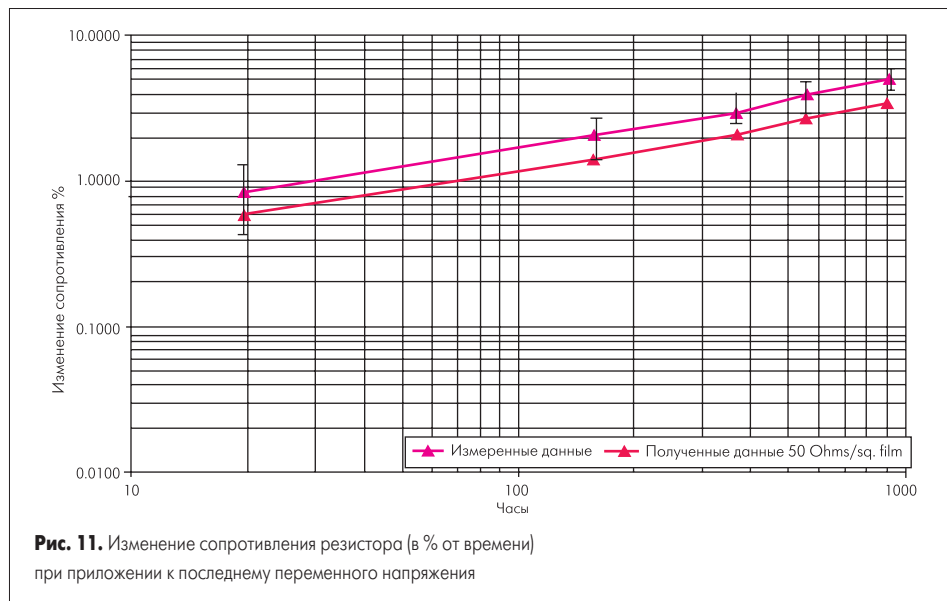


Рис. 10. Изменение сопротивления резистора (в % от времени).

Данные нормированы для резистивного слоя с удельным сопротивлением 50 Ом/квдрат



Что касается рассеиваемой резистором мощности и определения максимальной температуры резистивного слоя, то в данном вопросе необходимо сначала дать некоторые разъяснения. На рис. 13 изображен тепловой поток, возникающий в установленном на плате чип-резисторе. Как видно из рисунка, тепловой поток (Heat flow) неравномерен в различных областях керамического корпуса резистора (Ceramic chip) и платы (Carrier), что приводит к тому, что температура в разных частях резистора будет различной.

В подтверждение этого на рис. 14 приведена компьютерная модель распределения температуры в чип-резисторе. На графике, показанном на этом рисунке, приведено изменение температуры, рассчитанное для поверхности пленки (top of film surf) и вдоль основания резистора (along carrier). В связи с этим можно выделить несколько точек на самом резисторе и вблизи него, которые используются для измерения температуры в процессе определения некоторых параметров сопротивления (рассеиваемой мощности, температуры резистивного слоя и т. д.). Данными точками являются (рис. 15): геометрический центр резистивной пленки (T0), температура на краю (вблизи угла) резистивной пленки (T1), температура установочной поверхности непосредственно под геометрическим центром резистивной пленки (T3) и температура установочной поверхности на расстоянии 30 мил от края чипа (T2).

Основываясь на вышесказанном, можно сделать следующие качественные наблюдения:

- Старение резистора в зависимости от температуры зависит в основном от средней по площади температуры резистивной пленки. Пиковой температурой пленки можно пренебречь, если она не настолько велика, чтобы привести к катастрофическим последствиям.
- T0 обычно является точкой с наибольшей температурой для резистивной пленки, симметрично расположенной на основании. Однако это утверждение справедливо лишь для резисторов. Для терминаторов положение точки с наибольшей температурой вполне может оказаться в неблагоприятном месте, например в месте, где пленка подверглась лазерной подгонке, или в месте, где толщина подложки невелика. Положение данной точки можно получить экспериментально.
- Инструмент с невысокой разрешающей способностью, например тепловая камера с размером сканируемой области порядка 30 мил, не сможет правильно измерить T0 или другую область локального увеличения температуры, особенно на пленках большой площади, поскольку они характеризуются быстрым изменением температуры между соседними областями поверхности.

Одним из возможных способов указания некоторых параметров резистора является измерение T3 и затем по компьютерной модели вычисление T2 (используя некоторые допущения). Есть еще один способ: резистор разрезают на две половинки вдоль продольной оси (на рис. 15 плоскость разреза будет перпендикулярна к плоскости рисунка и пройдет по пунктирной линии). За счет симметрии по-

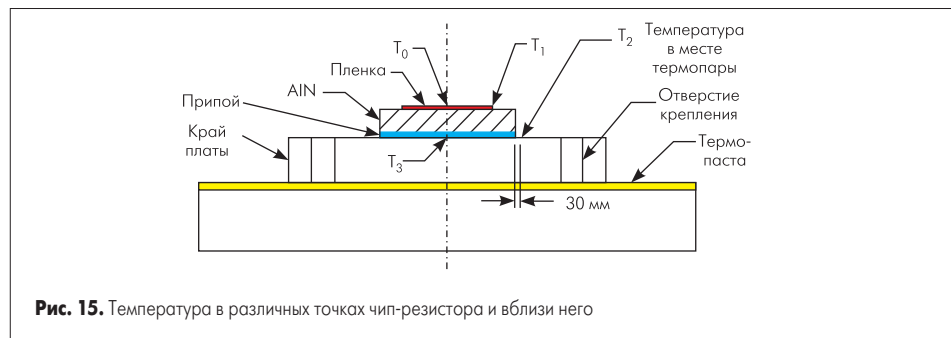


Рис. 15. Температура в различных точках чип-резистора и вблизи него

Таблица 5. Разница температуры между двумя точками поверхности, на которую устанавливается чип-резистор (рис. 15)

Размеры резистора		Размеры резистивной пленки		Приложенная мощность, Вт	Разница T3-T2, °C
длина, мил	ширина, мил	длина, мил	ширина, мил		
200	100	146	84	30	5,7
250	250	196	112	60	12,9
375	250	321	184	150	15,3

перечных тепловых потоков становится возможным непосредственно измерить T2 и T3 для некоторых резисторов при определенных значениях мощности. Результаты подобных измерений приведены в таблице 5. Все резисторы, подвергшиеся измерениям, имели высоту 40 мил и устанавливались на медное основание с покрытием из серебра.

Однако указанные методы хороши лишь для лабораторных условий и неприемлемы в условиях серийного производства. Таким образом, для внесения ясности в спецификации резистора четко оговариваются условия проведения тех или иных измерений. В первую очередь определяются размеры и материал теплопроводящего основания, на которое устанавливается испытываемый компонент. Затем определяется, в каком месте происходит измерение T2, и, наконец, оговаривается, каким именно инструментом производилось то или иное измерение. Оговорив таким образом условия, мы можем четко определить максимально допустимую мощность нашего резистора. Например, это может выглядеть следующим образом: при приложении к резистору максимально допустимой мощности и обеспечении в точке T2 заданной температуры окружающей среды будут соблюдаться два условия:

1. Максимальная температура резистивного слоя не превысит заранее оговоренное значение.
2. Изменение сопротивления резистивного слоя не превысит заранее заданного значения в процессе и после проведения 1000 часов тестирования по заданной методике (например, MIL-PRF-55342).

Рассказывая о характеристиках резисторов и методах их определения, нельзя не упомянуть о некоторых особенностях конструирования этих приборов. Все используемые чип-резисторы имеют стандартные размеры: например 0,2×0,1 дюйма или 0,25×0,25 дюйма. То же относится и к их высоте: в основном используются следующие значения — 25, 40, и 60 мил. Внутренняя структура резисторов также проектируется в соответствии с определенными закономерностями. Так, например, длина области перекрытия резистивного и контактно-

го слоев должна быть приблизительно равна ширине резистивного слоя. Есть, правда, одна особенность: независимо от того, по какой технологии выполнен резистор (толсто пленочной или тонкопленочной), всегда существует разброс сопротивления готового резистора (до подстройки). Для тонкопленочной технологии подобный разброс составляет 15%, что приводит к тому, что при заданном сопротивлении в 100 Ом реально резистор может иметь сопротивление от 85 до 100 Ом (до подстройки). Для обеспечения необходимого номинала резистора при разработке его топологии обычно задаются допуском в 20%. В любом случае, для обеспечения высокой точности номинала резистора используется его подстройка. Обычно для маломощных резисторов она заключается в перерезании металлических проводников, расположенных перпендикулярно длинной стороне резистивного слоя, однако подобный метод может привести к локальному перегреву некоторых частей подстроечных проводников из-за увеличения в них тока, протекающего через резистор. В связи с этим часто используется метод уменьшения

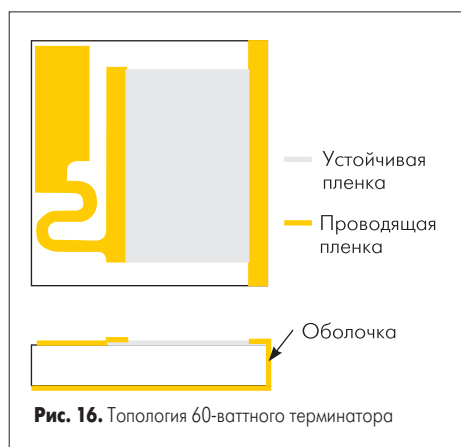


Рис. 16. Топология 60-ваттного терминатора

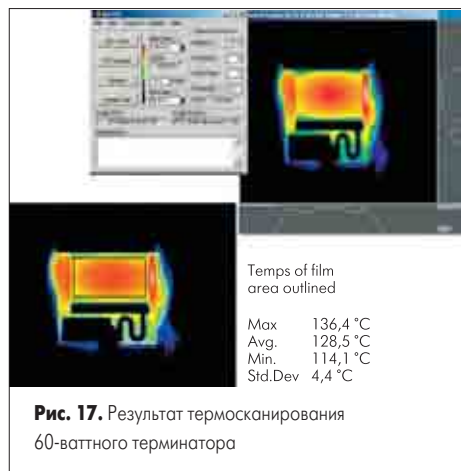


Рис. 17. Результат термосканирования 60-ваттного терминатора

ширины резистивного слоя. Таким образом, любой разрабатываемый резистор должен обладать шириной резистивного слоя, попадающей в 20%-ный интервал допуска, чтобы при последующем уменьшении ширины резистивного слоя (при подстройке резистора) можно было бы гарантированно достичь требуемого значения сопротивления.

Свои особенности имеют и конструкции терминаторов. В отличие от резисторов терминатор не только должен удовлетворять требованиям, предъявляемым к резистору (то есть обеспечивать заданную рассеиваемую мощность при определенной температуре резистивного слоя), но и обеспечивать требуемое значение импеданса. Так же, как и у резисторов, при проектировании топологии терминаторов задается допуск в 20% на ширину резистивного слоя. Помимо этого диэлектрическая постоянная подложки терминатора (нитрид алюминия) может меняться в диапазоне от 8,7 до 9,3, что вместе с допусками на линейные размеры элементов конструкции и корпуса терминатора приводит к уменьшению выхода годных изделий для заданного КСВН. К тому же если терминатор должен работать на частотах от нуля до нескольких гигагерц, он, как правило, проектируется таким образом, чтобы обеспечить приемлемое согласование во всей полосе частот, и, как следствие этого, измерение сопротивления постоянному току терминатора с номиналом, например, 50 Ом, не всегда покажет точное соответствие этому значению.

Топология 60-ваттного терминатора приведена на рис. 16. Результат термосканирования этого же терминатора при приложении к нему номинальной мощности — на рис. 17. При проведении термосканирования температура поверхности, на которой был установлен аттенуатор, составила 100 °C. Данная температура была измерена в соответствии с методикой, приведенной выше (на расстоянии 30 мил от края аттенуатора).

Суммируя все сказанное выше, можно отметить, что правильное применение резисторов и аттенуаторов в ВЧ/СВЧ-цепях во многом зависит от понимания разработчиком особенностей функционирования этих элементов, а зачастую — и от знания им нюансов их конструкции.

Литература

1. Дидилев С. Пассивные ВЧ/СВЧ-компоненты American Technical Ceramics // Компоненты и технологии. 2003. № 6.
2. Richard Fiore (Ричард Фиоре). Capacitors in Coupling and DC Blocking Applications // Circuit Designer's Notebooks. ATC # 001-927; Rev E. 1/05
3. Richard Fiore (Ричард Фиоре). Capacitors in Bypass Applications // Circuit Designer's Notebooks. ATC # 001-927; Rev E. 1/05
4. Richard Fiore (Ричард Фиоре). High Q Capacitors in Matching Applications // Circuit Designer's Notebooks. ATC # 001-927; Rev E. 1/05
5. Richard Fiore (Ричард Фиоре). ESR Losses in Ceramic Capacitors // ATC #001-923; Rev C, 5/04
6. ATC High Power Resistive Products // ATC #001-944; Rev C, 8/04.