

Резисторы – основные типы и характеристики

Часть 3

В. Горбачёв¹, В. Кочемасов, к. т. н.²

УДК 621.316.8 | ВАК 05.27.01

В первой и второй частях статьи, опубликованных в пятом и шестом номерах журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2021 год, было рассказано о ряде параметров, которые наиболее часто используются для оценки применимости резисторов, резисторах нескольких типов и технологиях их производства. В данном номере рассматриваются пассивные компоненты сопротивления общего назначения.

ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Чип-резисторы

Базовые понятия

Уже стало общим местом упоминание о том, что чип-резисторы по объему производства в группе пассивных компонентов уступают только многослойным керамическим конденсаторам (Multilayer Ceramic Capacitor, MLCC). Тем не менее, факт остается фактом: и MLCC, и чип-резисторы, позволяющие поддерживать тренд на миниатюризацию современного электронного оборудования, стабильно удерживают «призовые» места в производстве. Небольшие размеры чип-резисторов снижают паразитные реактивности, в силу чего эти компоненты широко применяются в высокочастотной аппаратуре. Существующая эквивалентная схема чип-резистора, позволяющая оценить частотные свойства через паразитные реактивности, основана на представлении этого устройства как линии передачи с распределенными параметрами (рис. 13) [16] и многократно рассмотрена, в том числе в [16] (в этом источнике термином *Lumped* (сосредоточенный) описываются компоненты, длина которых не превышает одной десятой длины волны электромагнитного колебания, что делает изменение фазы в компоненте при прохождении волны несущественным).

По существу эквивалентной схемы нужно отметить, что величины реактивностей определяются физическими размерами резистора и отчасти способом его монтажа, влияющим на положение относительно заземляющей поверхности. Так, в ситуациях, когда компонент достаточно удален от заземления, последовательная индуктивность L_s может моделироваться как ленточная катушка, параметры которой определяются ее длиной (то есть

¹ ООО «Радиокомп», ведущий инженер.

² ООО «Радиокомп», генеральный директор.

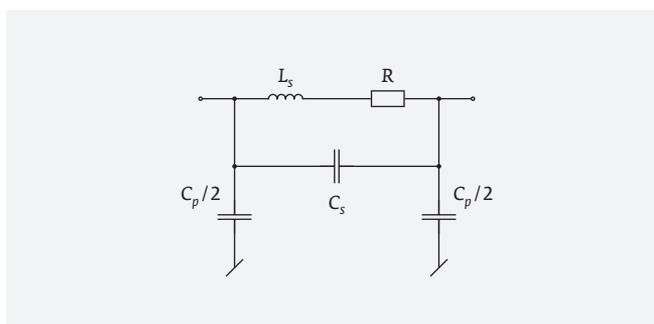


Рис. 13. Эквивалентная схема чип-резистора. L_s – последовательная индуктивность, C_s – последовательная емкость, C_p – шунтирующая емкость

размерами резистора). В [16] приводится типовое значение последовательной индуктивности в 0,7 нГн для формфактора 0805. В свою очередь, распределенная шунтирующая емкость C_p описывается моделью RC-линии передачи, в которой учитываются диэлектрические константы материала резистора и окружающего пространства. В том же документе [16] в качестве примера шунтирующей емкости резистора 0805 на плате из материала FR4 толщиной 0,032" указана величина 0,2 пФ. Последовательная (межконтактная) емкость C_s становится значимой с увеличением сопротивления резистора и также зависит от диэлектрической константы материала резистора и размеров контактных площадок.

Отвод тепла

По самой физической сути резистора как прибора сопротивления, рассеивающего мощность, и в силу перманентной миниатюризации одним из основных вопросов для чип-резисторов является отвод тепла. На решение этой проблемы направлены усилия производителей по разработке и исследованию подложек, формы контактных

площадок и способов монтажа чип-резисторов. Поскольку о подложках уже говорилось выше, чуть подробнее о двух других факторах.

В настоящий момент в чип-индустрии используются в основном пять видов дизайна контактных площадок резисторов. Обозначения, которые используются для них в материалах фирмы АТС, представлены на рис. 14 [17]. Похожие обозначения используют и некоторые иные производители резисторов, с той лишь разницей, что первая литера двухбуквенного обозначения заменяется на другую. Но есть компании (например, IMS), которые применяют свою систему обозначений. Надо отметить, что столь солидный набор типов контактных площадок используется в основном в мощных и высокочастотных приложениях. Подавляющее большинство иных приложений использует CW-тип контактных площадок, именуемый в зарубежной документации wraparound. Как видно из рисунка, отличительная особенность четырех остальных типов – это наличие контактной площадки для отвода тепла (на нижней стороне), электрически соединенной с одним из контактов у нагрузки (CZ-, CT-типы) и изолированной у резистора (CR-, CS-типы).

Рис. 14, кроме явно обозначенного разделения контактных площадок по типу компонента (резистор, нагрузка), содержит разделение еще на две группы, различающиеся способом монтажа. Это различие поясняется в [17] и состоит в том, что компоненты, называемые просто словом «чип» (с контактными площадками типов CT и CR),



Рис. 14. Типы контактных площадок (данные компании АТС). Красные линии – контактные площадки, желтые – монтажные элементы типа wire bond

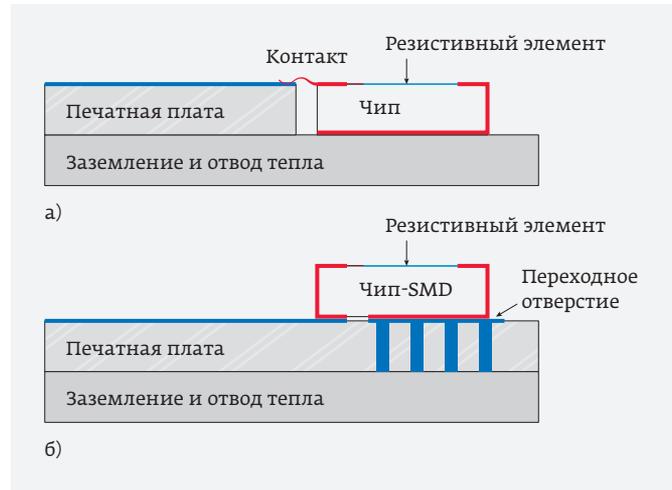


Рис. 15. Монтаж чип- (а) и SMD-чип (б) компонентов на примере нагрузки (данные компании АТС)

обычно монтируются в микровырезы платы (рис. 15) на заземляющую поверхность (Groundplane), выполняющую также роль теплоотвода.

А компоненты, имеющие контактные площадки типов CZ, CS и CW, относятся к группе SMD-компонентов и монтируются на поверхность печатной платы. При этом тепло отводится через контактную площадку, заполненную залитыми припоем переходными отверстиями.

Конечно, считать, что приведенная выше классификация является однозначно определенной и универсальной, было бы преувеличением. Существуют типы корпусов чип-резисторов, не укладывающиеся в очерченные границы. Например, фирма State of the Art (SOTA) выпускает изделие (S0202FS1001DKW), у которого один контакт выведен на верхнюю сторону резистора, а второй – на нижнюю, но при этом электрическое соединение резистивного слоя и нижней контактной площадки делается не «оборачиванием» контактной ламели (wraparound), а посредством проводящей кремниевой подложки. В терминологии производителя этот тип корпуса называется Back Contact Resistors (BCRs) и, как указывается, может удешевить процесс пайки за счет уменьшения количества проводных соединений (wire bonding). Отметим также, что в классификацию не вошли корпуса с частичным «оборачиванием» ламели (общее название partial wrap).

Завершая информационный блок, посвященный типам контактных площадок, необходимо еще раз вернуться к типу CW. Это один из самых востребованных дизайнов, имеющий хорошие параметры по механической прочности. Из-за больших по сравнению с типами CR, CT размеров контактных площадок этот тип имеет объективно худшие значения последовательной емкости. Тем не менее, фирма IMS (www.ims-resistors.com) предложила технологию использования CW-компонентов в высокочастотных

приложениях. Для этого производится монтаж компонента резистивным слоем вниз (Face-down Mounting). При этом протекание тока по более короткому маршруту, чем в случае традиционного монтажа, уменьшает площадь токовой петли и связанную с ней паразитную последовательную индуктивность (ESL) [18]. Исследования, проведенные на аттенюаторах А-серии компании IMS, относящихся к типу wground, для диапазона до 10 ГГц, показали, что частотный диапазон компонентов с монтажом Face-down увеличился до 40 ГГц с улучшением КСВ в верхней части диапазона. На рис. 16 представлено сравнение по КСВ (через обратные потери).

Можно также упомянуть о серии двухсторонних чип-резисторов DSC (Double-Sided Chip Resistors) фирмы Welwyn Components (управляется компанией TT Electronics). Эта серия резисторов уже в силу своего устройства, подразумевающего наличие резистивных слоев с обеих сторон подложки, выпускается с контактными площадками wground. Очевидными достоинствами такой конструкции являются расширенный диапазон мощностей и улучшенные импульсные свойства компонентов.

Точность номинала

Если отвод тепла мы обозначили как первый основной вопрос резисторостроения, то вторым, несомненно, является вопрос достижения заданной точности номинала, или допуска (tolerance). Рассмотрим этот вопрос на примере тонкопленочных чип-резисторов на основе нитрида тантала (TaN). Для начала напомним два понятия. Тонкой пленкой будем называть материал, толщина

которого много меньше расстояния между контактами. Сопротивление тонкой пленки произвольной площади в форме квадрата называется «удельным сопротивлением на квадрат» и обозначается как Ом/□ или Ом/кв. Этот параметр удобен тем, что сопротивление квадратного фрагмента проводящей пленки не зависит от размеров этого квадрата, при приложении напряжения по противоположным сторонам квадрата. Это объясняется тем, что квадратный фрагмент пленки можно представить как систему последовательно-параллельных цепочек резисторов, в которой увеличение длины квадрата (по линии тока) эквивалентно наращиванию последовательного сопротивления, а соответствующее увеличение ширины – наращиванию параллельных звеньев. При этом сопротивление фрагмента пленки, если он имеет форму прямоугольника, не зависит от его линейных размеров, а только от отношения длины *L* (измеренной вдоль линии тока) к его ширине *W*: *L/W*. Тогда сопротивление *R* тонкопленочного резистора определяется «геометрической» формулой:

$$R=r(L/W),$$

где *r* – удельное сопротивление (Ом/кв).

Технология производства чип-резисторов с высокими значениями допуска (~0,5%) наглядно представлена в документе компании ATP (www.thinfilm.com) [19]. На первом этапе создается своеобразная заготовка будущего резистора, которую можно представить как цепь последовательно соединенных квадратов тонкой пленки,

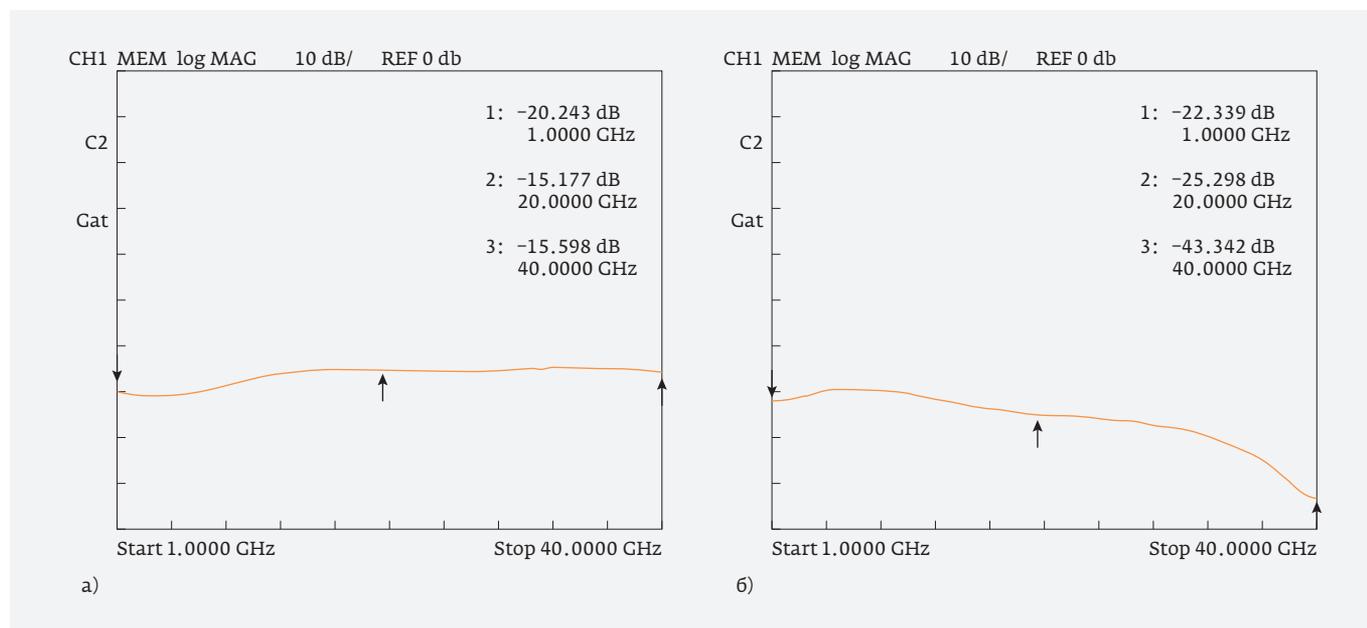


Рис. 16. Сравнение частотных откликов при монтаже аттенюатора А-0402 (компания IMS) резистивным слоем вверх (а) и вниз (б)

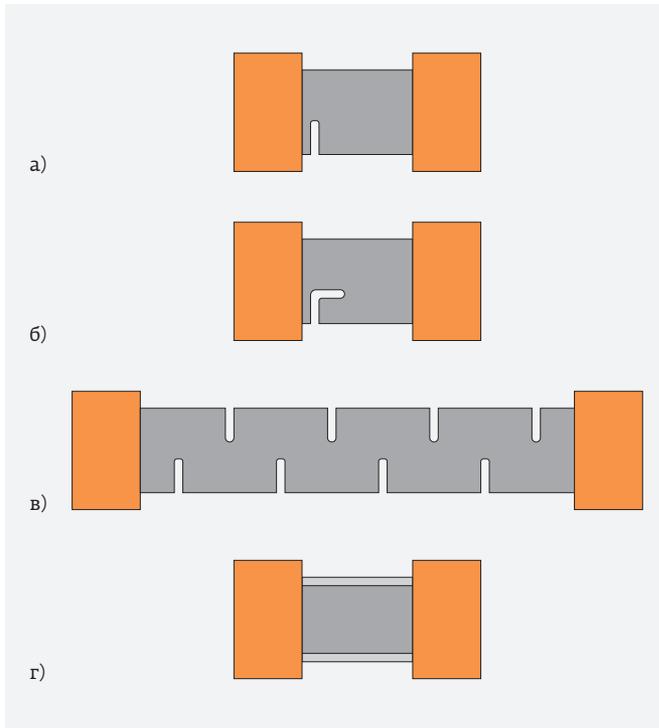


Рис. 17. Типы лазерных вырезов: а – «врезание» (Plunge Cut), б – «L» (L Cut), в – «змеевик» (Serpentine Cut), г – типа «сканирование» (Scan Cut) (данные компании АТР)

каждый из которых имеет сопротивление r . На втором этапе происходит лазерная обработка (подрезка) заготовки для получения точного значения номинала. Поскольку при серийном производстве приходится обрабатывать лазером миллионы изделий, разработаны и применяются типовые формы вырезов. Они представлены на рис. 17. Самый простой, быстрый и дешевый тип выреза – «врезание» (Plunge Cut) (рис. 17а). Он применяется при допуске до 5%. Рекомендован для приложений постоянного тока (DC). Вырез типа «L» (L Cut) (рис. 17б) обеспечивает улучшенный допуск по сравнению с Plunge Cut. Также применяется при допуске до 5%. Он более дорогой, сложный и затратный по времени. Рекомендован для DC. Вырез типа «змеевик» (Serpentine Cut) (рис. 17в) дает более широкий диапазон изменения значений сопротивления и лучший допуск, чем

два предыдущих типа вырезов. Обычно применяется для DC.

Вырез типа «скан» (Scan Cut, встречается также термин Scrub Cut) обычно производится с обеих сторон заготовки, хотя немало примеров и одностороннего применения. Он позволяет получить наилучшие показатели по частотному отклику и точности номинала (допуск до 0,05%). Этот тип вырезов – самый дорогой, сложный и затратный по времени. Рекомендован для любых приложений.

На рис. 18 [19] представлена одна из форм заготовки чип-резистора и получившегося после лазерной обработки результата. Эта форма носит название Top-Hat Configuration (конфигурация «шляпа»). Именно она позволяет получить наиболее широкий диапазон настройки номинала сопротивления. Показанный на рис. 18б резистор состоит из 11 квадратов, семь из которых имеют сопротивление $1r$, а четыре, расположенные в углах формы – сопротивление $0,56r$ (поскольку напряжение приложено к смежным сторонам квадрата). Считается, что полное сопротивление получившегося чип-резистора равно $9r$.

Управляя формой выреза, можно получить увеличение номинала до трех раз относительно начального значения, с допуском до 0,5%.

Как и в предыдущем разделе, где рассматривались типы контактных площадок, здесь нас тоже будут интересовать теплоотвод и частотный отклик применяемых форм. Для анализа этих характеристик воспользуемся

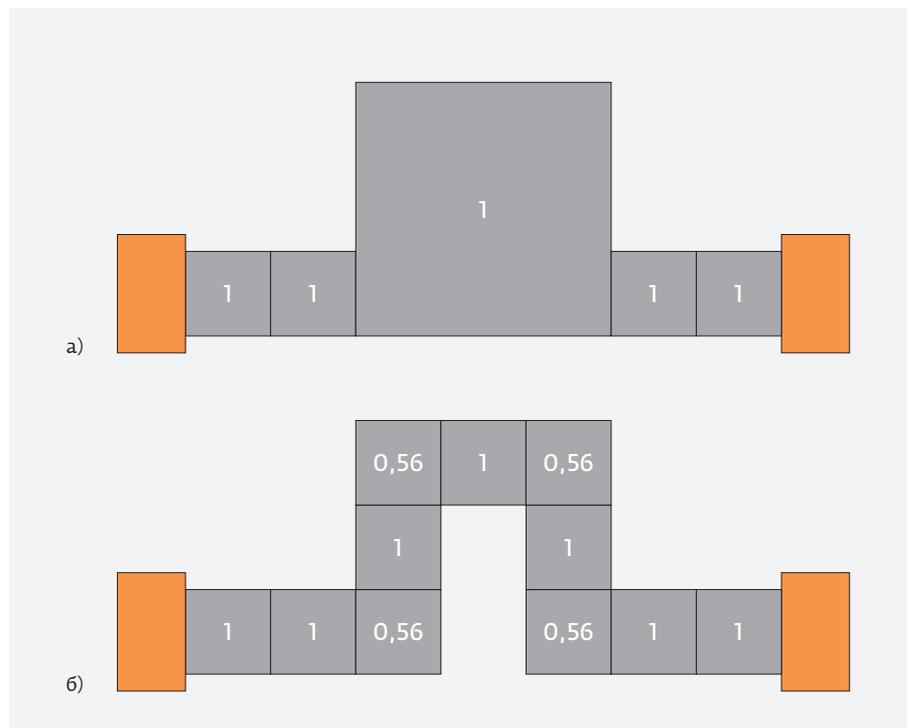


Рис. 18. Конфигурация резистивного слоя типа Top-Hat до (а) и после (б) обработки (данные компании АТР)

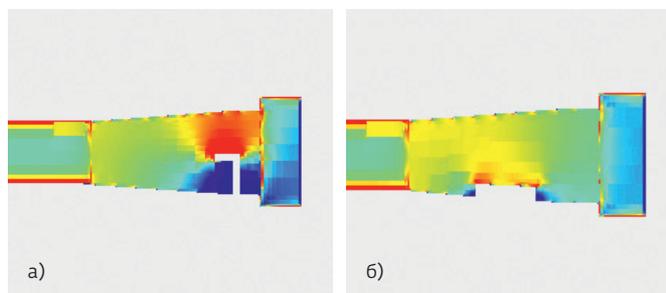


Рис. 19. Распределение температуры: а – вырез типа «L»; б – вырез типа «Scan»/«Scrub» (данные компании IMS)

публикацией фирмы IMS [20]. На рис. 19 представлено распределение плотности тока (через распределение температуры) на двух резисторах, обработанных до одинакового допуска.

Как видно, вырезы типа «скан» не создают уплотнений тока на резистивном поле и позволяют достичь более равномерного распределения температуры, что автоматически означает возможность работы с большими токами.

В уже цитированном документе [20] рассматриваются и частотные свойства двух типов вырезов. Исследования проводились на резисторах серии N (на подложке из нитрида алюминия) для диапазона мощности до 150 Вт. Исследуемая группа содержала два резистора форм-фактора 2512 и два – 2010. В каждой размерной паре один резистор обработан по схеме «L» (в обозначении имеются литеры SG) и один по схеме «Scan» (в обозначении имеются литеры SZG). Частотный отклик всех четырех образцов приведен на рис. 20. Здесь мы видим, что в обеих размерных парах более высокочастотными являются образцы с вырезами типа «скан».

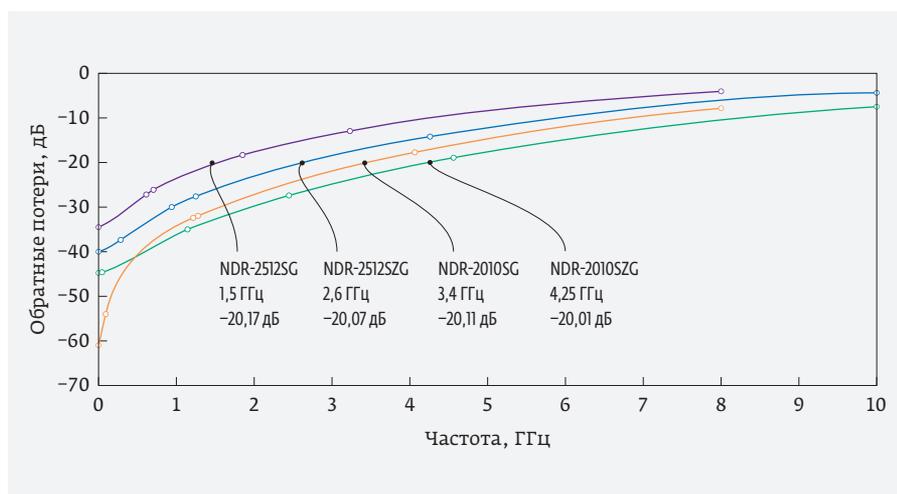


Рис. 20. Обратные потери для вырезов типов «L» и «Scan»/»Scrub» (данные компании IMS)

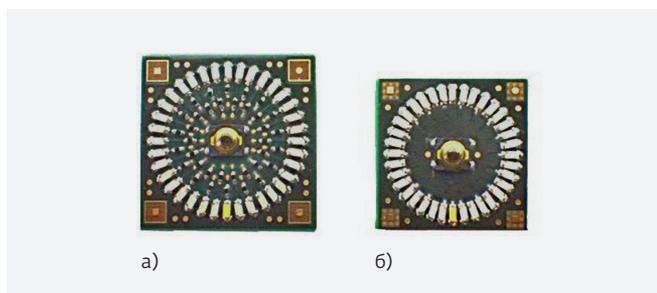


Рис. 21. Сравнительные размеры плат с резисторами, расположенными на поверхности платы (а) и встроенными в плату (б) (данные компании KOA)

Полезно отметить, что компания IMS разработала и производит в той же N-серии резистор с вырезом типа «скан» NDR1225SZG, рассчитанный на мощность до 200 Вт. Его частотные свойства оказались еще более впечатляющими. Если сравнивать с рис. 20, то обратные потери RL –20 дБ у этого чип-резистора достигаются на частоте 6,65 ГГц.

Встроенные чип-резисторы (Embedded resistors)

Перманентный тренд на миниатюризацию чип-резисторов всемерно способствует их использованию как встроенных пассивных компонентов печатных плат. Преимущества такой технологии очевидны и доказательств не требуют. Это:

- повышение плотности монтажа и связанное с этим улучшение частотных параметров;
- лучшее рассеяние тепла из-за более высокой теплопроводности материала платы;
- более высокая надежность оборудования в силу улучшения защиты компонентов от воздействия внешних агрессивных факторов.

На рис. 21 представлены сравнительные размеры двух шестислойных плат, содержащих 36 светодиодов, управляемых контроллером (размещен на обратной стороне платы). На плате, показанной на рис. 21а, кроме светодиодов на плате расположены 37 резисторов, два конденсатора и кнопка. На плате, представленной на рис. 21б, все резисторы и конденсаторы встроены в плату. При этом площадь платы уменьшилась на 26% со 196 до 144 мм².

Сегодня в промышленности применяются три метода встроенного монтажа. Их краткое описание и характеристики по документам компании KOA приведены в табл. 7. С более

Таблица 7. Типы встраиваемых резисторов (данные компании KOA)

Характеристики	SMD-резисторы общего назначения	Низкопрофильные тонкопленочные резисторы	Толстопленочные резисторы, выполненные методом трафаретной печати
Толщина компонента	0,23 / 0,33 мм и др.	0,13 мм и др.	0,02 мм
Электроды компонента	Sn-покрытие	Cu-покрытие	-
Метод присоединения компонента	Пайка	Переходные отверстия + покрытие медью	Термоустановка
Особенности	<ul style="list-style-type: none"> Используются существующие технологии поверхностного монтажа; применяются компоненты разной толщины; большая толщина подложки; необходимо предотвращать растекание припоя 	<ul style="list-style-type: none"> Процесс наращивания подложки упрощается; снижается толщина подложки; проблемы с установкой компонентов разной толщины 	<ul style="list-style-type: none"> Возможны сверхтонкие подложки; высокая надежность соединений; большие допуски номинала; влияние внешних воздействий, укороченное время жизни

подробной классификацией встраивания и детальным описанием соответствующих технологий можно ознакомиться в [21].

Возвращаясь к табл. 7 можно отметить, что монтаж с использованием низкопрофильных чип-компонентов выглядит наиболее сбалансированной технологией встраивания. Со стороны производителя технология поддерживается выпуском соответствующей элементной базы. Уже упомянутая KOA производит серию низкопрофильных резисторов XR73 с высотой компонента 0,14 мм для мощности до 0,063 Вт. Резисторы серии имеют ТКС 200 ppm / K и температурный диапазон -55...155 °C. Номинальный ряд серии – от 1 Ом до 10 МОм с допусками 1 и 5%. На рис. 22 приведено фото с поперечным разрезом платы со встроенным низкопрофильным чип-резистором.

Впрочем, другие тонкопленочные технологии встраивания также имеют поддержку производителя. Так компания Ohmega Technologies, Inc. (www.ohmega.com) разработала и применяет технологию ORBIT™ (Ohmega Resistor Built In Trace). Для обозначения этой технологии также используется товарный знак Ohmega Ply MTR® – Micro Trace Resistor), посредством которой тонкопленочные резисторы встраиваются непосредственно в дорожки печатной платы. Очевидная экономия места достигается за счет отказа от посадочных мест для резисторов. Для производства резисторов используются тонкие пленки из никель-фосфорного сплава (NiP) с сопротивлением

25 и 50 Ом / кв. При этом получаются резисторы с номинальным рядом от 50 до 300 Ом с шагом 50 Ом, для мощности от 40 до 120 мВт (рис. 23) [22]. Производитель указывает ширину резисторов от 50 до 125 мкм и допуск номинала 10% [22].

Завершая материал о встраиваемых чип-резисторах, можно отметить, что слово «встраиваемый» в настоящее время получило своеобразное «второе измерение». Резисторы (и конденсаторы) с размерами 0,4×0,2 мм (01005 EIA) встраиваются не только во внутренние слои печатных плат, а еще и между выводами микросхем с шагом 0,5 мм. При этом зазор с ламелями составляет 15 мкм [23].

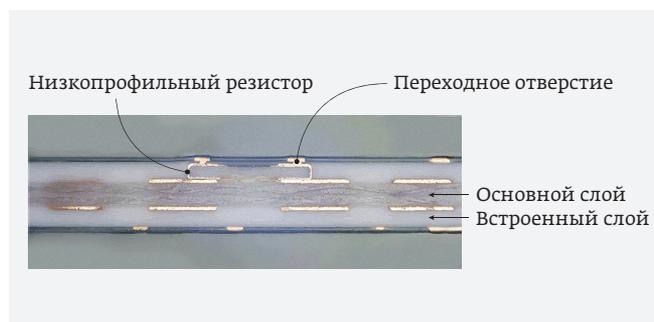


Рис. 22. Разрез платы со встроенным низкопрофильным чип-резистором (данные компании KOA)

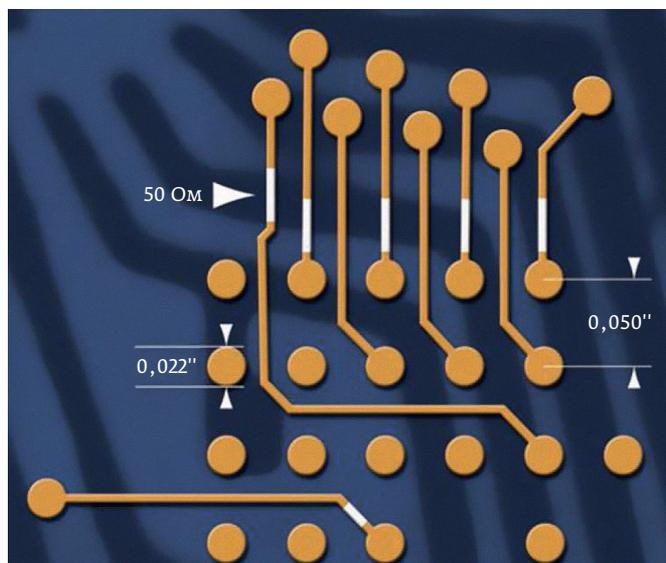


Рис. 23. Резисторы, встроенные в дорожки печатной платы

Особенности применения

За достаточно продолжительный период применения чип-резисторов проявились и были успешно преодолены некоторые недостатки конструкции. Одним из таких проблемных моментов является сульфидирование (осернение) внутреннего серебросодержащего электрода резистора. В результате этого процесса на внутреннем электроде образуется сульфид серебра (Ag_2S). Это вещество является твердой солью сероводородной кислоты (H_2S) и имеет свойства изолятора. Соответственно оно может нарушить контакт между резистивным материалом и контактной площадкой резистора. Наиболее подвержены этому дефекту толстопленочные чип-резисторы.

Чаще всего воздействие серы на резистор происходит в сложных условиях эксплуатации. Это могут быть содержащие серу масла и консистентные смазки механизмов, резиновые и резиносодержащие изделия, воздействие ископаемого топлива, присутствие вулканического и биологического газов. Конкретно в случае электронной индустрии используются технологии уплотнения и/или герметизации печатных плат формованной резиной, содержащей серу.

Значительные усилия по разрешению проблемы осернения приложены компаниями KOA и Arascer Technology Inc., основной продукцией которой являются платы DDR-памяти для вычислительных систем, срок службы которых часто значительно изменяется из-за воздействия сероводорода. В материалах компании Arascer процесс сульфидирования представлен на разрезе классического SMD чип-резистора (рис. 24) [24].

Защитная технология компании Arascer заключается в использовании специального сплава для верхних

электродов резистора. Состав сплава производитель не раскрывает. Специалистами Arascer проведен ряд тестов на традиционных и защищенных модулях DRAM. По условиям теста оба вида модулей проработали 1000 ч при температуре 105 °C в объеме 2400 мл, где было расплыено 50 г серы. По данным производителя стандартные модули памяти начали выходить из строя уже после 200 ч наработки. В то же время ни один из защищенных модулей не перестал работать в течение всего тестового интервала времени [24].

Компания KOA в качестве защиты от серы также использует свое ноу-хау. Выпускается 6–7 серий резисторов, защищенных с применением специального материала. Среди них присутствуют резисторы общего назначения, сверхпрецизионные, устойчивые к импульсам, высокомоощные, высоковольтные и сборки [25].

Еще один производитель резисторов – компания TT Electronics – выпускает серию резисторов APC для работы в серосодержащих средах для применения в автомобильной промышленности.

Резисторные структуры

Расположение нескольких резисторов на общей подложке – востребованный и имеющий преимущества прием в современной электронной индустрии. Сначала несколько слов о терминологии. В англоязычной технической литературе для обозначения резисторных структур используются термины Resistor Array (резисторная



Рис. 24. Процесс осернения: а – разрез резистора; б – пример применения (данные компании Arascer)

СОБСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ

Квадратурный делитель/
сумматор мощности

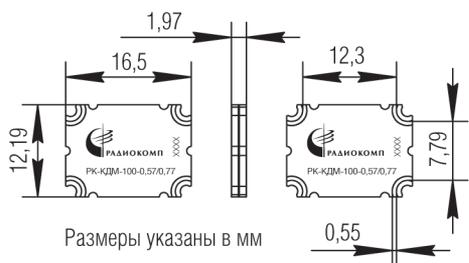
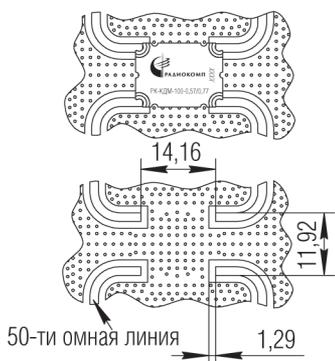
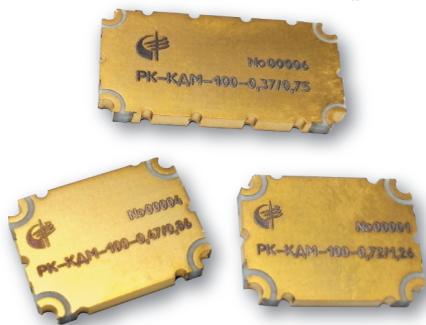
www.radiocomp.ru



РАЗРАБОТКА
ПРОИЗВОДСТВО
ИСПЫТАНИЯ
ПОСТАВКА

РАДИОКОМП

Квадратурный делитель/сумматор мощности РК-КДМ-100-0,47/0,86



Размеры указаны в мм

- Развязка
- Вносимые потери (прямое плечо)
- Вносимые потери (ответвленное плечо)
- КСВН порт 1
- КСВН порт 2
- КСВН порт 3
- КСВН порт 4

Данные устройства способны выдерживать большую мощность относительно своих малых габаритов. Технология изготовления обеспечивает хорошие электрические параметры, высокую повторяемость от партии к партии. Квадратурные делители/сумматоры мощности предназначены для поверхностного монтажа.

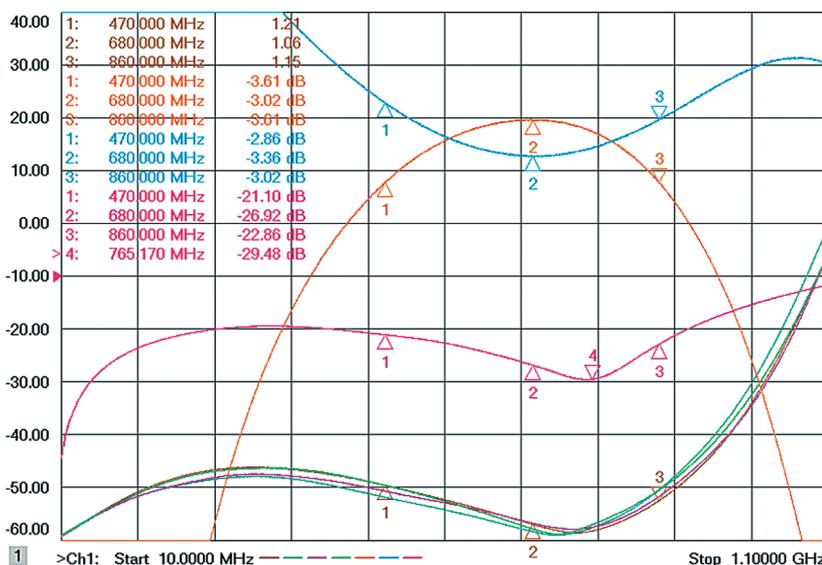
Диапазон рабочих частот, МГц.....	470 – 860
Неидентичность амплитуд, дБ.....	0,5
Развязка, дБ.....	25
Разность фаз, град.....	± 5
Максимальная непрерывная мощность, Вт.....	100
КСВН.....	1,25
Рабочий диапазон температур, °С.....	от -55 до +85
Габаритные размеры, мм.....	16,5 x 12,2 x 2

Основные преимущества технологии:

- надежность конструкции
- компактное решение
- высокий уровень развязки между каналами, малые потери
- не требует герметизации

В зависимости от условий эксплуатации мы можем предложить различные:

- типы финишного покрытия (иммерсионное золото, иммерсионное серебро, олово)
- конструктивы делителя/сумматора под требуемые габариты
- возможности поставки и приемки



Электрические характеристики квадратурных делителей/сумматоров

Модель	Диапазон частот, ГГц	Развязка, дБ, не менее	КСВН в рабочем диапазоне	Максимальная непрерывная мощность, Вт, не менее	Неидентичность амплитуд в рабочем диапазоне, дБ, не более	Габаритные размеры, мм
РК-КДМ-100-0,57/0,77	0,57 – 0,77	20	1,1 – 1,3	100	0,5	16,5 x 12,2 x 2
РК-КДМ-100-0,72/1,26	0,72 – 1,26	20	1,1 – 1,3	100	0,5	16,5 x 12,2 x 2
РК-КДМ-100-0,37/0,73	0,37 – 0,73	23	1,1 – 1,3	100	0,7	25,4 x 12,7 x 2
РК-КДМ-100-1,00/2,00	1,00 – 2,00	24	1,1 – 1,3	100	0,5	16,5 x 12,2 x 2
РК-КДМ-100-2,00/4,00	2,00 – 4,00	24	1,1 – 1,3	100	0,5	16,5 x 12,2 x 2

матрица, массив) и Resistor Network (резисторы с соединениями), также иногда встречается термин *multiple elements packages*. При этом подразумевается, что термином Resistor Array описывается резисторная структура, состоящая из отдельных, не соединенных друг с другом, резисторов. А в изделиях типа Resistor Network компоненты имеют соединения, либо, кроме резисторов, содержат еще и конденсаторы (чаще всего). В отечественной документации аналогом Resistor Array можно считать термин «набор резисторов», а Resistor Network – «резисторная сборка». Применяется также термин «набор резисторов». Но необходимо отметить, что и зарубежные и отечественные производители не особенно тщательно следят за чистотой терминологии.

В материалах компании Vishay приведено несколько типов устройств, которые могут быть выполнены на базе резисторных структур:

- наборы изолированных резисторов (Isolated);
- аттенюаторы (Attenuators);
- делители (Dividers);
- шинные структуры (Busses);
- многозвенные последовательно-параллельные схемы (Ladders).

Для полноты надо добавить сюда еще один тип, не вошедший в [26]: настраиваемые резисторные структуры. В англоязычной документации этот тип изделий чаще всего именуется Multi-Tap Wire bondable Resistor Array (многоконтактные подключаемые перемычками наборы резисторов).

Вся представленная выше терминология достаточно условна. Так, в качестве делителей могут использоваться структуры Dual-value Resistor (два одинаковых резистора на подложке. Терминология компании Vishay). Попутно отметим, что сдвоенные резисторы в терминологии компании State of the Art называются Center Tap Resistors, если резисторы соединены, и Dual Resistors – если изолированы. А фирма Bourns, производящая сборки резисторных делителей для формирования многоуровневых шин TTL и ECL (например, серия 4608X-104-221/331), использует для них обозначение Dual Terminator Resistor Network.

Справедливости ради отметим, что если точно следовать «букве» главы о компонентах сопротивления общего назначения, то этот раздел должен быть посвящен наборам резисторов (Resistor Array), в то время как сборки (Resistor

Network) отнесены в главу о компонентах специального назначения. Однако поскольку целью материала является рассмотрение общих вопросов применения резисторных структур, остановимся на компактном описании класса Array & Network.

В общем, преимущества использования резисторных структур очевидны: поддерживающая общий тренд на миниатюризацию экономия места на плате; повышение надежности конечных изделий за счет уменьшения мест пайки; связанное с этим снижение стоимости монтажа. Кроме того, ниже и стоимость собственно резисторной сборки в пересчете на дискретный элемент. И, наконец, улучшение характеристик оборудования по сравнению с использованием дискретных комплектующих.

Дополнительное преимущество сборок заключается еще и в том, что резисторы, помещенные на одну подложку, работают в одинаковых температурных условиях. Иллюстрация этого на примере чип-сборки, содержащей делитель напряжения, представлена на рис. 25 [27].

В этом примере показаны два варианта построения регулятора напряжения: с делителем на дискретных резисторах (рис. 25а) и с использованием чип-сборки тонкопленочных резисторов (рис. 25б). В обоих случаях использованы резисторы с ТКС ± 50 ppm / К. При этом $R_1 = R_2$. В варианте, представленном на рис. 25а, резистор R_1 расположен рядом с регулятором напряжения и может иметь температуру до 120 °С. Резистор R_2 расположен на другой изотермальной линии относительно регулятора напряжения и имеет температуру 20 °С. При такой разнице в температуре отличие в сопротивлениях резисторов делителя

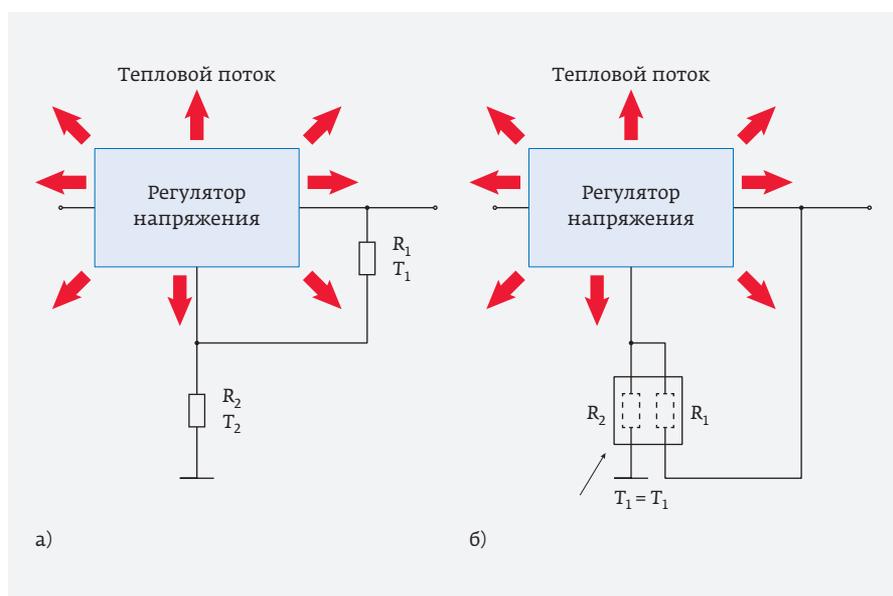


Рис. 25. Варианты построения регулятора напряжения с делителем на дискретных резисторах (а) и с использованием чип-сборки тонкопленочных резисторов (б) (данные компании Vishay)

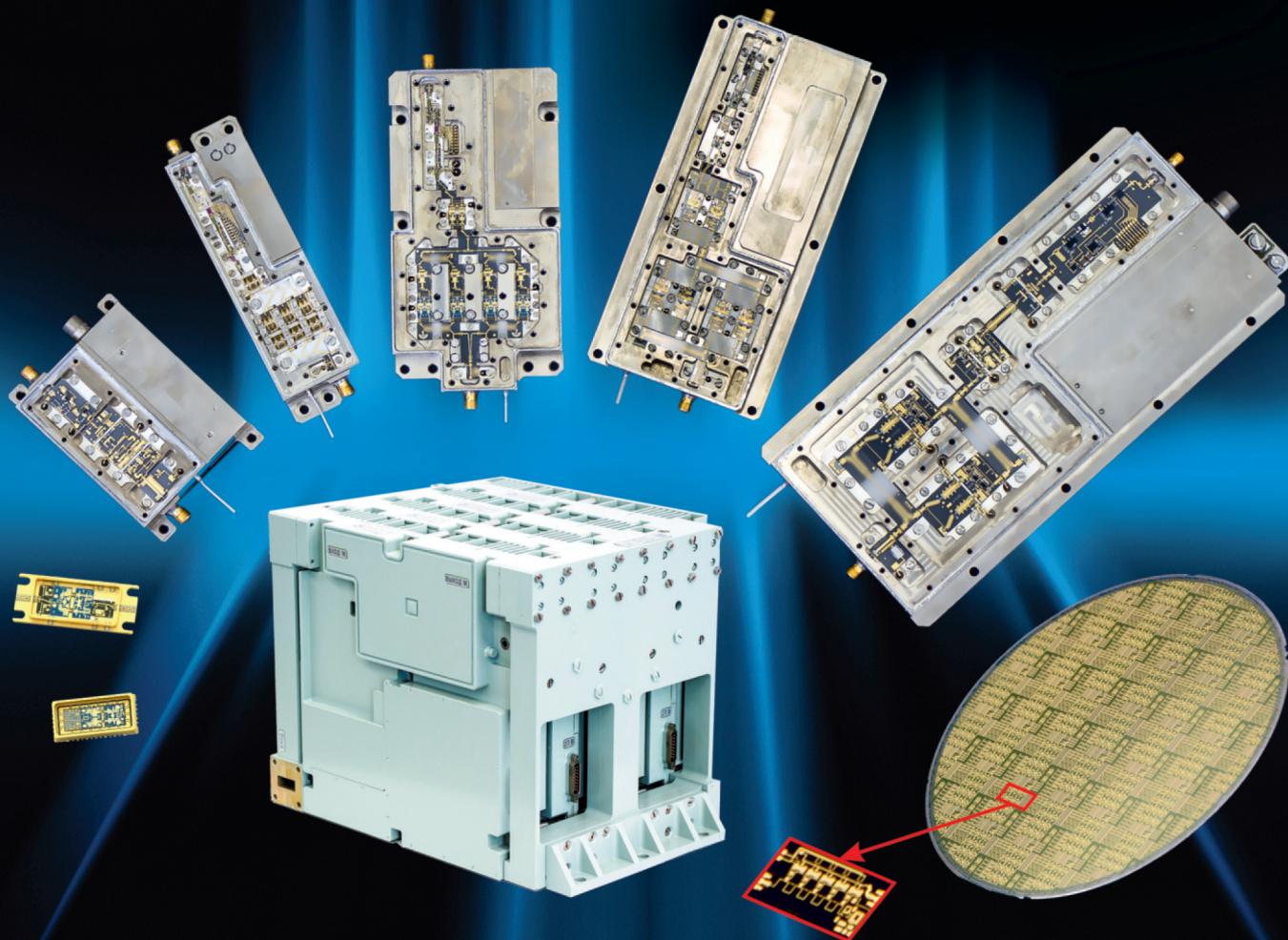


ИНТЕЛЛЕКТ. КАЧЕСТВО.

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»
Москва, Щелковское шоссе, д.5, стр.1
Тел. (499) 644-21-03, (499) 644-25-62
(многоканальный)
Факс +7(499) 644-19-70
E-mail: mwsystems@mwsystems.ru
www.mwsystems.ru

- СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНОЛОГИИ
- ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА/КАЧЕСТВО
- ПОЛНЫЙ СПЕКТР УСЛУГ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРОИЗВОДСТВУ МОНОЛИТНЫХ И ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА (0,3 - 22 ГГц)

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»



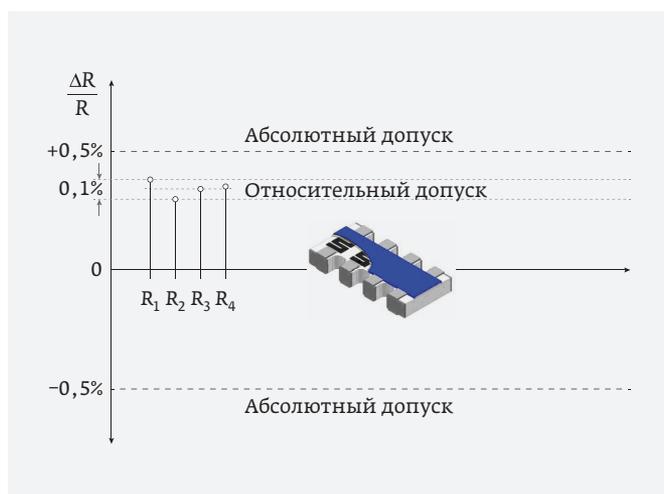


Рис. 26. Допуски в резисторной сборке (данные компании Vishay). R_1, R_2, R_3, R_4 – резисторы, входящие в состав сборки

с указанным ТКС может достигнуть 0,5%. В случае фиксированного регулятора, выходное напряжение которого определяется резистивным делителем, уход значения выходного напряжения может оказаться критическим для потребителей. Для компенсации такого температурного градиента, возможно, понадобится подстройка резисторов делителя. В варианте, показанном на рис. 25б, в качестве делителя использована сборка точных тонкопленочных резисторов, помещенных на одной изотермали относительно источника нагрева. В ситуации, когда конструктор печатной платы по каким-либо причинам не имеет возможности разместить резисторы дискретного делителя на одной изотермали, применение

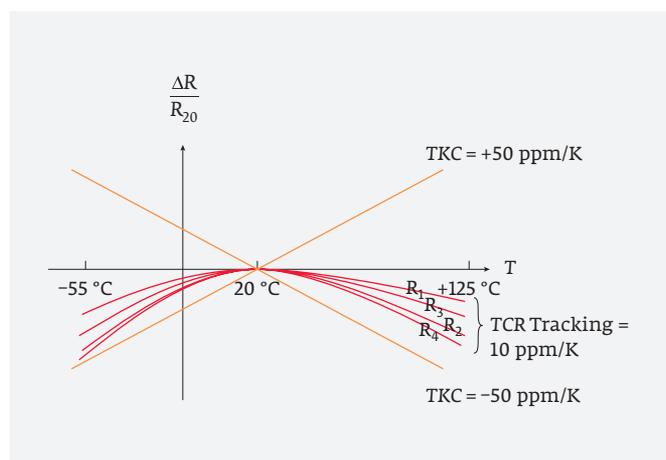


Рис. 27. Абсолютный и относительный ТКС резисторной сборки (данные компании Vishay). R_1, R_2, R_3, R_4 – резисторы, входящие в состав сборки; R_{20} – сопротивление при температуре 20 °C

резисторной сборки решает проблему температурной разрегулировки устройства.

Широкое применение резисторных сборок и наборов естественным образом ставит вопрос о специфических параметрах этих изделий, связанных именно с формулой «много резисторов, одна подложка». Такие параметры есть и для их рассмотрения вновь обратимся к работе [27].

Как мы помним, одним из основных параметров резистора является допуск (Tolerance) на величину сопротивления, определяемый как отклонение от номинального значения и измеряемый в процентах. В случае дискретного компонента этот допуск называется абсолютным (Absolute Tolerance), при рассмотрении же резисторной структуры имеем дело с относительным допуском (Relative Tolerance). В англоязычной документации используются также термины Ratio Tolerance и Tolerance Matching. Однако термин Relative Tolerance, как представляется, наиболее точно описывает ситуацию, поскольку становится понятно, что речь идет о наибольшем отклонении в группе резисторов (рис. 26) [27].

Как видим, на рис. 26 представлен чип-массив, все резисторы которого имеют абсолютный допуск в диапазоне $\pm 0,5\%$. При этом относительный допуск, определяемый как разброс между максимальной и минимальной девиациями сопротивления в массиве, равен 0,1%. И эта величина уже не имеет знака. На практике это означает следующее. При построении, например, того же делителя для фиксированного регулятора напряжения в вариантах на дискретных элементах и в виде чип-сборки, вариант с резисторным массивом будет иметь допуск $\pm 0,05\%$.

И вновь о температуре. ТКС – это второй важный параметр компонентов сопротивления, имеющий специфический характер при использовании сборок и массивов. Как и в случае допуска на значение сопротивления, при рассмотрении температурных характеристик имеются абсолютный и относительный ТКС резисторного массива. Последний в англоязычной документации именуется TCR tracking. Если для примера использовать уже упоминавшийся регулятор напряжения с резистивным делителем (см. рис. 25), то, напомним, там применялись резисторы с ТКС ± 50 ppm/K. В резисторной сборке, которая может быть потенциально использована в конструкции, ТКС всех компонентов не выходят за пределы указанного диапазона (рис. 27). При этом относительный ТКС сборки будет ± 10 ppm/K [27].

И в завершение раздела о резисторных структурах разумно будет упомянуть о специфической технологии, которая вот уже более полувека массово используется в электронной индустрии и в том числе в резисторостроении. Применительно к резисторным структурам изделие, сконструированное для применения данной технологии, называется Multi-Tap Wire bondable Resistor Array (многоконтактные подключаемые перемычками наборы

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТНО-ОБЪЕМНЫЕ ЭКРАНЫ



ПРЕИМУЩЕСТВА:

1

Являются коррозионно-стойкими и эффективны в широком диапазоне частот

2

Использование экранов позволяет обеспечить требования электромагнитной совместимости

3

Применение экранов в базовых несущих конструкциях позволяет решить проблему защиты от ЭМИ блоков РЭА различного назначения

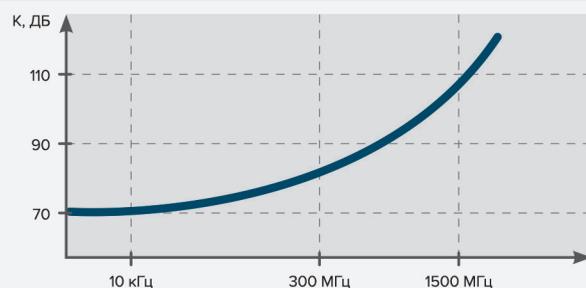
ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОДУКЦИИ:

Многослойные поверхностно-объемные экраны предназначены для защиты чувствительных электронных компонентов РЭА различного назначения и обеспечения электромагнитной совместимости при воздействии постоянного магнитного поля, переменных электромагнитных полей, электромагнитного импульса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ КОРПУСОВ ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ

БАЗОВЫЙ МАТЕРИАЛ КОРПУСА СПЛАВ AL		
Частота, МГц	Коэффициент экранирования, дБ	
	Образец с многослойным экраном	Образец без экрана
0,01	36	12
0,1	54	14
0,2	61	15
0,5	66	15
1	67	15
10	48	16
30	52	11
50	64	10
70	56	10
100	66	8

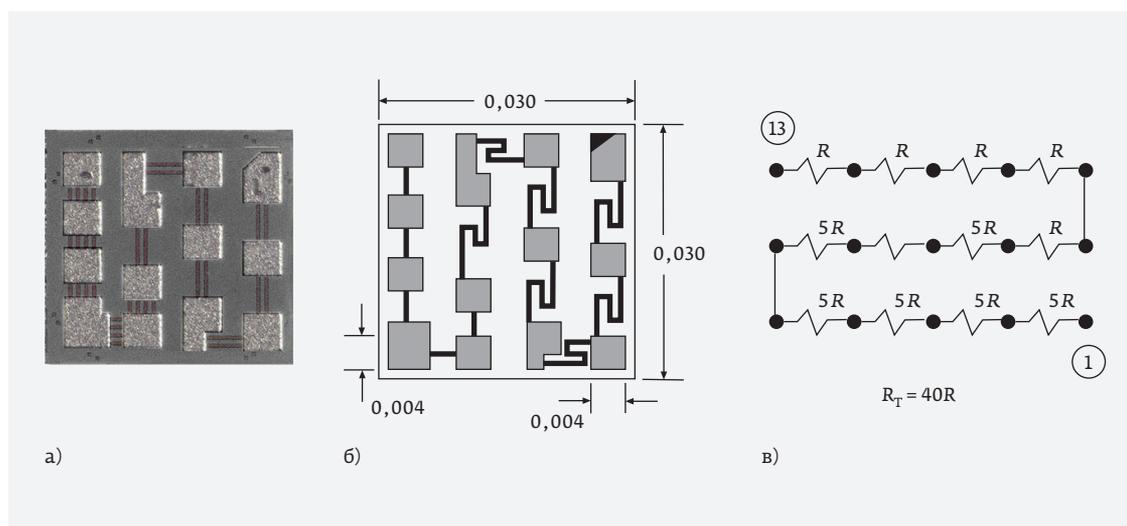
ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ МПОЭ



ОПТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ШЛИФА МПОЭ



Рис. 28.
Чип-массив
серии MTR ком-
пании Vishay:
а – внешний
вид; б – раз-
меры (в мм);
в – схема.
 R_T – полное
сопротивление



резисторов). В отечественной технической литературе чаще всего эта технология называется «разваркой» микропроводами и используется с 60-х годов прошлого века. Попутно заметим, что Wire bonding используется также и при монтаже дискретных компонентов. Сама технология подробно описана со множеством видеопримеров и анимаций и состоит в присоединении чипов к корпусам и платам посредством микропроводников из золота, меди или алюминия, закрепляемых на точках разварки термокомпрессионной или ультразвуковой сваркой. Можно сказать, что здесь имеет место ситуация, когда технология породила конструкцию. Во-первых, для того чтобы быть wire bondable, чип должен иметь контактные площадки сверху корпуса. В случае резисторов и резисторных массивов, это может означать иное взаимное расположение теплоотводящих и контактных поверхностей. И, во-вторых, использование сварки при монтаже предполагает, что корпус чипа способен выдерживать значительные компрессионные и термические нагрузки.

Иллюстрацией всему сказанному является, например, серия чип-массивов MTR компании Vishay [28]. Серия состоит из двух сборок с разными формами контактных площадок и набором полных сопротивлений от 100 Ом до 240 кОм. В качестве резисторного материала использован пассивированный нитрид тантала, а материалом подложки является оксидированный кремний. Изделие разработано для прототипирования и может использоваться для настройки гибридных сборок посредством селективного подключения назначенных резисторов массива. Внешний вид, размеры и схема соединений чипа приведены на рис. 28 [28].

ЛИТЕРАТУРА

16. **Riddle A.** Passive Lumped Components. In: RF and Microwave Passive and Active Technologies, 2008.
17. ATC Resistors and Terminations: Engineering Guidelines: https://atceramics.com/userFiles/uploads/pdfs/Resistive_eng_guidelines.pdf
18. Passive SMT mounting techniques: Face-up Vs Facedown and Performance Tradeoffs: <https://ims-resistors.com/wp-content/uploads/2017/03/whitepaper-PassiveSMT.pdf>
19. Integrated TaN Resistors: <https://www.thinfilm.com/resistors.html>
20. **Leary P.** SZG: Where High Power and High Frequency Join Forces: <https://ims-resistors.com/wp-content/uploads/2017/11/whitepaper-SZG-9-2017.pdf>
21. **Нисан А.** Встраивание пассивных и активных компонентов в печатные платы – альтернатива печатному монтажу // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2011. № 6. С. 84–92.
22. **Mahler B. P.** Improved Thin-Film Resistor Material // The PCB Design Magazine. 2013. № 9. PP. 24–28.
23. **Раскин А.** Мировой рынок пассивных электронных компонентов // Электронные компоненты. 2006. № 3. С. 77–83.
24. Anti-sulfuration: <https://industrial.apacer.com/en-ww/Technology/Anti-Sulfuration>
25. Sulfuration of Resistors: https://koaeurope.de/wp-content/uploads/Anti-Sulfuration_2016-07-14.pdf
26. Networks and Arrays: <https://www.vishay.com/networks-and-arrays/tab/products/>
27. **Bronskowski C.** Precision resistor arrays stabilize and enable miniaturization of electronic circuits: https://www.vishay.com/docs/49398/_z026_precision-resistor-arrays-miniaturization-of-circuits_cb_automotivedesignline_jun10.pdf
28. Wire Bondable Thin Film Multi-Tap Resistor Arrays: <https://www.vishay.com/docs/61045/mtr.pdf>



Разработка и производство конденсаторов

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип), K50-102, K50-103, K50-104

объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1М, K52-1БМ, K52-1Б, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1А, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-82

суперконденсаторы (ионисторы)

K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31, K58-32, K58-33

накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001

