

Резисторы – основные типы и характеристики

Часть 2

В. Горбачёв¹, В. Кочемасов, к. т. н.²

УДК 621.316.8 | ВАК 05.27.01

В первой части статьи, опубликованной в пятом номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2021 год, было рассказано о ряде параметров, которые наиболее часто используются для оценки применимости резисторов. В данном номере рассматриваются различные типы резисторов и технологии их производства.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

Проволочные резисторы

Несмотря на то, что проволочные (Wirewound) резисторы являются самыми возрастными изделиями электронной индустрии и довольно плохо укладываются в тренд миниатюризации компонентной базы электроники, они крайне востребованы современной электронной промышленностью. Причем востребованы чаще всего именно в самых габаритных своих исполнениях. По сути дела, как раз вследствие своих габаритов и материалов, из которых проволочные резисторы производятся, эти изделия способны отрабатывать мощные импульсные воздействия и нагреваться до высоких температур. Опять же в силу своей конструкции проволочные резисторы имеют высокую надежность и способны работать при неблагоприятных внешних воздействиях. К примеру, фирма Ohmite производит 37 серий проволочных резисторов, среди которых имеются Кельвиновские токоизмерительные конструкции, реостаты, подстроечные резисторы, нагревательные элементы, прецизионные резисторы общего применения, в том числе в SMD-исполнении. В большинстве своих исполнений проволочный резистор представляет собой проволоку резистивного сплава, намотанную на изолирующий сердечник. Для сердечников используются керамики, пластики и стекло. Точность номинала проволочных резисторов зависит от диаметра и длины проволоки. Оба эти параметра легко и точно контролируются, вследствие чего возможно производство точных резисторов. Для проволоки используются резистивные сплавы, выбираемые по наименьшему ТКС. Если резистор выполняет функцию нагревательного элемента, выбираются сплавы с максимальной рабочей температурой. Для этой цели применяется также чистый вольфрам, имеющий значительный ТКС и высокую рабочую

температуру. В настоящий момент в промышленности используется более десятка сплавов и чистый металл, уже упомянутый вольфрам (табл. 2).

Проволочные резисторы являются относительно низкочастотными в силу своей конструкции, практически полностью совпадающей с устройством однослойных индуктивностей без сердечника. Тем не менее, производится несколько исполнений проволочных резисторов с улучшенными частотными свойствами. Уменьшение собственной индуктивности в них достигается за счет намоток особого типа (рис. 3).

Бифилярная намотка обладает меньшей индуктивностью, но большей собственной емкостью по сравнению с обычной намоткой. *Плоская намотка* обеспечивает несколько меньшие значения индуктивности и емкости. *Намотка Айртона-Перри* обладает значительно меньшими значениями собственных индуктивности и емкости.

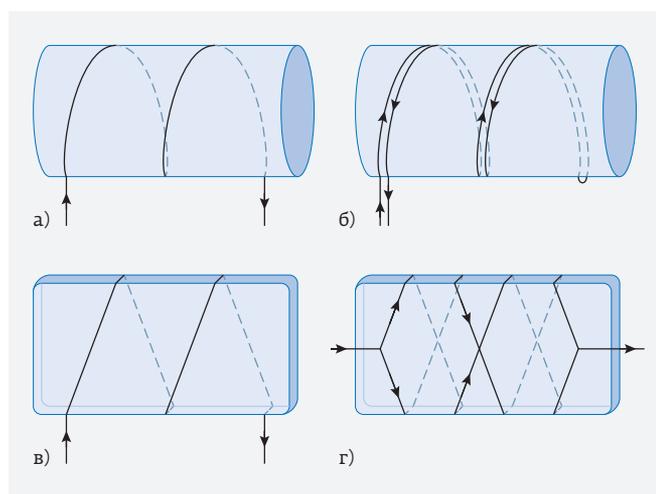


Рис. 3. Типы намоток проволочных резисторов: а – обычная; б – бифилярная (двухзаходная); в – плоская; г – Айртона-Перри

¹ ООО «Радиокомп», ведущий инженер.

² ООО «Радиокомп», генеральный директор.

Таблица 2. Резистивные сплавы и металлы

Типы сплавов	Материал	Состав, %	Удельное сопротивление, Ом·м	ТКС, ppm/°C	Максимальная рабочая температура, °C
Медные сплавы	Константан	54Cu-45Ni-1Mn	0,485	200	400
	Никелин	67Cu-30Ni-3Mn	0,4	110	300
	Манганин	86Cu-2Ni-12Mn	0,442	20	300
Серебряные сплавы	Сплав 109	82Ag-10Mn-8Sn	0,55	~40	-
	Сплав 139	78Ag-13Mn-9Sn	0,61	~80	-
	Сплав 173	80Ag-17Mn-3Sn	0,58	~100	-
Никель-хром	Нихром	20Cr-77/80Ni-2/0Mn	1,105	170	1150
Железо-хром	CrNiFe 1	70Ni-20Cr-8Fe-2Mn	1,11	900	1100
	CrNiFe 2	63Ni-15Cr-20Fe-2Mn	1,12	890	1100
Железо-хром-алюминий	Кантал А	72Fe-20Cr-5Al-3Co	1,45	60	1300
	Cekas	75Fe-20Cr-5Al	1,4	40	1300
	Мегапир	65Fe-30Cr-5Al	1,4	25	1350
Чистый металл	Вольфрам	100W-спеченный	0,053	4500	1500/1700

Компоненты с несущей подложкой и резистивным слоем от долей до десятков микрометров

Следует сразу отметить тот факт, что классификационная терминология, описывающая компоненты этой группы, выглядит несколько невнятно, поскольку для обозначения групп компонентов используются одновременно два параметра: толщина резистивного слоя и наличие металла в нем. В общем, разделение резисторов на две группы по толщине резистивного слоя (тонкопленочные, толсто-пленочные) появилось как естественное отражение разницы в технологиях изготовления «тонких» и «толстых» резистивных пленок. В процессе развития отрасли, шедшем в направлении разработки новых резистивных материалов, классификационная терминология стала более «материаловедческой», нежели чем «геометрической». Не претендуя на всеобщность, попытаемся, тем не менее, сгруппировать классификационную терминологию по толщине резистивного слоя (табл. 3).

Собственно говоря, все эти группы компонентов можно назвать пленочными (Film) резисторами, используя тот факт, что резистивный слой (обязательно в виде пленки, толщина которой значительно меньше толщины подложки) у них закреплен на несущем основании. Оно выполнено из керамики и имеет форму либо прямоугольной пластины – подложки (Substrate), либо стержня (Rod). Подавляющее большинство пленочных резисторов имеет

сэндвичную конструкцию независимо от типа корпуса – безвыводного (Chip) или с выводами (Leaded). Это хорошо видно на рис. 4 [3–5], где присутствуют корпуса обоих типов.

Пожалуй, на одинаковой конструкции список сходств тонко- и толсто-пленочных резисторов заканчивается. Далее идут различия, главное из которых – технологии производства. Уже сама толщина пленки тонкопленочных компонентов (до 1 мкм) показывает, что основной технологией их изготовления является напыление (магнетронное, ионно-плазменное, вакуумно-термическое), а также осаждение металла из газовой фазы. Для производства тонкопленочных Metal Film резисторов чаще всего используются два сплава: нихром (80Ni20Cr, температура плавления $t_{\text{плавл.}} = 1400^\circ\text{C}$) и нитрид тантала (TaN, $t_{\text{плавл.}} = 3360^\circ\text{C}$). Высокая температура плавления обоих сплавов определяет их мелкозернистую структуру и высокую стойкость к окислению – это два наиболее важных параметра для резистивного материала.

При производстве толсто-пленочных резисторов основной технологией является спекание трафаретно нанесенных на подложку паст, содержащих керамические и металлические включения (кермет). Тут надо отметить, что определение «основная технология» имеет, в том числе, и количественный аспект. По данным фирмы KOA Speer, более 90% фиксированных толсто-пленочных резисторов выполняются по технологии Metal Glaze Film

Таблица 3. Группы компонентов по толщине резистивного слоя

До 1 мкм	От 1 до 100 мкм
<ul style="list-style-type: none"> • Тонкопленочные (Thin Film) – общее название; • металлопленочные (Metal Film) – резистивный слой из нихрома или нитрида тантала; • углеродные (Carbon Film) – чаще всего цилиндрические выводные резисторы с угольной пленкой; • металлооксидные (Metal Oxide Film) – чаще всего цилиндрические выводные компоненты с резистивным слоем из окиси олова (SnO₂), иногда с добавлением оксида сурьмы 	<ul style="list-style-type: none"> • Толстопленочные (Thick Film) – общее название; • керметные (Cermet, используется также термин Metal Glaze Film) – резистивный слой из композитного материала на основе керамики и металла; • металлофольговые (Metal Foil) – резистивный слой представляет собой фольгу из металлургического сплава

(кермет). Полезно обратить внимание на то, что фирма State of the Art (SOTA) предложила своеобразные мнемонические формулы для описания технологий производства тонко- и толстопленочных резисторов: для тонкопленочных – Sputter, Etch and Trim (напыление, травление и подгонка); для толстопленочных – Print, Fire and Trim (трафаретная печать, обжиг и подгонка).

Отметим, что травление (etch) напыленной пленки используется для получения дизайна резистивного слоя с применением прецизионной фотолитографии. Под подгонкой (trim) понимается лазерная подрезка резистивного слоя для достижения заданного допуска номинала резистора.

Необходимо отметить, что различие в технологиях изготовления тонко- и толстопленочных резисторов порождает различие в их свойствах. Наиболее корректным выглядит сравнение тонкопленочных резисторов с толстопленочными керметными. Довольно подробный анализ

различий по основным параметрам сделан в работе [3]. Вкратце напомним их. В случаях, когда стандартный тонкопленочный резистор имеет несколько меньшие размеры, это не только повышает плотность монтажа, но и в силу меньших паразитных реактивностей делает резистор более высокочастотным. Меньшая толщина резистивного слоя в сочетании с его большей однородностью по сравнению с толстопленочными приводит к снижению шумов у высокоомных компонентов (см. рис. 2) и уменьшению деградации параметров в течение срока службы. Также технология производства тонкопленочных резисторов позволяет достичь лучших допусков номинала. И, наконец, сравнение стандартных образцов обеих групп компонентов показывает лучший ТКС тонкопленочных резисторов (рис. 5) [3].

Тем не менее, толстопленочные керметные резисторы совершенно не случайно являются лидерами рынка фиксированных резисторов. Их главное преимущество

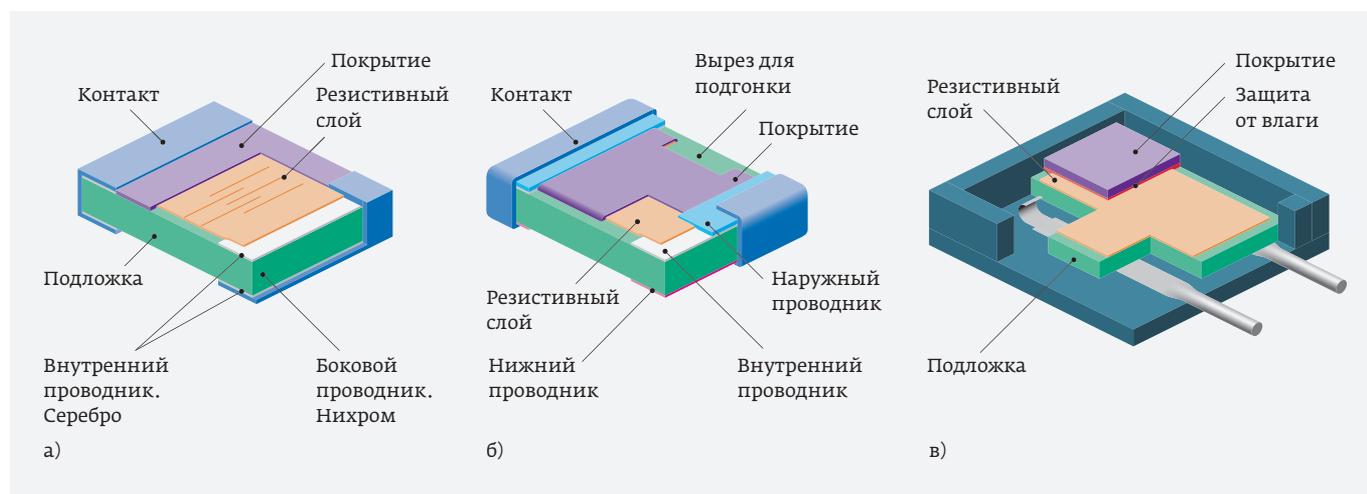


Рис. 4. Конструкции пленочных резисторов: а – тонкопленочный, компания Phycomp [3], б – толстопленочный, компания MSI [4], в – металлофольговый, компания Vishay [5]

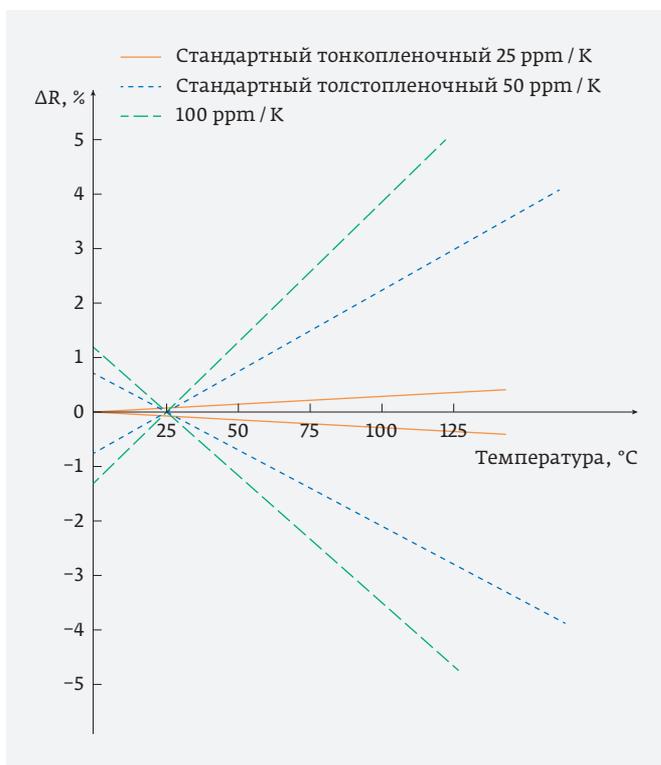


Рис. 5. Сравнение ТКС тонко- и толсто пленочных резисторов

заключается в соотношении «цена/качество». Это означает, что подавляющее большинство задач, решаемых современной электроникой, выполняется с использованием типовых значений ТКС, допусков и частотных параметров керметных резисторов. К тому же развитие материаловедческих и технологических аспектов производства резисторов этой группы постепенно улучшает параметры последних. Этот тренд хорошо просматривается, например, в работе специалистов пензенского Научно-исследовательского института электронно-механических приборов (НИИЭМП) [6], где разрабатываются рутениевые резистивные пасты для керметных резисторов.

Следует еще сказать о фольговых резисторах, для упрощения и наглядности отнесенных к толсто пленочным, хотя существуют примеры выделения их в отдельную группу. При производстве фольговых резисторов применяется приклеивание фольги металлургического сплава к керамической подложке с последующим использованием фотолитографии для получения топологии резистивного слоя.

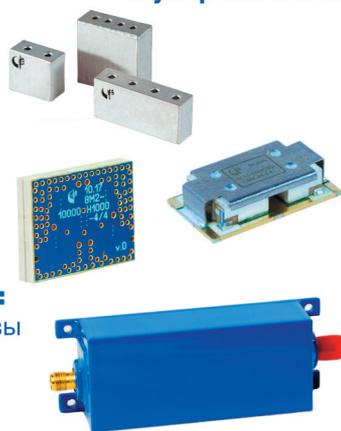
Способ создания резистора методом наклеивания фольги металлургического сплава на керамическую подложку был предложен Феликсом Зандманом в шестидесятых годах прошлого века. В настоящее время самым известным представителем этой технологии является бренд фирмы Vishay, известный как Bulk Metal® Foil (BMF).

Фильтры ВЧ/СВЧ, в том числе переключаемые и перестраиваемые, и устройства на их основе для частот до 26,5 ГГц и выше

- Диплексеры
- Мультиплексеры
- Генераторы
- Фазовращатели
- Делители/сумматоры мощности
- Направленные ответвители

Любые виды заказов:

- крупносерийные заказы
- единичные заказы
- срочные заказы
- НИР, ОКР



Разработка, производство, испытания устройств с учетом требований заказчика

- Устройства на сосредоточенных элементах
- Устройства на керамических резонаторах
- Гребенчатые и встречно-стержневые фильтры
- Моноблочные керамические фильтры
- Устройства на микрополосковых линиях
- Волноводные устройства
- Устройства по технологии LTCC

109316, Москва, Волгоградский проспект, 42 Отдел продаж: +7 495 95 777 45 Техподдержка: +7 495 361 09 04

Таблица 4. Параметры ВМФ-резисторов компании Vishay

Параметр	Значение
ТКС, ppm/°C	0,14
Допуск, %	±0,005
Долговременная стабильность	5 ppm/год, 10 ppm/3 года (для герметичных изделий)
Стабильность под нагрузкой	0,005%/2000 ч
ТермоЭДС, мкВ/°C	0,1
Шумы, дБ	-42
Реактивности	0,08 мкГн; 0,5 пФ

Считается, что эти сопротивления, резистивный слой которых представляет собой фольгу металлического сплава толщиной 2–10 мкм, по своим свойствам наиболее приближены к идеальной модели резистора. Свойства этих приборов весьма подробно описаны в корпоративной документации Vishay и различных инженерных сообществах. Что касается отечественной технической периодики, то затруднительно найти какой-либо еще пассивный электронный компонент, столь полно представленный в ней в текущем веке [7–11].

Параметры фольговых резисторов можно увидеть в документах фирмы Alpha Electronics, являющейся

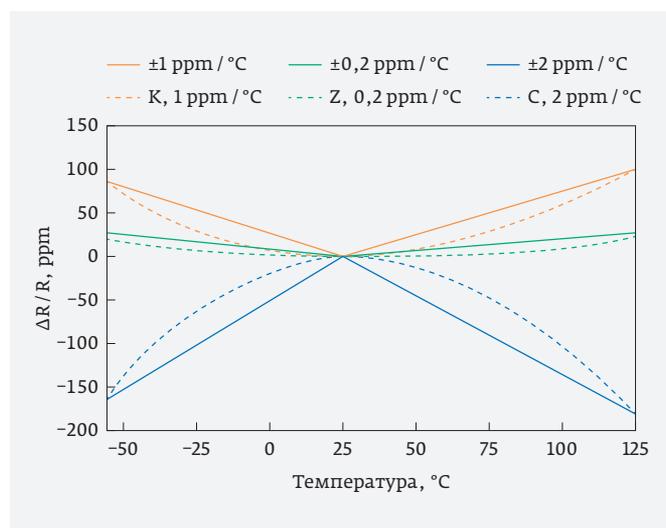


Рис. 6. Зависимость сопротивления от температуры для сплавов C, K и Z (данные компании Vishay)

производственным подразделением Vishay Precision Group (табл. 4).

Обращает на себя внимание значение ТКС, которое на два порядка лучше, чем у тонкопленочных и толстопленочных керметных резисторов. Достижение такой температурной стабильности, достойной скорее литературных эпитетов, нежели чем сухого арифметического сравнения, стало возможным благодаря эффекту термокомпенсации в сэндвиче, состоящем из резистивной фольги и подложки, материалы которых имеют различные температурные коэффициенты линейного расширения. Такие параметры фольговых резисторов, как термо-ЭДС и указанные в табл. 4 типы стабильностей, связаны со свойствами резистивных сплавов, разработанных Зандманом. За всю историю развития сопротивлений этого типа известно три поколения сплавов, ТКС которых улучшался от поколения к поколению. В хронологическом порядке это сплавы C, K и Z. На рис. 6 приведена чуть более подробная версия хорошо известного рисунка, где ТКС представлен в виде хорд соответствующих кривых для трех сплавов.

Возможно, мы уже можем говорить и о четвертом поколении сплавов для фольговых резисторов. Причем сплав этот отечественный и создан он специалистами НИИЭМП. Так, в работе [12] представлен сплав с названием NV и ТКС лучшим, чем у Z-фольговых резисторов. Сравнительные характеристики этих двух сплавов представлены на рис. 7 [12].

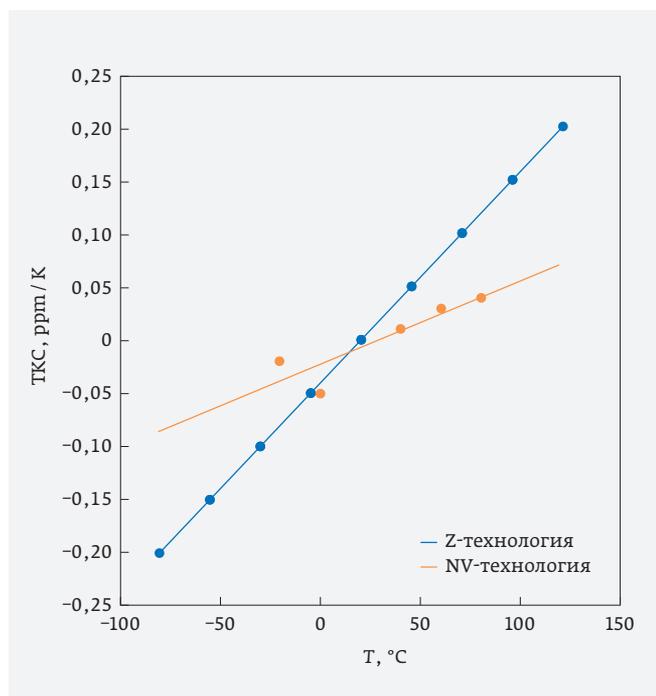
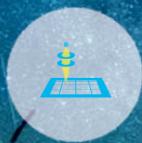


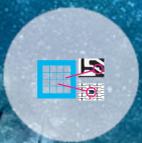
Рис. 7. ТКС сплавов NV и Z (данные компании НИИЭМП)



ПРОЕКТИРОВАНИЕ



ГЕНЕРАЦИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ



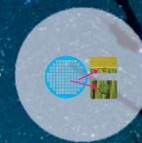
КОНТРОЛЬ
ФОТОШАБЛОНОВ



РЕМОНТ
ФОТОШАБЛОНОВ



ФОТОЛИТОГРАФИЯ



КОНТРОЛЬ
ПЛАСТИН



СБОРКА ИЗДЕЛИЙ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

БЕЗМАСОЧНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Многоканальные лазерные генераторы изображений
- Проектная норма 0.35, 0.6 μm
- Высокая точность совмещения
- $\varnothing 200, 150, 100$ мм



ГЕНЕРАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Диапазон UV, DUV
- Проектная норма 90, 130 нм
- 16/32-лучевая архитектура
- Фазосдвигающие шаблоны
- Быстрая переналадка пластина – шаблон



КОНТРОЛЬ ФОТОШАБЛОНОВ

- Проектная норма 90, 130, 250 нм
- Твердотельный лазер
- Контроль методом D2DB, D2D
- Высокая производительность
- Контроль неплоскостности



РЕМОНТ ФОТОШАБЛОНОВ

- Фемтосекундный лазер
- 0.15/ 0.3/ 0.5 μm min элемент
- Размер шаблона до 9"х9"
- Ремонт копированием
- Ремонт через пелликл
- Прозрачные / непрозрачные дефекты



КОНТАКТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Ручная и автоматизированная загрузка
- Двусторонняя литография
- Высокая точность совмещения
- Низкий уровень генерации дефектов
- Высокая энергоэффективность



СТЕППЕРЫ

- Проектная норма 0.35, 0.8 μm
- Автоматический масштаб
- Двустороннее совмещение
- $\varnothing 200, 150, 100$ мм
- Твердотельный источник света



КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ

- Контроль привносимых дефектов пластин без топологии
- Автоматический микро и макро контроль дефектов пластин с топологией
- Высокая производительность



АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ

- Контроль микроразмеров
- Контроль неплоскостности
- Контроль координат
- Контроль толщин
- Контроль рассовмещения



ЗОНДОВЫЙ КОНТРОЛЬ

- $\varnothing 200, 150, 100$ мм
- ± 4 мкм погрешность контактирования
- Ручное / полуавтоматическое / автоматическое оборудование



РАЗДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИН И ПОДЛОЖЕК

- $\varnothing 300, 200, 150, 100$ мм
- 2 независимые зоны разделения в одной установке
- 2.4 кВт мощность электрошпинделя
- Полуавтоматическое / автоматическое оборудование



С праздником
Ивана Купала!



Создаем традиции будущего!

- Единое таможенное пространство
- 59 лет опыта в разработке и производстве прецизионного оптико-механического и сборочного оборудования
- Высокий уровень применяемых технологий и современного оборудования
- Полный цикл разработки и производства, высококвалифицированный персонал
- Высокое качество изделий подтверждено национальными и международными стандартами
- Возможность комплексной поставки оборудования, адаптированного для Российского рынка, программного обеспечения для поддержки процессов изготовления фотошаблонов и 3D-моделирования для фотолитографии компании GenlSys (Германия)

Республика Беларусь
220033, г. Минск
Партизанский пр-т, 2

тел: (+375 17) 226 09 82
(+375 17) 223 22 26
факс: (+375 17) 226 12 05

office@kbtem-omo.by
kbtem.omo@gmail.com
www.planar.by



Компоненты с несущим резистивным слоем

Конструктивной противоположностью резисторам с несущей подложкой являются компоненты, у которых резистивный слой служит силовым несущим элементом конструкции. К этому типу относятся объемные угольные выводные резисторы и сопротивления, выполненные на основе металлургических сплавов.

Объемные композитно-угольные резисторы

Наряду с проволочными резисторами углекомпозитные относятся к старейшим в отрасли. В англоязычной технической литературе они чаще всего обозначаются как Carbon Composition Resistors (CCR). От углелепночных данные изделия отличаются тем, что весь стержень резистора отформован из смеси угольных частиц и связующего и представляет собой элемент сопротивления. В качестве связующего раньше использовалась глина, сейчас чаще применяется смесь керамического порошка и резины. Из этих композитов формируется стержень (Rod) резистора при высоких давлении и температуре. Проводящим (резистивным) материалом является либо графит (удельное сопротивление $\sim 8 \cdot 10^{-6}$ Ом), либо аморфный химически чистый уголь (удельное сопротивление $\sim 45 \cdot 10^{-6}$ Ом). По сравнению с более современными типами резисторов углекомпозитные имеют два преимущества: лучшие импульсные свойства, обусловленные большим объемом, воспринимающим энергию импульса, и цену. Все остальные свойства углекомпозитных резисторов хуже, чем у других типов. Например, большие допуски номинала, обусловленные трудностями его предустановки при формовании и обжиге композита. Для номинала характерна значительная деградация (до 5% в год при хранении и до 15% при 2000-часовом тесте с максимальными значениями параметров и температурой 70 °C). Данные резисторы также имеют низкие шумовые свойства, опять-таки связанные с большим объемом композитов, и, наконец, крайне непрезентабельные значения ТКС, достигающие до 1200 ppm / °C.

В связи со всем вышепредставленным углекомпозитные резисторы чаще всего применяются либо в бытовой электронике, либо в импульсных приложениях, не требующих высоких точностей номинала.

Резисторы из металлических сплавов

Обычно сплавные резисторы (рис. 8) выполняются из металлургических сплавов манганин или нихром и поэтому в англоязычной терминологии называются: Metal Strip (примерный русский перевод – металленточные), Metal Plate (металлопластинчатые) и Metal Wire (металлопроволочные – имеется в виду прямая проволока, не свитая в спираль, как у Wirewound).

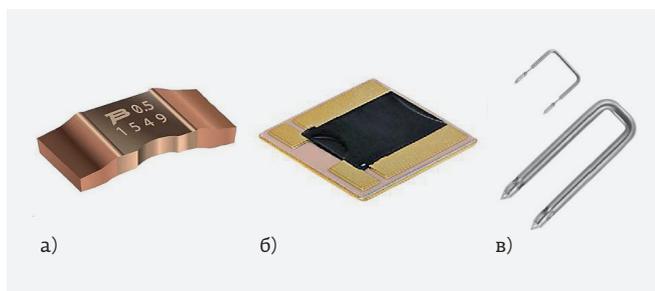


Рис. 8. Резисторы с несущим резистивным элементом: а – Metal Strip (металлоленточные), компания Bourns; б – Metal Plate (металлопластинчатые), компания Vishay; в – Metal Wire (металлопроволочные), компания KOA Speer

В отношении резисторов с несущим резистивным слоем, не имеющих защитного покрытия (рис. 8а и 8в), встречается термин Open Air (компания TT Electronics).

Технологически отличие ленточных резисторов от пластинчатых заключается в том, что ленточные часто изготавливаются из двух слоев (двух склеенных лент) сплава, один из которых является сопротивлением, другой – теплоотводом. Соответственно, в этом случае сплавы имеют разную теплопроводность. Тем не менее, надо отметить, что никакой жестко зафиксированной границы между Metal Plate и Metal Strip не существует и нередки ситуации, когда в одном документе используются оба термина при описании одного компонента.

Завершая разбор терминологии, заметим, что фирма TT Electronics для обозначения ленточных резисторов использует термин Bulk metal, который в данном случае не надо путать с Bulk Metal® Foil.

Здесь необходимо отметить, что в силу своей конструкции самонесущие резисторы используются в мощных и импульсных приложениях, чаще всего для измерения токов и шунтирования. Поэтому более подробное описание конструкции самонесущего резистора сделаем в информационном блоке, посвященном токоизмерительным сопротивлениям.

Типы подложек

В настоящий момент в резисторной индустрии используется более десятка типов подложек. Значительная часть их представлена в табл. 5, рассмотрение которой позволяет выделить два класса материалов по значению теплопроводности (Thermal Conductivity). С точки зрения резисторостроения это разделение на маломощные (малые значения теплопроводности) и мощные приложения.

Собственно частотные свойства подложек передаются параметром – тангенс угла потерь (Loss Tangent). Существует даже некое условное разделение по этому

Н А Н О В О Й В Ы С О Т Е

Организаторы

The logo for MAKS 2021. The word "МАКС" is in white, bold, uppercase letters, with a white circle around the letter 'А' and three white diagonal lines passing through it. The year "2021" is in a large, bold, blue font. The background features a stylized globe with white grid lines and a red and white comet-like streak curving across the top.

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИЙ
САЛОН**

Устроитель



WWW.AVIASALON.COM • 20-25 ИЮЛЯ • ЖУКОВСКИЙ

Таблица 5. Параметры материалов подложек

Параметр	Оксид берил-лия (BeO)	Нитрид алюми-ния (AlN)	Химический алмаз (CVD Diamond)	Оксид алюми-ния (Al ₂ O ₃)	Сили-кон (SiO ₂)	Стекло (Glass)	Слюда (Mica)	Стекло-волокно (Fiber-glass)	Майлар (Mylar)
Теплопроводность λ, Вт/м·К	210-260	170-190	1000-1600	36	1,3	0,5	0,75	0,04	0,14
Относительная диэлектрическая проницаемость	6,7	9	5,6	10	3,9	5	6	4,8	3,1

Примечание. Табл. 5 составлена по данным разных производителей. В силу этого в некоторых ячейках имеется диапазон параметров, и конкретные значения параметров могут несколько различаться у разных производителей из-за отличий в применяемых материалах и методиках измерений.

параметру на «быстрые» и «медленные» подложки. При описании тех или иных материалов значение тангенса угла потерь обычно приводится для некоторой частоты в диапазоне от 1 МГц до 10 ГГц. С большим разбросом по частоте измерения потерь связана некоторая трудность при сравнении подложек по этому параметру. Тем не менее, известно, что, например, кремниевые и стеклянные подложки, о которых пойдет речь ниже, относятся к «быстрым» и используются в основном в мало-мощных радиочастотных приложениях.

Подложки для маломощных приложений

Кремний (SiO₂ / Silicon). С точки зрения производителя кремний привлекателен изученностью и предсказуемостью свойств, а также возможностью применения оборудования и технологических процессов для производства широко распространенных активных компонентов, традиционно использующих кремний. К таким производителям относится, например, фирма US Microwaves, выпускающая серию тонкопленочных дискретных чип-резисторов USMRSTC3600 из нитрида тантала на кремниевой подложке (рис. 9). Заявленный частотный диапазон – от постоянного тока до СВЧ. Рассеиваемая мощность в диапазоне температур до 150 °С – 250 мВт.

Резистор имеет золотые контактные площадки сверху корпуса (top contact) и размеры 36×36 мил. Допуски на номинал резистора в серии составляют ±1, ±5 и ±10%. ТКС в рабочем диапазоне температур равен ±100 ppm/°C. Несмотря на конфигурацию выводов типа top contact, производитель позиционирует это изделие не только для монтажа методом «разварки» микропроводами, но и как компонент для поверхностного монтажа. Судя по документации производителя, заявленное изделие является представителем

целого ряда подобных конструкций. Так, кроме дискретного резистора по этой же технологии полупроводникового тонкопленочного процесса изготавливаются сборки, содержащие наборы резисторов и MNOS (metal-nitride-oxide-semiconductor) конденсаторов.

Еще одним известным производителем кремниевых резисторов является компания Vishay.

Стекло (Glass). Использование стекла для резистивных подложек позволяет производить высокочастотные резисторы бюджетного ценового диапазона. Важным фактором при использовании стекла является наличие отработанных технологий. Такими проприетарными технологиями в полной мере владеет, например, компания AVX, традиционно использующая стекло при производстве многослойных конденсаторов. В резисторостроении AVX отметилась двумя сериями сопротивлений на основе стекла. Это сверхширокополосная серия UBR (Ultra-Broadband Resistors) и высокоомная серия HVR (High Value Resistors). Оба изделия имеют сходную

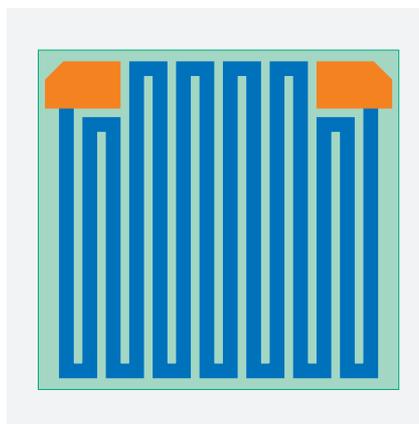


Рис. 9. Чип-резистор на подложке SiO₂, компания US Microwaves



ПАТРОНАЖ ТПИ РФ

21-24

СЕНТЯБРЯ 2021

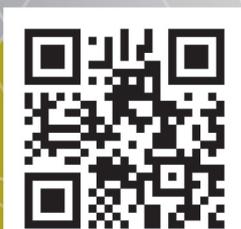
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

Radelexpo

XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА РАДИОЭЛЕКТРОНИКА & ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И КОМПЛЕКТУЮЩИЕ
- ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И ДРУГИЕ НОСИТЕЛИ СХЕМ
- СВЕТОДИОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
- РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ
- РОБОТОТЕХНИКА
- КОНСТРУКТИВЫ
- МАТЕРИАЛЫ
- ТЕХНОЛОГИИ
- ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТЫ
- КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ



ОРГАНИЗАТОР ВЫСТАВКИ:



radelexpo.ru (812) 718-35-37

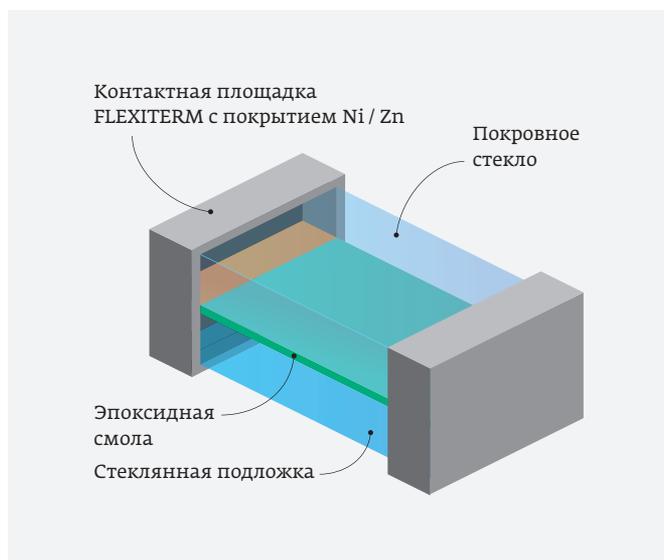


Рис. 10. Резистор на стеклянной подложке, компания AVX

конструкцию, представленную на рис. 10, и предназначены для применения в диапазоне мощностей до 125 мВт.

Кроме сходства конструкции и материалов, резисторы имеют однотипные проприетарные контактные площадки FLEXITERM®, увеличивающие надежность монтажа при применении, например, в автомобильной промышленности за счет введения элементов компенсации механических нагрузок. UBR-серия выпускается в форм-факторе 0402 и применяется до 20 ГГц при напряжениях до 1 кВ. В серии HVR, за счет применения резистивных пленок с высоким значением удельного сопротивления на квадрат, номинальный ряд сопротивлений достигает 30 ГОм при форм-факторах 0201 и 0402.

В связи с компонентами фирмы AVX также необходимо отметить, что ею выпускается серия прецизионных чип-резисторов WBR (Wire-Bondable Resistors) форм-фактора 0202. В состав серии входят резисторы как на стеклянной подложке, так и на кремниевой (SiO₂). Резисторы подгоняются лазером до допусков ±2%, ±1%, ±0,5%, ±0,1%. Диапазон мощностей у этих изделий – до 250 мВт. В качестве областей применения указаны в том числе радиочастотные и СВЧ приложения.

Подложки для мощных приложений

Обращаясь вновь к табл. 5, можно отметить, что оксид алюминия (Al₂O₃) представляет собой своеобразную границу, отделяющую маломощные подложки от мощных, и по своей теплопроводности, если можно так выразиться, «равноудаленный» от тех и от других. Тем не менее, например, компания Ion Beam Milling (IBM) относит эту подложку к классу маломощных. Пример IBM интересен тем, что качественное, в общем, понятие «маломощный»

Таблица 6. Максимальная плотность мощности (данные компании IBM)

Материал подложки	Максимальная плотность мощности, Вт / дюйм ²
Оксид алюминия	3 000
Нитрид алюминия	5 000
Оксид бериллия	10 000
Химический алмаз	20 000

(low power) в материалах фирмы сопровождается таблицей (табл. 6), позволяющей сравнить подложки количественно по такому параметру, как максимальная плотность мощности (Вт / дюйм²).

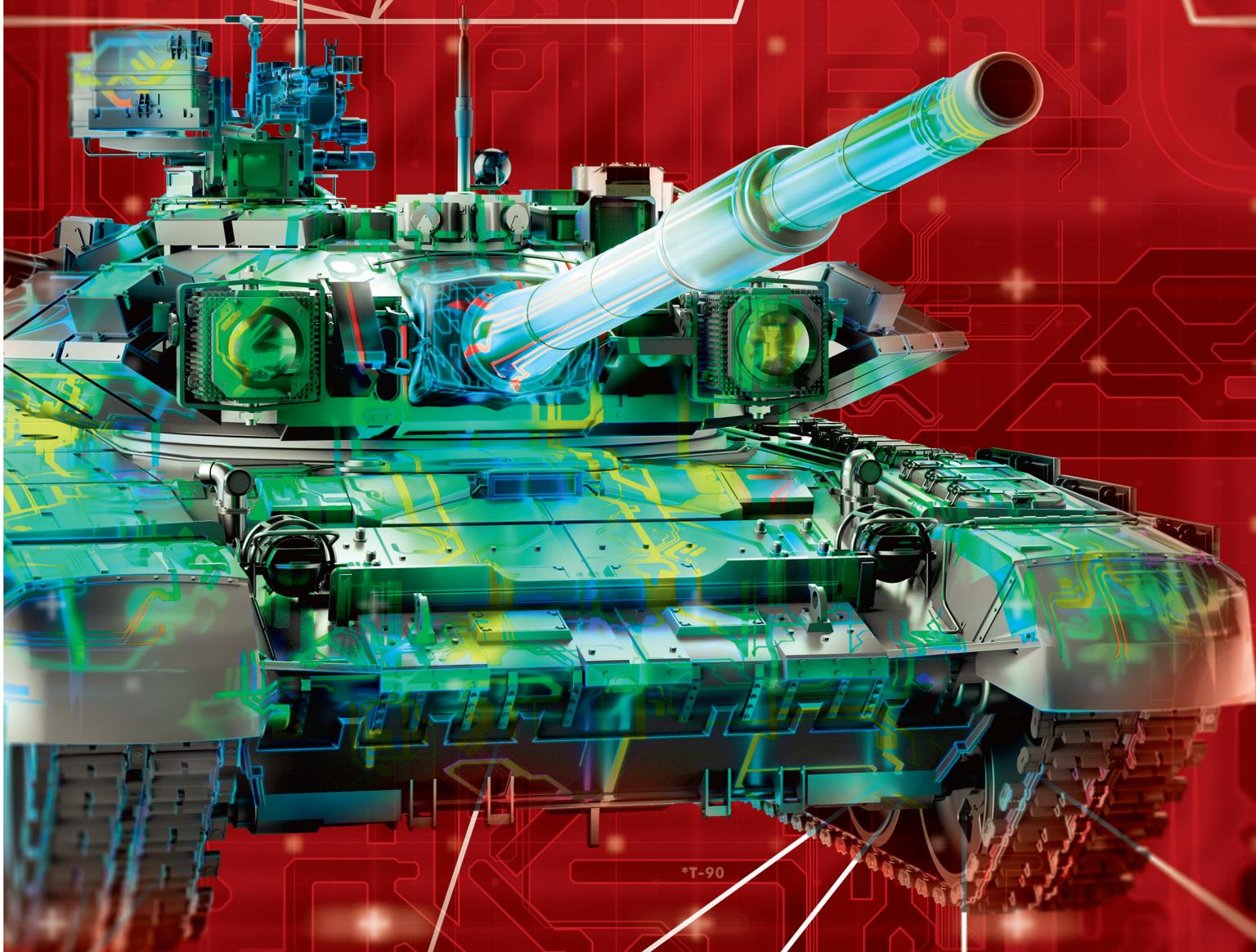
При проведении сравнительных тестов на измерение максимальной плотности мощности температура тестовых образцов доводилась до 125 °С. В качестве теплоотвода использовалась медная пластина размерами 3×3×0,25 дюйма.

Относя ту или иную подложку к некоторому классу по мощности рассеяния, тем не менее, следует помнить, что, несмотря на возможность количественного сравнения (см. табл. 6), классификация достаточно условна. В определенных ситуациях повысить мощность рассеяния можно, увеличив площадь резистора на сравнительно маломощной подложке. Понятно также, что при этом возникнут две проблемы, особенно чувствительные в высокочастотном оборудовании. Во-первых, понадобится больше места на печатной плате. Во-вторых, увеличится паразитная шунтирующая емкость, влияющая на верхнюю границу частотного диапазона изделия. При всём при этом возможность построения такого резистора существует и это «размывает» границы диапазонов мощности рассеяния подложек.

На текущий момент самым теплопроводящим веществом считается химический алмаз (Diamond CVD – кристаллический углеродный материал, полученный методом осаждения из паровой фазы) (см. табл. 5). Наиболее близко к нему по теплопроводности стоит сравнительно недавно заинтересовавший исследователей материал – нитрид бора (λ_T ≈ 800 Вт / м·К). Однако серийная резистивная продукция выпускается на основе относительно давно известных материалов: нитрида алюминия, оксида бериллия, химического алмаза. Из названной тройки два первых используются более двух десятилетий, а алмаз активно применяется около десяти лет. В силу высокой теплопроводности всей тройки речь идет о применении в качестве подложек для мощных и высокочастотных (из-за низкого значения тангенса угла потерь) резисторов.

★ ARMY 2021

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ



*Т-90

22–28 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО

WWW.RUSARMYEXPO.RU

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ
ОПЕРАТОР



MKB

МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

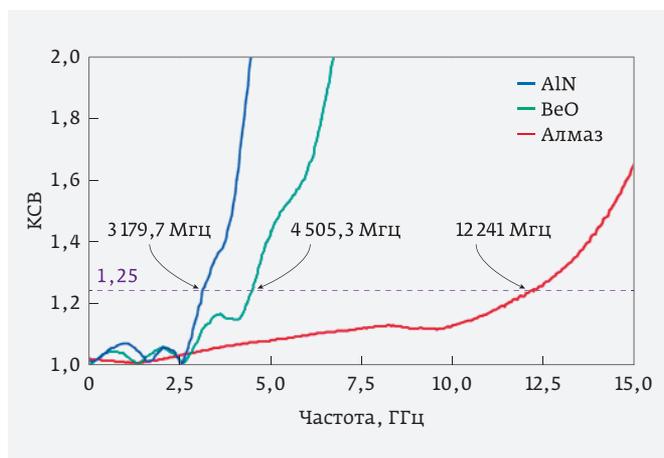


Рис. 11. КСВ контактных площадок (данные компании EMC Technology)

Имеется значительное количество сравнительных исследований тройки основных материалов для мощных подложек. Все эти исследования показывают значимое преимущество алмаза над ближайшими конкурентами. Производством резисторов на всех трех мощных подложках занимаются такие фирмы, как EMC Technology и Ion Beam Milling. Именно EMC Technology провела комплексное сравнительное исследование различной резисторной продукции на трех подложках [13]. На первом этапе измерялся КСВ трех 120-ваттных нагрузок: СП310D – алмаз, 50 Ом, площадь 0,005 дюйм²; 82-3031 – оксид бериллия, 50 Ом, площадь 0,021 дюйм²; 82-7176 – нитрид алюминия, 50 Ом, площадь 0,028 дюйм². Результаты измерений представлены на рис. 11.

Обращает на себя внимание также тот факт, что при равной мощности рассеяния (120 Вт) чип на подложке из искусственного алмаза в четыре раза меньше по площади, чем на оксиде бериллия, и почти в шесть раз меньше, чем резистор с применением нитрида алюминия.

На втором этапе были проведены исследования двух одинаковых однокаскадных типовых делителей/сумматоров Вилкинсона. Центральная частота обоих делителей составляет 10 ГГц. В одном из делителей был использован 50-ваттный изолирующий резистор на подложке из оксида бериллия, в другом – той же мощности резистор на химическом алмазе. Принцип работы делителя/сумматора Вилкинсона предполагает, что когда на порты 2 и 3 (рис. 12) подаются сигналы в разных фазах или с разными амплитудами, то вся разностная мощность рассеивается на изолирующем резисторе. Таким образом, этот резистор должен обеспечивать работу во всём диапазоне мощностей делителя/сумматора. Схема делителя Вилкинсона и обратные потери в полосе рабочих частот представлены на рис. 12.

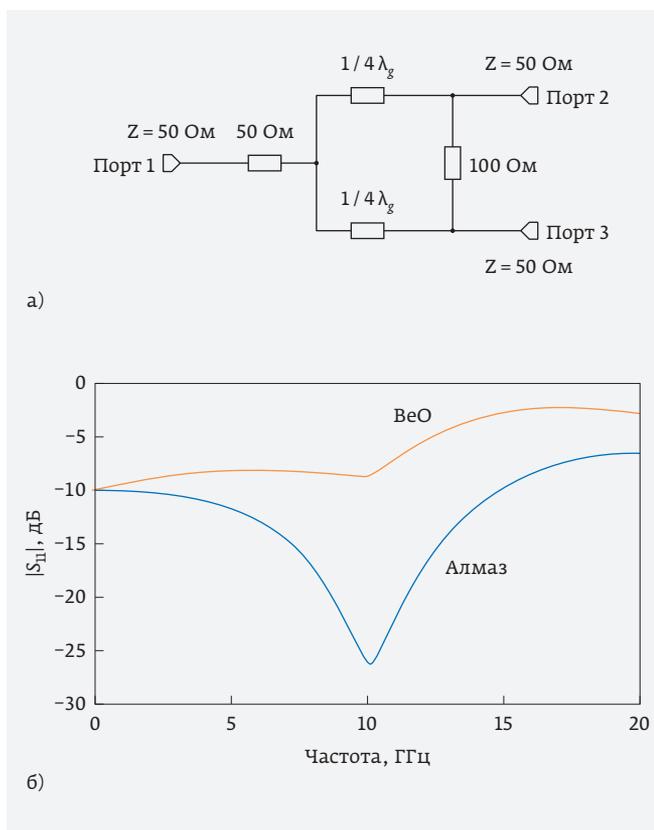


Рис. 12. Делитель Вилкинсона: а – схема, б – обратные потери в полосе рабочих частот (данные компании EMC Technology)

Как указывается в обсуждаемом документе [13], деградация делителя с бериллиевым резистором связана с шунтирующей емкостью, пропорциональной размерам резистора. Соответственно при использовании такого компонента в делителе Вилкинсона требуется дополнительная подстройка реактивностями.

Контроль температуры

Обсуждение подложек было бы не полным, если не упомянуть еще одну ипостась их применения – теплоотводящие мосты. В этом случае подложка используется как самостоятельный элемент в чип-форм-факторе со стандартными контактными площадками. Обычный способ использования таких изделий – это установка рядом с рассеивающими значительные мощности сопротивлениями для отвода тепла на терморассеивающие элементы конструкции. Поскольку эти компоненты не являются резисторами, их рассмотрение ограничим ссылками на источники. Один из классических примеров теплового моста – это λ-bridge компании AVX [14]. Также в этом сегменте рынка присутствует фирма International Manufacturing Services (IMS) со своей линейкой изделий TermaBridge™ на основе нитрида

алюминия. В производственной линейке фирмы имеются все размеры чип-мостов от 0505 до 3275 [15].

ЛИТЕРАТУРА

3. **Крюков М.** Высокостабильные тонкопленочные чип-резисторы фирмы Phycomp // Компоненты и технологии. 2003. № 4. С. 16–18.
4. Thick Film Catalog: http://www.mini-systemsinc.com/wp-content/uploads/2016/02/Thick_Film_Catalog.pdf
5. Vishay Solution Guide For The Selection Of Low-Ohmic Components: <https://www.escomponents.com/precisioncurrentsensingguide2>
6. **Недорезов В., Подшибякин С.** Современные композиционные керметные материалы для толстопленочных резисторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2011. № 6. С. 104–111.
7. **Недорезов В.** Металлофольговые резисторы и наборы резисторов // Электронные компоненты. 2006. № 4. С. 111–114.
8. **Ключников Б., Калаев К.** Прецизионные сопротивления, изготовленные по технологии Bulk Metal Foil, – реальное воплощение идеальной модели // Электронные компоненты. 2007. № 2. С. 99–100.
9. **Калаев К.** Линейность и шумовые характеристики резисторов Bulk Metal® Foil компании Vishay // Электронные компоненты. 2010. № 6. С. 56–57.
10. **Калачёв А.** Уникальные высокопрецизионные фольговые резисторы Vishay // Электронные компоненты. 2012. № 6. С. 61–68.
11. **Калачёв А.** Фольговые резисторы Vishay // Электронные компоненты. 2012. № 12. С. 120–126.
12. **Недорезов В.** Резисторы как элемент пассивной электроники. – <https://docplayer.ru/49474538-Rezistory-kak-elementy-passivnoy-elektroniki.html>
13. **Vailly M.** Diamond Rf™ Resistives: The Answer to High Power and Low Capacitance // Microwave Journal. 2010. № 11. PP. 94–100.
14. λ -Bridge Thermal Conductor: <http://www.avx.com/docs/techinfo/whitepapers/AVX-Thermal-Management.pdf>
15. ThermoBridge™ Electrically Isolated AlN Thermal Management Device: <https://ims-resistors.com/products/therma-bridge/>

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 760 руб.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп.

Кондрашин А. А., Лямин А. Н., Слепцов В. В.

С развитием высоких технологий становится реальным выпуск трехмерных электронных устройств (ТЭУ). Решением данной задачи являются еще только разрабатываемые гибридные технологии, названные в данной работе квази-4D-технологиями формирования ТЭУ. В то же время создана классификация 4D-объектов (способных менять свою форму или структуру после их создания в зависимости от внешних условий, например при изменении температуры, при механическом воздействии и т.д.) ТЭУ и технологий для их формирования.

Данное учебное пособие является первой книгой по технологиям изготовления, сканирования и визуализации трехмерных электронных устройств. Во второй книге будут рассмотрены технологии сканирования трехмерных электронных устройств различных диапазонов, в том числе нанометрового диапазона. Отдельный раздел второй книги будет посвящен возможностям изготовления трехмерных электронных устройств нанометрового диапазона с применением методов сканирующей микроскопии. Третья книга будет посвящена технологиям визуализации (средствам отображения информации) для контроля параметров ТЭУ, создания новых ТЭУ и технологий реинжиниринга ТЭУ.

Учебное пособие может быть рекомендовано бакалаврам и магистрам высших учебных заведений.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2019. – 210 с.,
ISBN 978-5-94836-504-6

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru