

Десять причин выбрать фольговые резисторы Vishay для вашего проекта

Александр Калачев (г. Барнаул)

Технология **Bulk Metal Foil** была разработана в 1962 году Феликсом Зандманом (*Dr. Felix Zandman*) – основателем компании Vishay. Результатом работы компании стали фольговые резисторы с низким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и высокой стабильностью параметров вне зависимости от изменений температуры [1]. Технология Bulk Metal Foil вывела компанию на рынок прецизионных сопротивлений и приборов на их основе и сделала ее одним из явных лидеров в этой области.

Технология **Z-Foil**, успешно реализованная в 2000 году, стала новым прорывом компании Vishay. Впервые было достигнуто абсолютное значение ТКС $\pm 0,2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Стратегия развития компании [2] сфокусирована на вертикальной интеграции продуктов – применение технологии изготовления фольговых резисторов для датчиков (сопротивления, деформации, тока и др); применение датчиков в электронно-измерительных устройствах; интеграция датчиков и электронно-измерительных устройств, а также программного обеспечения в модули и измерительные системы.

Основные свойства резисторов Vishay и их ассортимент

На сегодняшний день фольговые резисторы превосходят резистивные компоненты других типов по точности, стабильности и надежности. Все это стало возможным благодаря уникальной конструкции, включающей использование специального резистивного сплава (C-Foil, K-Foil, а с 2000 года – Z-Foil), обеспечивающего уникальные свойства – предельно низкие температурные и мощностные коэффициенты сопротивления (ТКС и МКС меньше $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) [3-5].

Типовые технические характеристики фольговых резисторов:

- Низкий температурный коэффициент сопротивления: $\pm 0,05 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ($0 \dots 60^\circ\text{C}$), $\pm 0,2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ($-55 \dots 125^\circ\text{C}$);
- Широкий диапазон номинальной мощности;
- Высокое предельное рабочее напряжение 180В;
- Высокая точность $\pm 0,01 \dots 0,001\%$;
- МКС в результате самонагрева 5 ppm при номинальной мощности;
- Защита от электростатики до 25кВ;
- Стабильность при работе под нагрузкой $\pm 0,005\%$ (70°C , порядка 2000 часов работы при номинальной мощности);
- Широкий диапазон номинальных сопротивлений;
- Неиндуктивный, неемкостной дизайн;
- Низкие значения токового шума -40дБ;
- Коэффициент напряжения менее $0,1 \text{ ppm}/\text{В}$;
- Диапазон рабочих температур $-55 \dots 125^\circ\text{C}$;
- Возможность изготовить ЛЮБОЙ (1К892346) номинал в пределах номиналов сопротивления данной серии.

Компанией предлагаются прецизионные резисторы практически для любой области применения, в любом конструктивном исполнении [3, 5]. Ассортимент фольговых резисторов (таблица 1) включает в себя:

- Резисторы для поверхностного монтажа (SMD);
- Дискретные резисторы для монтажа в отверстия;
- Делители напряжения (для монтажа в отверстия и SMD);
- Резисторные сборки (для монтажа в отверстия и SMD);
- Резисторы- датчики тока (current-sensing resistors);
- Герметичные резисторы;
- Потенциометры;
- Гибридные микросхемы;
- Герметичные резисторные сборки под заказ потребителя;
- Высокотемпературные резисторы (рабочая температура более 220°C);
- Резисторы для аудио.

Таблица 1. Ассортимент фольговых резисторов Vishay Precision Group

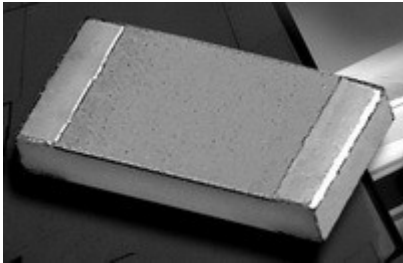
Резисторы поверхностного монтажа

Внешний вид

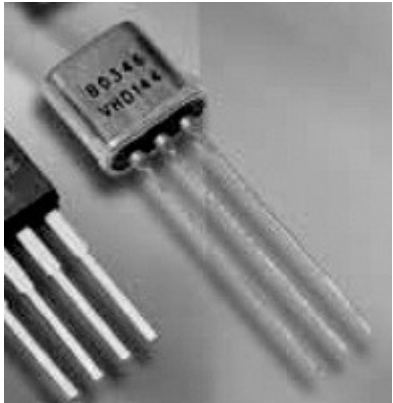
Выводные резисторы и сборки

Внешний вид

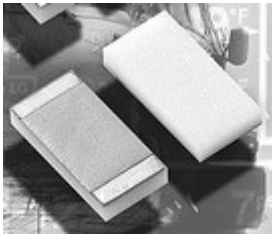
VSMP Series



VH Series



VFCP Series



Z201



SMRxD Series



VHP Series



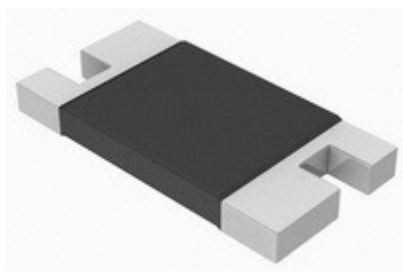
VCS2516Z



VPR Series



CSM Series



VHA Series



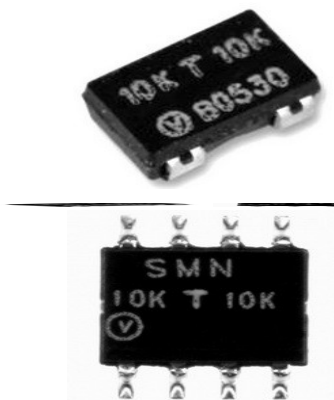
PRND



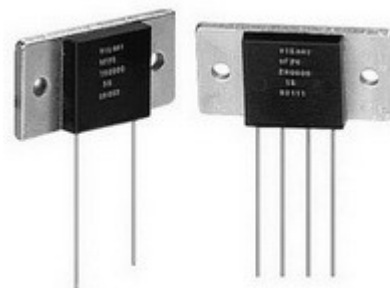
VCS Series



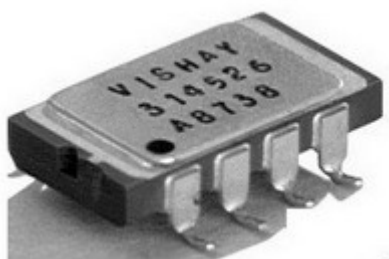
DSM/SMN



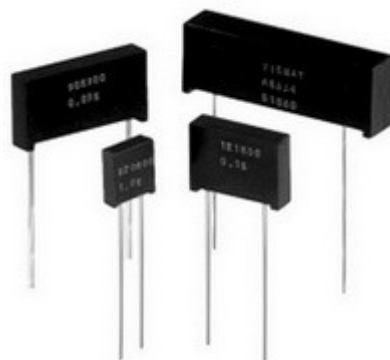
VFP Series



VSM



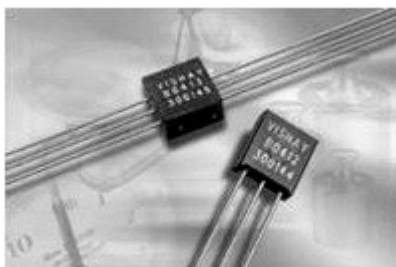
S Series



VFCD



300144



В качестве услуги Vishay предлагает уникальный сервис Prototype Fastlane Service (PFS), позволяющий потребителю получить резисторы технологии Bulk Metal Foil любого номинала (например, 123,455487 Ом) в течение 76 часов.

Технологические решения Vishay

для достижения высоких эксплуатационных характеристик фольговых резисторов

При разработке инженерного решения для какой-либо задачи очень важно учесть как можно больше факторов, способных повлиять на конечный результат. Кроме того, иногда при решении проблемы удастся использовать простые и понятные даже школьнику явления и эффекты. Объять все это и воплотить в жизнь – целое искусство. Рассматривая аспекты технологии фольговых резисторов Vishay, можно с уверенностью сказать, что эти резисторы являются в своем роде произведениями искусства – своеобразный сплав элегантных и остроумных решений и возможностей, предоставляемых высокими технологиями. Ниже кратко описаны подходы и технологические решения [5, 6], примененные в прецизионных фольговых резисторах Vishay и обеспечивающие продукции компании успех на рынке.

1. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС)

Два простых и предсказуемых физических явления, протекающих в слое фольги и ее подложке, лежат в основе низкого температурного сопротивления этих резисторов:

- Сопротивление резистивного сплава прямо пропорционально зависит от изменения температуры;
- Коэффициент температурного расширения сплава фольги больше, чем у керамической подложки, вследствие этого резистивный слой при росте температуры испытывает сжатие. При сжатии сопротивление резистивного слоя падает.

Таким образом, ТКС фольговых резисторов определяется результатом параллельно протекающих процессов – изменения сопротивления от температуры и от вызванного ею сжатия слоя. В итоге мы получаем предсказуемо низкий, повторяемый и контролируемый температурный коэффициент сопротивления – без сортировки и отбраковки продукции, вне зависимости от номинала сопротивления, номера партии и даты изготовления.

Типичная зависимость ТКС фольговых резисторов от температуры дается как относительное изменение сопротивления резистора в зависимости от температуры, выраженное в частях на миллион на градус Цельсия (parts per million per degree centigrade – ppm/°C; в русской литературе обычно указывается ТКС – $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$). Зависимости даны для инструментального диапазона 0...25°C и 25...60°C и для военного – -55...25°C и 25...125°C, для всех номиналов резисторов, включая низкоомные.

В результате внедрения в техпроцесс сплава Z-Foil удалось достичь характеристик ТКС в $\pm 0,2$ ppm/°C. На рисунке 1 показаны типичные зависимости ТКС от температуры для различных сплавов, применяемых в фольговых резисторах VPG. Первоначальный сплав C-Foil показывал негативную параболическую температурную характеристику с положительным наклоном в области низких температур и с отрицательным в области высоких [5, 6].

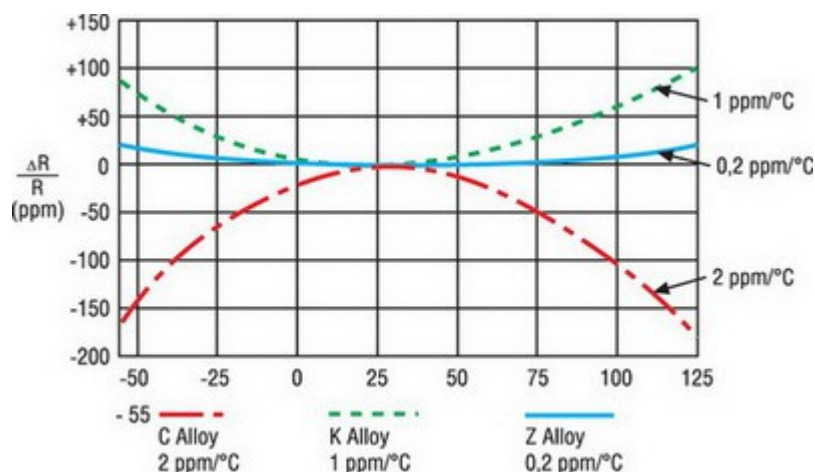


Рис. 1. Типичные зависимости ТКС от температуры для различных резистивных сплавов

Следующий сплав K-Foil демонстрирует обратную параболическую зависимость с отрицательным наклоном в области низких температур и с положительным в области высоких. Сплав Z-Foil имеет характеристику, аналогичную K-Foil, но с примерно пятикратным улучшением ТКС. Эта технология позволяет создавать резисторы с практически нулевым температурным дрейфом.

Абсолютно низкие значения ТКС позволяют снизить т.н. эффект «трекинга» (стабильность отношения ТКС двух различных сопротивлений). Эффект возникает в случае использования резисторов разных технологий в одной схеме при различных условиях их работы (разные температурные условия, токи); его трудно избежать даже при значениях ТКС 2...5 ppm/°C.

2. Мощностной коэффициент сопротивления (МКС)

На практике температура резистора зависит не только от внешних условий, но и от эффекта Джоуля- нагрева резистора при протекания через него тока (самонагрев). ТКС сам по себе не описывает поведение прецизионного резистора. Для более полного описания вводится еще одна характеристика- мощностной коэффициент сопротивления (МКС), который выражается в относительном изменении сопротивления резистора на ватт для заданной мощности. Для фольговых резисторов технологии Z-Foil МКС лежит в пределах 5ppm (4ppm для мощных резисторов). К примеру, мощный фольговый резистор с ТКС 0,2ppm/°C и МКС 4 ppm/Вт при изменении температуры на 50°C (50...75°C) и рассеиваемой мощности в 0,5Вт даст относительную погрешность $DR/R = 500,2 + 0,54 = 12ppm$ [5, 6].

3. Температурная стабилизация

Когда мощность прикладывается к резистору, его температура растет. Для достижения высокой точности необходима быстрая реакция на изменения во внешней среде или режиме работы. Быстрая температурная стабилизация требуется в приложениях, где необходимо незамедлительное достижение стабильного состояния сопротивления. Для большинства технологий изготовления резисторов это время может достигать нескольких минут. Фольговые резисторы способны к практически моментальной температурной стабилизации, вплоть до нескольких ppm за доли секунды. Точное значение зависит от текущих внешних условий, протекающего тока, температурных градиентов. Рисунок 2 иллюстрирует скорость температурной стабилизации резисторов различных технологий [5, 6].

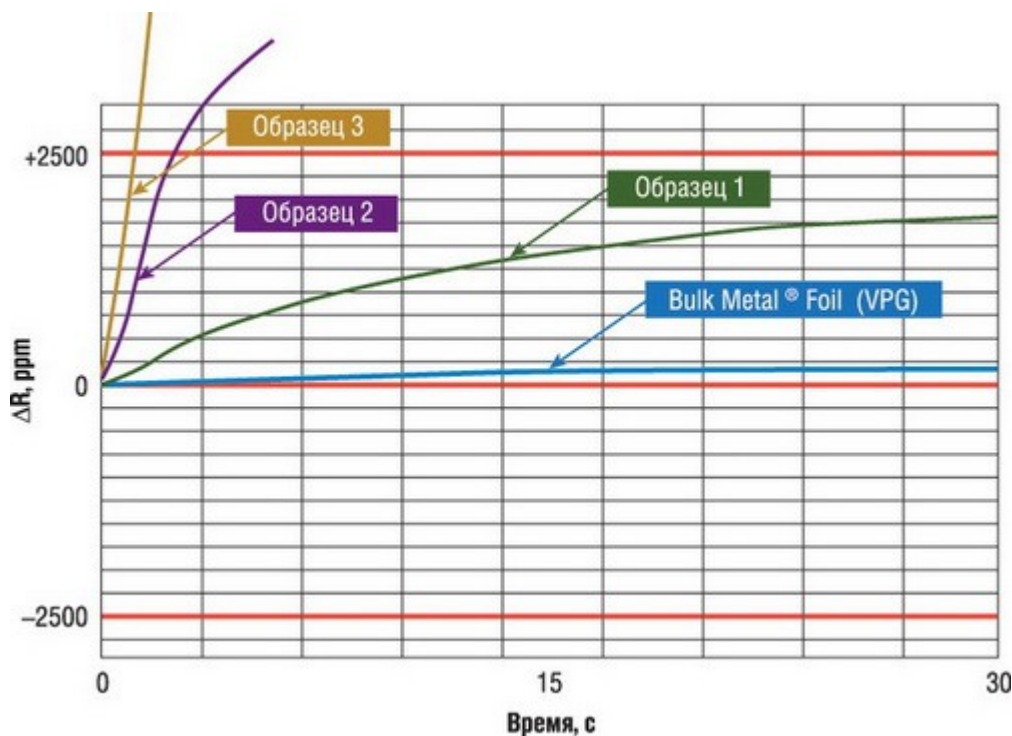


Рис. 2. Скорость температурной стабилизации резисторов различных технологий

4. Низкая абсолютная погрешность величины сопротивления

Система, устройство или отдельный узел схемы рассчитаны на определенный срок службы, и в рамках этого срока они должны соответствовать заявленным параметрам. В течение периода эксплуатации устройство может подвергаться различным условиям воздействия, и точность его работы может отличаться от заявленной.

Одна из причин высоких требований к точности элементов схемы – обеспечение требуемой точности работы в течение всего срока службы. Другая причина – бюджет допустимой ошибки экономически более применим к резисторам, чем к другим компонентам. Фольговые резисторы калибруются с точностью до 0,001% благодаря выборке разного количества точек настройки, предусмотренных на фотошаблоне резистивного элемента (рис. 3).

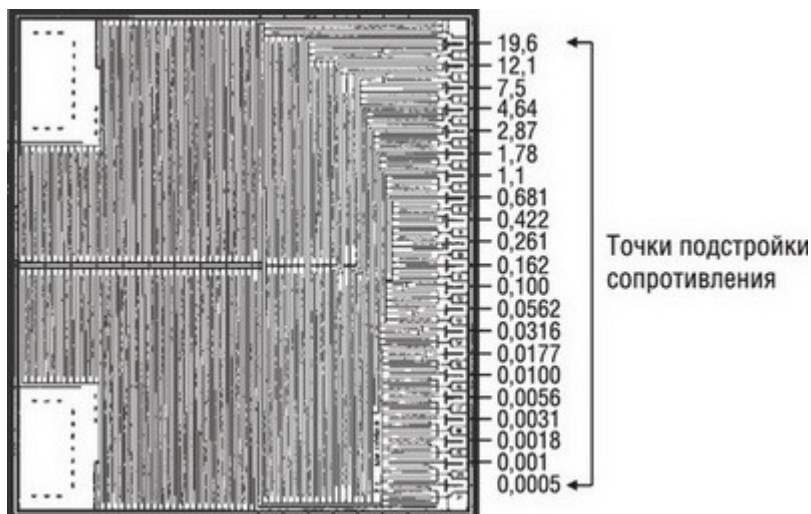


Рис. 3. Фотошаблон резистивного слоя – область подстройки сопротивления (белые области – слой фольги)

С помощью этих точек можно предвидеть изменение сопротивления до требуемого уровня точности. Если убрать одну из областей соединения, то увеличится путь тока, и, следовательно, увеличится сопротивление (рис. 4).



Рис. 4. Схематичный путь тока по резистивному слою (черные области – слой фольги)

В области точной настройки для прецизионной подгонки удаление точек соединения, благодаря топологии, оказывает все меньший и меньший эффект на изменение сопротивления 0,001... 0,0005% (5 ppm) [6].

5. Стабильность в течение срока жизни

Не менее важной чертой резисторов, кроме точности, является временная стабильность их параметров при работе под нагрузкой.

Стабильность параметров фольговых резисторов Vishay заключается прежде всего в применяемых материалах и конструкции (слой резистивной фольги и подложка на основе оксида алюминия).

К примеру, на рисунке 5 показано поведение резисторов Z201 под нагрузкой при температуре 125°C (допустимое отклонение DR – максимум 150 ppm после 2000 часов под нагрузкой и максимум 500 ppm после 10000 часов). Как правило, DR уменьшается при уменьшении приложенной нагрузки (снижается самонагрев резисторов).

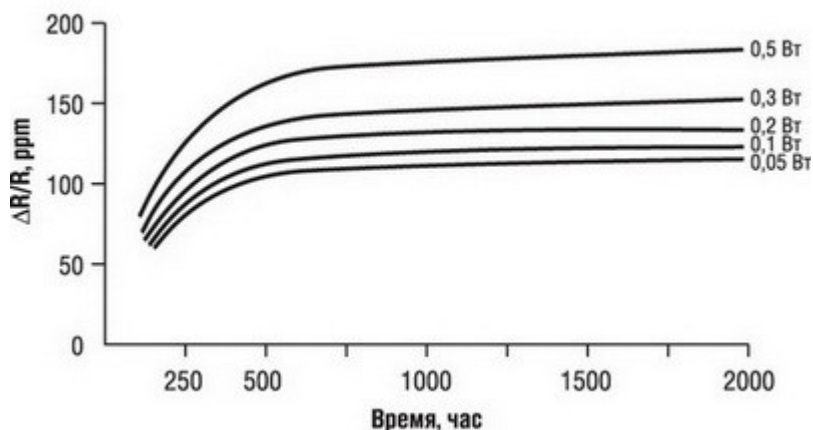


Рис. 5. Относительное изменение сопротивления резистора с течением времени при различном уровне рассеиваемой мощности (T=125°C)

Более впечатляющими являются примеры тестирования фольговых резисторов в течение длительного периода времени. Так на рисунке 6 представлены результаты тестирования герметичных резисторов VHP101 одним из потребителей за 8 лет эксплуатации, а на рисунке 7 – результаты тестирования 50 резисторов S102C (10 кОм при 70°C под нагрузкой 0,1 Вт) в течение 29 лет (более 250 тысяч часов наработки!). В первом случае среднее отклонение не превысило 1 ppm, во втором – 60 ppm [5, 6].

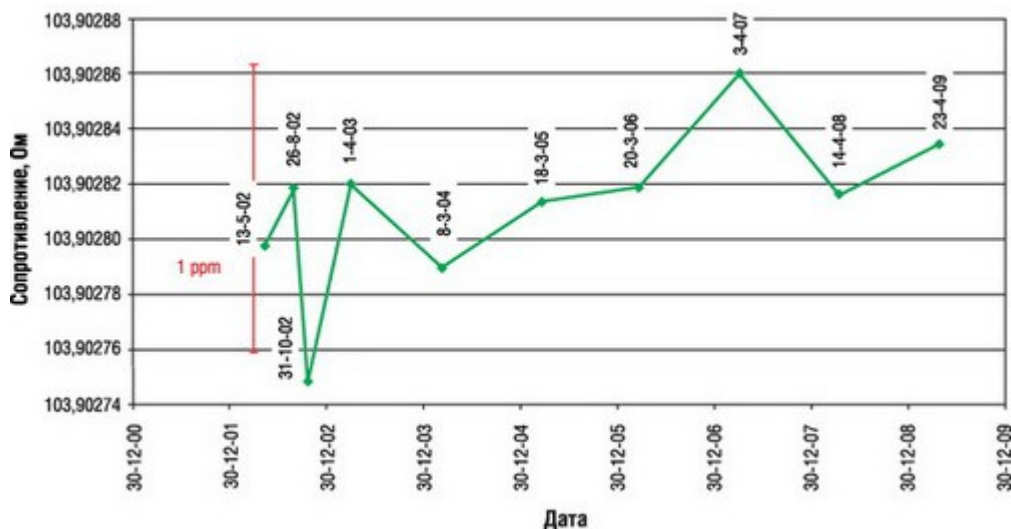


Рис. 6. Изменение сопротивления герметичных резисторов VHP101 в процессе эксплуатации

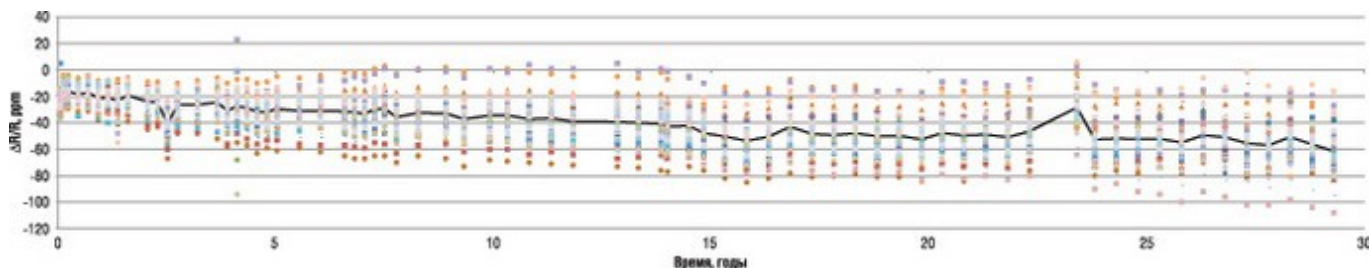


Рис. 7. Относительное изменение сопротивления фольговых резисторов в течение эксплуатации (50 образцов S102C, 10 кОм, мощность 0,1 Вт, температура 70°C)

6. Высокая скорость нарастания и время отклика

На высоких частотах резистор начинает проявлять реактивные свойства: в зависимости от конструктивного исполнения — либо преимущественно емкостные, либо индуктивные. Эквивалентную схему резистора на высоких частотах можно представить следующим образом — рисунок 8.

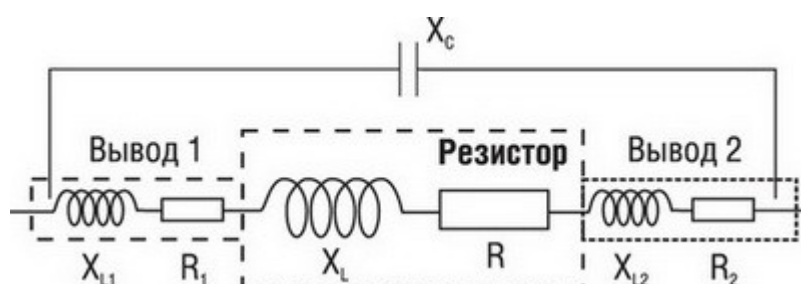


Рис. 8. Эквивалентная схема резистора на высоких частотах

Влияние оказывают и внешние выводы резистора, и геометрическое исполнение резистивного слоя. Так для резисторов со спиральным резистивным слоем повышается влияние индуктивности, т.к. конструктивно данное исполнение напоминает катушку индуктивности, и направления протекания тока в соседних витках совпадают, плюс паразитные емкости проводника суммируются благодаря их параллельному их подключению.

Как уже упоминалось, фольговые резисторы имеют планарную структуру, а рисунок резистивного слоя на подложке напоминает систему меандров (рис. 3 и 4). В результате такого решения индуктивность проводника снижается за счет того, что в соседних петлях меандра токи текут в разные стороны. Паразитная емкость такого планарного слоя также уменьшается, поскольку распределенные по всей длине резистивного слоя паразитные емкости оказываются включенными последовательно (рисунок 9) [6].

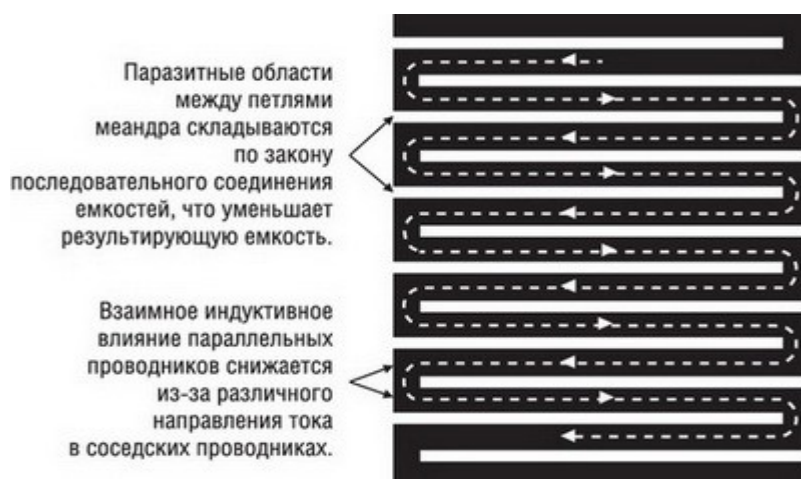


Рис. 9. Устранение влияния взаимной индукции проводников и паразитной емкости

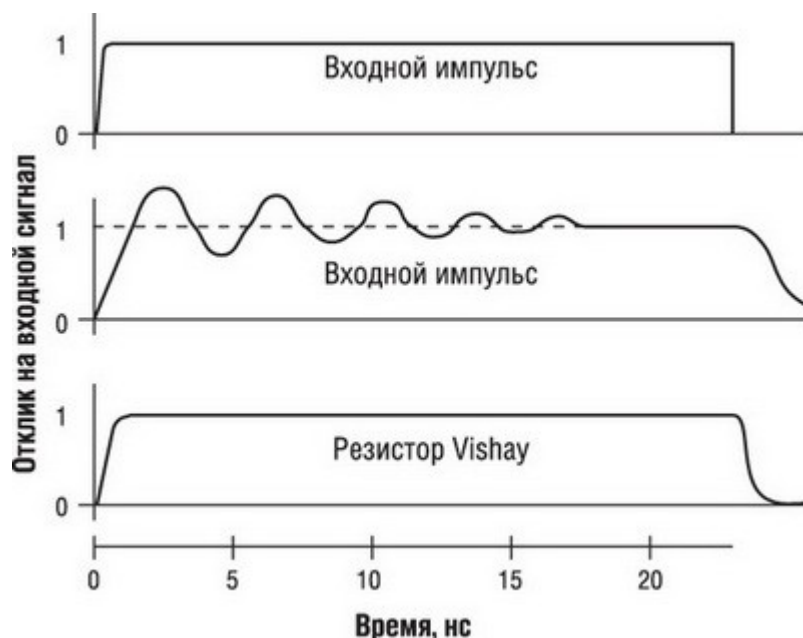


Рис. 10. Отклики фольгового и проволочного резисторов на прямоугольный импульс

Рисунок 11 содержит типовые частотные характеристики фольговых резисторов в виде отношения полного сопротивления к активной составляющей. Отклонения от единичной прямой вверх указывают на индуктивный характер нагрузки, вниз – на емкостной.

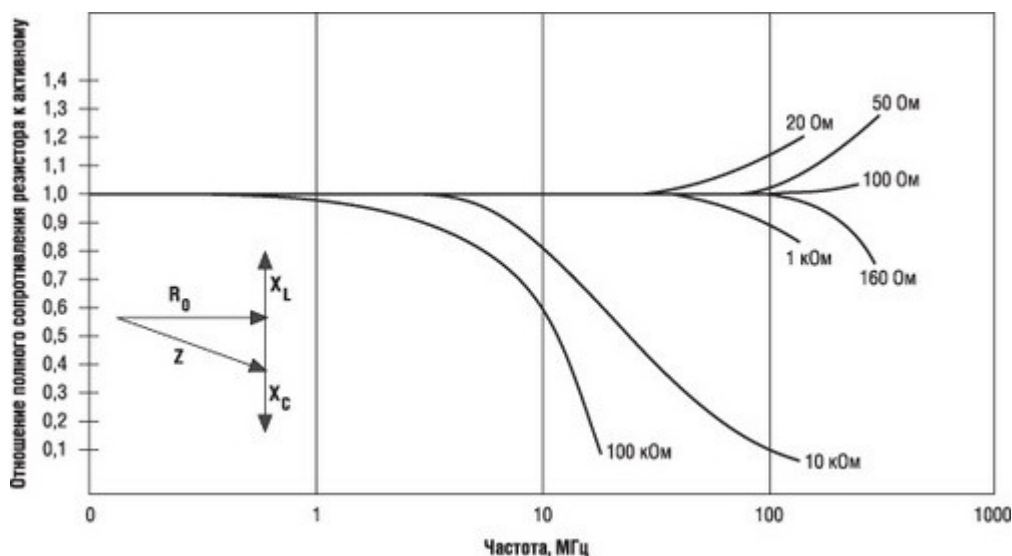


Рис. 11. Типовые частотные характеристики фольговых резисторов

Наилучшим образом ведут себя резисторы номиналом 100 Ом, имеющие активный характер нагрузки практически до 100 МГц.

7. Шум – «услышь разницу!»

Современные требования к качеству воспроизведения/записи звука становятся все более жесткими, как следствие, ужесточаются требования и к компонентам аудиосхем. В частности, для систем с уровнем входного сигнала в диапазоне микровольт собственный шум элементов схемы (в частности, резисторов) становится критичным.

Сам по себе резистор также может являться источником шума, уровень которого будет зависеть от технологии изготовления, его конструктивных особенностей, номинала сопротивления и пр.

Выделяют тепловой шум, зависящий только от сопротивления резистора, и токовый (дробовой) шум, зависящий от уровня протекающего тока и материала резистора.

Наибольший шум генерируют резисторы, выполненные по технологии резистивного слоя с проводящими металлическими частицами в среде непроводящего наполнителя – точечный характер контактов между проводящими частицами является источником повышенного шума.

Резисторы, выполненные по технологиям металлических расплавов наименее подвержены этому эффекту, т.к. контактные явления протекают уже на границах зерен сплава, имеющих гораздо более плотные контакты между собой чем проводящие частицы, например, в углеводородных резисторах. В этом смысле фольговые резисторы Vishay не исключение. Более того, благодаря применению фотолитографии и технологии изготовления фольговых резисторов (структура резистивного сплава с гладкими, протяженными границами между зернами, планарное решение, низкая паразитная емкость, разнонаправленные токи в отдельных линиях) Vishay удалось существенно снизить уровень токового шума [4-6].

Для сравнения в таблице 2 приведены шумовые характеристики резисторов различных технологий изготовления (значения выражены в децибелах – отношение 1 мкВ токового шума в одному вольту сигнала – $дБ = 20 \lg(\text{мкВ } U_{\text{шума}} / \text{В } U_{\text{сигнала}})$).

Таблица 2. Уровни токового шума резисторов различных технологий

Технология	Шум, дБ	Примечание
Металло-углеродные	-12...-6	Сильное влияние контактов между металлами и углеродным наполнителем; зависимость от температуры, механических напряжений, влажности, времени эксплуатации
Тонкопленочные	-18...-10	Источник шума – контактные явления между частицами оксида рутения в керамическом наполнителе
Металлопленочные	-32...-16	Спиральный путь тока по резистору, влияние неровностей на границах резистивной пленки вследствие механической или лазерной обработки
Проволочные	-38	Благодаря сплошному металлическому резистивному слою устранены контактные эффекты в структуре материала, но из-за индуктивного характера полного сопротивления возможно увеличение шумовых пиков на второй-третьей гармонике сигнала
Фольговые	-40	Ровные границы благодаря фотолитографии, сниженное влияние паразитных емкостей и индуктивностей за счет мевандрового пути тока по плоскому резистивному слою

8. ТермоЭДС

ТермоЭДС возникает на месте контакта металлов с различными уровнями молекулярной активности, также сказывается неравномерность нагрева как отдельных элементов схемы, так и резистора. Влияние термоЭДС особенно заметно при работе с малыми постоянными сигналами.

В фольговых резисторах увеличенная площадь контакта между выводами и резистивным слоем способствует распределению тепла между ними. Равномерный слой фольги и ее топология не содержат точек локализации тепла. Данные меры способствуют равномерному распределению тепла, и, как следствие, минимизации причин возникновения термоЭДС [6-8].

На рисунке 12 представлены результаты тестирования резисторов (SMD-резисторы размера 2512, сопротивлением 0,05 Ом) различных технологий, влияющих на генерацию термоЭДС при одинаковом температурном градиенте [8].

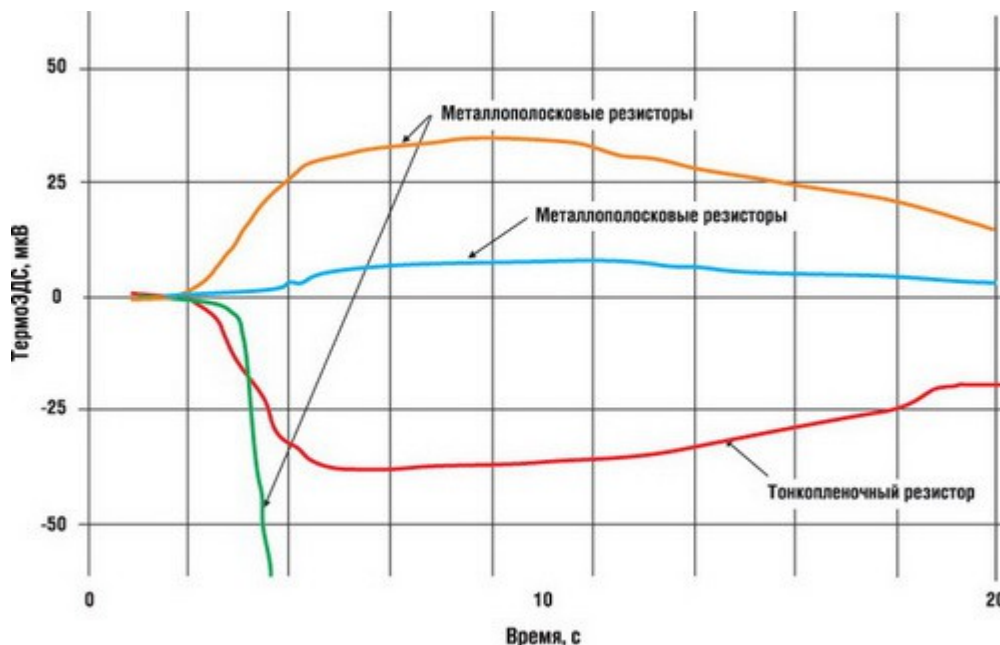


Рис. 12. Генерация термоЭДС (SMD-резисторы размера 2512, сопротивлением 0,05 Ом, различных технологий)

9. Электростатический разряд

Не секрет, что разряд статического электричества, возникающий при прикосновении к приборам или предметам интерьера, может иметь плачевные последствия для электронной схемы. Даже не смотря на то, что энергия, высвобождаемая при разряде мала, размеры элементов схемы также не велики, и во многих случаях этого достаточно для вывода электронного компонента из строя.

Для резисторов вероятность повреждения электростатическим разрядом обратно пропорциональна их размерам – чем меньше резистор, тем меньше у него возможность рассеять энергию разряда, что может вызвать локальный перегрев и расплавление резистивного слоя.

Для фольговых резисторов эффект локального перегрева из-за электростатического разряда не играет существенной роли прежде всего из-за относительной толщины фольгового слоя – соответственно, для его расплавления требуется больше энергии (т. к. толщина фольгового слоя примерно в 100 раз больше толщины пленки в пленочных резисторах). В отличие от пленочных резисторов с композитной структурой резистивного элемента резистивный слой представляет собой сплошной сплав, что способствует более быстрому распространению тепла по нему.

Тестирование показало устойчивость фольговых резисторов к электростатическому разряду вплоть до 25000 В (типовые значения для резисторов других типов 3000...4000 В) [6].

10 Незначительный коэффициент напряжения

Еще один источник погрешности в резисторах – зависимость сопротивления от приложенного напряжения. Особенно сильно этот эффект проявляется в металло-углеродных резисторах, значительно менее он заметен у резисторов других технологий; его величина может существенно варьироваться. Фольговые резисторы нечувствительны к величине приложенного напряжения, так как резистивный элемент представляет собой сплошной металлический слой без инородных включений или наполнителей.

Области применения

Характеристики фольговых резисторов позволяют применять их в областях с высокой степенью ответственности, повышенными требованиями к качеству, точности или сроку службы, а также в тяжелых климатических условиях – медицинское оборудование, высокопроизводительное аудио оборудование, прецизионные измерительные системы, аэрокосмические или военные приложения

[3, 5, 6].

Мостовые схемы

Данный тип приложений требует наличия четырех резисторов – три строятся по наиболее стабильной технологии, а четвертый работает в качестве чувствительного элемента, преобразуя значение физической величины в изменение напряжения на выходе мостовой схемы. При этом резисторы монтируются как можно ближе друг к другу, и их температуру во время измерений также стремятся сделать одинаковой. Фольговые резисторы идеально подходят для данной области применения благодаря исключительно низкому температурному и мощностному коэффициенту сопротивления, низкому шуму термоЭДС, малому времени рассасывания заряда.

Датчики тока

Резистор с очень низким сопротивлением с четырьмя точками подключения позволяет минимизировать потери мощности на измерительном сопротивлении, и применять для измерения тока тепловое излучение. Измерение очень больших токов данным методом требует от резистора достаточно больших размеров для обеспечения рассеяния тепла. Резисторы технологии Vishay Foil являются прекрасным решением, т.к. тонкий плоский слой фольги располагается на керамической подложке, которая в состоянии рассеять и отвести в нижележащую плату достаточное количество тепла. Низкий ТКС предотвращает дрейф параметров резистора при изменении температуры в результате нагрева при протекании большого тока.

Дифференциальные усилители

Коэффициент усиления обычного усилителя должен быть по возможности постоянным вне зависимости от условий внешней среды. Входной резистор и резистор обратной связи в данных схемах имеют отличные характеристики рассеяния тепла и протекающего тока, разогревающего резисторы. В дифференциальном усилителе речь идет уже о четырех, а иногда и о большем количестве резисторов – это означает, что все они должны проявлять практически идентичные характеристики в широком диапазоне значений. Резисторы технологии Vishay Bulk Foil отвечают этим требованиям лучше других.

Гироскопы в системах навигации

В электростатических гироскопах применяется электронное управление для перестройки гироскопа во время изменения его ориентации. Гироскопы других типов также критичны к точности резисторов, применяемых в их схемах. Чаще всего в схемах применяются резисторные сборки, используемые для определения и реализации функций «включено-выключено», «контроль азимута» и других. Данные функции являются критичными с точки зрения управления воздушными, водными судами, космическими аппаратами. Это только одна из причин, по которой применение прецизионных фольговых резисторов является практически обязательным.

Датчики давления

Давление воздуха в воздушных и подводных судах, как правило, является вопросом жизни и смерти, в этой связи от систем его измерения требуется высокая точность и еще большая отказоустойчивость. Чаще всего выход датчика зависит от приложенной к нему силы, и для точной обработки сигнала необходима мостовая схема, значения сопротивлений которой находятся в среднем диапазоне значений, что минимизирует потребляемую мощность, и, соответственно, нагрев резисторов. Фольговые резисторы в подобных схемах, кроме температурной, добавляют временную стабильность параметров.

Импульсные источники питания

Эта область применений требует наборов сопротивлений с минимальной реактивностью. Любая паразитная индуктивность или емкость резисторов может негативно сказаться на работе схемы из-

за влияния на крутизну фронта переключения. Благодаря своей конструкции и технологии изготовления фольговые резисторы Vishay Foil обладают минимальной реактивностью по сравнению с другими.

Телекоммуникации

В телекоммуникационной инфраструктуре наиболее важными параметрами являются широкий диапазон рабочих частот и высокая временная стабильность. Конструкция фольговых резисторов Vishay является планарной со смежными проводниками, ток по которым течет в противоположных направлениях. Данное решение уменьшает индуктивность резистора, и паразитные емкости при этом оказываются в параллельном включении, что уменьшает результирующую емкость – все это снижает реактивную составляющую полного сопротивления резистора и улучшает его частотные характеристики.

Медицина

В данной области фольговые резисторы обеспечивают стабильность параметров даже в условиях переменной температуры и влажности. К основным применениям можно отнести: кардиографы; томографы; миниатюрные датчики для систем трехмерного изображения для очной диагностики и хирургии; имплантаты.

Литература

1. Г.Келл. Vishay Intertechnology: портрет компании // Новости Электроники №9/06, с 23-25.
2. Vishay Precision Group. Company Overview. // http://www.vishaypg.com/docs/75012/vpg_co.pdf
3. Ultra-High-Precision Bulk Metal® Foil Resistors. Advanced Medical Applications, Treatment Solutions, and Biotechnology// http://www.vishay.com/docs/49466/pl_cap_b.pdf
4. Introduction to High Precision Resistors. Vishay Foil Resistors// <http://cimail15.blh.com/docs/49787/intro.pdf>
5. Bulk Metal® Foil Resistors. Complete resource guide.// <http://images.vishaypg.com/vpgdocs/49789VMN-PL0373.pdf>
6. 10 Technical Reasons Why to Choose Foil Resistors for Your Circuit Vishay Foil Resistors// <http://vishaypg.com/docs/49788/10reasns.pdf>
7. Thermal EMF for Low Ohmic Value Resistors// <http://www.vishay.com/docs/30175/thermal.pdf>
8. Yuval Hernik. Component selection and layout strategies for avoiding thermal EMF.// <http://www.eetimes.com/design/power-management-design/4214897/Component-selection-and-layout-strategies-for-avoiding-thermal-EMF>.

Получение технической информации, заказ образцов, поставка – e-mail: discret.vesti@compel.ru

Точнее и надежнее не бывает



Казалось бы, поскольку в электронике и радиотехнике резистор — самый «древний» элемент, с его стороны не приходится ожидать каких-либо непредвиденных обстоятельств, препятствующих успешному проектированию электронных средств. Зачастую так и происходит, когда условия эксплуатации не сильно отличаются от привычных бытовых и промышленных. Тогда обнаруженное на производстве при входном контроле отклонение электрического сопротивления резистора от номинального значения в 5. и даже 10% вполне допустимо, и если внезапных внутренних обрывов в резисторах не происходит, а в процессе старения изменение номинала не

превышает нескольких процентов, то спроектированное изделие годами работает исправно.

Совершенно другой подход требуется при проектировании метрологических приборов, когда требуется близкая к абсолютной точность результатов измерений, или в разработке радиоэлектронных средств, функционирующих в аномальных внешних условиях, будь то активная химическая среда, температура, измеряемая сотнями градусов жары или холода, сверхвысокое давление или почти абсолютный вакуум — как в космосе, где обычными оказываются также длительные многократные весовые перегрузки. В таких случаях конструктору никак не обойтись без особо стабильных и прецизионных фольговых резисторов, о которых пойдет речь в статье.

Изобретение, рожденное упорным трудом

Еще с 1816 г. в науке было известно явление фотоупругости (фотостресса), связанное с возникновением оптической анизотропии в прозрачных твердых телах под действием механических напряжений. Данное явление позволяло оценить силу механического воздействия путем измерения смещения оптического луча на выходе тестируемого оптически прозрачного твердого тела. В связи с развитием сверхзвуковой авиации и космических летательных аппаратов в 50–х годах прошлого столетия актуальной стала задача измерения перегрузок, или, другими словами, разработки тензодатчиков. Одним из первых свой научный интерес к данной проблеме проявил двадцатидвухлетний ученый Феликс Зандман (Felix Zandman), окончивший в 1949 г. университет Нанси (Франция) по специальности «физика и техника». Жажда к знаниям и успехи в обучении были столь значительными, что ему по окончании университета было присвоено почетное звание «Студент века».

Следующий жизненный этап даровитого ученого связан с докторантурой в знаменитом университете Сорбонны, где Ф. Зандман исследовал влияние механического давления на электрическое сопротивление проводника с током. Научное предположение о возможности оценки механического стресса, воздействующего на проводник с током, путем измерения его электрического сопротивления, после длительных и упорных экспериментов воплотилось в новый метод и уникальную технологию, составивших основу докторской диссертации. После ее успешной защиты последовали годы преподавания во французской Академии аэронавтики и научно-практической деятельности в авиационной промышленности Франции.

В 1956 г. д-р Зандман получил предложение от компании Budd переехать в США и занять должность директора департамента научных исследований и разработок. Развивая свою методику измерения деформаций, ученый пришел к идее создания сверхпрецизионного тонкопленочного резистора, прототипа нынешнего фольгового резистора. Однако руководство компании отклонило предложенную бизнес-идею, посчитав ее бесперспективной. И тут надо отдать должное предвидению и уверенности изобретателя в полезности своего «детиса» — в 1962 г. для производства фольговых резисторов Ф. Зандман создал собственную фирму, назвав ее [Vishay](#) (в соответствии с именем литовского городка, где родилась и жила бабушка, воспитавшая будущего ученого-изобретателя).

Можно только гадать, что именно — точный технический анализ, оригинальное сочетание старых и новых конструктивов в производстве изобретенного резистивного элемента или простое везение — помогло создать продукт, стремительно ворвавшийся на рынок резисторов, но дела у новоявленного бизнесмена с докторским званием пошли чрезвычайно успешно. В те годы привычные всем конструкторам резисторы оформлялись в цилиндрическом корпусе. Новая технология предполагала совмещение токопроводящего слоя с керамическим основанием — пластинкой квадратной или прямоугольной формы. Соответственно, потребовался корпус резистора, в качестве которого превосходно подошел аналогичный от малогабаритного слюдяного конденсатора, производимый в больших количествах на стандартном оборудовании. Причем рассеиваемая резистором мощность 0,33 Вт дополнила сложившийся к тому времени ряд стандартных значений 0,125, 0,25 и 0,5 Вт, что также возымело эффект новизны. Главное же достоинство фольговых резисторов, благодаря которому начали поступать миллионные заказы от военной промышленности, — это невиданные доселе прецизионность и стабильность резисторов даже в самых жестких условиях эксплуатации. Дела у новой фирмы пошли настолько успешно, что всего лишь через два года, в 1964 г., лицензию на производство запатентованных резисторов

нового типа начали раскупать другие зарубежные производители, в том числе и в России (в 1973 г.).

Несмотря на безвременную кончину доктора Ф. Зандмана в июне 2011 г., фирма Vishay Intertechnology, Inc. продолжает оставаться безусловным лидером в производстве и реализации прецизионных резисторов, занимая примерно треть мирового рынка: в Азии и Европе по 37%, в Америке — 26%. Помимо резисторов в сферу интересов компании в настоящее время входят также конденсаторы, диоды, транзисторы, микросхемы, элементы оптоэлектроники и другие компоненты, что стало возможным благодаря активно проводимой руководством политике поглощения смежных подразделений всемирно известных фирм — Temic (Telefunken), Infineon, General Semiconductor и др. Однако несомненно, что основным продуктом, продвигаемым на мировом рынке фирмой Vishay, останутся сверхпрецизионные фольговые резисторы, превосходящие по своим параметрам другие типы резисторов. Рассмотрим истоки и причины такого превосходства.

Все познается в сравнении

Последние десятилетия развития электронной промышленности убедительно свидетельствуют о неуклонном стремлении к миниатюризации производимых устройств и приборов различного назначения. В связи с этим постоянно повышаются требования как к параметрам используемых компонентов, так и к их надежности, определяющей работоспособность устройства в целом. Оправданной, с точки зрения автоматизации производства, оказалась «чипизация» элементов, и среди них в первую очередь — резисторов, являющихся основными «строительными блоками» для многих схем. Их положительным свойством является экономное расходование полезной площади на печатной плате проектируемого устройства и отличная приспособляемость к автоматизированному сборочному процессу. При возможности использования разнотипных резисторов следует учитывать, что общая надежность устройства будет определяться наиболее слабым звеном, следовательно, конструктору необходимо осознанно подходить к выбору элементов, анализируя их основные и вспомогательные параметры.

В таблице 1. представлена сравнительная характеристика наиболее распространенных прецизионных резисторов [2]. Очевидно, что проволочные резисторы, присутствующие в таблице, не могут быть исполнены в виде чипов, поскольку для их изготовления требуется намотка резистивного провода на керамическую (пластиковую) шпильку. Тем не менее такие прецизионные резисторы применяют на печатных платах с монтажом в отверстиях. Выбирая диаметр и материал провода, конструктор обеспечивает требуемое значение электрического сопротивления резистора и его первоначальные параметры. У этих резисторов, по сравнению с тонко- и толстопленочными, самый низкий температурный коэффициент сопротивления (ТКС), характеризующий относительное изменение сопротивления резистора при изменении температуры окружающей среды на 1°C . За рубежом в качестве единицы измерения данного параметра для прецизионных резисторов используют миллионные доли относительного изменения сопротивления резистора ($\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$), а в отечественной технической литературе — полный аналог такой единицы измерения ТКС: $10^{-6}\cdot 1/^{\circ}\text{C}$.

На изменение сопротивления резистора влияет не только температура внешней среды, но и саморазогрев элемента при прохождении электрического тока. Причем внутренняя часть провода, прилегающая к основанию (шпильке), нагревается сильнее, чем внешняя, обтекаемая воздухом. Точно так же провод вблизи выводов вследствие дополнительного отвода тепла через выводы на печатную плату нагревается меньше, чем центральная часть резистора. В результате разогрева проволочного резистора при включении аппаратуры и охлаждения после отключения в проводе и шпильке происходит вначале упругая (обратимая) деформация, а по мере старения — необратимая. Постоянные механические деформации приводят к случайным изменениям электрических параметров провода и непредсказуемым результатам в конце жизненного цикла резистора. Неблагоприятную динамику изменения класса точности проволочного резистора отображают данные, приведенные в 4-й и 5-й колонках таблицы. Здесь видно, как по мере эксплуатации проволочный резистор теряет свое превосходство в точности и сравнивается с тонкопленочным резистором.

Как и пленочные, проволочный резистор обладает значительной тепловой инерцией. Ему требуется несколько минут, чтобы после включения тепловой режим стабилизировался и сопротивление достигло требуемой точности.

С другой стороны, толщина и масса проводящего материала в проволочном резисторе значительно больше, чем у пленочных, что позволяет ему без ущерба для работоспособности выдерживать электростатический разряд (ЭСР) с напряжением до 25 000 В. Также проволочный резистор превосходит пленочные по коэффициенту шума.

Однако у проволочного резистора отмечается существенный недостаток, ограничивающий его применение в цепях переменного (импульсного) тока на частотах выше 50 кГц. Плотное расположение на шпильке витков провода приводит к образованию заметной межвитковой емкости. А поскольку направление тока в соседних витках одинаковое, то и суммарная индуктивность такой обмотки с резистивным проводом наряду с распределенной эквивалентной емкостью могут быть весьма значительными.

В отличие от проволочных производство тонкопленочных резисторов автоматизировано в гораздо большей степени, и поэтому затраты на единицу продукции существенно меньше. Они более компактны по сравнению с проволочными, и их применение оправдано в приборах, где достаточен промежуточный уровень точности сопротивления резистора.

Процесс изготовления тонкопленочного резистора заключается в вакуумном напылении на керамическую подложку паров металла (хрома, тантала, никрома и др.), при этом образуется пленка толщиной всего лишь 5–25 нм (1 нанометр = 10^{-9} м). В дальнейшем на металлическую пленку методом фотолитографии проецируют групповое изображение резисторов с заданной конфигурацией токопроводящей дорожки и подвергают химическому или ионному травлению токопроводящий слой под засвеченными в ультрафиолетовых лучах участками фоторезиста. На заключительном этапе осуществляют порезку на отдельные элементы групповой сборки резисторов на общей подложке и их герметизацию.

Очевидно, что точность сопротивления изготовленного тонкопленочного резистора определяется, в основном, технологическим соблюдением заданной толщины напыляемой металлической пленки, и в начале жизненного цикла точность весьма высока, лишь на порядок уступая точности прецизионного проволочного резистора. Примерно одинаковы для сравниваемых в данном случае резисторов ТКС,

а также точность в конце жизненного цикла и на заданном этапе функционирования (через 2. и 10 тыс. ч работы). Однако из-за незначительной толщины пленки такой резистор способен выдержать значительно меньший ЭСР, напряжением всего лишь 2500 В. И коэффициент теплового шума у него существенно выше, достигая –20 дБ.

По всем параметрам вышеназванным аналогам уступает толстопленочный резистор, в котором толщина проводящего слоя составляет 10–100 мкм. Тем не менее объемы производства и потребления таких элементов остаются значительными благодаря их относительной дешевизне. В то же время таким элементам свойственна высокая надежность, обусловленная прочным сцеплением токопроводящего слоя с керамической подложкой. При производстве токопроводящую пасту через сетчатый трафарет наносят на подложку, а затем подвергают сушке и вжиганию. В результате прочность сцепления подложки с толстой пленкой достигает 50 кгс/см².

Толстые пленки на основе серебряно-палладиевой, оловянной, боридной, рутениевой и др. пасты представляют собой вкрапления токопроводящих гранул в стеклянной матрице [3], как это показано на рис. 1. Электрические контакты между гранулами создают дорожку для протекания тока в резисторе. Таких параллельных дорожек образуется великое множество, их интегрирование (объединение) во всем объеме материала задает требуемое электрическое сопротивление толстопленочного резистора. Тепловое линейное расширение токопроводящего слоя приводит к обрыву многих дорожек, но их настолько много, что выхода резистора из строя не наблюдается. Однако, как показано в таблице, термостабильность, изначальный класс точности и стабильность сопротивления в процессе функционирования у толстопленочного резистора значительно хуже, чем у аналогов. К тому же гранулированная структура проводящего материала и флуктуация токопроводящих путей приводят к образованию сгустков электронных зарядов и их скачкообразному продвижению через резистор. В результате чем выше сопротивление резистора, тем меньше содержание гранул металла в его объеме и тем выше уровень шума и

меньше стабильность. С другой стороны, стекловидный материал в составе толстопленочного резистора образует дополнительную герметизирующую пленку, поэтому его влагостойкость выше, чем у тонкопленочного резистора.

Все вышесказанное, а также приведенные в таблице данные убеждают нас в абсолютном превосходстве фольгового резистора, но его замечательные свойства заслуживают отдельного рассмотрения.

ТКС фольгового резистора

Как известно, в соответствии с классической электронной теорией сопротивление проводника, изготовленного как из чистого металла, так и из сплавов различных металлов, подвержено влиянию температуры. Ионы и атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, совершают тепловые гармонические колебания относительно положения равновесия. Свободные электроны, создающие электрический ток, по мере продвижения вдоль проводника сталкиваются с узлами решетки, испытывая сопротивление своему движению. Чем выше температура металла (сплава), тем больше препятствий (столкновений), тем выше сопротивление. Разумеется, с ростом температуры у различных металлов (сплавов) относительное повышение сопротивления различно.

Еще в 50-х годах прошлого столетия Ф. Зандман задался целью создать такой сплав, чтобы его сопротивление не зависело от температуры. Однако он понимал, что тепловое движение узлов кристаллической решетки с ростом температуры устранить невозможно, его можно только каким-то образом скомпенсировать. И выход был найден.

Обратим внимание на структуру проводимости электрического тока в фольге, изготовленной из сплавов различных металлов [3], показанную на рис. 2. В качестве исходных материалов молодой ученый экспериментировал с хромом, никелем, молибденом и др. Если на рис. 1. «дорожка» для протекания тока образована соприкасающимися острыми краями токопроводящих гранул в изоляционном материале, то в охлажденном расплаве металлов на рис. 2. мы видим огромное множество таких «дорожек» между плотно расположенными «островками» проводимости (группами кристаллов) — ведь никаких изоляторов в расплав не вводилось. Теперь представим, что мы начали сжимать островки. Чем плотнее они будут прижиматься друг к другу, тем меньше окажется результирующее сопротивление проводника.

Осталось объединить эти два разнородных физических явления. Для этого изобретатель склеивал слой фольги из металлического сплава с керамической подложкой. Механическое соединение фольги с подложкой оказалось очень прочным. Причем коэффициент линейного расширения сплава путем композиции различных металлов подбирался почти таким же, как у керамической подложки, чтобы не допустить механического разрыва фольги толщиной 0,002–0,1 мм, прочно соединенной с подложкой. В силу этого при нагревании фольга стремилась расшириться, но подложка тормозила это расширение, т. е. островки проводимости подвергались внешнему сжатию. В результате внутреннее увеличение электрического сопротивления металлического сплава вследствие нагревания компенсировалось дополнительным сжатием и улучшением контакта между островками, поэтому результирующее сопротивление такого проводника почти не изменялось.

Тысячи, если не миллионы, экспериментов были проведены неутомимым первооткрывателем Ф. Зандманом, прежде чем приблизиться к желаемому результату. И, как видно на рис. 3, первым удачным оказался сплав, обозначенный автором изобретения литерой С (C Alloy). Для данного сплава ТКС, имеющий параболическую зависимость от температуры, аппроксимируют прямой линией, показанной на рисунке синим цветом, и по абсолютному значению он составляет ± 2 ppm/°C. Десятки лет упорного труда потребовались, чтобы создать сплав K Alloy с ТКС = ± 1 ppm/°C. И прошло еще почти полвека, прежде чем в 2000 г. осуществилась мечта изобретателя, когда был получен сплав Z Alloy, у которого ТКС = $\pm 0,2$ ppm/°C. Несмотря на современный уровень развития науки и техники, никакими другими методами получить столь низкий ТКС у резисторов до настоящего времени не удается.

Когда шум шуму — рознь...

Вряд ли доктор Зандман при изобретении резистора с предельно низким ТКС задавался целью снизить уровень шума в усилителях слабых электрических сигналов. Усилитель может быть выполнен как на дискретных элементах, так и на интегральных микросхемах. В любом случае рабочий режим усилителя задают резисторы. А поскольку усиление требуется достаточно большое, будет усиливаться не только некоторый слабый полезный импульсный сигнал, осциллограмма которого показана на рис. 4а, но и соизмеримые с полезным сигналом шумы, создаваемые обычными резисторами во входных цепях усилителя [3], как это иллюстрирует рис. 4б. При использовании прецизионных фольговых резисторов уровень шумов в усиленном сигнале значительно снижается, его осциллограмму демонстрирует рис. 4с.

Природа возникновения шумов в резисторах рассмотрена ранее (рис. 1, 2). Если сравнивать показанный на рисунках путь прохождения тока в тонкопленочных и фольговых резисторах, бесспорным окажется преимущество последних за счет множественности «элементарных» путей, образующих суммарный ток в резисторе. В свою очередь, такая множественность образована более тесным соприкосновением островков проводимости, у которых все грани участвуют в проведении тока. Важное следствие такого механизма токообразования в фольговых резисторах — нейтрализация влияния повышения температуры на уровень шума, когда более плотное соединение островков способствует образованию дополнительных путей для прохождения электрического тока. Аналогично компенсируется повышение шумов при возрастании электрического напряжения в токопроводящей цепи в отличие от пленочных резисторов, где существенное влияние оказывает как минимальная толщина проводящей пленки, так и неустойчивое соединение токопроводящих гранул в матрице изоляционного материала. К тому же фольговые резисторы в индивидуальных корпусах отличаются значительно лучшей герметизацией, чем проволочные и пленочные, поэтому в них повышение влажности окружающей среды не влияет на повышение уровня электрических шумов.

Существенный вклад в уровень электрического шума в резисторах вносит также переход от токопроводящего материала к выводам для подключения к внешней схеме, т. е. конструкция выводов. Наиболее оптимальной она оказалась именно в фольговых резисторах. Этому способствует относительно высокая проводимость используемого в таких резисторах материала, что позволяет контактные площадки для подключения выводов исполнять из той же фольги, что и токопроводящие проводники [3], как это показано на рис. 5. Но в особо ответственных вариантах применения фольговых резисторов технология их изготовления предусматривает возможность золочения выводов на керамической подложке, что способствует дополнительному снижению уровня электрического шума.

В итоге оказывается, стремился ли изобретатель Зандман к подобному результату или он получен благодаря удачному стечению технических обстоятельств, но никакие другие резисторы не могут сравниться с фольговыми по уровню создаваемых ими электрических шумов и другим показателям, о которых пойдет речь далее.

Чем достигается особая прецизионность фольгового резистора?

Если обратиться к таблице 1, можно видеть, что у фольговых резисторов в серийном производстве отклонение сопротивления от номинального значения не превышает 0,001%. Заметим, что это отнюдь не тот предел точности, который достигим на поточном оборудовании фирмы Vishay Intertechnology, Inc. По индивидуальному заказу фирма предоставляет специальный сервис PFS (Prototype Fastlane Service) [3], суть которого состоит в гарантированной возможности в течение 76 ч изготовления и отправки потребителю партии резисторов с произвольным заданным номинальным значением сопротивления, например 123,4567 Ом. Как же достигается подобная точность?

В технологической основе создания сверхпрецизионных резисторов лежит упомянутый выше процесс фотолитографии, используемый также при изготовлении тонкопленочных резисторов. Рассмотрим промежуточный результат (рис. 5), когда на керамической подложке с резистивным слоем фольги (закрашен белым цветом) уже сформирована требуемая топология токоведущих проводников. На левой части керамической подложки расположены контактные площадки для формирования выводов резистора. Вертикально расположенные линии — это проводники,

образующие бесподстроечную часть резистора.

Правая часть рисунка отображает горизонтально расположенные проводники и соединенные с ними так называемые триммерные (подгоночные) площадки, в крупном масштабе показанные в центре изображения. Здесь проводники окрашены в черный цвет, а изоляционные промежутки — в белый.

Пунктиром показан путь электрического тока в двух абсолютно идентичных смежных участках резистора — А и В. На участке В триммерная площадка удалена с помощью лазера, поэтому в обход препятствия электрический ток вынужден преодолевать длинный меандрообразный путь со сравнительно большим сопротивлением. На участке А триммерная площадка осталась нетронутой, благодаря чему электрический ток «выбирает» кратчайший путь в обход меандрообразного участка. Очевидно, что электрическое сопротивление участка В существенно больше, чем участка А.

Лазерное удаление отдельных триммерных площадок позволяет в автоматизированном режиме осуществлять калибровку прецизионного резистора. Как показывает шкала в правой части рисунка, влияние отключаемого при калибровке резистора меандрообразного участка максимально вверх и позволяет грубо изменять номинальное значение сопротивления (с точностью до 19,6%), и минимально вниз (с точностью до 0,0005%).

Высокочастотное применение фольговых резисторов

В отличие от остальных прецизионных резисторов, меандрообразная топология токоведущего проводника в фольговых резисторах предоставляет конструктору еще одно неоспоримое преимущество — возможность их широкого применения в высокочастотных цепях. Для пояснения данного замечательного свойства рассмотрим эквивалентную схему прецизионного проволочного резистора [3], показанную на рис. 6. В этом резисторе витки провода намотаны на керамическую шпильку в одном направлении (если смотреть со стороны вывода — либо по часовой стрелке, либо против). И поскольку во всех витках направление электрического тока одинаково, то и отдельные межвитковые емкости, и индуктивные составляющие отдельных витков складываются, причем суммарная реактивная составляющая полного сопротивления прецизионного проволочного резистора оказывается настолько значительной, что его работа невозможна на частотах выше 50 кГц, как это указывалось выше. На рисунке активная составляющая полного сопротивления резистивного проводника обозначена R_0 , вывода 1. и вывода 2. — r_1 и r_2 соответственно, индуктивная — X_{L0} , X_{L1} , X_{L2} , емкостная — X_C . Здесь резистивные и индуктивные компоненты включены последовательно, поэтому общее активное сопротивление резистора $R = R_0 + r_1 + r_2$, индуктивное — $X_L = X_{L0} + X_{L1} + X_{L2}$, емкостное — X_C . С учетом введенных обозначений модуль полного сопротивления резистора Z может быть выражен равенством:

Благодаря тому, что токоведущие проводники в фольговых резисторах имеют меандрообразную структуру, как это показано на рис. 5, их реактивная составляющая в общем сопротивлении оказывается значительно ослабленной. Противоположное направление тока в соседних витках, изображенное на рисунке, приводит к взаимной компенсации индуктивного сопротивления резистора, а межвитковые емкости оказываются включенными последовательно, поэтому суммарная эквивалентная емкость фольгового резистора существенно меньше по сравнению с другими типами резисторов. Типовую частотную зависимость отношения полного сопротивления разнотипных фольговых резисторов к активной составляющей [3] отражает рис. 7. В соответствии с приведенным выше равенством, модуль полного сопротивления резистора (на рисунке — длина вектора Z) можно определить как длину гипотенузы в прямоугольном треугольнике, один из катетов которого — активная составляющая R , второй — разность емкостной и индуктивной составляющих. Как видно на графике, все представленные для исследования фольговые резисторы абсолютно свободны от реактивной составляющей сопротивления на частотах до 1. МГц. Затем для резисторов 10 и 100 кОм в общем сопротивлении начинает сказываться емкостная составляющая. У резисторов 1. кОм и 160 Ом такое влияние становится заметным на частотах свыше 50 и 100 МГц соответственно. В остальных резисторах преобладает индуктивная составляющая, а резистор 100 Ом практически свободен от реактивной составляющей сопротивления на частотах вплоть до 200 МГц, что позволяет его использовать во входных цепях

анализаторов спектра радиосигналов, осциллографов и других прецизионных приборах.

Кроме частотной зависимости полного сопротивления, для оценки высокочастотных свойств резистора применяют и другой критерий — способность пропускать импульсный сигнал без искажений фронта. Для фольговых резисторов данный показатель соответствует импульсу с длительностью фронта всего лишь 1 нс, тонкопленочных — 10 нс, толстопленочных — 50 нс.

Из всего сказанного следует, что в случае необходимости схемотехнической обработки высокочастотных или импульсных сигналов с большой крутизной фронта при выборе элементной базы другой альтернативы для инженера-конструктора, помимо фольговых резисторов, просто не существует.

Области применения фольговых резисторов

Представленную выше сравнительную характеристику параметров разнотипных прецизионных резисторов можно продолжать и продолжать. Например, при анализе зависимости сопротивления от приложенного к нему напряжения окажется, что так называемый коэффициент напряжения в фольговых резисторах по сравнению с другими на несколько порядков ниже — менее 0,1 ppm/V. Аналогичное явление наблюдается при исследовании зависимости относительного изменения сопротивления фольгового резистора от рассеиваемой мощности. Так называемый мощностной коэффициент сопротивления в данном случае не превысит 5 ppm/Wt. То же и по всем другим параметрам. Вывод однозначен: на сегодня среди прецизионных резисторов только фольговые могут соответствовать самым жестким предъявляемым требованиям в ответственных случаях применения различных электронных устройств.

Многообразие метрологических и других задач, решаемых с помощью фольговых резисторов, порождает широкий спектр типоразмеров серийно производимых компанией Vishay резисторов, исчисляемых сотнями. Чтобы получить первичное представление о такой продукции, выборочно рассмотрим лишь некоторые из резисторов [3], включенные в таблицу 2.

Большинство из представленных в таблице образцов — двухвыводные прецизионные резисторы на основе сплава Z Alloy, исполненные как в виде чипов для поверхностного монтажа, так и с выводами, предназначенными для монтажа посредством пайки в отверстиях.

В таблице показаны также многовыводные резисторы, представляющие собой объединение нескольких резисторов на одной подложке, что позволяет использовать их прежде всего в цепях обратной связи для операционных усилителей. Такое применение дает неоспоримое схемотехническое преимущество по сравнению с другими резисторами по двум причинам. Во-первых, фольговый резистор, как пояснялось, способствует резкому снижению электрических шумов, и, во-вторых, равновеликое воздействие температуры внешней среды на все резисторы с низким ТКС в общей цепи делителя напряжения, образующего обратную связь, как никакого другого способствует почти абсолютной термостабильности электрического режима усилителя. Аналогичный результат не удастся получить в случае применения дискретных фольговых резисторов.

В операционном усилителе используют, как правило, один канал усиления по инвертирующему либо неинвертирующему входу. Но в ряде случаев требуется усиление сразу по двум каналам, т. е. дифференциальное усиление. В таких усилителях число резисторов, задающих требуемый электрический режим, кратно возрастает. И только фольговые резисторы на общей подложке обеспечивают высокие параметры дифференциального усилителя.

Весьма оправдано применение объединенных на одной подложке фольговых резисторов и в мостовых схемах. Как известно, мостовые схемы применяют в устройствах как для измерения различных электрических параметров устройств и компонентов (сопротивления, частоты, тока, напряжения и пр.), так и в различных следящих системах для датчиков движения и управления двигательными установками. Следовательно, без фольговых резисторов, соединенных на общей подложке по мостовой схеме, невозможно обойтись во всех сферах, где применяются электромеханические устройства, — в автомобилестроении, электронных системах вооружения и военной техники, авиации, современной космической технике и др.

Незаменимыми оказываются датчики тока на основе фольговых резисторов при разработке

импульсных источников питания, особенно оперирующих большими токами. В таких преобразователях наряду с большой рассеиваемой на датчиках тока мощностью требуется высокая степень достоверности получаемого сигнала мгновенного значения тока, который может быть значительно искажен заметной эквивалентной емкостью и индуктивностью резистора и способен нарушить нормальную работу замкнутых контуров в цепях усиления сигнала ошибки и автоматического регулирования выходного напряжения (тока).

Высокая степень герметизации фольговых резисторов обеспечивает их независимость от влияния внешней среды с высокой влажностью и агрессивными компонентами в ее составе, что особенно важно в химическом производстве, медицине, судовых механизмах военного/гражданского морфлота и многих других областях.

Еще одна обширная область применения фольговых резисторов — техника высококачественного звуковоспроизведения. В таких системах можно инструментально измерить уровень искажений и привносимых в звуковой сигнал электрических шумов. Однако верность высококачественного звуковоспроизведения теми или иными устройствами в основном оценивается по совокупности субъективных отзывов аудиоэкспертов и меломанов. И подавляющее большинство таких отзывов свидетельствует о полноценном воспроизведении звука только аудиоаппаратурой, базирующейся на фольговых резисторах [3].

С полной номенклатурой производимых компанией Vishay фольговых резисторов можно ознакомиться на сайте производителя. Для заказа продукции, а также уточнения отдельных параметров резисторов, не нашедших отражения в размещенной на сайте информации, можно обратиться к сотрудникам фирмы PT Electronics, являющейся официальным дистрибьютором Vishay Intertechnology, Inc.

Литература:

- Российский рынок электромеханики. По материалам исследования Информационно-аналитического центра современной электроники // Вестник электроники. 2012. № 2.
- Introduction to High-Precision Resistors Vishay Foil Resistors.
<http://www.vishaypg.com/docs/49787/intro.pdf>.
- Bulk Metal® Foil Resistors. Complete Resource Guide.
<http://www.vishaypg.com/docs/49789/vfrguide.pdf>.