

23. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радиолокационные и радионавигационные системы. - М.: "Радио и связь", 1994.
24. Оленев А. Радиотехническая разведка. Перспективы применения в истребителях пятого поколения. - Фазотрон, №3, 2005.
25. Соболев Н.В., Долбня Е.В., Кочемасов В.Н. Аналоговые Фурье-процессоры и их применение. - Зарубежная радиоэлектроника, №4, 1983.
26. Кочемасов В.Н., Соболев Н.В., Долбня Е.В. Комбинированные Фурье-процессоры. - Зарубежная радиоэлектроника, №2, 1985.
27. Кочемасов В.Н. Применение дисперсионных Фурье-процессоров в разведывательных приёмниках. - Зарубежная радиоэлектроника, №2, 1987.
28. Щербак В.И., Водянин И.И. Приёмные устройства систем РЭБ. - Зарубежная радиоэлектроника, №5, 1987.
29. Баландин В.С., Головинский К.В., Дорофеев В.В., Куц В.А. Перспективы развития приёмных устройств систем радиоэлектронной борьбы. - Зарубежная радиоэлектроника, №12, 1987.
30. Слюсар.В. Цифровое формирование луча в системах связи. Будущее рождается сегодня. - Электроника НТБ. №1, 2001.
31. Слюсар.В. Цифровые антенные решётки - будущее радиолокации. - Электроника НТБ. №3, 2001.
32. Слюсар.В. Схемотехника цифрового диаграммообразования. Модульные решения. - Электроника НТБ. №1, 2002.
33. Активные фазированные антенные решётки/Под ред. Д.И.Воскресенского и А.И.Капашенкова. - М.: Радиотехника, 2004.
34. Высоцкий.Б., Войнич.Б. Разумная обшивка. Перспективы развития бортовых радиоэлектронных систем. - Электроника НТБ. № 3-4, 1998.
35. Щербак.Н. РЭА индивидуальной защиты истребителей нового поколения. - Электроника НТБ. № 4, 2001.
36. Афинов В. Новое направление развития западных средств РЭП индивидуальной защиты самолётов (активные буксируемые радиолокационные ловушки первого поколения). - Зарубежное военное обозрение №7,8, 1999.
37. Н.Щербак Буксируемые ложные цели. - Электроника НТБ. №4, 2000.
38. <http://www.altera.com/>
39. <http://www.xilinx.com/>
40. <http://www.ti.com/>

ОПТИМАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

В.Г.Спирин

Арзамасский политехнический институт, г. Арзамас

Повышение плотности упаковки микросборок (МСБ), содержащих тонкопленочные резисторы (ТПР) может быть достигнуто за счет уменьшения их линейных размеров, однако это может привести к ухудшению воспроизводимости ТПР, вследствие роста, прежде всего, относительной производственной погрешности. В технической литературе и

н нормативной документации существует большое количество разнообразных форм ТПР, но далеко не все они подходят для проектирования МСБ высокой плотности упаковки. Сформулируем основные критерии, на основании которых будем выбирать формы ТПР: производственная погрешность размеров ТПР должна быть минимальной; при одинаковом числе квадратов предпочтение должно отдаваться той форме ТПР, которая занимает меньшую площадь.

С точки зрения этих критериев все многообразие форм ТПР можно разделить на четыре группы:

1. Резисторы, форма которых зависит от совмещения фотошаблона (ФШ).

2. Резисторы с переменной шириной.

3. Прямоугольные резисторы.

4. Зигзагообразные резисторы.

К первой группе можно отнести резисторы с Г-образной (рис. 1,а) и П-образной (рис. 1,б) формой. Применение этой группы резисторов нецелесообразно, так как в общую погрешность изготовления ТПР добавляется погрешность от величины несовмещения ФШ при их изготовлении, а также при выполнении операции фотолитографии.

Ко второй группе относятся: гантельные резисторы (рис. 1,в) и резисторы с разной шириной (рис. 1,г). Число квадратов N для резистора, изображенного на рис. 1,г, рассчитывается по формуле [1]:

$$N = \frac{l_1}{b_1} + \frac{l_2}{b_2} + \frac{1}{\pi} \left[\frac{S^2 + 1}{S} \ln \left(\frac{S+1}{S-1} \right) - 2 \ln \left(\frac{4S}{S^2 - 1} \right) \right],$$

где $S = b_2/b_1$ и $l_2 > 2b_2/3$.

Формула для расчета гантельного резистора еще более сложная [1]. Применение гантельных резисторов может быть технически целесообразно только при высоких плотностях тока (более 1 мА/мкм²), протекающего через электроды ТПР. Учитывая современную тенденцию снижения напряжения питания МСБ, а также то, что гантельные резисторы являются относительно высокоомными, то высокие плотности тока при этом на практике не достигаются.

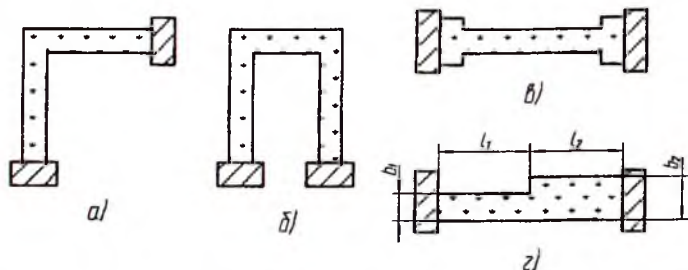


Рис. 1. Формы ТПР: а) Г-образная; б) П-образная; в) гантельная; г) с разной шириной

Применение резисторов второй группы также не нашло широкого применения на практике по двум основным причинам: из-за трудоемкости расчета; резисторы с такой формой занимают большую площадь. Поэтому применение резисторов второй группы при проектировании МСБ высокой плотности упаковки не рекомендуется.

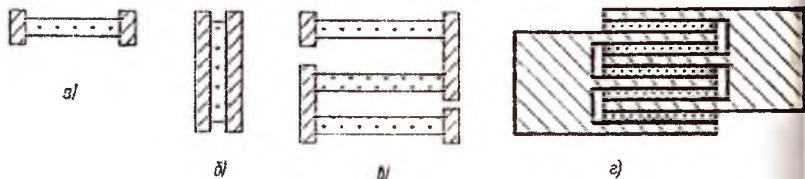


Рис. 2. Прямоугольные ТПР: а), в) $K_f > 1$; б) $K_f < 1$; г) гребенчатый, $K_f < 0,1$

Третью группу представляют следующие резисторы:

- прямоугольной формы с $K_f > 1$ (рис. 2,а) и $K_f < 1$ (рис. 2,б);
- резистор, выполненный в виде отдельных прямоугольных резистивных полосок, соединенных пленочными проводящими перемычками (рис. 2,в);
- резистор со встречно – гребенчатыми электродами или гребенчатый резистор (рис. 2,г).

Сопротивление резистивных элементов третьей группы рассчитывается по формуле:

$$R = \rho l/b = \rho K_f$$

где ρ - удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки; l , b - длина и ширина резистора; K_f - коэффициент формы ТПР.

Конфигурация резисторов четвертой группы показана на рис. 3: Z-образный резистор (рис. 3,а); обратный Z-образный резистор (рис. 3,б); резисторы типа меандр (рис. 3,в, г); резистор типа обратный меандр (рис. 3,д); резистор с внутренней контактной площадкой (рис. 3,е). Характерной особенностью зигзагообразных резисторов является наличие углового участка. На практике угловой участок формируют в виде квадрата. В этом случае сопротивление углового квадрата составляет $0,55\rho$ [2]. Сопротивление резисторов зигзагообразной формы рассчитывают как сумму всех прямоугольных и угловых участков.

Наиболее употребительными в практике проектирования МСБ являются резисторы прямоугольной формы, так как их формулы расчета наиболее просты, а их форма хорошо вписывается в топологию платы. Z-образные резисторы применяют для повторения конфигурации близлежащего проводника или минимизации числа угловых участков. Резисторы, составленные из отдельных резистивных полосок и резисторы

типа меандр применяют для реализации высокоомных элементов. Резисторы типа меандр имеют примерно одинаковую воспроизводимость сопротивления, как и резисторы, составленные из отдельных резистивных полосок, так как имеют малую относительную погрешность по длине, вследствие большой ее величины, но зато имеют небольшие участки с направлением, перпендикулярным основному, что ухудшает воспроизводимость сопротивления из-за анизотропности свойств резистивной пленки [3]. Следовательно, длина этих участков, как впрочем, и вертикального участка Z-образного резистора, должна быть минимальной.

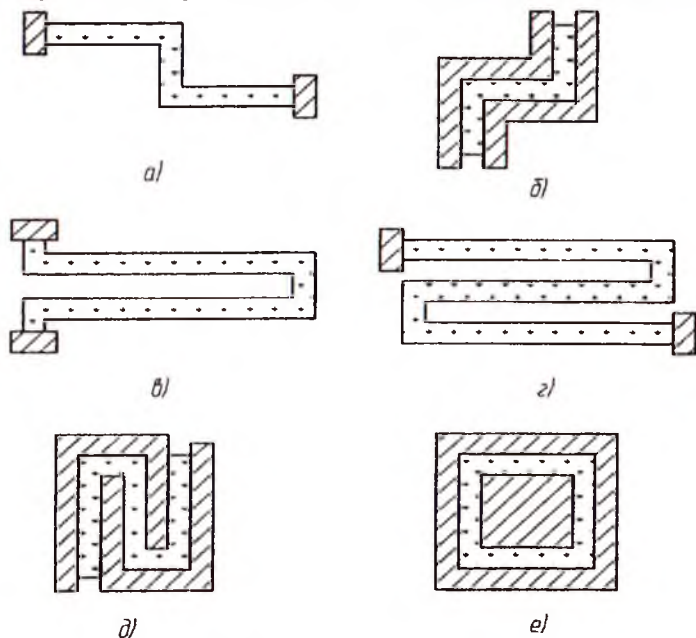


Рис. 3. Зигзагообразные формы ТПР

Тем не менее, форма резистора типа меандр предпочтительнее, так как он занимает меньше площади, чем резистор, составленный из отдельных полосок. Кроме того, форму меандра можно уточнить после первого изготовления платы путем определения инструментальных погрешностей [4].

В технической литературе приводятся две формы меандра (рис. 3, в, г), которые на первый взгляд ничем не отличаются. Однако, при внимательном рассмотрении этих форм, можно заметить, что при одной и той же занимаемой площади резистор, изображенный на рис. 3, г, обладает большим сопротивлением, чем резистор, изображенный на рис. 3, в. При

проектировании зигзагообразных резисторов надо стремиться к уменьшению количества угловых участков, так как эта мера повышает воспроизводимость сопротивления резисторов и экономит площадь проектируемой МСБ.

Особенностью конструкции резисторов с $K_\phi < 0,1$ является большое сопротивление электродов. Для конструирования резисторов с $K_\phi < 0,1$ можно рассматривать следующие формы ТПР: прямоугольный (рис. 2,б), гребенчатый резистор (рис. 2,г), обратный Z – образный (рис. 3,б), обратный меандр (рис. 3,д), резистор с внутренней контактной площадкой (рис. 3,е). Из этих резисторов обратный меандр является наиболее компактным и занимает наименьшую площадь. Однако конструкции обратного меандра и обратного Z-образного резистора обладают рядом недостатков, которые препятствуют их применению в МСБ высокой плотности упаковки.

1. В резисторе на разных его участках ток протекает во взаимно перпендикулярных направлениях, что увеличивает производственную погрешность сопротивления резистора, вследствие анизотропности свойств резистивной пленки.

2. Резистор в угловых его участках характеризуется значительной неравномерностью тока, что усложняет расчет его номинального сопротивления.

3. В этих конструкциях сложнее произвести анализ влияния сопротивления электродов на погрешность сопротивления резистора.

Перечислим недостатки конструкции резистора (рис 3,е) с внутренней КП.

1. Резистор занимает большую площадь из-за: больших размеров наружного электрода, который определяется размерами внутренней КП (обычно не менее $0,3 \times 0,3$ мм); ограниченного количества резистивных прямоугольных элементов (их всего четыре), включенных параллельно; нерационального расположения наружной КП.

2. Соединение внутренней КП с элементами платы требует второго уровня коммутации или проволочной перемычки, что снижает надежность платы и увеличивает ее трудоемкость.

Поэтому применение резистора с внутренней КП также не рекомендуется.

Учитывая, что гребенчатый резистор по основным параметрам (занимаемой площади и сопротивлению электродов) практически идентичен обратному меандру, но свободен от его недостатков, то применение этой формы ТПР для реализации низкоомных резисторов является наиболее предпочтительным. Был проведен анализ влияния сопротивления электродов на погрешность сопротивления прямоугольного и гребенчатого резисторов. Из проведенного анализа следует, что прямоугольный резистор рекомендуется применять при $K_\phi > 0,067$, а гребенчатый резистор в диапазоне $0,01 \leq K_\phi \leq 0,067$.

Выводы

В результате проведенного анализа установлено, что согласно двух критериев (воспроизводимости сопротивления и занимаемой площади) оптимальными формами ТПР для МСБ являются: резистор прямоугольной формы ($K_{\phi} \geq 0,067$); Z – образный резистор ($K_{\phi} \geq 20$); резистор типа меандр ($K_{\phi} \geq 40$); гребенчатый резистор ($0,01 < K_{\phi} < 0,067$). Применение таких форм ТПР в тонкопленочных МСБ повысит плотность их упаковки и выход годных.

Список использованных источников

1. Берри Р. Тонкопленочная технология / Р. Берри, П. Холл, М. Гаррис. - М.: Энергия, 1972.- 336 с.
2. ОСТ107.460084.200 - 88. Микросборки. Общие требования и нормы конструирования.
3. Спиринов В.Г. Проектирование и технология тонкопленочных микросборок с топологическими размерами 10-50 мкм: Монография / В.Г. Спиринов.- Арзамас: АГПИ, 2005.- 146 с.
4. Спиринов В.Г. Метод оценки качества тонкопленочной платы / В.Г. Спиринов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество – 2008», Т. 2.- Пенза, ПГУ, 2008.- С. 5-8.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

В.Г.Спиринов

Арзамасский политехнический институт, г. Арзамас

Наибольшее применение в настоящее время получила двойная фотолиитография, две разновидности которой для формирования конфигурации резистивного фрагмента приведены на рис. 1,а, б [1]. Суть этих способов заключается в том, что в первом способе при первой фотолиитографии формируют длину резисторов, а при второй фотолиитографии их ширину, а во втором способе сначала формируют ширину тонкопленочного резистора (ТПР), а затем - его длину. В первом способе используют проводящую структуру Cr-Au, а во втором - проводящие структуры, не содержащие драгоценных металлов, например, V-Cu-Ni или V-Al. Недостатком первого способа является высокая себестоимость, а второго - низкая точность формирования ширины ТПР.

Автором в Арзамасском НПП «Темп-Авиа» в 1989 г. был разработан третий способ изготовления ТПР, который успешно эксплуатируется до настоящего времени. Его отличие от первого способа состоит в том, что при 2-ой фотолиитографии все резистивные элементы, проводники и контактные площадки защищаются фоторезистом (рис.1,в). Незащищенными фоторезистом остаются только контактные площадки перекрытия (КПП)