

Д. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, Арзамасский политехнический институт
E-mail: spv149@mail.ru

Дата поступления в редакцию
14.04 2009 г.

Оппонент к. т. н. А. Н. ЛУГИН
(НИИ ЭМП, г. Пенза)

МЕТОД РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА

Получены физико-математические модели сопротивления электродов тонкопленочного резистора прямоугольной и гребенчатой формы. Дана оценка влияния сопротивления электродов на производственную и температурную погрешности сопротивления резистора.

Уменьшение размеров тонкопленочных резисторов (ТПР), изготавливаемых методом двойной фотолитографии (менее 0,2 мм), сопровождается уменьшением выхода годных плат тонкопленочных микросборок вследствие того, что сопротивления резисторов не попадают в заданные поля допусков. Анализ причин этого явления показывает, что на выход годных изделий влияют не только технологические, но и конструктивные факторы. Конструкция ТПР (рис. 1) в самом простом случае содержит: резистивный элемент, два электрода, два контакта между проводящей и резистивной пленкой, четыре контактные площадки перекрытия (КПП) резистивного и проводящего слоев.

Современные методы расчета сопротивления ТПР, в основном, учитывают только сопротивление резистивного элемента. Однако все остальные элементы конструкции вследствие собственного сопротивления вносят определенный вклад в общее сопротивление ТПР.

Под контактом между проводящей и резистивной пленкой понимают участок ТПР, в котором ток переходит из резистивного слоя в проводящий или наоборот. Длина этих участков очень мала, в связи с чем этот элемент конструкции ТПР обозначен на рис. 1 линией 3. Необходимость выделения контакта как элемента конструкции ТПР вызвана тем, что ток, проходящий через контакт, имеет нелинейную траекторию. Кроме того, плотность тока в контакте неравномерна. Эти явления требуют разработки специальной математической модели сопротивления контакта [1]. Контакты соединены последовательно с резистивным элементом, поэтому они увеличивают сопротивление ТПР.

Последовательно с контактом соединен электрод, далее электрод соединяется с КПП и с проводником. В частном случае роль электрода и КПП может выполнять контактная площадка (КП) для подключения выводов компонентов. Электроды выполнены из проводящей пленки, имеющей конечное сопротивление. Если коэффициент формы ТПР (отношение длины

резистора к его ширине) $K_{\phi} > 0,1$, сопротивлением электродов, как правило, пренебрегают. При малых значениях коэффициента формы ТПР сопротивление электродов становится сопоставимо с сопротивлением резистивного элемента и может значительно увеличивать номинальное сопротивление ТПР и ухудшать его стабильность вследствие большого температурного коэффициента сопротивления проводящей пленки.

КПП предназначены для исключения погрешности сопротивления ТПР, вызванной несовмещением фотошаблона при второй фотолитографии с рисунком подложки. Однако введение этих конструктивных элементов уменьшает плотность межсоединений.

Сопротивление электродов ТПР, как показано в [2], может существенно влиять на погрешность его изготовления. Особенно это влияние проявляется при конструировании ТПР, имеющего небольшой коэффициент формы. Поэтому при проектировании ТПР, который изготавливается методом двойной фотолитографии, обычно выдвигают требование к его коэффициенту формы $K_{\phi} \geq 0,1$ [3]. Это существенно сужа-

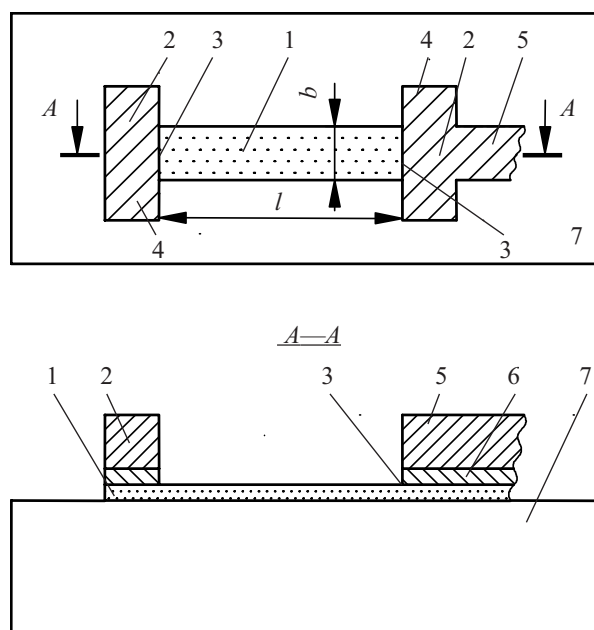


Рис. 1. Элементы конструкции ТПР:

1 — резистивный элемент; 2 — электрод; 3 — контакт между проводящей и резистивной пленкой; 4 — КПП; 5 — проводник; 6 — адгезионный слой; 7 — подложка

ет диапазон сопротивлений ТПР, изготавливаемых на одной подложке. Обычно диапазон сопротивлений ТПР расширяют путем напыления двух резистивных материалов на разных установках либо на разные подложки, либо на одну подложку с последующей тройной фотолитографией [4]. Однако эти конструктивно-технологические решения приводят к существенному увеличению массогабаритных характеристик и себестоимости микросборок.

Требование $K_\phi \geq 0,1$ в работе [3] не обосновывается и, очевидно, получено из практического опыта проектирования ТПР. Однако физическая природа данного ограничения до настоящего времени не нашла достаточного освещения в литературе. Прямоугольные ТПР с $K_\phi < 0,1$ имеют электроды значительных размеров. Поэтому можно предположить, что на воспроизводимость сопротивления этих ТПР сопротивление проводящей пленки электродов может оказывать существенное влияние вследствие ее конечной проводимости. Как показано в [2], при снижении K_ϕ до значений $K_\phi < 0,1$ у ТПР прямоугольной формы растет ширина электродов (которая совпадает с шириной резистивного элемента), что увеличивает их сопротивление, а это, в свою очередь, приводит к заметному увеличению общего сопротивления ТПР.

Целью настоящей работы является разработка метода расчета сопротивления электродов тонкопленочного резистора прямоугольной и гребенчатой формы и оценка влияния этого сопротивления на производственную и температурную погрешности сопротивления резистора.

Произведем оценку сопротивления электродов резистора прямоугольной формы с $K_\phi < 0,1$. Следует отметить, что оно в значительной степени будет зависеть от того, в какой области электродов будет подключена КП для измерения сопротивления ТПР. Рассмотрим конструкцию прямоугольного ТПР, в которой КП соединяются с концами электродов (рис. 2, а). Особенностью такой конструкции является большая длина электродов, которая равна ширине резистивного элемента. Ширина электродов определяется соотношением: $l_3 = kl$, где l — длина резистора; k — коэффициент. Данной конструкции ТПР соответствует эквивалентная электрическая схема, приведенная на

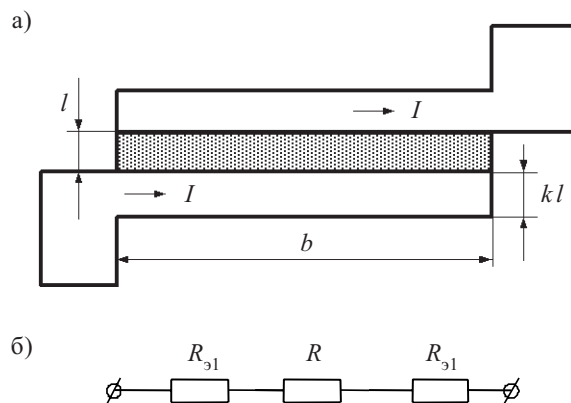


Рис. 2. ТПР с КП, подключенными к концам электродов: а — конструкция; б — эквивалентная электрическая схема

рис. 2, б, где R — сопротивление резистивного элемента (РЭ).

Ток I , проходящий через резистор (рис. 2, а), распространяется по всему сечению электрода. Тогда сопротивление одного электрода R_{31} можно найти в соответствии с выражением

$$R_{31} = \frac{\rho_n b}{kl} = \frac{\rho_n}{kK_\phi},$$

где ρ_n — удельное поверхностное сопротивление проводящей пленки;

b — ширина резистора;

K_ϕ — коэффициент формы ТПР.

Как следует из рис. 2, общее сопротивление электродов R_3 будет равно удвоенному сопротивлению R_{31}

$$R_3 = 2R_{31} = \frac{2\rho_n}{kK_\phi}. \quad (1)$$

При малых значениях K_ϕ сопротивление R_3 будет достигать значительной величины, в результате чего общее сопротивление ТПР возрастет, а его стабильность ухудшится из-за высокой чувствительности сопротивления проводящей пленки к воздействию температуры.

Рассмотрим случай произвольного размещения КП относительно электродов (рис. 3, а).

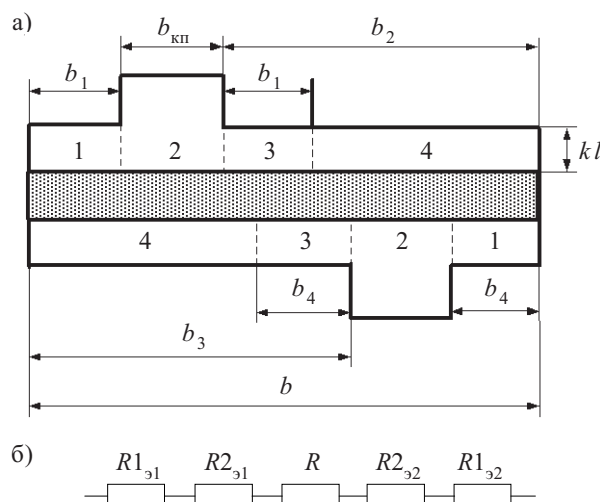


Рис. 3. ТПР с КП, произвольно размещенными относительно электродов:

а — конструкция; б — эквивалентная схема

В электродах ТПР выделим области 1—4. В области 2 ток через резистивный элемент проходит перпендикулярно электроду. Сопротивлением этой области пренебрегаем, ввиду малого числа квадратов проводящей пленки. Сопротивления областей 1 и 3 можно рассматривать как параллельное соединение цепей относительно РЭ, т. к. ток, проходящий через область 2, разветвляется в области 1 и 3. Для верхнего электрода общее сопротивление областей 1 и 3 обозначим R_{131} , а сопротивление области 4 обозначим R_{231} . Сопротивления R_{131} и R_{231} включены последовательно, т. к. через области 3 и 4 протекает один и тот же ток. Аналогично обозначив участки нижнего

электрода, получаем эквивалентную электрическую схему ТПР (рис. 3, б). Вычислим общее сопротивление $R_{\Sigma 1}$ верхнего электрода:

$$R_{\Sigma 1} = R_{1 \Sigma 1} + R_{2 \Sigma 1} = \frac{\rho_n b_1}{2kl} + \frac{2\rho_n (b_2 - b_1)}{2kl} = \frac{\rho_n (2b_2 - b_1)}{2kl}.$$

Тогда сопротивление обоих электродов будет иметь вид

$$R_{\Sigma} = \frac{\rho_n (2b_2 - b_1 + 2b_3 - b_4)}{2kl}.$$

Рассмотрим два характерных случая:

- 1) КП расположены на краях электродов (рис. 2, а);
- 2) КП расположены по центру электродов.

Для первого случая $b_1 = b_4 = 0$; $b_2 = b_3 = b$. В результате получим

$$R_{\Sigma} = \frac{2\rho_n b}{kl} = \frac{2\rho_n}{kK_{\Phi}},$$

т. е. получили выражение, аналогичное (1).

Для второго случая $b_1 = b_4 = b_2 = b_3$. При этом сопротивление электродов имеет вид

$$R_{\Sigma} = \frac{\rho_n b_1}{kl} = \frac{\rho_n (b - b_{\text{кп}})}{2kl} = \frac{\rho_n}{2k} \left(\frac{1}{K_{\Phi}} - \frac{b_{\text{кп}}}{l} \right). \quad (2)$$

Как следует из выражений (1), (2), из-за выбора места расположения КП сопротивление электродов прямоугольного ТПР может изменяться более чем в 4 раза. Располагая КП в прямоугольном резисторе по центру электродов, можно существенно уменьшать их сопротивление.

Для уменьшения сопротивления электродов ТПР была предложена конструкция гребенчатого резистора (ГР) [5, 6]. Однако математическая модель расчета сопротивления электродов ГР, предложенная в [2], является упрощенной и не позволяет сделать достоверную оценку. Причем погрешность расчета возрастает при уменьшении количества резистивных элементов (числа n).

На рис. 4 показаны два варианта конструкции гребенчатого резистора, у которого КП расположены либо на минимальном расстоянии от каждого элект-

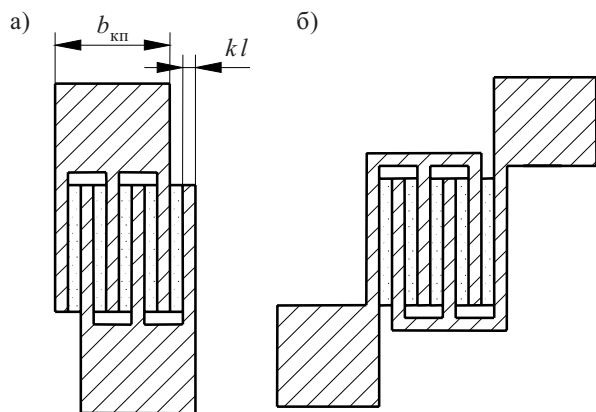


Рис. 4. Оптимальная (а) и неоптимальная (б) конструкция гребенчатого резистора

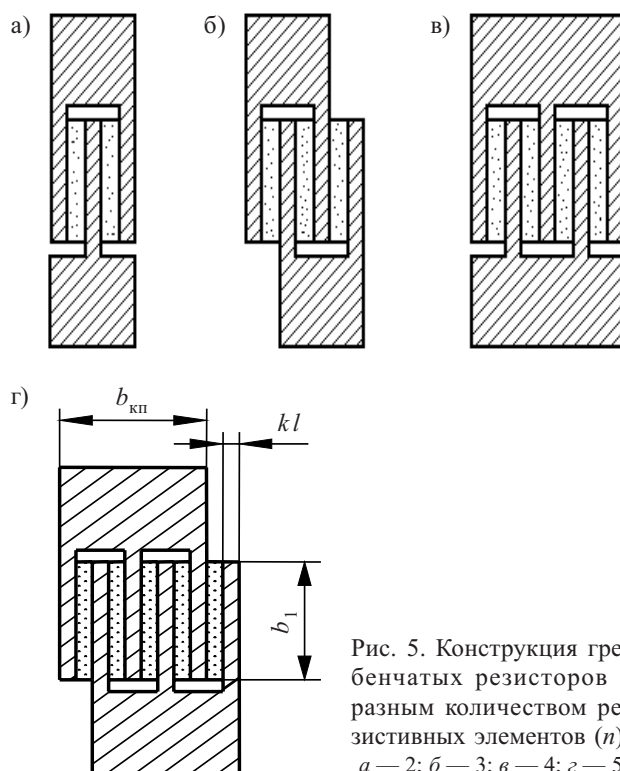


Рис. 5. Конструкция гребенчатых резисторов с разным количеством резистивных элементов (n): а — 2; б — 3; в — 4; г — 5

рода (а), либо расположены по краям электродов (б). Сопротивление электродов гребенчатого резистора также достаточно сильно зависит от места положения КП.

Нетрудно заметить, что конструкция ТПР на рис. 4, а является более компактной, чем на рис. 4, б, т. к. она ближе к прямоугольной форме, что позволит повысить плотность упаковки при компоновке платы. Кроме того, ТПР конструкции б обладает большим сопротивлением электродов, т. к. к сопротивлению электродов одного резистивного элемента $2R_{\Sigma 1}$ добавляются сопротивления проводников, соединяющих резистивные элементы с КП. Поэтому форма гребенчатого резистора, показанного на рис. 4, а, является оптимальной.

Варианты конструкции ГР с разным количеством РЭ показаны на рис. 5, а соответствующие эквивалентные электрические схемы этих резисторов — на рис. 6. Во всех этих конструкциях и схемах сопротивление ГР за счет РЭ равно R . Как видно из рис. 6, конструкция ГР представляет собой параллельное включение РЭ. В общем случае ГР состоит из n РЭ и $n+1$ прямоугольных электродов.

При построении модели расчета сопротивления ГР будем руководствоваться следующими допущениями.

1. Сопротивления прямоугольных электродов равны между собой, т. е. для схем на рис. 6

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_{\Sigma 1}.$$

2. Сопротивления всех РЭ также равны между собой и равны nR , где n — количество РЭ в ГР, а R — сопротивление ГР.

3. Сопротивление РЭ намного больше сопротивления его прямоугольного электрода: $nR \gg R_{\Sigma 1}$. В свя-

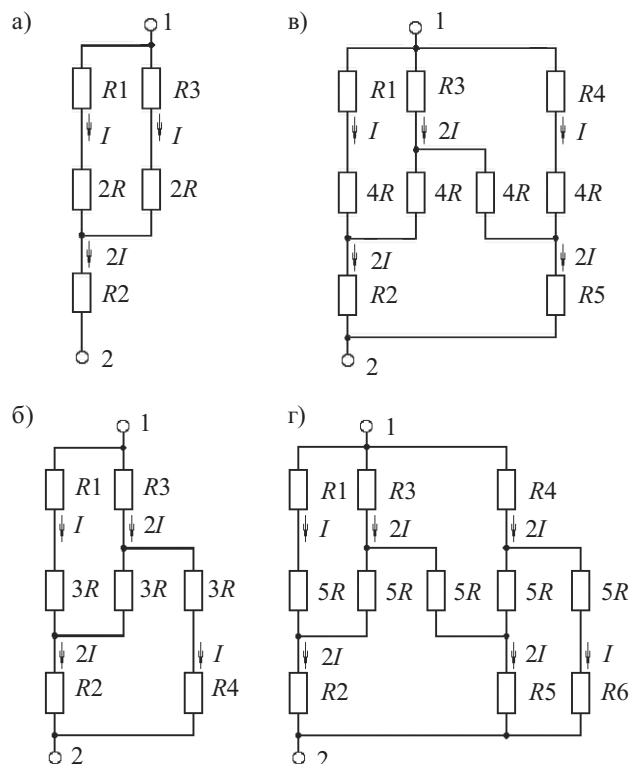


Рис. 6. Электрические схемы гребенчатых резисторов с разным количеством РЭ (n): а — 2; б — 3; в — 4; г — 5; $R1$ — $R6$ — сопротивления прямоугольных электродов

зи с этим ток I через любой РЭ будет определяться выражением: $I = U_{12}/(nR)$, где U_{12} — напряжение между узлами 1 и 2. При этом через каждый из узлов 1 и 2 будет протекать суммарный ток nI .

Непосредственный расчет сопротивления электродов ГР из схем, представленных на рис. 6, затруднителен. Поэтому выполним преобразования этих схем (рис. 7). Для этого исключим из схем ГР сопротивления РЭ, а сопротивления их прямоугольных электродов соединим таким образом, чтобы ток через них оставался таким же, каким он был на схемах рис. 6. В этом случае не нарушается первый закон Кирхгофа, и через каждый из узлов 1 и 2 будет протекать тот же ток nI . При этом падение напряжения на каждом резисторе $R1$ — $R6$ и их подключение к узлам 1 и 2 останется неизменным.

В частном случае, формулы для расчета сопротивлений электродов ГР, изображенных на рис. 5, согласно схемам на рис. 7, приведены в табл. 1.

Для нечетного количества n цепь, составленная из прямоугольных электродов (рис. 7, б, г), представляет собой параллельное соединение резисторов сопротивлением $2R_{31}$. Для произвольного нечетного n

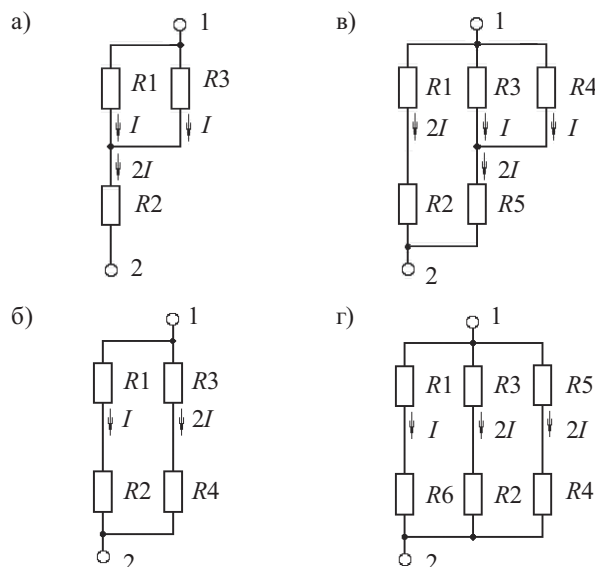


Рис. 7. Эквивалентные электрические схемы электродов гребенчатых резисторов с разными значениями n : а — 2; б — 3; в — 4; г — 5; $R1$ — $R6$ — сопротивления прямоугольных электродов

формула для расчета сопротивления электродов ГР будет иметь вид

$$R_{гр} = \frac{4R_{31}}{n+1}. \quad (3)$$

При четном произвольном n цепь, составленная из сопротивлений прямоугольных электродов, состоит из цепи на рис. 7, а, к которой параллельно будет подключаться цепь сопротивлением $2R_{31}$ при каждом увеличении n на 2. Проводимость цепи 1—2 равна $2/(3R_{31})$. Чтобы последнее условие выполнялось при произвольном четном n (в том числе и при $n=2$), надо потребовать от другой параллельной цепи, состоящей, например, из резисторов $R2, R3$ (рис. 7, в), выполнения соотношения для ее проводимости $(n-2)/(4R_{31})$. Тогда проводимость $Y_{гр}$ цепи 1—2 будет определяться выражением

$$Y_{гр} = \frac{2}{3R_{31}} + \frac{n-2}{4R_{31}} = \frac{3n+2}{12R_{31}},$$

откуда сопротивление ГР будет равно

$$R_{гр} = \frac{12R_{31}}{3n+2}. \quad (4)$$

Справедливость полученных выражений (3), (4) для расчета сопротивления электродов ГР докажем методом математической индукции.

1. Для $n=1$ сопротивление электродов ГР рассчитываем по формуле (3): $R_{гр} = 2R_{31}$.

Из рис. 5 видно, что в общем случае ГР содержит n РЭ и $n+1$ прямоугольных электродов, где $n=1, 2, 3, \dots$ — натуральные числа. При $n=1$ ГР вырождается в обычный прямоугольный резистор. Полученное соотношение соответствует формуле (2).

2. Для $n=2$ сопротивление электродов ГР рассчитываем по формуле (4): $R_{гр} = 3R_{31}/2$.

Таблица 1

Формулы для расчета сопротивлений электродов ГР

n	2	3	4	5
Формула	$3R_{31}/2$	R_{31}	$6R_{31}/7$	$2R_{31}/3$

3. Для $n=3$ сопротивление электродов ГР рассчитываем по формуле (3): $R_{эг}=R_{э1}$.

4. Для $n=4$ сопротивление электродов ГР рассчитываем по формуле (4): $R_{эг}=6R_{э1}/7$.

5. Рассчитанные по формулам (3), (4) соотношения в п. п. 2—4 соответствуют табл. 1. Следовательно, можно утверждать, что полученные формулы (3), (4) справедливы для любого натурального n .

Сопротивление прямоугольного электрода для ГР находится в соответствии с выражением

$$R_{э1} = \frac{\rho_n \left(\frac{b}{n} + 1 \right)}{kl} = \frac{\rho_n \left(\frac{1}{nK_\phi} + 1 \right)}{k},$$

где b — суммарная ширина всех РЭ;
 l — длина РЭ.

Тогда сопротивление электродов ГР можно найти по следующим выражениям:

$$\text{при нечетном } n \quad R_{эг} = 4\rho_n \frac{\frac{1}{nK_\phi} + 1}{k(n+1)}, \quad (5)$$

$$\text{при четном } n \quad R_{эг} = 12\rho_n \frac{\frac{1}{nK_\phi} + 1}{k(3n+2)}. \quad (6)$$

В общем случае на производственную погрешность сопротивления электродов ГР влияют погрешности параметров ρ_n , ρ , l , b , а также погрешность от несовмещения фотошаблона (ФШ) при второй фотолитографии. Для того, чтобы минимизировать погрешности формирования ширины ТПР и несовмещения ФШ, необходимо, чтобы коэффициент формы $K_{\phi1}$ одного резистивного элемента был не более 0,2. При $K_{\phi1} \leq 0,05$ растет сопротивление электродов (табл. 2, 3). Поэтому оптимальная величина коэффи-

циента формы одного резистивного элемента находится в пределах: $0,05 \leq K_{\phi1} \leq 0,2$.

При увеличении n начинает расти ширина $b_{кп}$ КП (рис. 5), что приводит к увеличению площади, занимаемой ТПР. Для получения прямоугольной формы гребенчатого резистора при $k=1$ ширина $b_{кп}$ должна удовлетворять условию

$$b_{кп} = (2n+1)l. \quad (7)$$

Задаваясь допустимыми значениями $b_{кп}$ и длиной l в выражении (7), можно определить интервал n . Например, для силалловых подложек при $l=50$ мкм и $b_{кп} = 350 \dots 450$ мкм получим $n=3, 4, 5$.

Сопротивление электродов нужно рассматривать как методическую погрешность, которая увеличивает сопротивление ТПР, т. е. является систематической. Влияние этой погрешности на сопротивление ТПР можно рассчитать согласно выражению

$$\delta R_{эс} = R_э / R. \quad (8)$$

Производственная погрешность $\delta R_э$ ТПР, вносимая сопротивлением электродов, имеет случайный характер и будет определяться случайными производственными погрешностями удельного поверхностного сопротивления проводящей пленки и ширины электрода. Влияние этой погрешности на сопротивление ТПР определяется выражением

$$\delta R_э = \frac{R_э \sqrt{\delta \rho_n^2 + \delta l^2}}{R}, \quad (9)$$

где $\delta \rho_n$ — случайная погрешность удельного поверхностного сопротивления проводящей пленки;
 δl — случайная погрешность ширины электрода, равная случайной погрешности длины ТПР.

На практике толщина проводящей пленки имеет большие разбросы (типичные значения толщины составляют 1—1,5 мкм), значительно большие, чем изменения ширины электродов ТПР. Поэтому положим $\delta \rho_n \geq 3\delta l$, тогда выражение (9) преобразуется к виду

$$\delta R_э = \frac{\delta \rho_n R_э}{R} = \delta \rho_n \delta R_{эс}. \quad (10)$$

Температурная погрешность $\delta R_{эг}$ ТПР, вносимая сопротивлением электродов, находится согласно выражению

$$\delta R_{эг} = \frac{\alpha_n \Delta T R_э}{R(1 + \alpha_p \Delta T)} = \frac{\alpha_n \Delta T \delta R_{эс}}{1 + \alpha_p \Delta T}, \quad (11)$$

где α_n , α_p — температурные коэффициенты сопротивления (ТКС) проводящей и резистивной пленок;
 ΔT — диапазон изменения температуры.

Таблица 2
Погрешности, вносимые электродами
прямоугольного ТПР

С КП, расположенными на краю электродов	K_ϕ	0,1	0,07	0,05	0,035	0,02	0,01
	$R_э$, Ом	0,7	1	1,4	2	3,5	7
	$\delta R_{эс}$, %	0,7	1,4	2,8	5,7	17,5	70
С КП, расположенными по центру электродов	K_ϕ	0,1	0,07	0,05	0,035	0,02	0,01
	$R_э$, Ом	0,05	0,13	0,23	0,38	0,75	1,6
	$\delta R_{эс}$, %	0,05	0,19	0,46	1,1	3,8	16

Погрешности, вносимые электродами гребенчатого резистора

n	2			3			4			5		
$K_{\phi1}$	0,2	0,1	0,05	0,21	0,09	0,06	0,2	0,1	0,06	0,2	0,1	0,05
K_ϕ	0,1	0,05	0,025	0,07	0,03	0,02	0,05	0,025	0,015	0,04	0,02	0,01
$R_э$, Ом	0,315	0,578	1,103	0,202	0,424	0,618	0,180	0,330	0,530	0,140	0,257	0,490
$\delta R_{эс}$, %	0,315	1,155	4,41	0,288	1,41	3,092	0,36	1,32	3,533	0,35	1,283	4,9

Учитывая, что ТКС резистивной пленки на 1—2 порядка меньше, чем ТКС проводящей пленки, величиной $\alpha_p \Delta T$ в выражении (11) можно пренебречь. Тогда выражение для температурной погрешности принимает вид

$$\delta R_{\text{эп}} = \alpha_p \Delta T \delta R_{\text{эс}}. \quad (12)$$

Для пленок со структурой РС3710-V-Al ($\rho=1$ кОм/□; $\rho_p=0,035$ Ом/□) был произведен расчет параметров $R_{\text{эп}}$, $\delta R_{\text{эс}}$ по выражениям (1—4) при $b_{\text{кп}}/l=7$; $k=1$. Результаты расчета этих параметров для прямоугольного ТПР в двух вариантах исполнения (рис. 2, 3) приведены в табл. 2, для гребенчатого резистора (рис. 5) — в табл. 3.

Для пленок той же структуры при $\delta \rho_p=0,25$; $\alpha_p=0,0046$ 1/°C; $\Delta T=80^\circ\text{C}$, согласно выражениям (10), (12), случайная производственная погрешность из-за сопротивления электродов составила $\delta R_{\text{эп}}=0,25\delta R_{\text{эс}}$, а температурная погрешность $\delta R_{\text{эп}}=0,37\delta R_{\text{эс}}$.

Для уменьшения сопротивления электродов надо увеличить их ширину, то есть k . Однако при увеличении k почти пропорционально увеличивается площадь ТПР. Как показывают расчеты (табл. 2, 3), при $k=1$ сопротивление электродов мало влияет на погрешность сопротивления ТПР. Таким образом, если учесть, что систематическую погрешность $\delta R_{\text{эс}}$ можно скомпенсировать при проектировании ТПР и если не требуется высокая температурная стабильность сопротивления резистора, то принимают $k=1$.

Выводы

Сопротивления электродов и проводников, включенных последовательно с ТПР, следует рассматривать как систематическую погрешность, которая увеличивает сопротивление ТПР. Разработан метод расчета сопротивления электродов прямоугольного и

гребенчатого ТПР. Дана оценка влияния электродов на систематическую, производственную и температурную погрешности сопротивления ТПР. На примере пленок со структурой РС3710-V-Al произведен расчет этих параметров. Определены оптимальные величины коэффициента формы ($0,05 < K_{\text{ф1}} \leq 0,2$) одного резистивного элемента и количество резистивных элементов, которые должны использоваться при проектировании гребенчатого резистора. Гребенчатая конструкция резистора имеет ряд преимуществ перед прямоугольной конструкцией резистора, таких как меньшая занимаемая площадь и меньшее влияние сопротивления электродов на все виды погрешностей ТПР. Благодаря этим преимуществам, применение гребенчатого резистора на порядок расширяет диапазон сопротивлений ТПР, проектируемых на одной плате, повышает точность их изготовления и стабильность в эксплуатации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Спирин В. Г. Сопротивление контактов тонкопленочного резистора // Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре. — 2008. — № 5. — С. 20—23.
2. Спирин В. Г. Оценка влияния сопротивления электродов на погрешность тонкопленочного резистора // Вестник МВВО. Серия: Высокие технологии в радиоэлектронике, информатике и связи. Н. Новгород. — 2003. — Вып. 1(9). — С. 11—14.
3. Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И. Микроэлектроника. — М.: Высш. шк., 1987.
4. Бондаренко О. Е., Федотов Л. М. Конструктивно-технологические основы проектирования микросборок. — М.: Радио и связь, 1988.
5. Пат. 2231150 РФ. Тонкопленочный резистор и способ его изготовления / В. Г. Спирин. — 20.06 2004.
6. Пат. 2244969 РФ. Тонкопленочный резистор / В. Г. Спирин., В. И. Чипурин. — 20.01 2005.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Рихтер С. Г. Кодирование и передача речи в цифровых системах подвижной радиосвязи. — М.: Горячая линия — Телеком, 2009. — 304 с.

Систематизированы сведения в области преобразования и обработки информации в системах связи с подвижными объектами, причем основное внимание сосредоточено на речевых сигналах. Изучаются процедуры преобразования и обработки информации, осуществляемые, в основном, в абонентском терминале — ключевом элементе любой системы связи с подвижными объектами. Последовательно рассматриваются вопросы формирования и преобразования речевого сигнала на пути от микрофона на передающей стороне до телефона (громкоговорителя) на приемной. Особое внимание уделено вопросам кодирования речи.

Предназначена для подготовки дипломированных специалистов соответствующих специальностей.

