

Д. т. н. В. Г. СПИРИН

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

Дата поступления в редакцию
14.04 2009 г.

Оппонент д. т. н. Ю. В. ПАНФИЛОВ
(МГУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА

Исследована погрешность сопротивления тонкопленочного резистора, вызванная исключением контактных площадок перекрытия резистивного и проводящего слоев.

Как известно, при формировании тонкопленочных резисторов (ТПР) в их конструкции предусматривают четыре контактные площадки перекрытия (КПП) резистивного и проводящих элементов [1], которые исключают влияние несовмещения фотошаблонов (ФШ) на погрешность сопротивления резистора. Как видно из рис. 1, наличие КПП увеличивает промежуток между тонкопленочными элементами, что приводит к снижению плотности монтажа. Оценим насколько увеличивается при этом зазор между элементами.

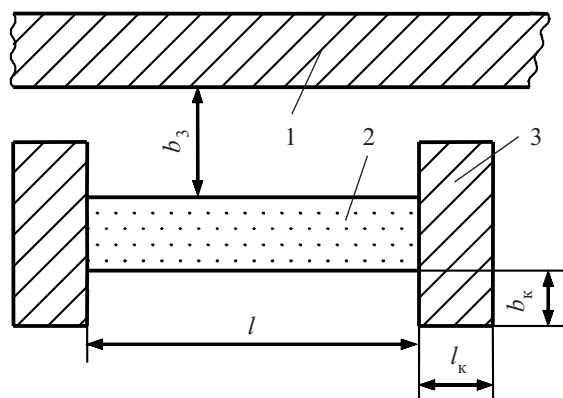


Рис. 1. Влияние КПП на плотность монтажа:
1 — проводник; 2 — резистивный элемент; 3 — КПП

Определим минимальные размеры КПП и зазор между проводником и резистивным элементом, которые обеспечиваются комплектом ФШ. Эти размеры будут зависеть от следующих производственных погрешностей: несовмещения комплекта ФШ ($\Delta B_{\text{фш}}$), несовмещения проводящего слоя платы и второго ФШ, формирующего резистивный слой ($\Delta B_{\text{фл}}$), изменения размеров ТПР, обусловленных первой фотолитографией и травлением [2, 3], т. е. погрешностями длины ТПР.

Длину КПП можно рассчитать по формуле [2, 3]

$$l_k = K_l (\Delta B_{\text{фл}} + \Delta l_c + \Delta l),$$

где Δl_c , Δl — абсолютные систематическая и случайная погрешности длины l ТПР;

K_l — коэффициент запаса формирования длины КПП. (Так как длина КПП незначительно влияет на плотность межсоединений, $K_l = 2 \dots 5$.)

Процессы фотолитографии и травления проводящей пленки являются изотропными, поэтому размеры КПП на плате после выполнения этих процессов отклоняются от базовых линий на ФШ на одну и ту же величину $(\Delta l_c \pm \Delta l)/2$ [2].

Резистивный элемент не должен выходить за пределы контактных площадок, поэтому минимальная ширина КПП должна быть такой, чтобы величина b_k (см. рис. 1) была не меньше

$$b_{k \min} = \Delta B_{\text{фш}} + \Delta B_{\text{фл}} + (\Delta l_c + \Delta l)/2. \quad (1)$$

Минимальный зазор между проводниками $b_{3 \min}$ обычно равен минимальной ширине проводника $b_{\text{п} \min}$, но при наличии контактных площадок он будет дополнительно увеличен на величину b_k , т. е.

$$b_{3 \min} = b_{\text{п} \min} + b_{k \min}. \quad (2)$$

Погрешности, входящие в формулу (1), в случае применения фотошаблонов класса С составляют [3—5]: $\Delta l_c = 6,2$ мкм; $\Delta l = 10,8$ мкм; $\Delta B_{\text{фш}} = 3,5$ мкм; $\Delta B_{\text{фл}} = 1,5$ мкм, откуда $b_{k \min} = 13,5$ мкм. Тогда при $b_{\text{п} \min} = 10$ мкм получим $b_{3 \min} = 23,5$ мкм.

Из рассмотренного примера видно, что наличие КПП увеличивает минимальный зазор между проводником и резистором в 2,35 раза. Расчеты показывают, что даже в случае применения прецизионных фотошаблонов и фотолитографии плотность монтажа существенно уменьшается из-за КПП. Поэтому для проектирования тонкопленочной платы представляет интерес рассмотрение погрешности сопротивления резистора без КПП. Конструкция такого резистора, полученного при смещении ФШ резистивного слоя относительно проводящего слоя платы, показана на рис. 2, а.

Резистор $R_{\text{см}}$ представим в виде двух параллельно соединенных резисторов $R1$ и $R2$ (см. рис. 2, б, в), и тогда можно записать

$$R_{\text{см}} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}. \quad (3)$$

Величина сопротивлений $R1$ и $R2$ определяется как $R1 = \rho(l/\Delta B + 2m)$; $R2 = \rho(l/\Delta B + 2m)$; $R1 = R2$

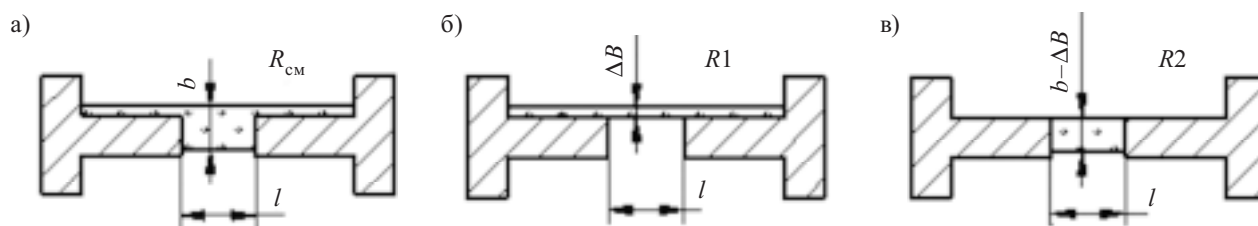


Рис. 2. Конструкция резистора без КПП (а) и формирование погрешности его сопротивления (б, в)

$$R_2 = \rho l / (b - \Delta B), \quad (5)$$

где ΔB — величина смещения резистивного слоя относительно проводящего слоя, $\Delta B = \Delta B_{\text{фш}} + \Delta B_{\text{фл}}$;

m — число квадратов углового участка резистивного элемента резистора R_1 (на данном участке происходит искривление протекания тока).

Определим сопротивление $R_{\text{см}}$. Подставим формулы (4) и (5) в (3) и, упростив полученное выражение, запишем

$$R_{\text{см}} = \rho \frac{l(l + 2m\Delta B)}{lb + 2m\Delta B(b - \Delta B)}. \quad (6)$$

В этом выражении множителем ρ является коэффициент формы $K_{\text{фсм}}$ резистора $R_{\text{см}}$, т. е.

$$R_{\text{см}} = \rho K_{\text{фсм}}.$$

Обозначив $\delta B = \Delta B / b$ и проведя некоторые преобразования, получим

$$K_{\text{фсм}} = \frac{K_{\text{ф}}}{1 - 2m \cdot \delta B^2 / (K_{\text{ф}} + 2m\delta B)}, \quad (7)$$

где $K_{\text{ф}} = l/b$ — коэффициент формы резистора $R_{\text{см}}$ при $\delta B = 0$, т. е. в отсутствие смещения.

Используя выражение (4), найдем абсолютную ($\Delta K_{\text{ф}}$) и относительную ($\delta K_{\text{ф}}$) погрешности коэффициента формы резистора $R_{\text{см}}$:

$$\Delta K_{\text{ф}} = K_{\text{фсм}} - K_{\text{ф}} = \frac{K_{\text{ф}}}{1 - \frac{2m \cdot \delta B^2}{K_{\text{ф}} + 2m\delta B}} - K_{\text{ф}}; \quad (8)$$

$$\delta K_{\text{ф}} = \frac{\Delta K_{\text{ф}}}{K_{\text{ф}}} = \frac{1}{1 - \frac{2m \cdot \delta B^2}{K_{\text{ф}} + 2m\delta B}} - 1. \quad (9)$$

Рассчитаем систематическую погрешность сопротивления $R_{\text{с}}$, которая возникает из-за исключения КПП:

$$R_{\text{с}} = R_{\text{см}} - R = \rho \cdot \Delta K_{\text{ф}},$$

где R — сопротивление резистора $R_{\text{см}}$ при $\delta B = 0$.

Эта погрешность увеличивает сопротивление ТПР. Как видно из выражений (8) и (9) погрешность коэффициента формы будет определяться величиной смещения δB и коэффициентом формы резистора без смещения $K_{\text{ф}}$. Задаваясь этими величинами, можно определить погрешность резистора за счет смещения фотошаблона.

Из рассмотрения конструкции ТПР на рис. 2 можно предположить, что значение m является функцией длины электродов смещенного резистивного элемента

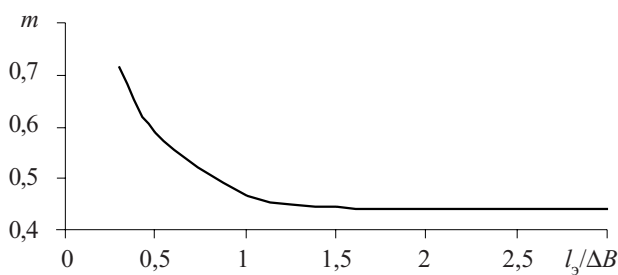
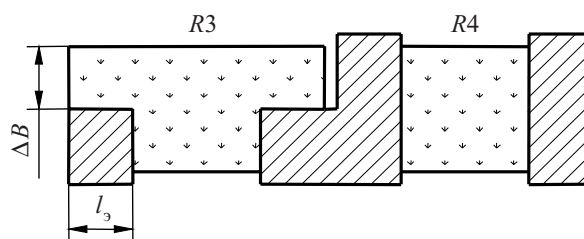


Рис. 3. Зависимость числа квадратов углового участка от приведенной длины электрода

l_3 и величины ΔB . В работе [6] был проведен теоретический анализ зависимости $m = f(l_3 / \Delta B)$, который показал, что при уменьшении отношения $l_3 / \Delta B$ ниже 1 значение m резко возрастает (рис. 3), а в области $(l_3 / \Delta B) \geq 1$ оно остается практически постоянным (для $l_3 = \Delta B$, $m = 0,461$, а для $l_3 = 3\Delta B$, $m = 0,436$).

Для подтверждения этих данных был проведен эксперимент с помощью специально разработанной тестовой схемы (рис. 4). Размеры резисторов R_3 , R_4 ($l = b = 3$ мм) и смещение ($\Delta B = 1,5$ мм) были выбраны достаточно большими с целью минимизации влияния производственных погрешностей сопротивления ТПР на результат измерения. Для приведенных значений $K_{\text{ф}}$ и ΔB тестовой схемы после несложных преобразований из формулы (9) можно найти

$$m = 2 \cdot \delta K_{\text{ф}} / (1 - \delta K_{\text{ф}}). \quad (10)$$


 Рис. 4. Тестовая схема для определения m

Для нахождения m в центральной части подложки были сформированы четыре тестовые схемы. В состав каждой входил один резистор R_4 и два резистора R_3 , у одного из которых длина электрода $l_3 = \Delta B$, а у другого $l_3 = 3\Delta B$. Было изготовлено шесть подложек, на которых измерялись сопротивления всех резисторов.

Величину m определяли следующим образом.

Вычисляли значения отношений сопротивлений резисторов на всех тестовых схемах

$$K_3 = R_3 / R_4,$$

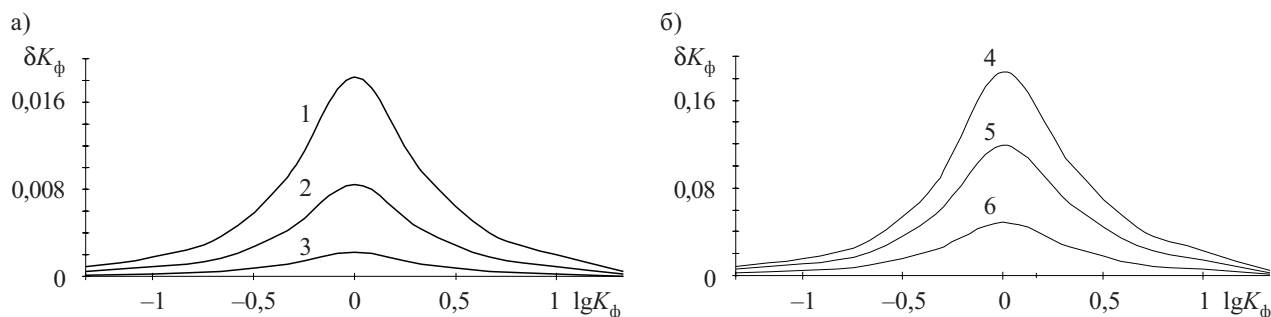


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности коэффициента формы ТПР от значения коэффициента формы при различных значениях относительного несовмещения фотошаблона δB :
1 — 0,15; 2 — 0,1; 3 — 0,05; 4 — 0,5; 5 — 0,4; 6 — 0,25

и среднее значение полученных коэффициентов

$$K_3 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k K_{3i},$$

где i — номер тестовой схемы, k — их количество.

Учитывая, что $\delta K_3 = K_3 - 1$ и используя формулу (10), определим

$$m = 2(K_3 - 1) / (2 - K_3).$$

В результате были получены следующие средние значения: $m_1 = 0,41$ для $l_3 = \Delta B$ и $m_2 = 0,40$ для $l_3 = 3\Delta B$. При этом разброс значений m составлял 0,348—0,448, что можно объяснить погрешностью микродефектов [7, с. 42], которая образуется, например, вследствие шероховатости подложки.

Также для некоторых значений δK_ϕ , которые близки к экспериментальным, значения m были рассчитаны по формуле (10). Результаты расчета приведены в таблице.

δK_ϕ	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
m	0,353	0,381	0,41	0,439	0,469

Их анализ показывает, что разброс $\delta K_\phi = 2\%$, характерный для эксперимента, приводит к разбросу $m = 0,353$ —0,469, что хорошо согласуется с полученными экспериментальными результатами. Погрешность расчетного значения m относительно среднего экспериментального не превышает 11%. Тем не менее, учитывая разброс m , для $l_3 \geq \Delta B$ при расчете зависимости $\delta K_\phi = f(K_\phi)$ будем использовать значение $m = 0,461$. Проектирование ТПР с $(l_3 / \Delta B) < 1$ не рекомендуется, т. к. при этом величина погрешности δK_ϕ резко возрастет.

Анализ представленных на рис. 5 зависимостей показал, что систематическая погрешность, увели-

чивающая общее сопротивление ТПР, достигает своего максимального значения при $K_\phi = 1$. В большинстве случаев — при $K_\phi < 1$ и $K_\phi > 10$ — ТПР можно изготавливать без КПП, что существенно повысит плотность монтажа. Однако изготовление без КПП резисторов малых размеров и коэффициентом формы $0,1 < K_\phi < 10$ (кривая 4 на рис. 5, б), даже в случае прецизионного изготовления фотошаблонов и тонкопленочной платы, приводит к недопустимой погрешности сопротивления ТПР.

Полученные результаты исследований особенно значимы при проектировании ТПР с малыми топологическими размерами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бондаренко О. Е., Федотов Л. М. Конструктивно-технологические основы проектирования микросборок. — М.: Радио и связь, 1988.
2. Спирин В. Г. Математические модели сопротивления тонкопленочного резистора с размерами 50 мкм // Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре. — 2004. — № 2. — С. 14—16.
3. Спирин В. Г. Оценка производственных погрешностей тонкопленочных элементов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 4. — С. 50—53.
4. Готра З. Ю. Технология микросистемных устройств. — М.: Радио и связь, 1991.
5. ОСТ 4 ГО.073.210-84. Фотошаблоны прецизионные. Общие технические условия.
6. Потехин В. А., Спирин В. Г., Шурыгин Б. Д. Расчет функции числа квадратов углового участка тонкопленочного резистора // Межвуз. сб. статей «Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении». — Н. Новгород—Арзамас, 2003. — С. 366—369.
7. Фомин А. В., Боченков Ю. И., Сорокопуд В. А. Технология, надежность и автоматизация производства БГИС и микросборок. — М.: Радио и связь, 1981.