

К. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, г. Арзамас, НПП "Темп-Авиа"
E-mail: temp@arzamas.nnov.ru

Дата поступления в редакцию
08.01 2004 г.
Оппонент д. т. н. С. Ю. ЛУЗИН
(ОАО "Авангард" г. С.-Петербург)

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С учетом оценки погрешностей параметров тонкопленочного резистора получены формулы для расчета размеров проводников и контактных площадок.

Формирование размеров проводников и резистивных элементов в тонкопленочных микросборках (МСБ) методами фотолитографии и жидкостного травления неизбежно сопровождается как систематическими, так и случайными погрешностями [1]. Эти погрешности обусловлены как технологическими факторами, например, разрешающей способностью фоторезиста или примененным травителем, так и конструктивными факторами, например, применением того или иного металла (меди, золота или алюминия) в проводящем слое. Определение значений производственных погрешностей тонкопленочных элементов имеет очень важное практическое значение как для настройки оптимальных параметров технологического процесса [2], так и для повышения процента выхода годных МСБ путем компенсации систематических погрешностей [3]. Кроме того, знание производственных погрешностей необходимо для определения норм конструирования тонкопленочных элементов.

Как правило, производственные погрешности тонкопленочных резисторов (ТНР) определяются с помощью тестовых схем по специально разработанным алгоритмам. Недостатками известных тестовых схем и алгоритмов [2; 4, с. 109—114] являются:

- низкая достоверность результатов измерений из-за расположения тестовых элементов на периферийном технологическом поле и применения упрощенных математических моделей сопротивления ТНР;
- ошибочные алгоритмы расчета, основанные на предположении, что сопротивления ТНР являются случайными независимыми величинами. (На самом деле сопротивления резисторов являются случайными зависимыми величинами с коэффициентом корреляции близким к 1 — из-за идентичности удельного поверхностного сопротивления.)

Результаты исследований, приведенные в [1, 5, 6], позволяют предложить тестовую схему, состоящую из пяти резисторов (рис. 1). Параметры этой схемы приведены в табл. 1 (здесь R1—R5 — резисторы, R_п — проводники).

С помощью предлагаемой тестовой схемы можно с алгоритмической точностью не хуже 1% опреде-

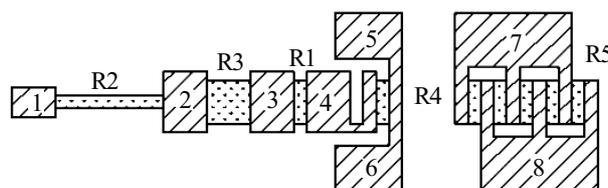


Рис. 1

Таблица 1

Параметры	R1	R2	R3	R4	R5	R _п
Коэффициент формы (l/b)	0,05	50	1	0,05	0,01	22
Длина резистора (l), мм	0,05	2,5	1	0,05	0,05	—
Ширина резистора (b), мм	1	0,05	1	1	1	—
Длина электрода (l_e), мм	1	0,45	1	0,05	0,05	—
Номера контактных площадок (КП)	3—4	1—2	2—3	4—5	7—8	5—6

лить следующие систематические и случайные погрешности параметров ТНР: удельного поверхностного сопротивления, длины, ширины, сопротивления электродов. Алгоритмической погрешности ниже 1% не требуется из-за присутствующей в реальном технологическом процессе погрешности микродефектов, величина которой составляет 1—3%.

Следует отметить, что данная тестовая схема может применяться только для ТНР, изготавливаемых первым или третьим способом фотолитографии [5]. Суть этих способов заключается в том, что при первой фотолитографии формируют длину резисторов, а при второй фотолитографии — их ширину. В пер-

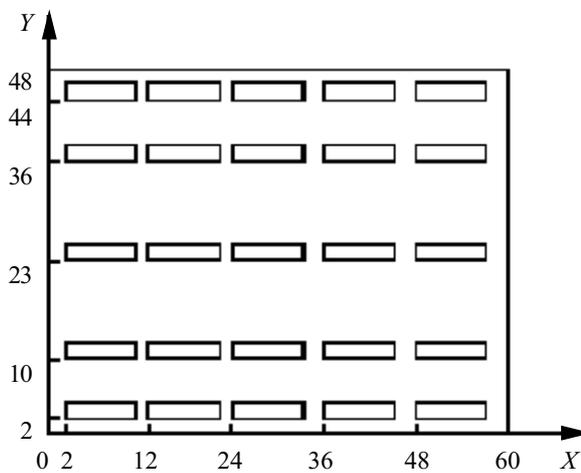


Рис. 2

вом способе используют проводящую структуру Cr—Au, а в третьем — проводящие структуры, не содержащие драгоценных металлов, например, V—Cu—Ni или V—Al.

Совокупность тестовых схем образует тест-плату (рис. 2). Левый нижний угол каждой тестовой схемы можно однозначно определить координатами x, y . Тогда расположение тестовых схем на подложке можно характеризовать матрицей размером $k \times m$, где k — количество исследуемых координат подложки по оси X , а m — количество исследуемых координат по оси Y . В проводимом эксперименте $k=m=5$.

Тест-платы должны быть изготовлены на подложках, напыленных в разных партиях, т. к. подтравы тонких пленок в значительной степени зависят от процесса напыления — его режимов, электронной гигиены, состава инертного газа и других факторов. Из каждой партии подложек изготавливают одну тест-плату и измеряют на ней сопротивление всех резисторов.

При формировании физической структуры тонкопленочной платы МСБ используется групповая технология, что приводит к сильной корреляции параметров сопротивления ТПП, получаемых в одной технологической операции.

Пусть в ходе какой-то технологической операции происходит формирование одного из параметров сопротивления ТПП, например, длины L , причем операция проводится с целью получения требуемого значения формируемого параметра l_n . В пределах одной партии одновременно обрабатываемых подложек параметр L — случайная величина со средним значением $l + \Delta l_{cy}$ и выборочным стандартным отклонением s_e . Для отлаженного технологического процесса в большинстве случаев распределение любого параметра платы МСБ можно считать нормальным [2].

Учитывая особенности параметров тестовой схемы, сопротивление каждого ТПП после его изготовления можно описать выражениями [1]

$$R1 = \rho(l + \Delta l_c)/b; \quad R2 = \rho l_2 / (b_2 + \Delta b_c); \quad R3 = \rho(l_3 + \Delta l_c)/b; \\ R4 = R1 + R_{эп}; \quad R5 = R_{эгр} + R1/n, \quad (1)$$

где ρ — удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки;

l, b — соответственно длина и ширина резисторов, определяемая фотошаблоном;

$\Delta l_c, \Delta b_c$ — систематические погрешности длины и ширины ТПП за счет фотолитографии и травления;

$R_{эп}, R_{эгр}$ — сопротивление электродов прямоугольного и гребенчатого резисторов, соответственно;

n — количество резистивных элементов в гребенчатом резисторе R5.

Расчет всех видов погрешностей ТПП производят для резисторов, которые имеют одну координату y_j . Это необходимо для исключения влияния градиентной погрешности $\delta\rho_c$ на точность вычислений.

В связи с тем, что сопротивление всех резисторов зависит от погрешности ρ , статистический ряд, составленный из значений сопротивлений резисторов, будет представлять собой совокупность зависимых случайных величин. Это приводит к необходимости использования методов корреляционного анализа при определении производственных погрешностей, что значительно усложнит алгоритмы расчета. Поэтому необходимо построить другие статистические ряды,

состоящие из независимых случайных величин, которые позволяли бы достоверно определять случайные производственные погрешности длины, ширины и контактного сопротивления электродов ТПП при применении основных характеристик статистического ряда. Такими статистическими рядами могут быть ряды, составленные из отношений сопротивлений двух резисторов:

$$K1_1, K1_2, \dots, K1_i; \quad K2_1, K2_2, \dots, K2_i; \quad K4_1, K4_2, \dots, K4_i; \\ K5_1, K5_2, \dots, K5_i, \quad (2)$$

где i — номер тестовой схемы по j -й координате y ;

$$K1_i = R1_i/R3_i; \quad K2_i = R2_i/R3_i; \quad K4_i = R4_i/R1_i; \quad K5_i = R5_i/R1_i. \quad (3)$$

В общем случае относительная случайная погрешность δK отношения двух ТПП, например $R1/R2$, определяется выражением

$$\delta K = \sqrt{(\delta l_1 - \delta l_2)^2 + (\delta b_1 - \delta b_2)^2 + (\delta R_{эп1} - \delta R_{эп2})^2}. \quad (4)$$

Тогда для рассматриваемой тестовой схемы на основании (4) можно получить следующие выражения:

$$\delta K1 = \delta l; \quad \delta K2 = \delta b; \quad \delta K4 = \delta R_{эп}; \quad \delta K5 = \delta R_{эгр},$$

где $\delta l, \delta b, \delta R_{эп}, \delta R_{эгр}$ — случайные производственные погрешности ТПП: длины, ширины, обусловленные сопротивлением электродов — прямоугольной и гребенчатой формы.

Если перейти от значений случайных погрешностей к характеристике статистического ряда — коэффициенту вариации, то получим систему уравнений для оценки случайных погрешностей ТПП:

$$V_{R3} = V_{\rho j}; \quad V_{K1} = V_{l_j}; \quad V_{K2} = V_{b_j}; \quad V_{K4} = V_{эп j}; \quad V_{K5} = V_{эгр j},$$

где V_{R3} — коэффициент вариации статистического ряда, составленного из сопротивлений R3;

$V_{K1}, V_{K2}, V_{K4}, V_{K5}$ — коэффициенты вариации статистических рядов (2);

$V_{\rho j}$ — коэффициент вариации удельного поверхностного сопротивления по координате y_j ;

V_{l_j}, V_{b_j} — коэффициенты вариации длины и ширины ТПП;

$V_{эп j}, V_{эгр j}$ — коэффициенты вариации сопротивления электродов резисторов R4 и R5.

Оценку достоверности измеренных результатов сопротивлений в строке матрицы производим по следующему алгоритму.

1. Среднее значение резистора $R3_j$ находим по формуле

$$R3_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R3_i = \rho_j,$$

где k — количество измеренных резисторов по координате y_j (в строке);

ρ_j — среднее значение удельного поверхностного сопротивления в строке.

2. Вычисляем отношения сопротивлений резисторов (коэффициенты K) по формулам (3).

3. Рассчитываем средние значения коэффициентов K :

$$K1_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k K1_i; \quad K2_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k K2_i; \quad K4_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k K4_i; \\ K5_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k K5_i. \quad (5)$$

4. Находим коэффициенты вариации для статистического ряда $R_{3_1}, R_{3_2}, \dots, R_{3_i}$ и для статистических рядов (2):

$$V_{\rho_j} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k (R_{3_i} - R_{3_j})^2}}{R_{3_j} \sqrt{k-1}}; \quad V_{l_j} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k (K1_i - K1_j)^2}}{K1_j \sqrt{k-1}};$$

$$V_{b_j} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k (K2_i - K2_j)^2}}{K2_j \sqrt{k-1}}; \quad V_{\text{эп}j} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k (K4_i - K4_j)^2}}{K4_j \sqrt{k-1}};$$

$$V_{\text{эп}j} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k (K5_i - K5_j)^2}}{K5_j \sqrt{k-1}}.$$

По результатам полученных значений коэффициентов вариации можно оценить качество изготовления тест-платы и точность проведенных измерений. Результаты измеренных сопротивлений считались достоверными при $V_{\rho_j} \leq 1,7\%$; $V_{b_j} \leq 3\%$; $V_{l_j} = V_{\text{эп}j} = V_{\text{эп}j} \leq 5\%$. При такой оценке в эксперименте было использовано свыше 90% всех измерений.

Систематические погрешности ТПР для каждой координаты y_j рассчитываются по следующему алгоритму.

1. Среднее значение сопротивления резисторов $R1_j, R3_j$ находим по следующим формулам:

$$R1_j = \frac{1}{k_d} \sum_{i=1}^{k_d} R1_i; \quad R3_j = \frac{1}{k_d} \sum_{i=1}^{k_d} R3_i = \rho_j, \quad (6)$$

где k_d — количество измеренных резисторов по координате y_j , результаты измерения сопротивления которых признаны достоверными.

2. Рассчитаем средние значения коэффициентов K :

$$K1_j = \frac{1}{k_d} \sum_{i=1}^{k_d} K1_i; \quad K2_j = \frac{1}{k_d} \sum_{i=1}^{k_d} K2_i;$$

$$K4_j = \frac{1}{k_d} \sum_{i=1}^{k_d} K4_i; \quad K5_j = \frac{1}{k_d} \sum_{i=1}^{k_d} K5_i. \quad (7)$$

3. Используя (1), (6) и (7), запишем значения коэффициентов K :

$$K1_j = \frac{(l_1 + \Delta l_{cj})}{(l_3 + \Delta l_{cj})}; \quad K2_j = \frac{l_2 b_3}{(b_2 + \Delta b_{cj})(l_3 + \Delta l_{cj})};$$

$$K4_j = (R1_j + R_{\text{эп}j})/R1_j; \quad K5_j = (R_{\text{эп}j} + R1_j/n)/R1_j. \quad (8)$$

4. Из уравнений (8) определим, соответственно, $\Delta l_{cj}; \Delta b_{cj}; R_{\text{эп}j}; R_{\text{эп}j}$:

$$\Delta l_{cj} = (l_3 K1_j - l_1)/(1 - K1_j); \quad \Delta b_{cj} = l_2 b_3 / [K2_j (l_3 + \Delta l_{cj})] - b_2;$$

$$R_{\text{эп}j} = R1_j (K4_j - 1); \quad R_{\text{эп}j} = R1_j (K5_j - 1/n).$$

5. Величину градиентной погрешности удельного поверхностного сопротивления находим по формуле $\delta \rho_{ci} = \rho / \rho_0 - 1$, где ρ_0 — среднее значение удельного поверхностного сопротивления для центральной координаты y_0 подложки.

6. Среднее удельное поверхностное сопротивление и средние систематические погрешности параметров ТПР, характерные для всей площади q -й тест-платы, находим в соответствии с выражениями

$$\rho_q = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \rho_j; \quad \Delta l_{cq} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta l_{cj}; \quad \Delta b_{cq} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta b_{cj};$$

$$R_{\text{эп}q} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m R_{\text{эп}j}; \quad R_{\text{эп}q} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m R_{\text{эп}j},$$

где m — количество исследуемых координат y_j .

7. Средние значения для r изготовленных тест-плат находим согласно выражениям

$$\rho = \frac{1}{r} \sum_{q=1}^r \rho_q; \quad \Delta l_c = \frac{1}{r} \sum_{q=1}^r \Delta l_{cq}; \quad \Delta b_c = \frac{1}{r} \sum_{q=1}^r \Delta b_{cq};$$

$$R_{\text{эп}} = \frac{1}{r} \sum_{q=1}^r R_{\text{эп}q}; \quad R_{\text{эп}} = \frac{1}{r} \sum_{q=1}^r R_{\text{эп}q}. \quad (9)$$

8. Найдем среднеквадратическое отклонение основных параметров ТПР: удельного поверхностного сопротивления s_ρ , длины s_l и ширины s_b :

$$s_\rho = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{q=1}^r (\rho_q - \rho)^2}; \quad s_l = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{q=1}^r (\Delta l_{cq} - \Delta l_c)^2};$$

$$s_b = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{q=1}^r (\Delta b_{cq} - \Delta b_c)^2}. \quad (10)$$

9. Используя выражения (9), (10), определим коэффициент вариации V_ρ удельного поверхностного сопротивления: $V_\rho = s_\rho / \rho$.

10. Задавая вероятность (надежность) P того, что истинное значение случайной погрешности любого параметра сопротивления ТПР попадет в заданный доверительный интервал (допуск), по числу проведенных достоверных измерений r определяем, согласно [7, с. 96], значение коэффициента Стьюдента t для этих данных. Показатель надежности выбирается из компромиссных соображений между увеличением трудоемкости групповой и индивидуальной подгонки резисторов при низкой надежности и увеличением линейных размеров и допусков резисторов — при высокой надежности. Рекомендуемая величина надежности составляет $P = 0,68 \dots 0,95$.

11. Используя формулу, приведенную в [7, с. 75], учитывающую связь между допуском на случайную погрешность, коэффициентом Стьюдента и стандартным отклонением, найдем допуски на абсолютные погрешности длины и ширины ТПР:

$$\Delta l = t s_l; \quad \Delta b = t s_b.$$

Относительный допуск на величину ρ равен: $\delta \rho = t V_\rho$.

Нетрудно заметить, что длина $l_{\text{кд}}$ и ширина $b_{\text{кд}}$ проводников и контактных площадок после изготовления ИС будет определяться выражениями

$$l_{\text{кд}} = l_{\text{кд}} - \Delta l_c \pm \Delta l; \quad b_{\text{кд}} = b_{\text{кд}} - \Delta l_c \pm \Delta l,$$

где $l_{\text{кд}}, b_{\text{кд}}$ — длина и ширина проводников и контактных площадок по конструкторской документации.

Результаты расчета погрешностей сопротивления ТПР, полученные по вышеприведенным алгоритмам на основе шести тест-плат с тонкопле-

Таблица 2

Систематические погрешности					Случайные погрешности		
δp_c , %	Δl_c , мкм	Δb_c , мкм	$R_{эп}$, Ом	$R_{эг}$, Ом	δp , %	Δl , мкм	Δb , мкм
6,5	6,2	2,5	1,97	0,31	4,0	10,8	2,5

ночной структурой РС-3710-V-A1, изготовленных третьим способом фотолитографии, приведены в табл. 2. При этом вероятность оценки погрешностей составляла $P=0,9$, а $t=2,01$.

Анализ результатов погрешностей, приведенных в табл. 2, показал следующее. Высокое значение градиентной погрешности удельного поверхностного сопротивления вызвано конструкцией подложкодержателя, который не обеспечивает равномерность нагрева подложки, т. к. имеет двусторонние вырезы для установки подложки в направлении координаты Y . Такое значение градиентной погрешности не позволяет использовать всю площадь подложки, что увеличивает себестоимость изготовления МСБ.

Полученные значения систематических и случайных погрешностей длины и ширины ТПР, а также случайной погрешности удельного поверхностного сопротивления, позволяют проектировать ТПР с номинальными размерами 50 мкм.

Согласно [6], теоретические значения сопротивления электродов для исследуемых ТПР составляют: $R_{эп}=1,4$ Ом; $R_{эг}=0,3$ Ом. Экспериментальное значение сопротивления электродов гребенчатого резистора мало отличается от теоретического значения, в то время как сопротивление электродов прямоугольного ТПР отличается значительно. Это вызвано тем, что модель расчета сопротивления электродов [6] не учитывает контактное сопротивление между проводящим и резистивным слоем.

В эксперименте было измерено сопротивление $R_{п}$ проводящего слоя электрода (рис. 1, КП 5—6), среднее значение которого составило $R_{п}=0,64$ Ом. Отсюда можно рассчитать среднее значение контактного сопротивления: $R_{к}=R_{эп}-2R_{п}=0,69$ Ом. Конструкция гребенчатого резистора ослабляет влияние контактного сопротивления в n раз.

Выводы

Разработана тестовая схема и алгоритмы расчета систематических и случайных производственных по-

грешностей конструктивных параметров тонкопленочных резисторов: удельного поверхностного сопротивления, длины, ширины, а также погрешности, вносимой сопротивлением электродов. На основе тонкопленочной структуры РС-3710-V-A1 изготовлено шесть тест-плат, на которых измерены сопротивления резисторов, и по разработанным алгоритмам проведен расчет погрешностей параметров ТПР (табл. 2).

Как следует из табл. 2, значения систематических погрешностей длины и ширины ТПР достаточно велики, поэтому они должны быть скомпенсированы при проектировании топологии платы микросборки.

Сопротивление электродов гребенчатого резистора меньше, чем у прямоугольного, несмотря на то, что коэффициент формы гребенчатого резистора в 5 раз меньше. Кроме того, конструкция гребенчатого резистора практически исключает влияние контактного сопротивления — даже при напылении резистивного и проводящего слоев в разных технологических циклах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Спиринов В. Г. Математические модели сопротивления тонкопленочного резистора с размерами 50 мкм // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 2.— С. 14—16.
2. Коробов А. И., Иванов А. В., Пассов М. И. Применение тестовых схем для оперативного контроля технологического процесса изготовления резистивных структур ГИС // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника.— 1985.— Вып. 4.— С. 86—91.
3. Спиринов В. Г. Методы определения коэффициента формы тонкопленочных резисторов при проектировании и изготовлении гибридных интегральных схем // Технология авиационного приборостроения.— 1990.— Вып. 2.— С. 66—68.
4. Власов В. Е., Захаров В. П., Коробов А. И. Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры.— М.: Радио и связь, 1987.
5. Спиринов В. Г. Способы изготовления тонкопленочных резисторов // Вестник МВВО. Сер. Высокие технологии в радиоэлектронике, информатике и связи. (Н.-Новгород).— 2003.— Вып. 1.— С. 7—10.
6. Спиринов В. Г. Оценка влияния сопротивления электродов на погрешность тонкопленочного резистора // Там же.— С. 11—14.
7. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений.— М.: Наука, 1970.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Фриман Р. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ.— М.: Техносфера, 2003.— 500 с.

Волоконно-оптические системы связи уже давно стали реальностью и создаются на основе самых современных технологий глобальных сетей SONET/SDH и WDM не только за рубежом, но и в нашей стране. Однако книг по этой тематике на русском языке явно не хватает. Больше всего это относится не столько к описанию указанных технологий, сколько к комплексному описанию таких систем связи в целом, вопросам инженерного проектирования таких систем.

Книга известного американского автора адресована широкому кругу читателей — от студентов до инженеров — специалистов в области связи. Она покрывает широкий круг вопросов от источников и приемников оптического сигнала, оптоволоконной среды распространения с присущими ей нелинейными эффектами, технологий SONET/SDH и WDM и используемого ими оборудования (оптических усилителей и мультиплексоров) до инженерных аспектов оптических систем передачи в целом, включая планирование, прокладку и тестирование сети, мониторинг показателей ее работоспособности и вопросы функционирования сети и ее управления. Русское издание книги дополнено двумя важными разделами, посвященными синхронизации цифровых сетей SDH и оценке показателей ошибок в таких сетях.

