

УДК 621.3.049.776

Д. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, Арзамасский политехнический институт,  
филиал Нижегородского технического университета им. Р. Е. Алексеева  
E-mail: spvl49@mail.ru

## МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ПЛАТЫ

*Разработан метод оценки качества тонкопленочной платы, который основан на результатах измерения сопротивления резисторов и вычисления их инструментальных погрешностей. Применение данного метода позволяет увеличить выход годных плат в 1,5–2 раза.*

*Ключевые слова:* тонкопленочный резистор, инструментальная погрешность сопротивления.

В большинстве датчиков первичной информации в России сервисную электронику выполняют в виде тонкопленочной микросборки. Это связано прежде всего с тем, что пассивные компоненты датчиков имеют большие габариты и их невозможно изготавливать по полупроводниковой технологии. Основной конструктивной единицей микросборки, которая во многом определяет ее качество, надежность и выход годных, является плата.

В процессе производства тонкопленочной платы используют два основных типа контроля: по внешнему виду и по параметрам пассивных элементов (резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности). Наиболее распространенным элементом платы является тонкопленочный резистор (ТПР). Ввиду высокой точности и стабильности, ТПР часто используют в датчиках и в измерительных системах или устройствах, например в выходных резисторах акселерометров, входных делителях мультиметров, измерительных мостах, резисторных матрицах АЦП и ЦАП. Количество ТПР на одной плате может достигать нескольких десятков и даже сотен. Качество изготовления платы определяется точностью попадания сопротивлений ТПР в заданный интервал допуска.

Измерение сопротивления большого количества резисторов платы вручную является трудоемким процессом. Для снижения трудоемкости и повышения достоверности измерений сопротивления ТПР в [1] предложена автоматизированная система контроля качества платы, в основе которой лежит измерение сопротивления резисторов тестовых схем, расположенных на периферийных технологических полях подложки. Далее по определенным алгоритмам производится расчет систематических и случайных погрешностей размеров ТПР. По рассчитанным значениям погрешностей дается заключение о годности платы.

Метод, рассмотренный в [1], является косвенным и, следовательно, ненадежным. Хотя

он и дает заключение о годности платы, это вовсе не означает, что сопротивление каждого резистора платы лежит в заданном поле допуска. Такие отклонения могут быть вызваны рядом причин, таких, например, как неравномерность напыления резистивного слоя по поверхности подложки, локальное подтраивание резистора, пористость подложки, проколы в фоторезисте и пр. То есть, в случае применения этого метода велика вероятность того, что на сборочную операцию может быть пропущена бракованная плата.

При проектировании и изготовлении плат не придают должного значения инструментальным погрешностям ТПР, хотя они снижают выход годных в 1,5–2 раза [2]. Инструментальные погрешности сопротивления ТПР в основном определяются комплектом фотошаблонов (ФС) и проявляются в том, что сопротивление одного или нескольких резисторов не попадает в заданное поле допуска. На воспроизводимость сопротивления ТПР, кроме технологического процесса изготовления ФС, могут оказывать влияние разработчик электрической принципиальной схемы, конструктор эскиза топологии, кодировщик. Все многообразие инструментальных погрешностей можно разделить на методические, субъективные и производственные погрешности при изготовлении ФС.

К методическим погрешностям можно отнести выбор разработчиком схемы номинального сопротивления ТПР по стандартному ряду, а не исходя из минимально возможных размеров ТПР, которые являются технологическим ограничением. Иногда это приводит к несоответствию сопротивления, изображенного на эскизе топологии ТПР, перечню элементов вследствие дискретности координатной сетки. Методические погрешности формируются из-за того, что применяемые математические модели расчета сопротивления ТПР и его погрешностей являются приближенными и не включают в себя особенности

конструкции ТПР, например сопротивления его электродов, а также систематические производственные погрешности, которые возникают в реальном технологическом процессе.

Субъективные погрешности в основном связаны с невнимательностью проектировщиков плат и фотошаблонов. Ошибки такого рода приводят, как правило, к неверному определению числа квадратов резистора.

Производственные погрешности при изготовлении фотошаблонов связаны с точностью оборудования и метода изготовления. Кроме того, инструментальную погрешность могут значительно увеличить неисправности оборудования, например фотонаборной установки.

Инструментальные погрешности обнаружить очень сложно, т. к. они маскируются производственными погрешностями. На сопротивление резисторов влияют два основных параметра: удельное поверхностное сопротивление  $\rho$  резистивной пленки и коэффициент формы  $K_\phi$ . Поскольку сопротивление зависит от двух переменных, выявить причины появления инструментальных ошибок при получении заданных сопротивлений ТПР в процессе изготовления плат трудно. Отсюда возникает задача разработки алгоритма оценки инструментальных погрешностей, который позволил бы при каждом запуске платы по новым фотошаблонам простыми расчетами находить данный класс погрешностей.

Целью настоящей работы является разработка метода оценки качества тонкопленочной платы по результатам вычисления инструментальных погрешностей ТПР.

**В** [3] предложен алгоритм оценки инструментальных погрешностей. Данный метод основан на сопоставлении сопротивления исследуемого резистора с эталонным. Причем в качестве эталонного резистора выбирается входящий в состав платы ТПР с наибольшими размерами. Если такового не имеется, то проектируются технологические эталонные резисторы с размерами 0,5×0,5 мм. Недостатком данного метода является то, что технологические эталонные резисторы увеличивают трудоемкость проектирования платы и занимают ее площадь. Кроме того, данный метод отличается сравнительно невысокой точностью, т. к. основан только на исключении влияния удельного поверхностного сопротивления.

Если предположить, что систематические погрешности длины, ширины и сопротивления электродов ТПР скомпенсированы [4], можно предложить другой подход к выбору эталонного резистора, основанный на вычислении погрешности отношения сопротивлений двух ТПР. Согласно [5], эта погрешность в общем случае определяется выражением

$$\delta K = \delta \rho_{c1} - \delta \rho_{c2} + \sqrt{(\delta l_1 - \delta l_2)^2 + (\delta b_1 - \delta b_2)^2} + \delta K_d, \quad (1)$$

где индексы 1, 2 соответствуют резисторам  $R_1, R_2$ ;

$\delta \rho_c$  — систематическая градиентная погрешность удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки резистора;

$\delta l, \delta b$  — случайные погрешности длины  $l$  и ширины  $b$  резистора;

$\delta K_d$  — погрешность отношения сопротивлений двух ТПР, обусловленная точечными дефектами.

Если при проектировании платы исследуемый и эталонный резисторы расположить на расстоянии менее 5 мм друг от друга, то градиентной погрешностью можно пренебречь. В этом случае формула (1) принимает вид

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

Как следует из этой формулы, погрешность отношения сопротивлений двух ТПР минимальна, если резисторы имеют идентичную форму и расположены в непосредственной близости друг от друга. В этом случае величина этой погрешности будет определяться точечными дефектами (обычно  $\delta K_d = 1-3\%$ ). Однако на практике идентичность форм всех ТПР соблюсти невозможно. Тем не менее, можно предположить, что при некоторых условиях возможно приближение выражения (2) к минимальной погрешности.

Чтобы выявить эти условия, рассмотрим случайную погрешность коэффициента формы ТПР, которая описывается следующей формулой:

$$\delta K_\phi = \sqrt{\delta l^2 + \delta b^2} = \sqrt{(\Delta l / l)^2 + (\Delta b / b)^2}, \quad (3)$$

где  $\Delta l, \Delta b$  — абсолютные случайные производственные погрешности длины и ширины ТПР.

Если  $\delta l \geq 3\delta b$  или  $\delta b \geq 3\delta l$ , то меньшим слагаемым в формуле (3) можно пренебречь. Как показывают исследования [6], для структуры пленок РС-3710-V-Al  $\Delta l \approx 2\Delta b$ . В этом случае возможны две ситуации:

а)  $2\Delta b / l \geq 3\Delta b / b$ ; откуда  $l / b \leq 2/3$ ;

б)  $\Delta b / b \geq 6\Delta b / l$ ; откуда  $l / b \geq 6$ .

Анализ формул (2), (3) показывает, что все резисторы, которые может содержать тонкопленочная плата, в зависимости от коэффициента формы  $K_\phi = l/b$  можно разделить на несколько групп, причем каждую группу можно характеризовать собственным значением погрешности отношения сопротивлений.

Выявим условия минимума погрешности отношения сопротивлений двух ТПР для каждой группы ТПР:

1 группа — резисторы с примерно одинаковой шириной или с большой шириной. В этом случае  $\delta l_1 - \delta l_2 > 3(\delta b_1 - \delta b_2)$ ;

2 группа — резисторы, размеры которых значительно отличаются друг от друга;

3 группа — резисторы с примерно одинаковой длиной или с большой длиной. В этом случае  $\delta b_1 - \delta b_2 > 3(\delta l_1 - \delta l_2)$ .

Очевидно, что в качестве эталонного предпочтительнее выбирать резистор из той же группы, что и исследуемый. В этом случае минимизируются случайные производственные погрешности изготовления ТПР и легко выявляются инструментальные. Наиболее сложно обеспечить минимальную погрешность отношения сопротивлений двух ТПР для резисторов второй группы. Следует отметить, что для ТПР этой группы производственная погрешность максимальна вследствие высокой зависимости их сопротивления от размеров. Поэтому для повышения выхода годных плат при их проектировании следует увеличить размеры тех ТПР второй группы, погрешность сопротивления которых не позволяет достигнуть заданного допуска. Это вполне допустимо, т. к. эти резисторы занимают небольшую площадь.

При изготовлении платы по новым ФШ необходимо определить те резисторы, сопротивление которых не попало в заданное поле допуска. Для каждого из исследуемых резисторов следует выбрать эталонный. В дальнейшем исследуемый резистор будем обозначать  $R1$ , а эталонный —  $R2$ .

Сформулируем требования к выбору эталонного резистора:

- эталонный резистор должен входить в состав платы, на которой расположен исследуемый резистор;
- измеренное сопротивление эталонного резистора должно соответствовать заданному допуску;
- коэффициенты формы исследуемого и эталонного резисторов должны соответствовать одной группе (см. таблицу) или находится на стыке групп;
- расстояние между исследуемым и эталонным резисторами по координате  $Y$  (малой стороне подложки) не должно превышать 5 мм. В этом случае разностью градиентной погрешности этих сопротивлений можно пренебречь.

Определение инструментальных погрешностей ТПР производят по следующему алгоритму:

1. По вышеописанной методике для каждого резистора платы определяют эталонный резистор, для чего резисторы группируют (см. таблицу). При этом использовать такие сочетания как « $R1$  — исследуемый,  $R2$  — эталонный» и « $R2$  — исследуемый,  $R1$  — эталонный» нельзя.
2. Задают значения  $\delta K_d$  (обычно  $\delta K_d = 0,03$ ).

3. Вычисляют допустимую погрешность исследуемого резистора относительно эталонного по формулам из таблицы. Такая погрешность обусловлена параметрами этих ТПР, заданными в конструкторской документации.

4. Вычисляют фактическую относительную погрешность отношения сопротивлений исследуемого и эталонного резисторов

$$\delta K_{\text{и}} = (R1_{\text{и}}/R2_{\text{и}} - R1/R2)/(R1/R2) = (R1_{\text{и}}/R2_{\text{и}})/(R2/R1) - 1,$$

где  $R1_{\text{и}}$ ,  $R2_{\text{и}}$  — измеренные сопротивления резисторов платы;

$R1$ ,  $R2$  — номинальные сопротивления этих же резисторов по конструкторской документации.

5. При наличии инструментальной погрешности ТПР выполняется следующее неравенство:  $|\delta K_{\text{и}}| > \delta K$ . (4)

Если неравенство (4) выполняется для какого-либо исследуемого резистора, то проводят анализ причин, вызвавших это отклонение, и принимают меры по их устранению. Анализ инструментальных погрешностей ТПР следует проводить при первом изготовлении тонкопленочной платы по новым ФШ. Этому анализу должны подвергаться также те платы, которые характеризуются низким процентом выхода годных в связи с непопаданием сопротивления какого-либо ТПР в заданный допуск.

По разработанному алгоритму произведена оценка инструментальных погрешностей спроектированной в ноябре 2004 г. платы УКВГ, на которой сформировано 47 резисторов. Размер платы составляет 45×29,5 мм. Первые образцы данной платы были изготовлены в апреле 2005 г. Для анализа инструментальных погрешностей ТПР необходим чертеж платы и результаты измерения сопротивлений. В связи с тем, что часть резисторов были подгонными и значения их сопротивления записывались только после проведения подгонки, эти резисторы анализу не подвергались.

На основании чертежа платы 6Ш7.100.429 и вышеизложенных рекомендаций была проведена группировка ТПР, и для каждого резистора был выбран эталонный.

Оценка инструментальных погрешностей проводилась при следующих исходных данных:  $\Delta l = \pm 10$  мкм;  $\Delta b = \pm 5$  мкм;  $\Delta K_d = 0,03$ ;  $\rho = 1$  кОм/□. Разность градиентной погрешности для всех исследуемых и эталонных ТПР принималась равной нулю.

По разработанным алгоритмам вычислялись допустимые и фактические отклонения сопротивлений исследуемых резисторов от эталонных.

В результате проведенных расчетов было установлено, что шесть резисторов из 47 имеют фактическое отклонение значений сопротивления вы-

Погрешность отношения сопротивлений двух ТПР в зависимости от коэффициента формы

| Группа ТПР | Коэффициент формы               | Формула для погрешности отношения сопротивлений группы                                     |
|------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1          | $0,01 \leq K_{\text{ф}} < 0,67$ | $\delta K = \delta l_1 - \delta l_2 + \delta K_d$                                          |
| 2          | $0,67 \leq K_{\text{ф}} \leq 6$ | $\delta K = \sqrt{(\delta l_1 - \delta l_2)^2 + (\delta b_1 - \delta b_2)^2} + \delta K_d$ |
| 3          | $K_{\text{ф}} > 6$              | $\delta K = \delta b_1 - \delta b_2 + \delta K_d$                                          |

ше допустимого. Анализ показал, что для одного из резисторов такое отклонение вызвано несоответствием его номинального значения (6,2 кОм) реализованному в чертеже платы (6,0 кОм). Это ошибка схемотехника — он выбрал номинальное сопротивление этого резистора по стандартному ряду. Для других пяти резисторов каких-либо существенных отклонений в конструкторской документации найдено не было. Поэтому для этих резисторов был проведен расчет  $\delta K_{\text{и}}$  по результатам измерения 12 плат. Дополнительный анализ показал следующее.

1. Большинство рассчитанных значений  $|\delta K_{\text{и}}|$  меньше, чем  $\delta K$ , т. е. инструментальных погрешностей для этих резисторов нет.

2. Параметр  $\delta K_{\text{и}}$  имеет как положительные, так и отрицательные отклонения, что свидетельствует о случайном характере отклонений.

3. Для каждого из пяти исследуемых резисторов в двух-трех случаях из двенадцати  $|\delta K_{\text{и}}| > \delta K$ , что, как выяснилось, стало результатом следующих промахов:

- результаты измерений записывались числами с недостаточным количеством значащих цифр после запятой — не более трех, а следовало бы четыре;
- при измерении сопротивления ТПР оператор допустил ошибку;
- во время выполнения технологических процессов напыления или фотолитографии на резистор попали инородные частицы;
- шероховатость подложки не регламентировалась;
- фотошаблоны были загрязнены;
- края элементов фотошаблонов не были достаточно четкими.

### Выводы

В результате экспериментально-теоретического анализа инструментальных погрешностей сопротивления ТПР установлено, что для повышения выхода годных серийно изготавливаемых плат следует изменить размеры одного резистора. Проведенная практическая оценка показала высокую эффективность разработанных алгоритмов: применение данного метода позволяет увеличить процент выхода годных плат тонкопленочных микросборок в 1,5–2 раза.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Власов В. Е., Захаров В. П., Коробов А. И. Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры. — Москва: Радио и связь, 1987. [Vlasov V. E., Zakharov V. P., Korobov A. I. Sistemy tekhnologicheskogo obespecheniya kachestva komponentov mikroelektronnoy apparatury. Moscow: Radio i svyaz', 1987]
2. Спирин В. Г. Оценка инструментальных погрешностей сопротивления тонкопленочного резистора // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении. Матер. Всероссийской НТК. — Н. Новгород — Арзамас, НГТУ — АФ НГТУ, 2003. — С. 363–365. [Spirin V. G. Otsenka instrumental'nykh pogreshnostei soprotivleniya tonkoplenochnogo rezistora // Progressivnye tekhnologii v mashino- i priborostroenii.

Mater. Vserossiiskoi NTK. N. Novgorod — Arzamas, NGTU — AF NGTU, 2003. P. 363]

3. Спирин В. Г. Методы определения коэффициента формы тонкопленочных резисторов при проектировании и изготовлении гибридных интегральных схем // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. Производственно-технический сборник. — 1990. — Вып. 2. — С. 66–68. [Spirin V. G. // Tekhnologiya aviatsionnogo priboro- i agregatostroeniya. Proizvodstvenno-tekhnicheskii sbornik. 1990. Iss. 2. P. 66]

4. Спирин В. Г. Компенсация систематических погрешностей тонкопленочных элементов через элементы фотошаблона // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 4. — С. 9–11. [Spirin V. G. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2004. N 4. P. 9]

5. Спирин В. Г., Ямпурин Н. П. Исследование погрешностей функций тонкопленочных резисторов // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении. Матер. Всероссийской НТК. — Н. Новгород — Арзамас, НГТУ — АФ НГТУ, 2003. — С. 358–362. [Spirin V. G., Yampurin N. P. Issledovanie pogreshnostei funktsii tonkoplenochnykh rezistorov // Progressivnye tekhnologii v mashino- i priborostroenii. Mater. Vserossiiskoi NTK. N. Novgorod — Arzamas, NGTU — AF NGTU, 2003. P. 358]

6. Спирин В. Г. Оценка производственных погрешностей тонкопленочных элементов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 4. — С. 50–53. [Spirin V. G. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2004. N 4. P. 50]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 05.03 2012 г.*

**Spirin V. G. Method for evaluating the quality of thin-film board.**

*Keywords: thin-film resistor, resistance instrumental error.*

A method for estimation of the quality of a thin-film board has been developed, based on the results of resistance measuring and instrumental errors calculation. Recommendations are given for the exclusion of gross errors in the application of the method. The practical estimation carried out shows the high efficiency of the developed algorithms. This method allows to increase the boards yield by 1,5–2 times.

Russia, Arzamas Polytechnical Institute, a branch of the R. E. Alekseev Nizhny Novgorod Technical University.

**Спирін В. Г. Метод оцінки якості тонкоплівкової плати.**

*Ключові слова: тонкоплівковий резистор, інструментальна похибка опору.*

Розроблено метод оцінки якості тонкоплівкової плати, який заснований на результатах вимірювання опору резисторів і обчислення їх інструментальних похибок. Дано рекомендації по виключенню грубих промахів при застосуванні методу. Проведена практична оцінка показує високу ефективність розроблених алгоритмів. Застосування даного методу дозволяє збільшити вихід придатних плат в 1,5–2 рази.

Росія, Арзамаський політехнічний інститут, філія Нижегородського технічного університету ім. Р. Є. Алексєєва.