

К. т. н. В. Г. СПИРИН

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

Дата поступления в редакцию
17.09 2003 г. — 01.03 2004 г.

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

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА С РАЗМЕРАМИ 50 мкм

Рассмотрены основные виды погрешностей и их влияние на формирование сопротивления тонкопленочного резистора. Предложены более точные модели расчета.

Сопротивление тонкопленочного резистора (ТПР) прямоугольной формы определяется выражением [1, с. 73]

$$R = \rho l/b = \rho K_{\phi}, \quad (1)$$

где ρ — удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки;

l, b — длина и ширина резистивного элемента;

K_{ϕ} — коэффициент формы резистора.

Однако применение математической модели (1) сопротивления ТПР при проектировании микросборок (МСБ) с размерами топологических элементов менее 0,2 мм характеризуется значительным снижением выхода годных.

Настоящая работа посвящена поиску более точной математической модели расчета сопротивления тонкопленочного резистора и его погрешности.

Выход годных МСБ напрямую связан с попаданием сопротивлений ТПР в заданное поле допуска. Если рассмотреть реальное распределение сопротивлений резисторов, то нетрудно заметить, что даже в годных МСБ практически все резисторы имеют отклонение сопротивлений от их номинального значения, причем некоторые сопротивления могут находиться на противоположных границах поля допуска. Однако в этих же МСБ можно найти хотя бы один резистор, сопротивление которого почти точно соответствует его номинальному значению. Это обусловлено тем, что на формирование сопротивления ТПР влияет большое количество погрешностей, все многообразие которых можно разделить на два класса:

- производственные, т. е. погрешности, формируемые при производстве МСБ;
- инструментальные, т. е. погрешности, вносимые основным инструментом получения рисунка МСБ — фотошаблоном (ФШ).

В свою очередь, инструментальные погрешности можно разделить на методические, субъективные и производственные погрешности изготовления ФШ.

Методические погрешности формируются из-за того, что применяемые математические модели расчета сопротивления ТПР (1) и его погрешностей являются приближенными и не учитывают особенностей конст-

рукций ТПР, например, сопротивления его электродов, а также систематических производственных погрешностей, которые возникают в реальном технологическом процессе. Субъективные погрешности, в основном, связаны с невнимательностью проектировщиков МСБ. Ошибки такого рода приводят, как правило, к неверному определению числа квадратов резистора.

Производственные погрешности ТПР образуются в процессе их изготовления. Основными видами этих погрешностей являются погрешности удельного поверхностного сопротивления, погрешности длины и ширины ТПР. (Еще одной разновидностью производственных погрешностей ТПР является погрешность переходного сопротивления областей контактов резистивной и проводящей пленки [1], однако эту погрешность невозможно рассчитать с достаточной степенью точности и трудно измерить, и она в данной работе не рассматривается.)

Каждый из перечисленных видов основных погрешностей имеет систематическую и случайную составляющие. Физическая природа некоторых видов погрешностей рассмотрена в [2]. Основной вклад в систематическую погрешность удельного поверхностного сопротивления вносят градиентная погрешность [2, с. 169] и погрешность, зависящая от ориентации резистивного элемента на подложке [3].

Градиентная погрешность (погрешность толщины пленки) — параметр, определяющий невоспроизводимость резисторов из-за градиентов технологических параметров напыления и термостабилизации по подложке. Основные источники градиентной погрешности — градиент температуры по поверхности подложки и градиент скорости нанесения резистивной пленки во время всего технологического цикла напыления. При вращении подложек на дисках или барабанах выравнивается распределение конденсата в направлении движения подложек, но сохраняется его неоднородность в перпендикулярном направлении — из-за пространственной неоднородности потока. Эффективное выравнивание конденсата по поверхности подложки может быть достигнуто с помощью специально спроектированной (корректирующей) диафрагмы. Обычно направление вращения подложек на барабане совпадает с более длинной стороной подложки, поэтому в дальнейшем будем считать, что длинная сторона подложки ориентирована вдоль оси X , а короткая сторона — вдоль оси Y . Отсюда градиентную погрешность можно разложить на две составляющие: $\delta\rho_x$ и $\delta\rho_y$, которые распределены соответственно по оси X и по оси Y .

В [3, 4] проведены исследования градиентной погрешности. Напыление резистивного сплава РС-3710 производилось на вращающиеся подложки ионно-плазменным методом на установке УВН-75П-1. В итоге получены примерно одинаковые результаты распределения градиентной погрешности по поверхности подложки. Средняя неравномерность удельного поверхностного сопротивления с номинальным значением 1 кОм/□ на ситалловых подложках составила: $\delta\rho_x = 1...3\%$ и $\delta\rho_y = \delta\rho_c = 6...7\%$. Следует отметить, что зависимость градиентной погрешности $\delta\rho_c$ от параметра Y (рис. 1) носит нелинейный характер.

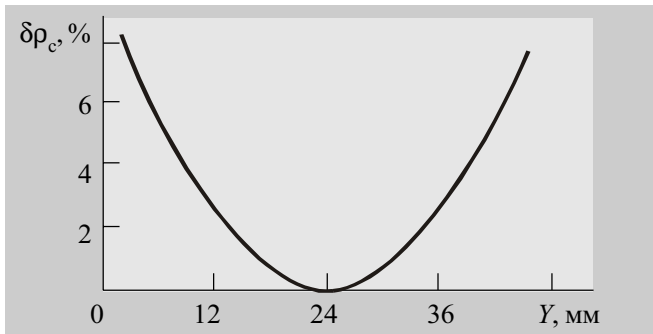


Рис. 1

В [3] показано, что в пределах одной подложки различие сопротивлений резисторов, расположенных параллельно и перпендикулярно оси вращения барабана, составляет 4—7%. Проведенные автором исследования для резистивного материала РС-3710 показывают, что наблюдается устойчивое различие в величинах удельного поверхностного сопротивления по осям X и Y подложки ($\rho_x > \rho_y$). Это различие можно оценить коэффициентом анизотропии $K_a = \rho_x / \rho_y - 1$. Коэффициент анизотропии для резисторов, изготовленных на ситалловых подложках ($\rho = 1000$ Ом/□), составляет 3,4 — 11,6%, а для резисторов, изготовленных на поликорковых подложках ($\rho = 100, 200, 300, 500$ Ом/□), коэффициент анизотропии составляет 1,1 — 9,8%. Причем ярко выраженной зависимости коэффициента анизотропии от величины ρ не наблюдалось.

Учитывая, что толщина пленок РС-3710 в проведенном эксперименте не превышала 20—50 нм, что сравнимо с пиками бугорков подложки, то данное явление можно объяснить методами полировки подложек, разными профилями бугорков на их поверхности, а также неравномерной конденсацией и кристаллизацией резистивной пленки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для исключения данного вида погрешности все резисторы по длине должны иметь одинаковое направление на плате.

Точность размеров элементов микросхем зависит, главным образом, от качества и стабильности процессов фотолитографии и влажного травления. Практика свидетельствует, что в процессе изготовления МСБ не удастся получить полностью воспроизводимые размеры однотипных элементов даже в том случае, если партия подложек подвергалась фотолитографической обработке и травлению на одном и том же оборудовании, одним и тем же персоналом и с применением одних и тех же материалов.

Существует большое число факторов, определяющих погрешности размеров элементов. Основные

погрешности возникают из-за засветки фоторезиста под элементами ФШ вследствие явления дифракции и отражения света от подложки, а также за счет рассеяния света на неоднородностях фоторезиста; переэкспонирования и перепроявления фоторезиста; нарушения адгезии фоторезиста к поверхности пленки; большого зазора между ФШ и фоторезистом на подложке, который определяется валиком фоторезиста, образующимся по краю прямоугольной подложки, неплоскостностью ФШ и подложки, а также частицами пыли, попавшими между ФШ и подложкой; подтравливания пленки вследствие изотропности ее травления.

Для получения рисунка МСБ применяют, как правило, позитивные фоторезисты. Увеличение зазора между ФШ и подложкой увеличивает размер засветки фоторезиста на границе элемента ФШ. Засветка фоторезиста приводит к его разрушению при проявлении, а следовательно, к уменьшению размеров элементов фоторезистивной маски. Размер изображения в позитивных фоторезистах сильно зависит от сочетания времени экспонирования и проявления. Переэкспонирование и перепроявление фоторезиста еще более уменьшает размеры элементов.

Размер подтравливаемого участка пленки зависит от качества фоторезиста, его адгезии к поверхности пленки, от свойств материала, подвергающегося травлению, и от свойств используемого травителя. Следует иметь в виду, что сильные химические травители (такие, например, как фтористоводородная кислота, применяемая при травлении керметов, резистивных сплавов) частично разрушают и фоторезистивную маску. Это приводит к неконтролируемому изменению площади травления и еще большему снижению точности конфигурации элементов МСБ.

Профили фоторезиста и тонких пленок, получаемых в процессе фотолитографии, показаны на рис. 2, где $\Delta l_{\text{флс}}$ — систематическая погрешность размера топологического элемента. Систематическая погрешность, вследствие рассмотренных выше физических явлений, приводит к уменьшению размеров проводников и контактных площадок (КП) МСБ.

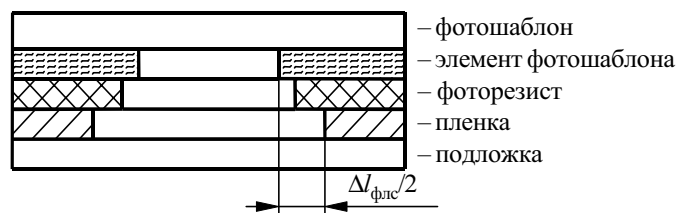


Рис. 2. Профили фоторезиста и тонких пленок после травления

Одним из ограничений при проектировании тонкопленочных МСБ, которое сужает диапазон сопротивлений ТПР, изготавливаемых на одной плате в едином технологическом цикле, является требование к коэффициенту формы резистора $K_{\phi} \geq 0,1$ [5, с. 169]. Однако физическая природа данного ограничения до настоящего времени не нашла достаточного освещения в технической литературе. Дело в том, что при $K_{\phi} < 0,1$ у ТПР прямоугольной формы начинается быстрый рост ширины электродов (ширина электродов совпадает по направлению с шириной резистивного элемента), что увеличивает их сопротивление, причем это сопротивление приводит к заметному увели-

чению общего сопротивления ТПР [6]. Этот вид погрешности относится к методической, т. к. эта погрешность не входит в математическую модель (1) расчета сопротивления ТПР. Изменение сопротивления электродов при изготовлении ТПР носит случайный характер и относится к производственной погрешности [6].

Наиболее просто в модели расчета сопротивления можно учесть те систематические погрешности, которые изменяют тот или иной размер резистора на постоянную величину.

Таким образом, можно учесть все систематические погрешности, за исключением градиентной погрешности ρ по оси Y . Следовательно, математическая модель сопротивления резистора R должна содержать систематические погрешности длины Δl_c и ширины Δb_c , а также сопротивления электродов R_3 ,

$$R = \rho \frac{l + \Delta l_c}{b \pm \Delta b_c} + R_3, \quad (2)$$

где $\Delta l_c, \Delta b_c$ — систематические погрешности длины и ширины резистора из-за процессов фотолитографии и травления.

Следует отметить, что параметр R_3 в формулу (2) включают только при расчете сопротивления ТПР с $K_\phi \leq 0,1$, где происходит быстрый рост сопротивления электродов. В формуле (2) учтено, что при выполнении операций фотолитографии и травления увеличивается длина резистора, а его номинальное сопротивление возрастает за счет сопротивления электродов. Ширина резистора может как уменьшаться (по вышеизложенным причинам), так и увеличиваться. Наиболее распространенными причинами увеличения ширины ТПР являются недопроявление фоторезиста и нечеткость края элементов ФШ.

Проиллюстрируем влияние систематических погрешностей на относительное изменение δR_c номинального значения сопротивления прямоугольного резистора, для чего рассчитаем сопротивления $R1, R2$ по формулам (1) и (2), соответственно, при следующих данных: $\rho=1$ кОм/□; $\Delta l_c=6$ мкм; $\Delta b_c=-3$ мкм.

Пример 1: $l=b=100$ мкм;

$R1=1$ кОм; $R2=(100+6)/(100-3)=1,093$ кОм; $\delta R_c=9,3\%$.

Пример 2: $l=100$ мкм; $b=2000$ мкм; $R_3=1,4$ Ом;

$R1=50$ Ом; $R2=(100+6)/(2000-3)+1,4=54,4$ Ом; $\delta R_c=8,8\%$.

Приведенные примеры показывают, что формула (1) дает существенные погрешности при уменьшении линейных размеров ТПР до 100 мкм и менее, а также не позволяет проектировать ТПР с $K_\phi < 0,1$.

Математическая модель половины поля допуска δR производственной относительной погрешности имеет вид

$$\delta R = \delta \rho_c + \sqrt{\delta \rho^2 + \delta l^2 + \delta b^2 + \delta R_3^2}, \quad (3)$$

где $\delta \rho_c$ — систематическая градиентная погрешность удельного поверхностного сопротивления;

$\delta \rho$ — общая случайная погрешность ρ ;

$\delta l, \delta b$ — случайные погрешности длины и ширины резистора из-за процессов фотолитографии и травления;

ΔR_3 — случайная абсолютная погрешность сопротивления электродов;

$\delta R_3 = \Delta R_3 / R$.

Математическая модель производственной погрешности содержит две основные составляющие: систематическую градиентную погрешность и суммарную случайную погрешность формирования толщины резистивной и проводящей пленки, а также длины и ширины ТПР. Систематическая градиентная погрешность, как это следует из рис. 1, имеет нелинейную зависимость по координате Y , следовательно, ее учет в формуле (2) приведет к усложнению расчета. Поэтому этот вид погрешности целесообразнее ввести в формулу (3). Для того, чтобы общая погрешность резистора имела симметричное поле допуска, необходимо при проектировании платы соответствующим образом выбирать координату Y_0 , где принимается $\delta \rho_c = 0$.

Формирование случайных погрешностей сопротивления ТПР происходит на следующих операциях: напыления резистивного слоя ($\delta \rho$); напыления проводящего слоя (δR_3); проведения первой фотолитографии и травления проводящей пленки (δl); проведения второй фотолитографии и травления резистивной пленки (δb). Эти события независимы друг от друга, поэтому для расчета случайной производственной погрешности может быть применен аппарат теории вероятностей. Как показывают расчеты [6], в случае применения при проектировании МСБ конструкции гребенчатого резистора случайная погрешность формирования электродов не превышает 1%, что намного меньше других составляющих производственной погрешности в формуле (3). Поэтому математическая модель половины поля допуска производственной относительной погрешности принимает более простой вид:

$$\delta R = \delta \rho_c + \sqrt{\delta \rho^2 + \delta l^2 + \delta b^2}.$$

Рассмотрение основных видов погрешностей и их влияния на формирование сопротивления тонкопленочных резисторов показало, что на воспроизводимость ТПР большое влияние оказывают методические погрешности, в связи с чем существующие математические модели расчета сопротивления ТПР нуждаются в уточнении.

Предложенные более точные модели расчета сопротивления ТПР и его погрешности позволяют проектировать ТПР с размерами 10...50 мкм, а также ТПР с $K_\phi < 0,1$, при существующих технологических допусках.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ермолаев Ю. П., Пономарев М. Ф., Крюков Ю. Г. Конструкция и технология микросхем.— М.: Радио и связь, 1980.
2. Гимпельсон В. Д., Радионов Ю. А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники.— М.: Машиностроение, 1976.
3. Клименко Б. И., Сидорова И. А. Совершенствование технологии изготовления тонкопленочных резисторов из сплава РС-3710 // Технология авиационного приборостроения.— 1987.— Вып. 3—4.— С. 36—38.
4. Спирин В. Г. Методы определения коэффициента формы тонкопленочных резисторов при проектировании и изготовлении гибридных интегральных схем // Там же.— 1990.— Вып. 2.— С. 66—68.
5. Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И. Микроэлектроника.— М.: Высшая школа, 1987.
6. Спирин В. Г. Оценка влияния сопротивления электродов на погрешность тонкопленочного резистора // Вестник Верхне-Волжского отд. АТН РФ. Сер. Высокие технологии в радиоэлектронике и связи.— 2003.— Вып. 1(9).— С. 11—14.