

К. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, Арзамасский политехнический институт
E-mail: spvl@ugnn.ruДата поступления в редакцию
03.04 2008 г.Оппонент д. т. н. Ю. В. ПАНФИЛОВ
(МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва)

СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТОВ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА

Предложена модель расчета контактного сопротивления тонкопленочного резистора и произведена оценка вносимой им погрешности.

Тонкопленочные резисторы (ТПР), ввиду их высокой точности и стабильности, широко распространены в датчиках и в измерительных системах или устройствах. Это, например, выходные резисторы акселерометров, входные делители мультиметров, измерительные мосты, резисторные матрицы АЦП и ЦАП. С каждым годом ужесточаются технические требования, предъявляемые к ТПР. Это, прежде всего, уменьшение их размеров, повышение точности и стабильности сопротивления. Одним из видов погрешностей сопротивления ТПР является погрешность, вносимая сопротивлением его контактов.

Анализ литературы, посвященной расчету контактного сопротивления, проведенный в [1], показывает актуальность и сложность решения проблемы. Решением рассматриваемой проблемы занимаются свыше 40 лет, однако до сих пор не получены формулы для инженерных расчетов. Актуальность решения проблемы вызвана, прежде всего, необходимостью создания высокостабильных резисторов малых размеров с нестабильностью сопротивления не более $\pm 0,001\%$ и температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) $\pm 1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Сопротивление ТПР R_0 в первом приближении определяется выражением

$$R_0 = R + R_k = \rho l / b + R_k = \rho K_\phi + R_k, \quad (1)$$

где R — сопротивление резистивного элемента;

R_k — сопротивление контактов ТПР;

ρ — удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки;

l, b — длина и ширина резистора;

$K_\phi = l/b$ — коэффициент формы резистора (число квадратов).

Как видно из формулы (1), контактное сопротивление может оказывать прямое влияние на общее сопротивление и стабильность ТПР. По мнению авторов [2, с. 6], контактное сопротивление определяется переходным межслойным удельным сопротивлением, которое возникает вследствие нескольких причин, а именно:

— образования «сплава» при взаимной диффузии материалов пленок в зоне их перекрытия;

— изменения структуры материала (крупно- или мелкокристаллическая структура), приводящего к эффекту «стягивания» — изменения сопротивления в межкристалльной области;

— возникновения окисных или сернистых соединений (особенно на предприятиях, расположенных вблизи автомобильных трасс) на поверхностях нижних пленок при извлечении подложек из вакуумных установок перед нанесением верхней пленки.

Учет в модели расчета R_k переходного удельного сопротивления приводит к фантастическим результатам: авторы [2, с. 34] утверждают, что сопротивление контакта при длине и ширине перекрытия пленок 10 мкм составит 1000 Ом, при этом сопротивление резистора с параметрами $\rho = 100 \text{ Ом}/\square$; $l = 50 \text{ мкм}$; $b = 10 \text{ мкм}$ составит 2500 Ом. Если бы приведенные результаты сколько-нибудь соответствовали действительности, то проблемы измерения контактного сопротивления не существовало бы, т. к. реализация ТПР с указанными параметрами не вызывает технологических трудностей. Полученный результат, очевидно, следует объяснить недостатком модели, который состоит в том, что при расчете контактного сопротивления используется «вероятный диапазон удельных переходных сопротивлений между пленками, конкретные значения которых устанавливаются экспериментально при отработке конкретной технологии для определенного сочетания применяемых материалов» [2, с. 15]. К сожалению, в [2] не указано, где приводится методика расчета или экспериментального определения переходного удельного сопротивления.

Наиболее достоверный метод расчета контактного сопротивления приведен в [1], где показано, что 82% величины тока переходит из адгезионного в резистивный слой на участке контакта длиной 0,1 мкм, независимо от длины контакта. Модель конструкции контакта в части расположения резистивного, адгезионного и проводящего слоев, приведенная в [1], аналогична рис. 1, а.

Предлагаемая в [1] модель расчета контактного сопротивления основана на численных методах и имеет следующие недостатки.

1. Расчет на компьютере предполагает разработку специальных алгоритмов и создание специальной программы. В таких алгоритмах и программах могут разобрататься только специалисты. Кроме того, подобного рода алгоритмы затрудняют анализ как самого

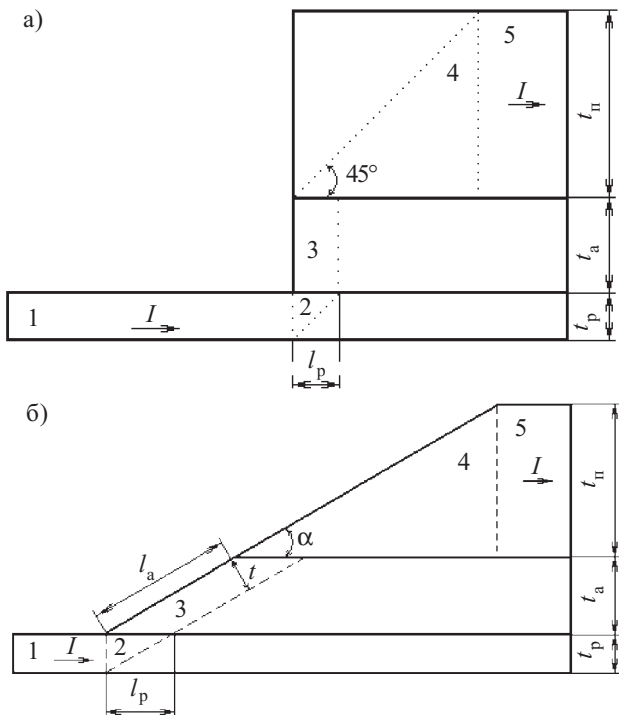


Рис. 1. Модель конструкции контакта ТПР при клине травления $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ (а) и $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ (б):

l — резистивный слой; 2 — резистивный слой контакта; 3 — адгезионный слой; 4 — проводящий слой; 5 — электрод ТПР

контактного сопротивления, так и его влияния на стабильность сопротивления ТПР. Эти недостатки ограничивают широкое применение модели на практике.

2. В модели конструкции контакта все пленки представлены в виде прямоугольных параллелепипедов, что не соответствует наиболее распространенному жидкостному методу травления проводящей и адгезионной пленок. Так как жидкостное травление изотропно, на участках контакта, состоящего из проводящей и адгезионной пленок, образуется клин травления [2, с. 59].

3. В модели не выделены участки контакта, соответствующие различным пленкам.

В задачу настоящей работы входит разработка физико-математической модели расчета контактного сопротивления, которая не имеет вышеперечисленных недостатков модели [1] и может быть использована при инженерных расчетах в проектировании ТПР.

Изучение явления перехода тока из резистивного материала в проводник в плоскости подложки в ТПР сложной формы [3, с. 26; 4] позволяет сделать следующие выводы и допущения при разработке модели расчета контактного сопротивления:

— ток в контакте переходит из резистивного материала в адгезионный слой по тем же законам, которые наблюдаются в плоских моделях ТПР, что может быть использовано при определении сопротивления участка резистивного слоя контакта;

— практически весь ток переходит из резистивного в адгезионный слой на расстоянии, равном толщине резистивного слоя от начала контакта;

— удельное поверхностное сопротивление резистивного, адгезионного (ρ_a) и проводящего (ρ_n) слоев имеют следующее соотношение: $\rho > \rho_a > \rho_n$;

— ширина всех слоев ТПР одинакова и равна ширине резистора.

Модель конструкции контакта ТПР при клине травления $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ показана на рис. 1, а. Согласно этой модели, ток из резистивного слоя 1 на участке 2 контакта «разворачивается» на 90° на расстоянии от начала контакта l_p , равном толщине резистивной пленки t_p , т. е. $l_p = t_p$. Затем ток проходит участок 3 контакта в адгезионном слое и поступает в участок 4 проводящего слоя контакта. В этом слое ток разворачивается и протекает по всему сечению участка 4, причем верхней границей протекания тока является линия, образующая с адгезионным слоем угол, равный 45° . Из участка 4 ток переходит в электрод ТПР 5, который уже не является элементом контакта и в дальнейшем не рассматривается. Расчет сопротивления электродов ТПР приведен в [5]. Таким образом, расчет сопротивления контакта ТПР сводится к нахождению сопротивления участков контакта 2—4.

Сопротивление каждого участка можно рассчитать по известной формуле

$$R_y = \rho_v l_y / S,$$

где ρ_v — удельное объемное сопротивление резистивного слоя; l_y, S — длина и площадь поперечного сечения участка.

Сопротивление R_p резистивного слоя участка 2 определяется следующим выражением:

$$R_p = \rho_v l_{p3} / (t_p b), \quad (2)$$

где l_{p3} — эквивалентная длина резистивного слоя под контактом; t_p — толщина резистивного слоя.

Используя результаты работ [1, 4] и учитывая, что $\rho_v = \rho t_p$, преобразуем уравнение (2) к виду

$$R_p = m \rho t_p / b, \quad (3)$$

где $m = l_{p3} / t_p$.

Учитывая, что в рассматриваемой модели при $\alpha = 90^\circ$ $m = 0,469$ [4], а при $\alpha = 45^\circ$ $m = 0,564$ [3, с. 26], т. е. в диапазоне $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ m изменяется незначительно, примем $m = 0,5$. Тогда уравнение (3) преобразуется к виду

$$R_p = 0,5 \rho t_p / b. \quad (4)$$

Сопротивление участка 3 адгезионного слоя толщиной t_a при $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ равно сопротивлению параллелепипеда с длиной t_a и площадью поперечного сечения $b t_p$ и рассчитывается по формуле

$$R_a = \rho_a / (b t_p). \quad (5)$$

Сопротивление участка 4 проводящего слоя толщиной t_n при $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ эквивалентно удвоенному сопротивлению параллелепипеда с длиной t_n и площадью поперечного сечения $b t_n$. Оно находится в соответствии с выражением

$$R_n = 2 \rho_n t_n / (b t_n) = 2 \rho_n / b. \quad (6)$$

При изотропном травлении пленок угол клина травления может принимать произвольное значение в диа-

пазоне $0 < \alpha \leq 45^\circ$ [2, с. 61]. Поэтому представляет интерес исследование влияния угла α на контактное сопротивление.

Модель конструкции контакта ТПР при клине травления $0 < \alpha \leq 45^\circ$ показана на рис. 1, б. Здесь ток после резистивного слоя 1 разворачивается на участке 2 на угол α , проникая под адгезионный слой на длину $l_p = t_p / \operatorname{tg} \alpha$. Согласно этой модели, ток на участке адгезионного слоя 3 встречается большее сопротивление, чем в модели на рис. 1, а. Это происходит за счет увеличения длины $l_a = t_a / \sin \alpha$ и уменьшения ширины участка 3: $t = (t_p / \operatorname{tg} \alpha) \sin \alpha = t_p \cos \alpha$. Величина t минимальна при $\alpha = 45^\circ$ и составляет $0,707 t_p$. При уменьшении α величина t будет приближаться к t_p . Ток на участке 4 проводящего слоя разворачивается и протекает по всему сечению проводника. С учетом того, что $m = 0,564$, сопротивление участков 2, 3 и 4 при клине травления $0 < \alpha \leq 45^\circ$ соответственно будет определяться выражениями

$$R_p = 0,564 \rho t_p t_p / (b t_p \operatorname{tg} \alpha) = 0,564 \rho t_p / (b \operatorname{tg} \alpha); \quad (7)$$

$$R_a = \rho_a t_a l_a / (b t) = \rho_a t_a^2 / (b t_p \cos \alpha \sin \alpha) = 2 \rho_a t_a^2 / (b t_p \sin 2\alpha); \quad (8)$$

$$R_n = 2 \rho_n t_n / (b \operatorname{tg} \alpha). \quad (9)$$

Общее контактное сопротивление ТПР рассчитывается по формуле

$$R_k = 2(R_p + R_a + R_n). \quad (10)$$

Рассчитаем контактное сопротивление двух вариантов ТПР. В первом варианте пленки наносились термическим испарением и имели структуру K20C-V-Al [1]. Во втором резистивный слой наносили ионно-плазменным напылением, а адгезионный и проводящий слои — электронно-лучевым испарением; пленки имели структуру PC3710-V-Al. В табл. 1 приведены параметры пленок и размеры двух вариантов ТПР для расчета контактного сопротивления, а в табл. 2 — результаты расчета.

При ширине контакта $b = 10$ мкм расчет сопротивления одного контакта для первого вида пленок по формулам (4)—(6), (10) показывает, что $R_k/2 = 2,42$ Ом. Как видим, полученный результат несопоставим с полученным в [2] значением $R_k/2 = 1000$ Ом.

Анализ данных табл. 2 показывает, что при значениях угла клина травления менее 45° резко возрастают все составляющие контактного сопротивления. Вместе с тем, при $\alpha \leq 45^\circ$ «искривление» тока в контакте значительно меньше, чем при $\alpha = 90^\circ$. В результате, неравномерность тока в контакте уменьшается, следовательно, уменьшается и рассеиваемая мощность вблизи границы контакта и резистивного слоя, что повышает надежность контакта.

Таблица 1

Параметры пленок и размеры ТПР

Вариант	ρ , Ом/□	t_p , мкм	ρ_a , Ом/□	t_a , мкм	ρ_n , Ом/□	t_n , мкм	l, b , мкм
I (K20C-V-Al)	500	0,1	5	0,2	0,05	1	100
II (PC3710-V-Al)	1000	0,03	330	0,03	0,035	1,25	100

Таблица 2

Результаты расчета контактного сопротивления ТПР для двух вариантов пленок

α , °	R_p , Ом	R_a , Ом	R_n , Ом	$R_k/2$, Ом	R_k , Ом	δR_{kc} , %
K20C-V-Al						
7,5	2,142	0,1545	0,0076	2,30415	4,6083	0,9217
15	1,0524	0,08	0,0037	1,13617	2,2723	0,4545
30	0,4884	0,0462	0,0017	0,53636	1,0727	0,2145
45	0,282	0,04	0,001	0,323	0,646	0,1292
90	0,25	0,02	0,001	0,271	0,542	0,1722
PC3710-V-Al						
7,5	1,2852	0,765	0,0066	2,05686	4,1137	0,4114
15	0,6315	0,396	0,0033	1,03073	2,0615	0,2061
30	0,2931	0,2286	0,0015	0,52321	1,0464	0,1046
45	0,1692	0,198	0,0009	0,36808	0,7362	0,0736
90	0,15	0,099	0,0009	0,24988	0,4998	0,05

Примечание. δR_{kp} — отнорительная погрешность.

Как видно из табл. 2, основной вклад в сопротивление контакта вносит резистивный слой, а сопротивлением проводящего слоя (участок 4) можно пренебречь. Сопротивление адгезионного слоя в некоторых случаях сопоставимо с сопротивлением резистивного слоя, и в первом варианте оно значительно меньше, чем во втором, из-за большей толщины. Таким образом, температурную нестабильность сопротивления ТПР будет определять сопротивление адгезионного слоя, т. к. металлы имеют большой ТКС.

Проведем оценку влияния адгезионного слоя на температурную стабильность сопротивления ТПР, которая в значительной степени зависит от угла клина травления. Температурная нестабильность сопротивления δR_{at} определяется из следующих выражений:

— при $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$

$$\delta R_{at} = 2\alpha_a \Delta T R_a / R = 2\alpha_a \Delta T \rho_a t_a^2 / (\rho l t_p); \quad (11)$$

— при $0 < \alpha \leq 45^\circ$

$$\delta R_{at} = 4\alpha_a \Delta T \rho_a t_a^2 / (\rho l t_p \sin 2\alpha), \quad (12)$$

где α_a — ТКС адгезионного слоя;
 ΔT — температурный диапазон.

Результаты расчета нестабильности сопротивления ТПР при $\alpha_a = 0,00036$ 1/°C, $\Delta T = 80^\circ$ C приведены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, создание ТПР малой длины ($l \leq 100$ мкм) с температурной нестабильностью менее 0,001% при клине травления $\alpha \leq 45^\circ$ проблематично для первого варианта пленок и невозможно для второго. Таким образом, наличие адгезионного слоя ограничивает возможность создания стабильных сопротивлений ТПР с длиной менее 100 мкм. Исключение адгезионного слоя из структуры пленок ТПР это ограничение снимает, т. к. в этом случае стабиль-

Таблица 3

Температурная нестабильность сопротивления двух вариантов ТПР

$\alpha, ^\circ$	$\delta R_{\text{ат}}, \%$	
	I	II
7,5	0,0017804	0,0044065
15	0,0009216	0,00228096
30	0,0005321	0,0013169
45	0,0004608	0,00114048
90	0,00023	0,00057

ность сопротивления ТПР будет определяться только стабильностью сопротивления резистивного слоя. Следует отметить, что для более строгого расчета температурной нестабильности сопротивления ТПР по формулам (11), (12) необходимо использовать экспериментально полученные значения ТКС.

Для повышения стабильности сопротивления ТПР необходимо применение анизотропных или плазмохимических методов травления адгезионного слоя. Однако более радикальным методом является, как уже говорилось, исключение адгезионного слоя. Это возможно только при напылении резистивного и проводящего слоев в одном технологическом цикле. В этом случае будет наблюдаться плавный переход тока из резистивного в проводящий слой независимо от угла травления. Сопротивление одного контакта будет приблизительно равно сопротивлению участка 2 резистивного слоя, т. е. $R_k = 2R_p$, при этом сопротивление R_p рассчитывается по формуле (7).

Оценим величину относительной погрешности $\delta R_{\text{кс}}$ при $\alpha = 90^\circ$, которую вносит резистивный слой как основная составляющая контактного сопротивления, по формуле

$$\delta R_{\text{кс}} = R_k / R = 2R_p / R = 2mt_p / l. \quad (13)$$

Отсюда следует, что относительная погрешность прямо пропорциональна толщине резистивного слоя и величине m , которая, в свою очередь, зависит от угла клина травления (при уменьшении угла m возрастает), и обратно пропорциональна длине ТПР. Данная погрешность является систематической. При значениях длины ТПР, сопоставимых с толщиной резистивного слоя, величина $\delta R_{\text{кс}}$ резко возрастает. Эту погрешность имеет смысл учитывать, когда она превышает 1%, т. е. при проектировании ТПР длиной $l \leq 10$ мкм и, как следует из (13), при $m = 0,5$ и $t_p = 0,1$.

Случайная погрешность $\delta R_{\text{к}}$, вносимая контактным сопротивлением, будет определяться, в основном, случайной погрешностью длины ТПР δl . Ее можно рассчитать по формуле

$$\delta R_{\text{к}} = 2mt_p \delta l / l, \quad (14)$$

откуда следует, что если $l < 10t_p$, а это практически всегда выполняется, то эту погрешность можно не учитывать при проектировании ТПР.

Формулы (13), (14) позволяют объяснить трудность экспериментального измерения контактного сопротивления. Для того, чтобы сопротивление ТПР было чувствительно к величине контактного сопротивления,

надо, согласно (13), уменьшать длину ТПР. Однако при этом резко возрастает случайная погрешность длины ТПР, которая определяется технологией ее формирования. Например, при фотолитографии случайная погрешность длины ТПР может достигать единиц микрометров [6]. Поэтому именно эта погрешность будет определять разброс значений сопротивления изготовленных ТПР. Чтобы экспериментальное измерение контактного сопротивления было возможным с позиции метрологии, необходимо выполнение условия $\delta R_{\text{к}} \geq 3\delta l$. Это условие выполнимо при $l \leq 2mt_p / 3$, т. е. если $m = 0,564$, $t_p = 100$ нм, то $l \leq 37$ нм. Полученное соотношение означает, что для экспериментального измерения контактного сопротивления необходимо формировать длину ТПР не более 33 нм с погрешностью не более 10%, т. е. 33 ± 4 нм. Такие размеры и точность формирования длины ТПР не могут обеспечить даже современные нанотехнологии.

Выводы

1. Полученные физико-математические модели контактного сопротивления ТПР при произвольном клине травления пленок позволили сделать вывод о том, что основной вклад в величину контактного сопротивления вносят сопротивления резистивной и адгезионной пленок, входящих в конструкцию контакта. Проводящий слой при рассмотренных значениях толщины пленок практически не оказывает влияние на контактное сопротивление.

2. Для повышения стабильности сопротивления ТПР необходимо использовать анизотропные методы травления адгезионного слоя или исключить адгезионный слой из конструкции ТПР, применяя соответствующие методы напыления пленок.

3. Резистивный слой как основная составляющая контактного сопротивления вносит систематическую погрешность, которую следует учитывать при проектировании резисторов малой длины ($l < 10$ мкм).

4. Так как на сопротивление ТПР значительно сильнее влияет погрешность формирования длины, чем погрешность измерения контактного сопротивления, точное измерение контактного сопротивления возможно только при небольшой погрешности (не более 4 нм) формирования либо измерения длины ТПР.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лугин А. Н., Оземша М. М. Электрическое сопротивление контакта тонкопленочных резисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 6. — С. 15—20.
2. Гильмутдинов А. Х., Ермолаев Ю. П. Модели оценки пленочных контактов и резисторов с распределенными параметрами. — Казань: ЗАО «Новое знание», 2005.
3. Гимпельсон В. Д., Радионов Ю. А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники. — М.: Машиностроение, 1976.
4. Потехин В. А., Спирин В. Г., Шурыгин Б. Д. Расчет функции числа квадратов углового участка тонкопленочного резистора // В сб. «Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении». — Н. Новгород – Арзамас: НГТУ – АФ НГТУ, 2003.
5. Спирин В. Г. Оценка влияния сопротивления электродов на погрешность тонкопленочного резистора // Вестник МВВО. Сер. Высокие технологии в радиоэлектронике, информатике и связи (Н. Новгород). — 2003. — Вып. 1. — С. 11—14.
6. Спирин В. Г. Оценка производственных погрешностей тонкопленочных элементов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 4. — С. 50—53.