

К. т. н. А. Н. ЛУГИН, М. М. ОЗЕМША

Россия, г. Пенза, НИИ электронно-механических приборов
E-mail: niiemp@penza.com

Дата поступления в редакцию
10.04—21.08 2006 г.

Оппонент к. т. н. В. Г. СПИРИН
(АПИ, фил. НГТУ, г. Арзамас)

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Предложена физическая модель и эквивалентная электрическая схема определения электрического сопротивления контакта и его составляющих, распределения тока и потенциала по слоям.

Проблема исследования характеристик тонкопленочного контакта практически всегда актуальна в микроэлектронике, одним из элементов которой являются тонкопленочные резисторы (ТПР) [1—8]. Публикации последних лет [9—11] свидетельствуют о ее значимости и в настоящий период. В то же время имеющиеся теоретические исследования пока не дают полного ответа по количественной оценке электрических характеристик составляющих контактного узла (распределения токов, потенциалов, сопротивления с точным указанием наиболее нагруженных, а значит наиболее нестабильных и ненадежных мест), а их рекомендации не позволяют в достаточной мере в целом произвести оценку конструкции и технологии при проектировании особостабильных тонкопленочных резисторов.

Такое положение объясняется тем, что сопротивление контакта, которое является составляющей полного сопротивления ТПР, определяется в настоящее время в основном сопротивлением металлизации и, реже, сопротивлением переходного слоя, которые имеют температурную и временную стабильность много ниже аналогичных характеристик материала резистивного слоя. Так, в работе [11] сопротивление контакта оценивается величиной сопротивления металлизации на основе системы "ванадий—алюминий", равной 0,39—2,0 Ом. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) или температурная нестабильность этих металлов достигает величины $(3400...4700) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ и ограничивает получение низких значений температурного коэффициента сопротивления ТПР в целом.

В то же время сопротивление контакта состоит из сопротивления металлизации, переходного слоя и резистивного слоя, находящихся под металлизацией. Четкого понимания размеров вклада каждой составляющей в сопротивление контакта, а также методов их определения, в настоящее время нет.

В основном все известные теоретические исследования построены на математических расчетах и анализе плоских моделей, представленных в работах [1, 3], а затем в работе [5, с. 367—373]. По-

добный подход к расчету изложен в работах [2, 12, 13]. В них не приводится информация о величине составляющих контактного сопротивления — сопротивления тонких пленок, образующих контакт, сопротивления переходного слоя, а при наличии подслоя — и его сопротивления.

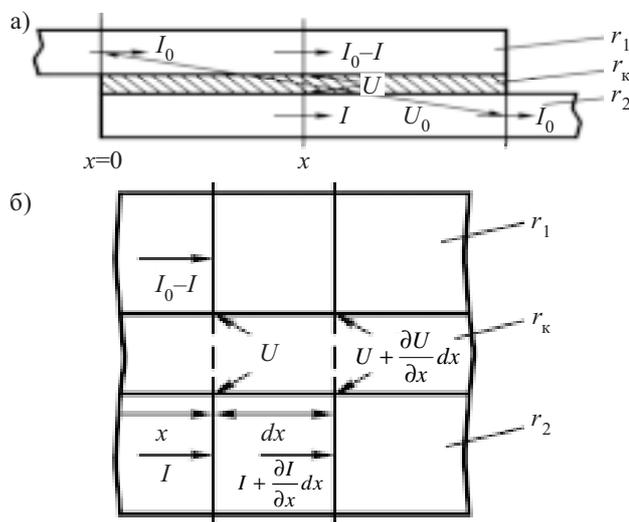


Рис. 1. Одномерная расчетная модель контактного узла [1]: а — условный разрез контактного узла; б — отрезок контактного узла; I_0 — ток на входе (выходе) контактного узла; U_0 — падение напряжения на контактном узле; U — текущее значение падения напряжения на переходном слое; r_1, r_2 — погонные сопротивления слоя металлизации и резистивного слоя; r_k — сопротивление переходного слоя

Принятые упрощенные физико-математические одномерные модели позволяют проводить исследование только в одном измерении — по длине контакта (рис. 1). Распределение токов и потенциалов по толщине слоев и, тем более, по их ширине не анализируется. Моделирование с применением эквивалентных электрических схем (рис. 2) также одномерно, упрощенно и в неполной мере отражает происходящие процессы распределения токов и потенциалов в реальном объемном контактном узле.

Необходимо отметить, что по этой же причине и использование в упомянутых моделях и в расчетах удельного электрического сопротивления в виде удельного поверхностного и погонного сопротивления тонких пленок, погонной проводимости переходного слоя для тока в направлении, перпендикулярном этому слою, может отвечать только тем упро-

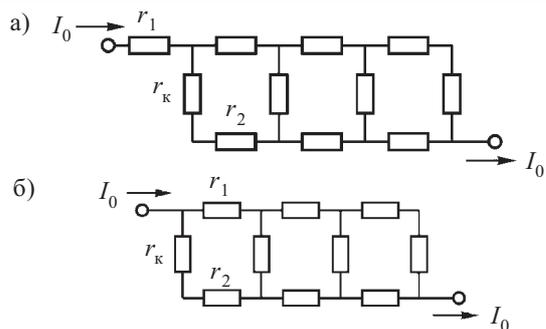


Рис. 2. Модель контактного узла в виде эквивалентной электрической схемы [3]:
а — Т-образная схема; б — П-образная схема

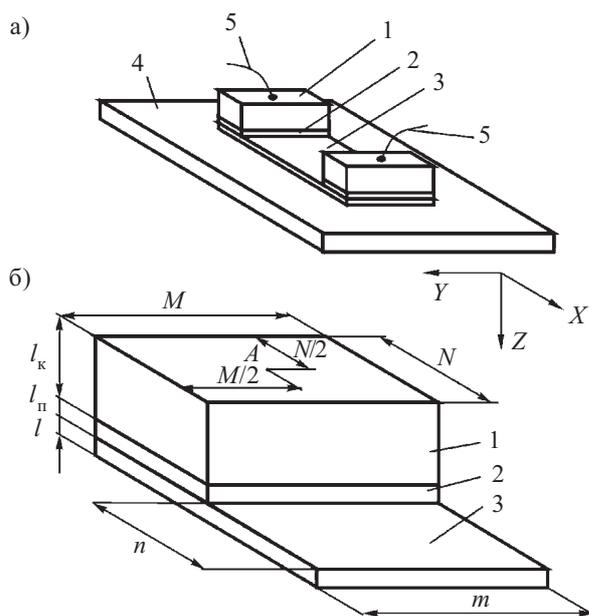


Рис. 3. Схематичное изображение тонкопленочного резистора (а) и упрощенной объемной конструкции контактного узла тонкопленочного резистора (б):
1 — металлизация контакта; 2 — подслой; 3 — резистивный слой; 4 — диэлектрическая подложка; 5 — соединительные проводники; M, N, l_k, l_p, l — линейные размеры контактного узла; m, n — линейные размеры участка резистивной пленки, примыкающей к контакту; A — точка присоединения соединительного проводника и вхождения тока

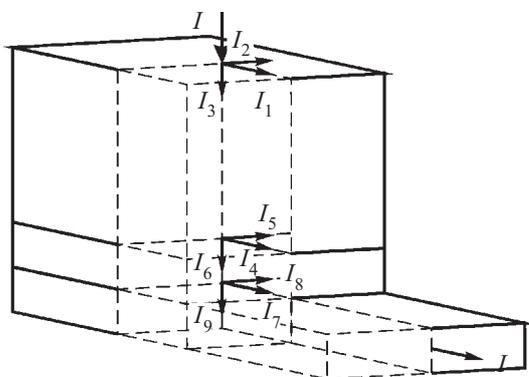


Рис. 4. Схематичное представление распределения тока в контактном узле:
 I — входящий (выходящий) ток; $I_1 \dots I_9$ — составляющие тока по осям X, Y, Z в слоях контактного узла

ценным моделям, которые исследовались. В реальном же контакте в общем случае направление тока имеет пространственный характер, и задача должна решаться с учетом трех взаимноперпендикулярных направлений распространения тока.

Необходимость создания ТПР с допуском отклонением и нестабильностью сопротивления не более $\pm 0,001\%$ и ТКС $\pm 1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ выдвигает задачу углубленного изучения указанных проблем, и прежде всего проблемы оценки величины составляющих контактного сопротивления и распределения токов и потенциалов в контакте.

Для решения поставленной задачи были рассмотрены схематичные изображения тонкопленочного резистора и объемной конструкции контактного узла, характерные для большинства ТПР и многих микро-схем (рис. 3). Резистор состоит из металлизации 1, подслоя 2, резистивного слоя 3 с величиной удельного объемного сопротивления материалов соответственно ρ_k, ρ_p, ρ , диэлектрической подложки 4, соединительных проводников 5. Резистивный слой, находящийся под металлизацией и подслоем, является составной частью контактного узла (контакта). В общем случае подслоя можно идентифицировать и как адгезионный, и как барьерный, имеющие различное назначение, а также как переходной, образующийся между металлизацией и резистивным слоем.

Для проведения дальнейшего расчета и анализа представим распределение тока в контактном узле в виде рис. 4.

Поскольку применить методику расчета, изложенную в работе [1], было достаточно сложно, для анализа параметров контактного узла использовалась методика, подобная изложенной в работе [14]. Для этого весь объем конструкции по осям X, Y, Z был разделен на кубики, величина ребра l_p которых кратна минимальному размеру толщин слоев l_k, l_p, l или (при $l < l_p < l_k$, что характерно для ТПР) величине $l_p = \frac{l}{p}$, где $p=2, 3 \dots$

Далее каждый из кубиков был представлен в виде резистора с сопротивлением, эквивалентным удельному объемному сопротивлению слоя. В результате была получена объемная модель в виде эквивалентной электрической схемы замещения контактного узла (рис. 5).

Для расчета сопротивления, токов и потенциалов отдельных участков контактного узла, так же, как и в работе [14], использовался метод узловых потенциалов [15], а для решения полученных и представленных в матричной форме уравнений — метод Гаусса [16].

Расчет параметров контактного узла проводился с учетом толщин металлизации и резистивного слоя, близких к реальным, — l_k до 2 мкм, l до 0,1 мкм (1000 Å). Толщина подслоя принималась равной $2 \frac{l}{p}$ от толщины резистивного слоя.

Исходную величину удельного поверхностного сопротивления материала принимали $\rho_s = 500 \text{ Ом}/\square$; $\rho_{s_1} = 5 \text{ Ом}/\square$ и $\rho_{s_2} = 0,05 \text{ Ом}/\square$ соответственно для резистивного слоя, подслоя и металлизации. Это также

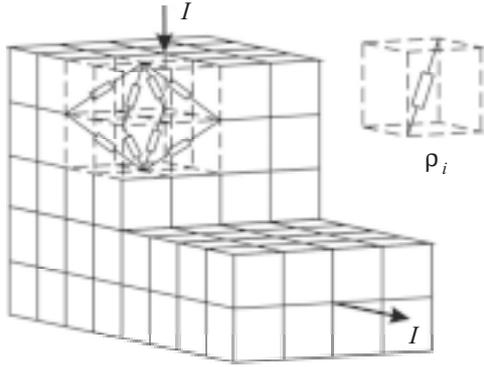


Рис. 5. Объемная модель в виде эквивалентной электрической схемы замещения контактного узла: ρ_i — объемное удельное сопротивление i -го слоя контактного узла; I — входящий (выходящий) ток

соответствует величинам, наиболее часто используемым в производстве прецизионных ТПР из керамики К20С, подслоя ванадия и алюминиевой металлизации. Удельное объемное сопротивление слоев определялось в соответствии с выражением $\rho_{S_i} = \rho_i / l_i$ [17, с. 56], где ρ_{S_i} , ρ_i , l_i — удельное поверхностное и удельное объемное сопротивление и толщина слоев, соответственно. То есть $\rho_k = \rho_{S_k} l_k$, $\rho_n = \rho_{S_n} l_n$, $\rho = \rho_S l$ или, с учетом принятой модели,

$$\rho_k = \rho_{S_k} \frac{l_k}{l} p l_p; \quad \rho_n = \rho_{S_n} \frac{l_n}{l} p l_p; \quad \rho = \rho_S p l_p.$$

В этом случае соотношение объемного сопротивления для каждого слоя в виде ρ_i / ρ составит:

1 — для металлизации;

$$\frac{\rho_n}{\rho_k} = \frac{\rho_{S_n} l_n}{\rho_{S_k} l_k} \quad \text{— для подслоя;}$$

$$\frac{\rho}{\rho_k} = \frac{\rho_S l}{\rho_{S_k} l_k} \quad \text{— для резистивного слоя.}$$

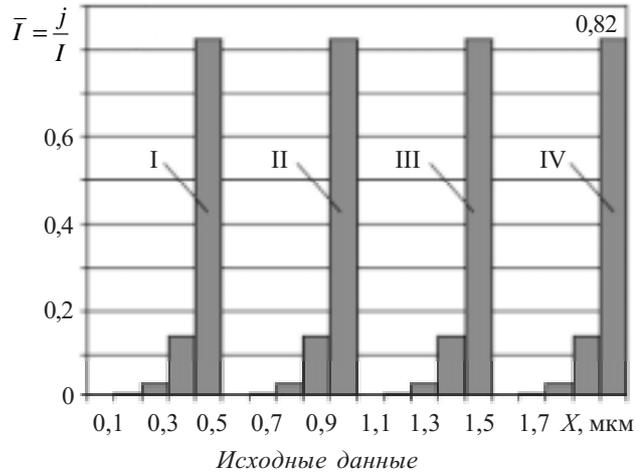
Расчет был проведен для различных величин геометрических размеров контактного узла и различных значений удельного сопротивления подслоя в пределах от удельного сопротивления металлизации до удельного сопротивления резистивного слоя. Ограничения, накладываемые в расчете, определяются возможностью применяемой ПЭВМ. В данной работе был проведен расчет контактов с ограничением по длине до 7 мкм и по ширине до 2 мкм. Вход тока в контакт располагался в центре верхней поверхности, выход — по сечению резистивного слоя вне контакта.

Соотношение линейных размеров и удельного объемного сопротивления при расчете для каждого слоя показано на нижеприведенных рисунках в виде таблиц

$$\frac{N}{l} p, \quad \frac{M}{l} p, \quad \frac{l_i}{l} p,$$

где $l_i = l_k, l_n, l$; $\frac{\rho_i}{\rho} = 1, \frac{\rho_n}{\rho_k}, \frac{\rho}{\rho_k}$ или $\frac{\rho_i}{\rho} = 1, \frac{\rho_{S_n} l_n}{\rho_{S_k} l_k}, \frac{\rho_S l}{\rho_{S_k} l_k}$ — для металлизации, подслоя и резистивного слоя, соответственно; C — изменяемое соотношение.

Некоторые из основных полученных данных расчета представлены на рис. 6—9.



Номер слоя (см. рис. 3, а)	$\frac{N}{l} p$	$\frac{M}{l} p$	$\frac{l_i}{l} p$	$\frac{n}{l} p$	$\frac{\rho_i}{\rho_k}$
1	C	20	20	—	1
2	C	20	2	—	10
3	C	20	2	4	1000

$$M=1,0 \text{ мкм}; p=2; C = \frac{N}{l} p$$

Рис. 6. Распределение тока j по длине перехода из подслоя в резистивный слой в зависимости от длины N контакта: I — $N=0,5$ мкм; II — $N=1$ мкм; III — $N=1,5$ мкм; IV — $N=2,0$ мкм

На рис. 6 приведены графики распределения тока j по длине перехода из подслоя в резистивный слой в зависимости от длины контактной площадки N при постоянных остальных размерах и удельном сопротивлении слоев. Как можно заключить, 82% величины тока переходит в резистивный слой на длине конечного участка контакта, равной 0,1 мкм, независимо от длины контакта. Применительно к наиболее распространенной длине контактной площадки в 100 мкм это составит 10^{-3} или 10^{-3} от площади 10^4 мкм² при размерах контакта 100×100 мкм. Это очень близко к экспериментальным данным (10^{-6} — 10^{-7} от площади 60 мм²), приведенным в публикации [4], при размерах контакта 6×10 мм.

На рис. 7 приведены графики распределения тока j по длине перехода из подслоя в резистивный слой в зависимости от ширины контакта M , толщины металлизации l_k и удельного сопротивления подслоя ρ_n . Как можно отметить, 82% величины тока переходит в резистивный слой на длине конечного участка контакта, также равной 0,1 мкм, независимо от изменяемых параметров M, l_k, ρ_n .

На рис. 8 приведен график изменения тока j на длине конечного участка контакта в 0,1 мкм в зависимости от ширины контакта.

На рис. 9 показан график изменения тока j по толщине резистивного слоя l в сечении, перпендикулярном поверхности этого слоя, на границе окончания контакта. Как видно, входящий в резистивный слой ток неравномерен по толщине этого слоя — в верхней

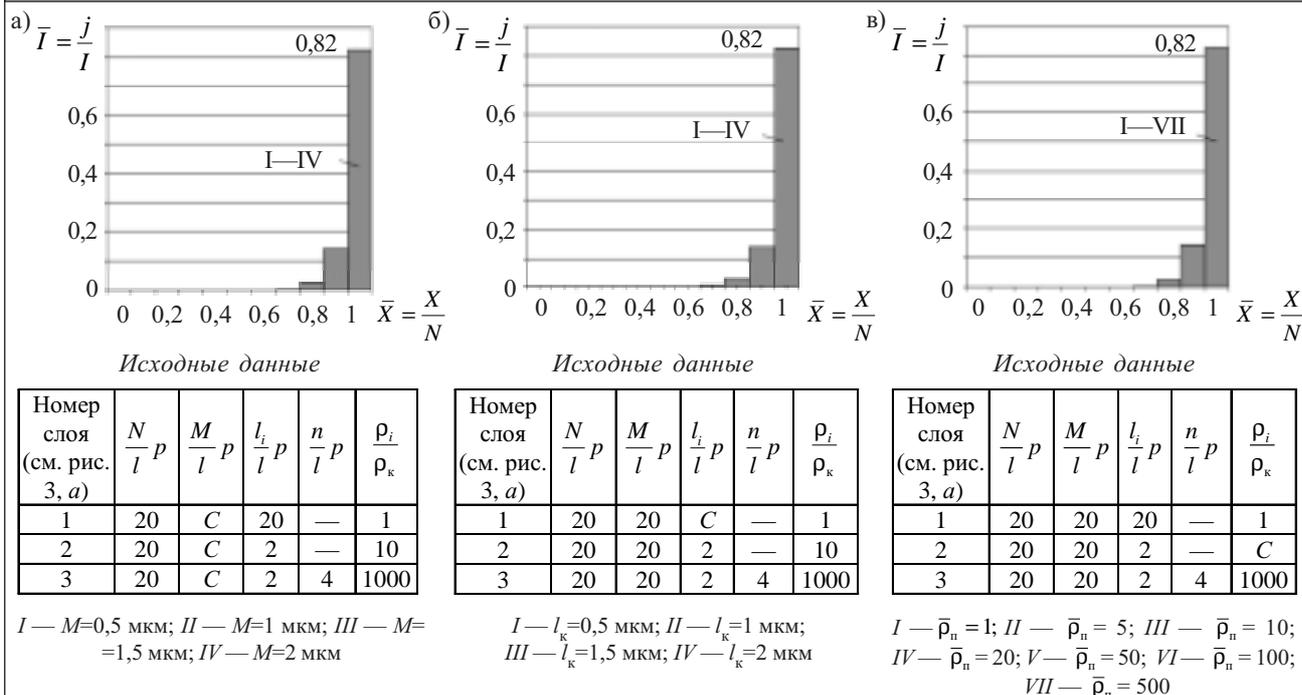
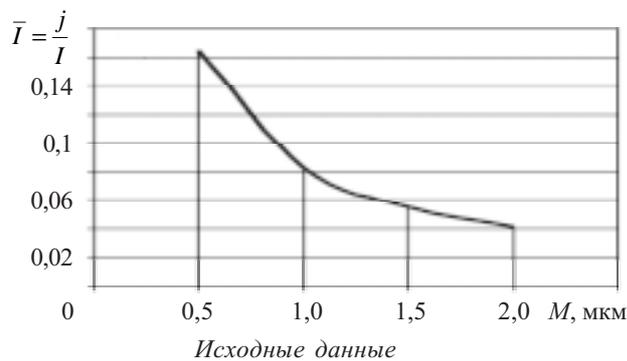


Рис. 7. Распределение тока j по длине перехода из подслоя в резистивный слой в зависимости от ширины контакта M (а), толщины металлизации l_k (б) и удельного объемного сопротивления подслоя ρ_n (в):

$N=1,0$ мкм; $p=2$; X — текущий размер длины; \bar{X} — относительный размер длины; $C = \bar{\rho}_n = \frac{\rho_n}{\rho_k}$



Номер слоя (см. рис. 3, а)	$\frac{N}{l} p$	$\frac{M}{l} p$	$\frac{l_i}{l} p$	$\frac{n}{l} p$	$\frac{\rho_i}{\rho_k}$
1	20	C	20	—	1
2	20	C	2	—	10
3	20	C	2	4	1000

$C = \frac{M}{l} p$; $p=2$

Рис. 8. Изменение тока j на длине и по ширине конечного участка контакта в 0,1 мкм при его переходе в резистивный слой в зависимости от ширины контакта

десятой части ток составляет 0,24 общего тока через весь слой, что более чем в 3 раза больше тока нижней десятой части.

Таким образом, наиболее нагруженным участком резистора по мощности рассеяния и плотности тока в контакте будет зона перехода тока в резистивный слой, ограниченная величиной 0,1 мкм по длине перехода на конечном участке контакта и около 0,2 от толщины резистивного слоя по глубине в сечении по гра-

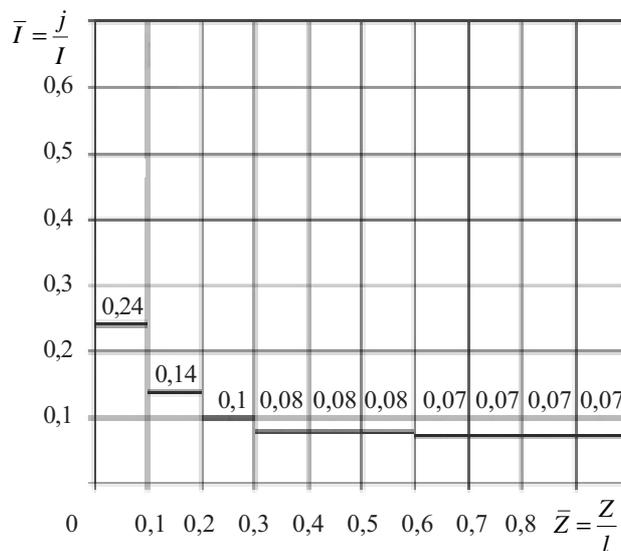


Рис. 9. Распределение тока j по участкам толщины резистивного слоя в сечении на границе окончания контакта. Здесь Z — текущий размер толщины; \bar{Z} — относительный размер толщины; $p=20$

нице контакта. При этом на данном участке удельная мощность рассеяния увеличивается практически на порядок.

На рис. 10 представлено в сокращенном виде распределение потенциала по крайним верхним и нижним горизонтальным расчетным слоям металлизации, подслоя и резистивного слоя для исходных данных, указанных в таблице при $I=1$ и $\rho_s=500$ Ом/. На рис. 11 для тех же исходных данных представлено

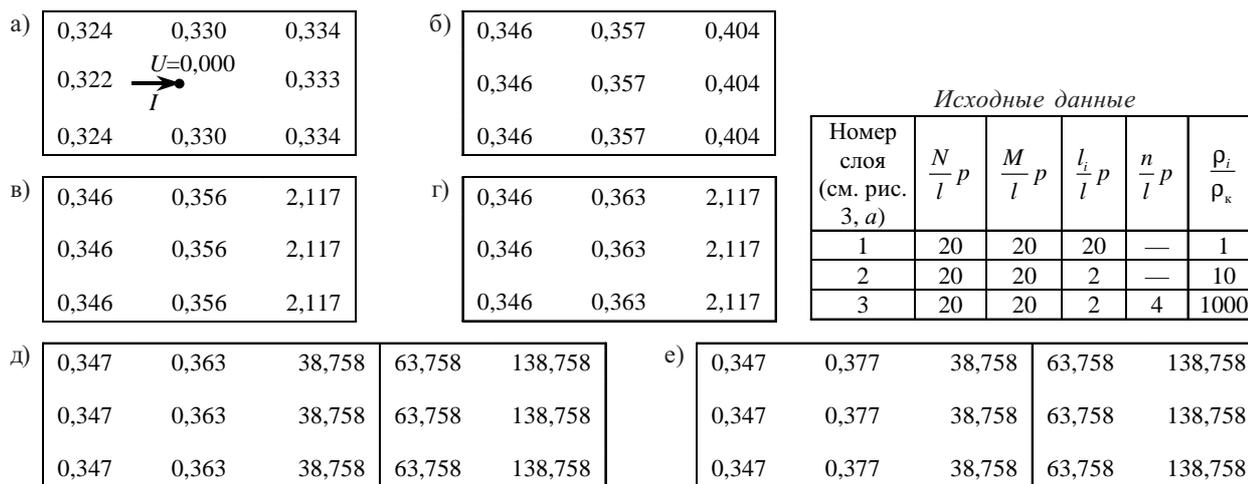


Рис. 10. Распределение потенциала по крайним верхним и нижним горизонтальным расчетным слоям металлизации, подслоя и резистивного слоя:
а, в, д — верхние слои; б, г, е — нижние слои

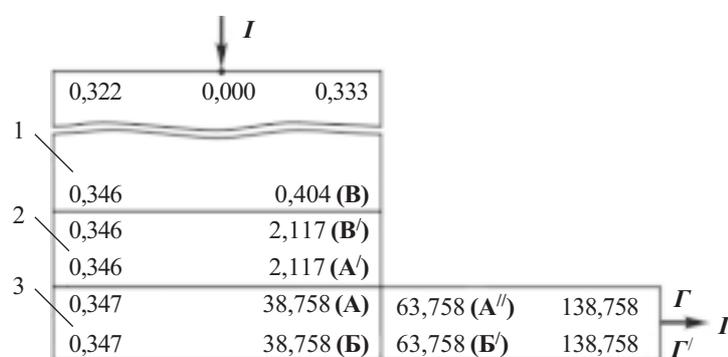


Рис. 11. Распределение потенциала по слоям контакта в вертикальном центральном сечении. Значения потенциалов даны для крайних верхних и нижних горизонтальных расчетных слоев: 1 — металлизация; 2 — подслой; 3 — резистивный слой; А, А', А'', Б, Б', В, В' — близлежащие точки слоев в эквивалентной электрической схеме; Γ , Γ' — точки выхода тока из резистивного слоя в эквивалентной электрической схеме

распределение потенциала по слоям контакта (металлизация—подслой—резистивный слой) в вертикальном центральном сечении.

Из представленных рис. 10 и 11 видно, что электрический потенциал в различных точках объема контакта различен, и поэтому точное измерение или определение разности потенциалов по экспериментальным данным между слоями, по крайней мере, достаточно сложно, так же, как и определение электрического сопротивления, вносимого каждым слоем в отдельности.

Поэтому для оценки составляющих электрического сопротивления предлагается использовать сведения о величине потенциала в сечении AB на границе контакта (которая в какой-то степени эквивалентна току j в этом сечении, равному входному току) и расчетное значение потенциала точек B и A' для каждого слоя. Тогда электрическое сопротивление всего контакта между точкой входа I и сечением AB , как это сделано в работе [1] при определении эффективного сопротивления, можно найти из выражения

$$R = \frac{U_A}{I},$$

где R — общее электрическое сопротивление контакта;
 U_A — разность потенциалов между точкой A и входом тока I в контакт.

Оценку сопротивления составляющих электрического сопротивления по слоям ориентировочно мож-

но произвести по соотношению соответствующих слоев потенциалов точек A' и B относительно точки входа и рассчитанной ранее величины сопротивления контакта.

На рис. 12 представлены результаты расчета сопротивления участка резистивного слоя, ограниченного контактом, и участков металлизации и подслоя, вносящих дестабилизирующий фактор в параметры резистора (поскольку материал резистивного слоя имеет временную и температурную стабильность много лучше, чем материал металлизации и подслоя).

Общее сопротивление металлизации и подслоя $R_{кп}$ в рассматриваемом случае, т. е. при $l=0,1$ мкм и $M=N=l_k=1$ мкм, равно около 2,1 Ом и остается практически постоянным в широком диапазоне удельного сопротивления (5—500 Ом/) резистивного слоя. Практически постоянно и соотношение сопротивления, которое вносит резистивный слой под контактом R , и удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя, которое составляет для рассмотренного случая 0,078.

Если перейти к контактной площадке с размерами $N=M=100$ мкм, то сопротивление металлизации и подслоя составит 0,021 Ом, а сопротивление резистивного участка контакта составит 0,39 Ом, что ограничивает создание прецизионных ТПР с малым значением электрического сопротивления при высоком удельном поверхностном сопротивлении резистивного слоя. В то же время эти расчеты показывают, что

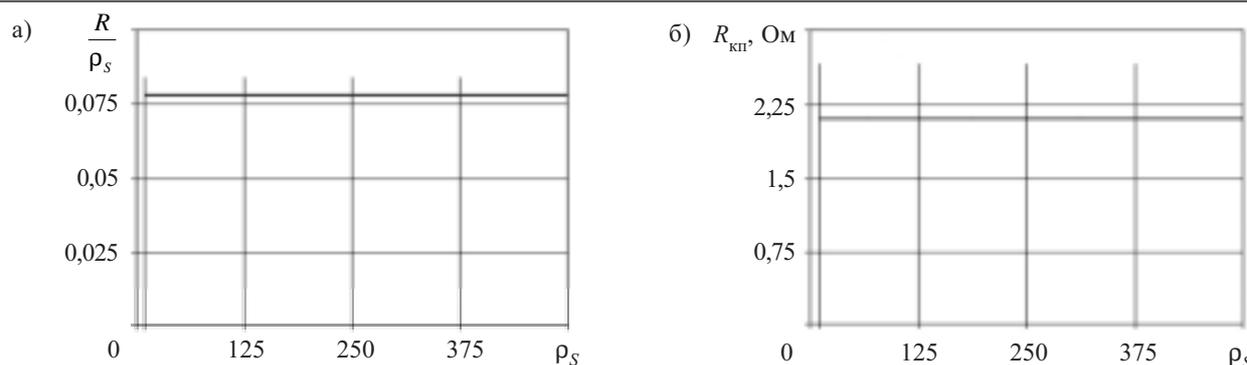


Рис. 12. Сопротивление резистивного участка (а) и общее сопротивление металлизации и подслоя (б) контакта в зависимости от удельного сопротивления резистивного слоя

при $\rho_s=500$ Ом/ сопротивление дестабилизирующих участков составляет менее 5% полного сопротивления контактного узла.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

Предложенная физическая модель и эквивалентная электрическая схема контакта тонкопленочных резисторов (ТПР) позволяют:

— определить распределение тока и потенциала по объемной конструкции контакта ТПР;

— произвести оценку общего сопротивления контакта и отдельных участков, составляющих контакт, — резистивного слоя, металлизации, подслоя;

— показать, что распределение тока по толщине / резистивной пленки неравномерно; расчетный ток в приграничной зоне контакта в верхнем слое резистивной пленки многократно (для приведенных расчетов более чем в 2,4 раза на длине 0,01 мкм) превышает значение для равномерного распределения тока, что может сказаться на изменении стабильности этой пленки из-за локального резкого нагрева от повышенной мощности рассеяния;

— на этапе проектирования получить достоверные данные об электрических характеристиках составляющих тонкопленочного контакта (сопротивлении, распределении тока и потенциала) и использовать их при проектировании ТПР или других микроэлектронных устройств.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кресин О. М., Харинский А. Л. Математический анализ тонкопленочного контакта // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Детали и компоненты аппаратуры.— 1964.— Вып. 5.— С. 15—21.
2. Ермолаев Ю. П., Каримова Ф. Г. Исследование переходных контактов между проводящими и резистивными пленками // Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности.— 1965.— № 4.— С. 15—17.

3. Кресин О. М., Рогинский И. М., Харинский А. Л. Экспериментальное исследование пленочного контакта (на моделях) // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника.— 1967.— Вып. 5.— С. 96—100.

4. Кайнов С. В., Алексеева Э. А. Исследование условий получения надежного пленочного контакта // Электронная техника. Сер. Радиокomпоненты.— 1967.— Вып. 5.— С. 120—124.

5. Харинский А. Л. Основы конструирования элементов радиоаппаратуры.— Л.: Энергия, 1971.

6. Lohetal W. M. Modeling and measurement of contact resistances // IEEE. Transactions on Electron Devices.— 1987.— Vol. ED-34, N 3.— P. 512—524.

7. Мартышов К. И., Зайцев Ю. В., Тихонов А. И. Методы расчёта резисторов.— М.: Энергия, 1971.

8. Задде В. В., Зайцева А. К. Измерение переходного сопротивления контакта металл—полупроводник // Приборы и техника эксперимента.— 1969.— № 4.— С. 191—192.

9. А. с. 1538703 России. Способ определения переходного сопротивления контакта к тонкопленочным резисторам с электродами / Г. Ф. Жуков, В. К. Смолин.— 1995.— Бюл. № 34.

10. Стовповой М. А. Особенности топологического расчета планарных полупроводниковых резисторов // Петербургский журнал электроники.— 2001.— № 1.— С. 52—53.

11. Спирин В. Г. Оценка влияния сопротивления электродов на погрешность тонкопленочного резистора // Вестник МВВО. Сер. Высокие технологии в радиоэлектронике, информатике, связи.— 2003.— Вып. 1.— С. 11—14.

12. Ермолаев Ю. П. Переходное сопротивление фигурных контактов между проводящими и резистивными пленками // Изв. вузов. Радиотехника.— 1966.— Т. 9, № 4.— С. 553—557.

13. Смирнов В. И., Матта Ф. Ю. Теория конструкций контактов в электронной аппаратуре.— М.: Сов. радио, 1974.

14. Лугин А. Н., Оземша М. М. Тонкопленочные резисторы с функциональным распределением удельного поверхностного сопротивления // Изв. вузов. Электроника.— 2002.— № 1.— С. 44—48.

15. Сигорский В. П. Анализ электронных схем.— Киев: Гос. изд-во технич. лит., 1964.

16. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В. Вычислительные методы для инженеров.— М.: Высшая школа, 1994.

17. Недорезов В. Г. Керметные толстопленочные резистивные материалы.— Пенза: ПГУ, 2002.