

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.

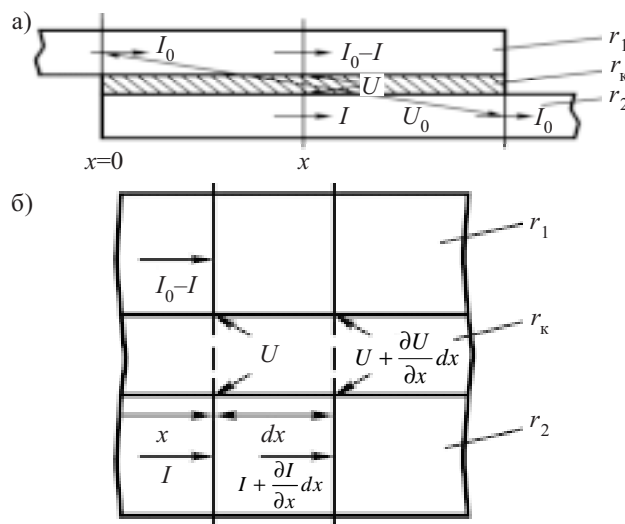


Рис. 1. Одномерная расчетная модель контактного узла [1]: а — условный разрез контактного узла; б — отрезок контактного узла;  $I_0$  — ток на входе (выходе) контактного узла;  $U_0$  — падение напряжения на контактном узле;  $U$  — текущее значение падения напряжения на переходном слое;  $r_1, r_2$  — 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-

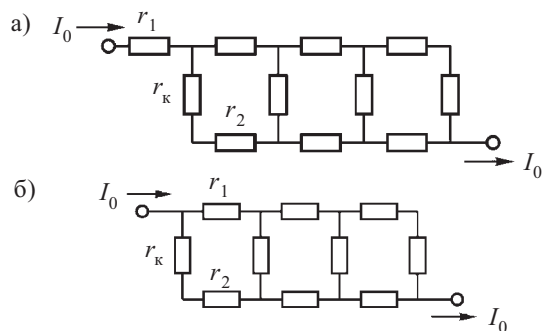


Рис. 2. Модель контактного узла в виде эквивалентной электрической схемы [3]:  
а — Т-образная схема; б — П-образная схема

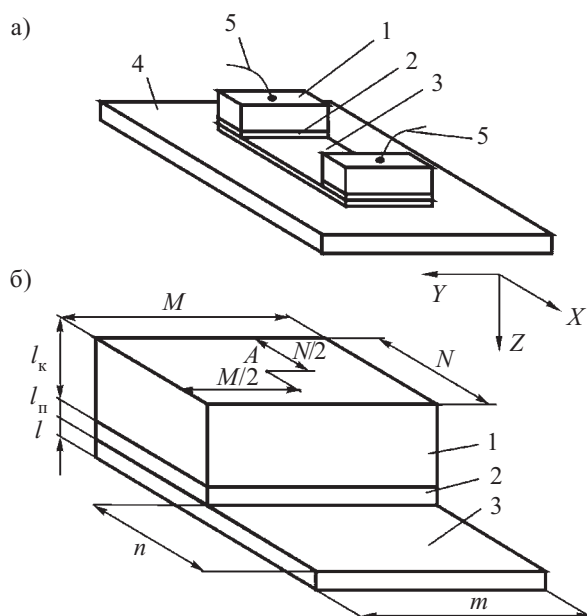


Рис. 3. Схематичное изображение тонкопленочного резистора (а) и упрощенной объемной конструкции контактного узла тонкопленочного резистора (б):  
1 — металлизация контакта; 2 — подслоя; 3 — резистивный слой; 4 — диэлектрическая подложка; 5 — соединительные проводники;  $M, N, l_k, l_p, l$  — линейные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

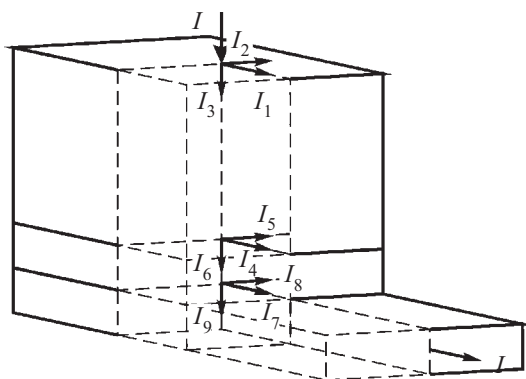


Рис. 4. Схематичное представление распределения тока в контактном узле:  
 $I$  — входящий (выходящий) ток;  $I_1 \dots I_9$  — составляющие тока по осям  $X, Y, Z$  в слоях контактного узла

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  $\rho_k, \rho_p, \rho$ , 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  $\rho_s = 500 \text{ Ом}/\square$ ;  $\rho_{s_p} = 5 \text{ Ом}/\square$  и  $\rho_{s_k} = 0,05 \text{ Ом}/\square$  соответственно для резистивного слоя, подслоя и металлизации. Это также

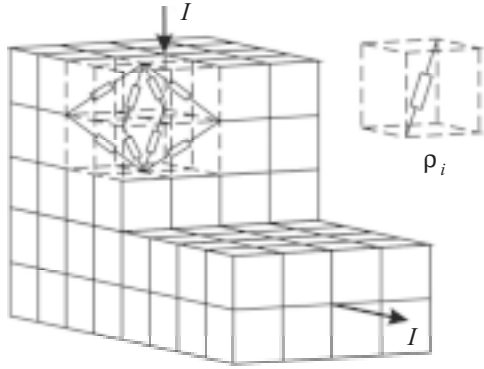


Рис. 5. Объемная модель в виде эквивалентной электрической схемы замещения контактного узла:  $\rho_i$  — объемное удельное сопротивление  $i$ -го слоя контактного узла;  $I$  — входящий (выходящий) ток

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  $\rho_{S_i}$ ,  $\rho_i$ ,  $l_i$  — 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  $\rho_i / \rho$  составит:

1 — для металлизации;

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

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

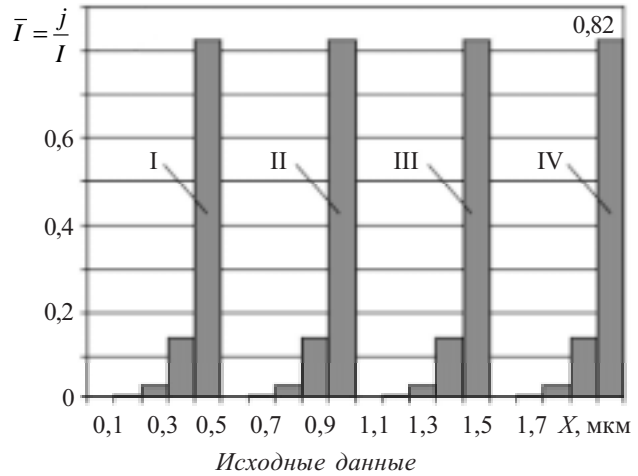
Расчет был проведен для различных величин геометрических размеров контактного узла и различных значений удельного сопротивления подслоя в пределах от удельного сопротивления металлизации до удельного сопротивления резистивного слоя. Ограничения, накладываемые в расчете, определяются возможностью применяемой 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

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

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  $10^4$  мкм<sup>2</sup> при размерах контакта  $100 \times 100$  мкм. Это очень близко к экспериментальным данным ( $10^{-6}$ — $10^{-7}$  от площади 60 мм<sup>2</sup>), приведенным в публикации [4], при размерах контакта  $6 \times 10$  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  $\rho_n$ . Как можно отметить, 82% величины тока переходит в резистивный слой на длине конечного участка контакта, также равной 0,1 мкм, независимо от изменяемых параметров  $M, l_k, \rho_n$ .

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

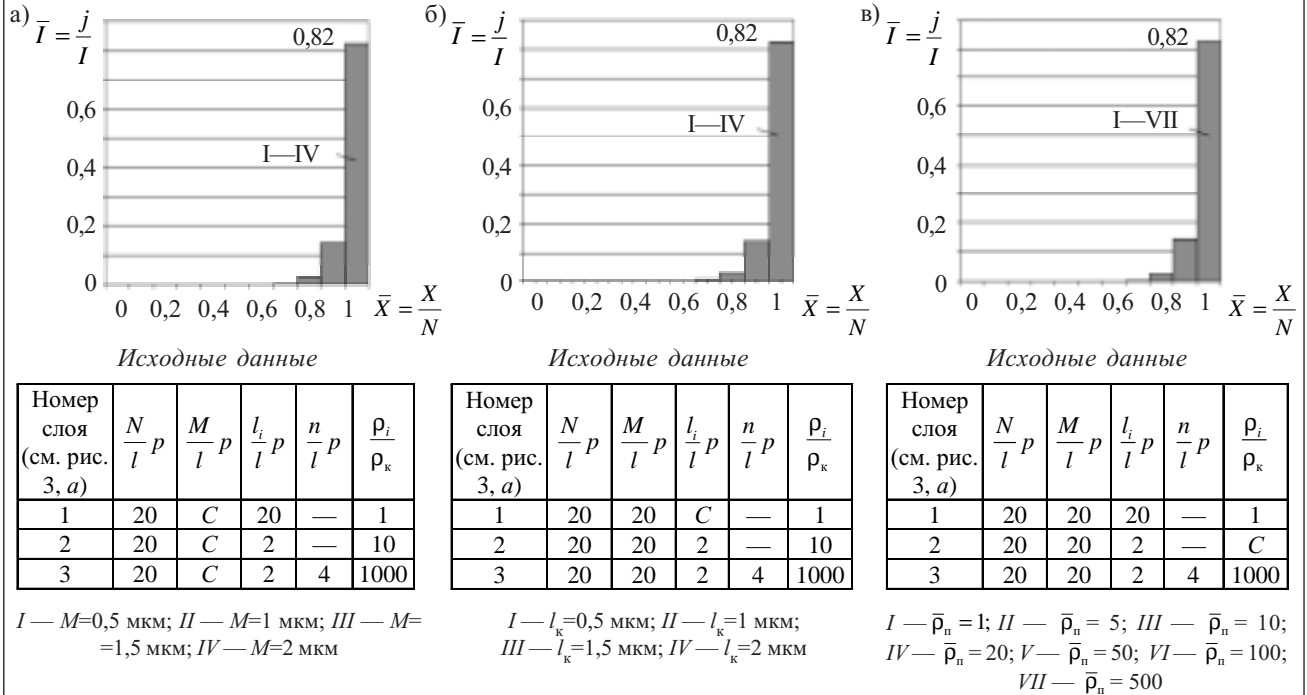


Рис. 7. Распределение тока  $j$  по длине перехода из подслоя в резистивный слой в зависимости от ширины контакта  $M$  (а), толщины металлизации  $l_k$  (б) и удельного объемного сопротивления подслоя  $\rho_n$  (в):  $N=1,0$  мкм;  $p=2$ ;  $X$  — текущий размер длины;  $\bar{X}$  — относительный размер длины;  $C = \bar{\rho}_n = \frac{\rho_n}{\rho_k}$

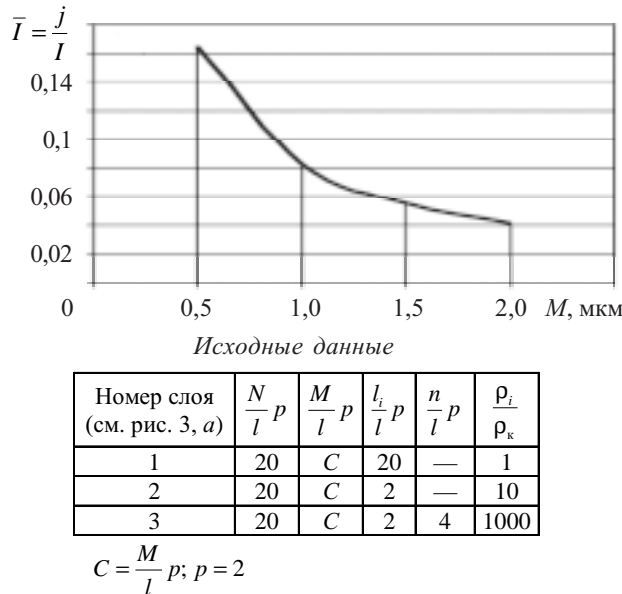


Рис. 8. Изменение тока  $j$  на длине и по ширине конечного участка контакта в 0,1 мкм при его переходе в резистивный слой в зависимости от ширины контакта

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-

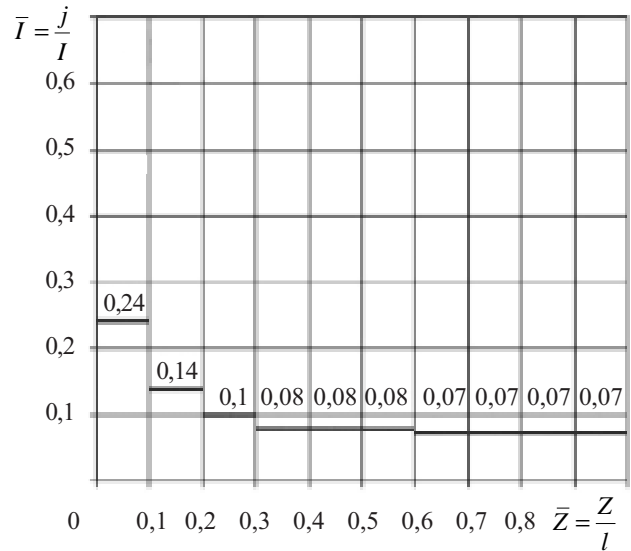


Рис. 9. Распределение тока  $j$  по участкам толщины резистивного слоя в сечении на границе окончания контакта. Здесь  $Z$  — текущий размер толщины;  $\bar{Z}$  — относительный размер толщины;  $p=20$

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

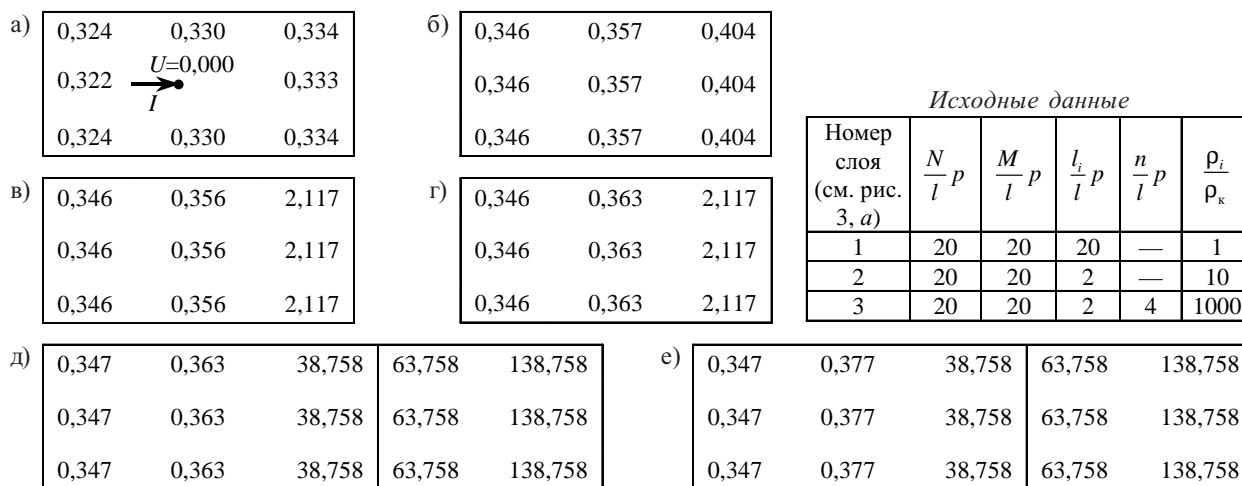


Рис. 10. Распределение потенциала по крайним верхним и нижним горизонтальным расчетным слоям металлизации, подслоя и резистивного слоя:  
а, в, д — верхние слои; б, г, е — нижние слои

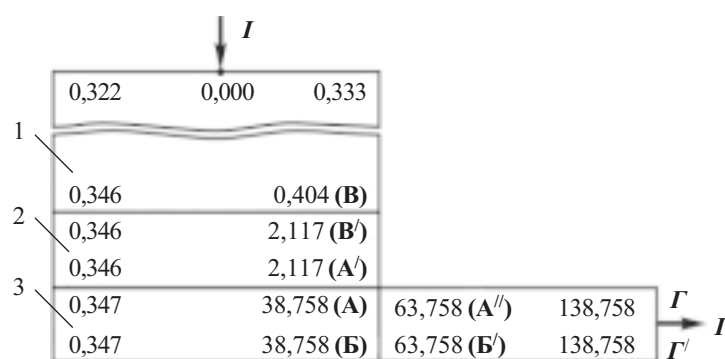


Рис. 11. Распределение потенциала по слоям контакта в вертикальном центральном сечении. Значения потенциалов даны для крайних верхних и нижних горизонтальных расчетных слоев: 1 — металлизация; 2 — подслой; 3 — резистивный слой; А, А', А'', Б, Б', В, В' — близлежащие точки слоев в эквивалентной электрической схеме; Г, Г' — 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 *АВ* на границе контакта (которая в какой-то степени эквивалентна току *j* в этом сечении, равному входному току) и расчетное значение потенциала точек *В* и *А'* для каждого слоя. Тогда электрическое сопротивление всего контакта между точкой входа *I* и сечением *АВ*, 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<sub>А</sub>* — разность потенциалов между точкой *А* и входом тока *I* в контакт.

Оценку сопротивления составляющих электрического сопротивления по слоям ориентировочно мож-

но произвести по соотношению соответствующих слоям потенциалов точек *А'* и *В* 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<sub>кп</sub>* в рассматриваемом случае, т. е. при *l=0,1* мкм и *M=N=l<sub>к</sub>=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

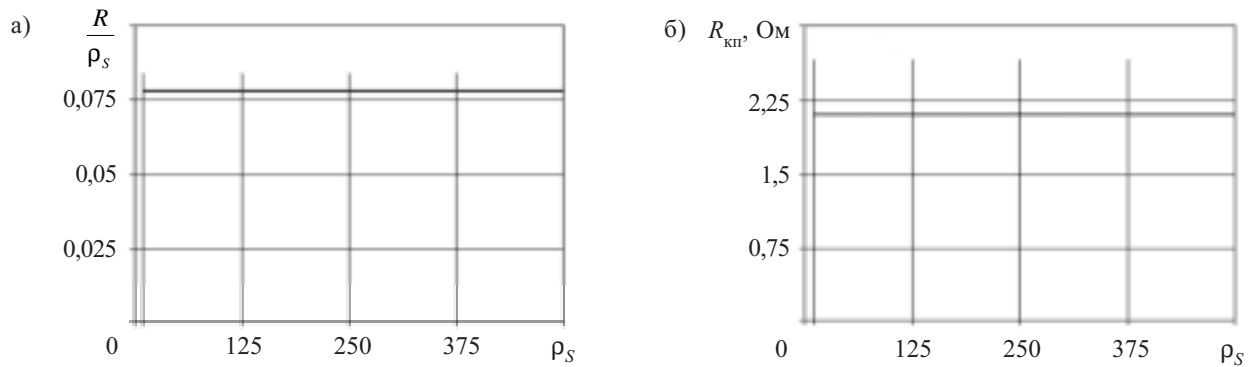


Рис. 12. Сопротивление резистивного участка (а) и общее сопротивление металлизации и подслоя (б) контакта в зависимости от удельного сопротивления резистивного слоя

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.