

К. т. н. А. В. СТЕРХОВА

Россия, Ижевский гос. технический университет  
E-mail: root@istu.udm.ruДата поступления в редакцию  
07.08 2001 г.Оппонент д. ф.-м. н. В. В. НОВИКОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)РАЗМЕРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ  
МИКРОСТРУКТУРЫ ТОЛСТЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК

*Проанализированы сходства и различия размерно-геометрических параметров моделей по мере изменения объемной доли проводящей фазы.*

Объектами данной работы служили образцы Ag—Pd толстопленочных резисторов (ТПР) толщиной 20—25 мкм, полученные по стандартной технологии трафаретной печати, с удельным сопротивлением ( $\rho$ ) 0,1, 0,5, 3,0 и 20,0 кОм/. Для количественной оценки основных параметров физической модели металлических кластеров и кластерной модели электрических связей ТПР [1, 2], в силу большой выборки экспериментальных данных [1], целесообразно было использовать математический метод статистической обработки с построением интегральной функции распределения исследуемой величины  $F(x)$ , при этом средняя величина  $\bar{x}$  определялась на уровне  $0,5 F(x)$  со среднеквадратической погрешностью  $\pm \sigma$ .

Целью данной работы является апробация методики построения моделей микроструктуры ТПР, изложенной в работе [1], и, на основе полученных результатов, выявление основных особенностей микроструктур ТПР в широком диапазоне удельных сопротивлений.

Измеряемыми параметрами являлись диаметр зерен ( $d$ ), вписанных в гранулы, длина гранулы ( $l$ ), площадь гранул ( $S$ ), плотность их распределения ( $P$ ), межгранулярное расстояние ( $L$ ), т. к. известно [3], что размеры частиц влияют на критическое поведение электропроводности, в частности, на порог протекания [4]. Более того [5], возрастание проводимости при увеличении концентрации связывают с постепенным увеличением размеров металлических кластеров.

Как следует из статистической обработки исходного массива экспериментальных данных, полученных при измерении диаметра зерен, функция  $F(d)$  для всех  $\rho$  носит одномодальный характер, т. е. подчиняется нормальному закону Гаусса. Средние значения  $d \pm \sigma$  имеют минимальный разброс (в скобках дана выборка  $N$ ): 0,14 $\pm$ 0,13 (912), 0,14 $\pm$ 0,13 (483), 0,16 $\pm$ 0,15 (400), 0,13 $\pm$ 0,11 (364). Полученные значения хорошо согласуются с величиной диаметра мелкодисперсного порошка проводящей фазы и с литературными данными [3].

В то же время общие выборки экспериментальных данных при измерении остальных параметров (длина гранулы, ее площадь и длина межгранулярно-

го расстояния) оказались многомодальными, т. е. каждая выборка характеризуется средним значением величины со своим соответствующим среднеквадратичным отклонением, что видно из представленных ниже табличных данных.

В табл. 1 приведены значения длины гранул  $\bar{l} \pm 3\sigma$  по выборкам и максимальные величины  $l_{\max} = \bar{l} + 3\sigma$  для указанных значений  $\rho$ . Из табличных данных следует многомодальность общей выборки экспериментальных данных для всех образцов. Максимальное число выборок, равное четырем, наблюдалось для образца с удельным сопротивлением 0,5 кОм/, структурная модель металлических кластеров которого являлась переходной от одной модели к другой [2].

Таблица 1

*Длина гранул (мкм) согласно выборкам общего распределения*

$\rho$ , кОм/	Номер выборки			
	1	2	3	4
Среднее значение ( $\bar{l} \pm \sigma$ , $N$ — выборка)				
0,1	0,19 $\pm$ 0,11 $N=91$	0,42 $\pm$ 0,10 $N=29$	1,05 $\pm$ 0,55 $N=34$	—
0,5	0,20 $\pm$ 0,10 $N=53$	0,64 $\pm$ 0,21 $N=44$	1,24 $\pm$ 0,14 $N=14$	2,19 $\pm$ 0,34 $N=14$
3	0,20 $\pm$ 0,13 $N=45$	0,60 $\pm$ 0,25 $N=49$	—	—
20	0,20 $\pm$ 0,10 $N=113$	0,62 $\pm$ 0,18 $N=21$	—	—
Максимальное значение ( $l_{\max} + 3\sigma$ )				
0,1	0,52 (60%)	0,72 (19%)	—	2,72 (21%)
0,5	0,50 (43%)	—	1,28 (35%)	1,69 (11%) 3,35 (11%)
3	0,60 (48%)	—	1,35 (52%)	—
20	0,50 (84%)	—	1,16 (16%)	—

Для всех образцов минимальный размер гранул (первая выборка) имел значение 0,2 $\pm$ 0,1 мкм и совпадал со средней величиной диаметра зерен исходного мелкодисперсного порошка проводящей фазы, который был общим материалом для всех образцов при максимальной длине порядка 0,6 мкм.

"Длинные" гранулы (до 2—3 мкм) были характерны для низкоомных образцов (третья и четвертая выборки), для высокоомных образцов их длина уменьшалась примерно в два раза. Среди высокоом-

ных образцов различие наблюдалось в большей степени не в численном значении размера гранул, а в преобладании для образцов с  $\rho = 20$  кОм/ в основном "мелких" частиц, в то время как для образцов с  $\rho = 3$  кОм/ гранул первой и второй выборок было примерно равное количество, а для  $\rho = 50$  кОм/ функцию  $F(l)$  можно признать одномодальной с высокой степенью вероятности ( $P=0,865$ ).

Эти выводы остаются справедливыми и при анализе  $F(S)$ , данных в табл. 2. Отличие же следует из того факта, что в каждом образце присутствуют отдельные "сверхбольшие" гранулы, не вошедшие ни в одну из гауссовских выборок и обозначенные в табл. 2 как "единичные"; их площадь была примерно равна суммарной площади всех "мелких" гранул.

Таблица 2

Площадь гранул ( $S \pm \sigma$  мкм<sup>2</sup>) согласно выборкам общего распределения

$\rho$ , кОм/	Номер выборки			
	1	2	3	Единичные
0,1	165±144 N=87 (3,8%)	870±290 N=25 (5,2%)	5400±640 N=28 (50,0%)	31500±66000 N=4 (42,0%)
0,5	108±72 N=69 (3,8%)	1050±300 N=44 (15,0%)	3180±165 N=19 (28,5%)	18540±27000 N=5 (52,9%)
3	180±126 N=40 (18,6%)	—	2100±231 N=64 (82,0%)	14250±13400 N=2 (13,8%)
20	102±66 N=72 (11,1%)	384±264 N=67 (39,0%)	—	3720±10000 N=11 (50,0%)

Интересным представляется рассмотрение табл. 3, где даны межгранулярные расстояния ( $L \pm \sigma$ ), определяющие прыжковую проводимость в ТПР [6] и  $L_{\max} = L \pm 3\sigma$ . Многомодальность общей выборки также имеет место, однако формирование таблицы по абсолютному значению  $L_{\max}$  приводит к большему числу колонок (до 6).

Практическая значимость таблицы в части  $L_{\max}$  состоит в том, что по ней можно определить максимальную величину межгранулярного расстояния (аналог сопротивления), при которой ток между гранулами перестает протекать. Это значение определялось по образцу с максимальным удельным сопротивлением и составляла  $L_{\max} > 1$  мкм (0,98 мкм). Данные табл. 3 также численно подтверждают тот факт, что плотность распределения гранул в низкоомных образцах максимальна, а в высокоомных — минимальна.

Как следует из экспериментальных данных, доля суммарной площади всех гранул в площади фрагментов модели составила 0,29, 0,19, 0,15 и 0,12 соответственно для  $\rho$  0,1, 0,5, 3,0 и 20,0 кОм/. Средняя плотность распределения гранул, проведенная по оценке удельной площади, для низкоомных образцов составила величину 0,20±0,07, а для высокоомных — 0,12±0,03.

Отсюда можно сделать некоторые выводы.

1. Впервые по структурной модели металлических кластеров и кластерной модели электрических связей из экспериментальных данных рассчитано число выборок, каждое из которых подчиняется закону распределения Гаусса.

Таблица 3

Межгранулярное расстояние (мкм)

$\rho$ , кОм/	Номер выборки					
	1	2	3	4	5	6
Средняя величина ( $L \pm \sigma$ )						
0,1	0,21±0,13 N=80	0,53±0,14 N=64	0,87±0,15 N=32	2,01±0,75 N=46	—	—
0,5	0,20±0,11 N=123	0,50±0,12 N=56	0,92±0,16 N=87	1,46±0,90 N=13	—	—
3	0,23±0,13 N=50	0,67±0,16 N=58	—	1,75±1,01 N=77	—	—
20	0,28±0,23 N=89	—	—	1,94±1,39 N=142	—	—
Максимальная величина ( $L_{\max} = L + \sigma$ )						
0,1	0,60 (36%)	0,98 (28%)	1,32 (14%)	2,61 (22%)	—	—
0,5	0,53 (44%)	0,84 (20%)	1,38 (31%)	2,06 (5%)	—	—
3	0,62 (27%)	—	1,13 (31%)	—	4,78 (36%)	—
20	—	0,98 (38%)	—	—	—	6,10 (62%)

2. Число выборок коррелирует (через  $\rho$ ) с величиной концентрации проводящей фазы в исходной резистивной пасте в равной степени для всех исследованных параметров ( $l, L, S$ ), кроме  $d$ .

В то же время выявленные отличия, хотя и являются следствием "разрежения" структуры за счет уменьшения доли проводящей фазы в исходной резистивной пасте, тем не менее не обладают свойствами самоподобия и масштабной инвариантностью на подобии фрактальных структур. Свидетельством этого является впервые выявленный для ТПР многомодальный характер распределения длин проводящих гранул общей выборки экспериментальных данных.

Таким образом, из проведенного анализа численных значений параметров моделей микроструктуры ТПР следует непротиворечивость в целом выявленных изменений формы, геометрии и распределения металлических кластеров от образца к образцу по мере уменьшения доли проводящей фазы в стекле. Размещение проводящих частиц в структуре имеет статистически взаимозависимый (многомодальный) характер.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Sterhova A. V., Ushakov P. A., Zharkov P. N. The procedure determination of parameters of structural and cluster models of thick resistive films // Sci. and Techn. J. TDEE. — 2001. — N. 1. — С. 39—43.
2. Стерхова А. В., Стыров С. В. Геометрическое моделирование микроструктуры ТРП в широком диапазоне удельных сопротивлений // Тез. докл. конф. "Микроэлектроника и информатика-2001". — 2001. — Москва, МИЭТ. — С. 82.
3. Carcia P. F., Ferreti A. and Suna A. J. Particle size effects in thick film resistors // Appl. Phys.— 1982.— Vol. 57.— N 7.— P. 5282—5287.
4. Ito O., Asai T., Ogawa T. et al. Effect of conduction particle size on LaB<sub>6</sub> thick film resistor // Thin Solid Films.— 1991.— Vol. 198.— P. 17—27.
5. Шкловский Б. И. Критическое поведение коэффициента Холла вблизи порога протекания // ЖЭТФ.— 1977.— Т. 72, вып. 1.— С. 288—295.
6. Paszczyński S. On possibilities of synthesis of a useful model of thick film components // Electron. Sci. Technol., Active and Passive Elec. Comp.— 1985.— Vol. 12.— P. 71—89.