

К. т. н. А. В. СТЕРХОВА, д. т. н. В. Е. ЛЯЛИН

Россия, Ижевский гос. технический университет
E-mail: root@istu.udm.ruДата поступления в редакцию
29.05 — 01.11 2001 г.Оппонент к. т. н. А. В. АБИЛОВ
(ИжГТУ, г. Ижевск)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Предложен комплекс математического и программного обеспечения для исследования эффективной электропроводности толсто пленочных резисторов в рамках теории перколяции.

Альтернативой либо существенным дополнением к классическому пути разработанного в деталях технологического процесса изготовления какого-либо изделия является установление определенных закономерностей физико-химических процессов, которые лежат в его основе. Для этого необходимо создавать информационное обеспечение, содержащее причинные, структурные и количественные предпосылки для последующей многокритериальной оптимизации технологических процессов. При этом связь между начальным комплексом технологических условий и критериями качества готовой продукции можно устанавливать чисто априорно (гипотетически), что, однако, не может служить руководством к действию, либо экспериментально — отслеживая поэтапно кинетику изменения физико-химического состояния объекта по мере изменения воздействующих факторов (температура, время и др.).

Более конструктивный подход может дать математическое моделирование структуры на основе экспериментально-статистического подхода при минимальной степени ограничений либо приближений, поскольку все реализуемые в технологических условиях процессы заложены в микроструктуре готовых изделий.

Объектом в данной работе служили Ag—Pd толсто пленочные резисторы (ТПР) гибридных интегральных микросхем, обладающие высокой стабильностью и воспроизводимостью электрофизических параметров. В предыдущих работах [1, 2] подробно описана методическая часть комплекса для построения моделей и определения размерно-геометрических параметров структуры. Задачей данной статьи явилось полное представление методического комплекса с более подробным описанием блоков нахождения основных перколяционных величин и блока построения структурной модели металлических кластеров на пороге протекания и в области размазки.

Разработан комплекс на основе оборудования, необходимого для преобразования исходного объекта

(ТПР) в продукт информационного обеспечения — модель статической микроструктуры, и алгоритмического и программного обеспечения последующего математического моделирования в рамках теории перколяции, математических методов статистической обработки экспериментальных данных и теории графов.

На рис. 1 дано схематичное изображение разработанного комплекса, включающего:

— блок предварительной обработки исследуемого объекта;

— блок построения структурной модели металлических кластеров и статистической обработки ее параметров;

— блок построения кластерной модели электрических связей и алгоритмическое и программное обеспечение для исследования критического поведения электропроводности;

— блоки обеспечения связи разработанного комплекса с производством ТПР — блок информации для технологического процесса, информационный блок критического поведения системы и блок информационного обеспечения в рамках теории перколяции, создающие базу данных по эталонным образцам.

Блок предварительной обработки исследуемого объекта предназначен для получения микрофотографии структуры образца и поэлементного анализа состава ТПР (с использованием Оже-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа) с последующей компьютерной обработкой для создания структурной модели металлических кластеров по методике, описанной в работе [1]. Сравнительный анализ структурных моделей металлических кластеров на качественном и количественном уровнях представлен в работе [2].

В следующем блоке на основе математических методов статистической обработки массивов экспериментальных данных были определены основные размерно-геометрические параметры структурной модели металлических кластеров (межгранулярное расстояние L , диаметр зерен d , длина l и площадь S металлических гранул, радиус корреляции ξ и локальная степень вершины n) и была (впервые) установлена многомодальность интегральной функции распределения $F(x)$ этих параметров для широкого диапазона значений удельного сопротивления ТПР [1, 2].

Программный блок построения кластерной модели электрических связей включал:

КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

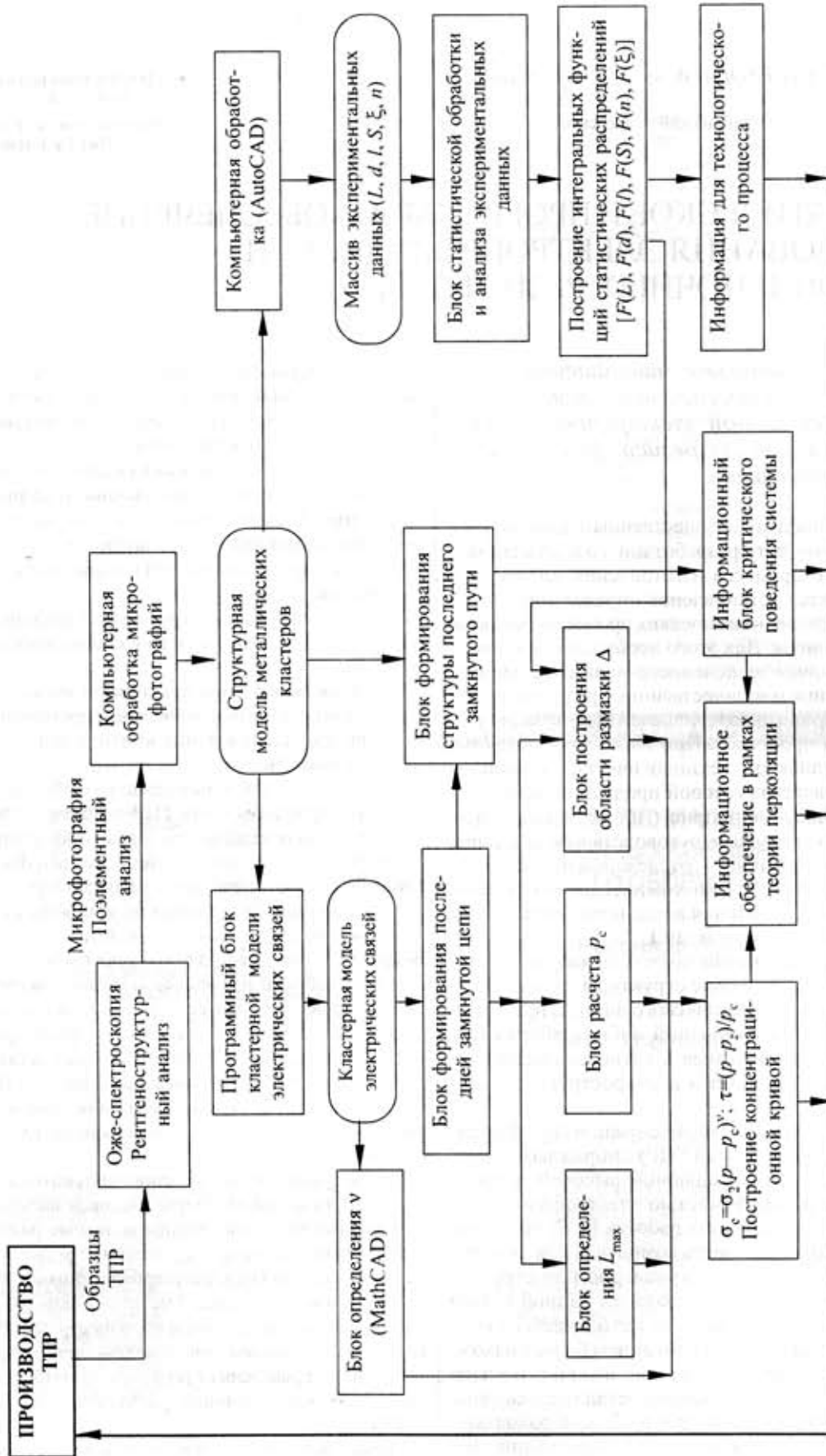


Рис. 1

— алгоритмическое и программное обеспечение для формирования последней замкнутой цепи протекания тока на основе кластерной модели электрических связей;

— блок формирования структуры последнего замкнутого пути;

— алгоритм определения критического индекса q степенной зависимости эффективной электропроводности;

— алгоритм определения порога протекания L_{\max} , объемной доли проводящей фазы p_c на пороге протекания и области размазки Δ ;

— алгоритм и программное обеспечение для построения концентрационной зависимости эффективной электропроводности $\sigma_c=f(p)$ для двухмерных и трехмерных сред в рамках теории перколяции.

Задача определения концентрационной зависимости в целом распадается на две [3]: во-первых, необходимо определить величину порога протекания, точнее, объемную долю проводящих частиц на пороге протекания (p_c); во-вторых, найти численное значение критического индекса эффективной электропроводности системы, находящейся ниже порога протекания (q).

На основе программного блока построения кластерной модели электрических связей при исследовании толстых резистивных серебропалладиевых пленок в диапазоне удельных сопротивлений (ρ) 0,1—50,0 кОм/□ получена оценка основных перколяционных величин, к которым относятся критические индексы (q и ν), объемная доля проводящей фазы (p_c) и максимальная длина межгранулярных расстояний (L_{\max}) на пороге протекания. Их численные значения сведены в таблицу (ν — показатель степени нелинейной зависимости сопротивления от длины диэлектрических прослоек при шунтировании другими связями, определенный экспериментально).

Как следует из таблицы, разброс величины p_c очень мал и составляет не более 8%, поскольку все исследуемые образцы изготавливались из резистивной пасты с использованием одного и того же мелкодисперсного порошка проводящей фазы с размером частиц 0,1—0,5 мкм. По численному значению величина p_c хорошо согласовывалась с данными [4].

ρ_c , кОм/□	0,1	0,5	3	20
p_c	0,084	0,091	0,098	0,096
ν	0,3	0,5	0,51	0,62
q	3,33	2,00	1,96	1,61
L_{\max} , мкм	0,44	0,66	1,11	1,11

Экспериментальное определение численного значения критического индекса проводилось по алгоритму с учетом топологии микроструктуры образца. По уравнению $\sigma_c = \sigma_2(p - p_c)^\nu$ (здесь σ_2 и p — электропроводность и текущая концентрация проводящей фазы) строились расчетные кривые, и величина ν определялась путем аппроксимации расчетных кривых с разными значениями ν к экспериментальным точкам.

Для приведения формулы к стандартному виду $\sigma_c = \sigma_2(p - p_c)^q$ [5] необходимо показатель степени представить в виде $\nu = 1/q$. При этом [6, с. 428] крити-

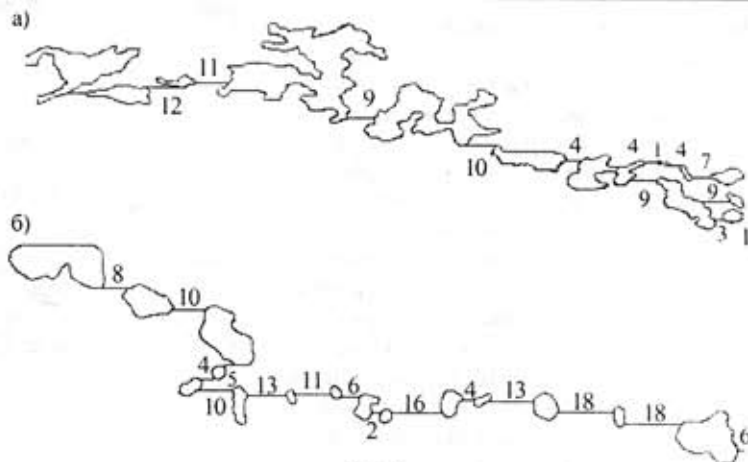


Рис. 2

ческий индекс q не имеет аналога в теории фазовых переходов и содержит важную дополнительную информацию о топологии бесконечного кластера.

Для наших систем под бесконечным кластером подразумевается, в отличие от бесконечного металлического кластера [7, 8], замкнутая цепь последней линии связи, состоящая из металлических гранул, разделенных диэлектрическими прослойками. Структура такой цепи на пороге протекания показана на рис. 2, а для низкоомных (0,1 кОм/□) и на рис. 2, б — для высокоомных (20,0 кОм/□) образцов. (Длина диэлектрических прослоек указана в условных единицах над каждой линией электрических связей.) На рис. 3, а и 3, б соответственно для этих же образцов даны структурные модели в области размазки, которая, по определению [6], содержит большее число металлических кластеров, чем на пороге протекания.

Как следует из анализа структур, представленных на рис. 2, а и 3, а, большинство металлических кластеров имеют перешейки в виде "тонких мостиков", на которых выделяется подавляющая часть джоулева тепла [9]. По их количеству можно определять уровень шумов и степень температурной стабильности. При увеличении удельного сопротивления образцов (рис. 2, б и рис. 3, б) величина гранул существенно уменьшается, их форма приближается к сферической, в гранулах исчезают "тонкие мостики", а длина диэлектрических прослоек увеличивается в среднем в два раза. Это хорошо согласуется с тем фактом, что активационный механизм электропроводности по локализованным состояниям в диэлектрической фазе становится преобладающим по сравнению с металлической составляющей. При этом для низкоомных резисторов как на пороге протекания, так и в области размазки наблюдается более широкий коридор протекания тока по сравнению с высокоомными.

В следующем блоке комплекса по соответствующему алгоритму определялось численное значение области размазки Δ как близость к порогу протекания $\tau = (p - p_c)/p_c$, т. е. как интервал, на котором сопротивление последней замкнутой цепи (максимальное на пороге протекания) уменьшалось до определенной величины за счет эффекта шунтирования другими связями. При этом для правильного описания концентрационной зависимости эффективной электропро-

водности в области размазки предложенный алгоритм учитывает любые комбинации включения элементов, как последовательное, так и параллельное, которые есть в реальной структуре.

Отличие представленной в работе [1] и используемой в предлагаемом комплексе методики построения структурных моделей на пороге протекания по сравнению с известными приемами состоит в том, что если традиционно порог протекания и критические индексы определяются методом Монте-Карло с использованием генератора случайных чисел для задания координат гранул [6, с. 407; 10—12] (что исключает возможность отображения структурных особенностей исследуемых объектов в моделях электропроводности), то в данной работе носителем информации является статическая микроструктура исследуемого образца со своими топологическими и метрическими особенностями.

Применение указанного комплекса открывает новые возможности для изучения микроструктуры гетерогенных сред, установления корреляционных структурных, количественных и причинных связей между параметрами микроструктуры и ее удельным сопротивлением.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Стерхова А. В., Ушаков П. А., Жарков П. Н. Методика определения параметров структурной и кластерной моделей толстых резистивных пленок // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2001. — № 1. — С. 39—43.
2. Стерхова А. В., Ушаков П. А. Определение параметров кластерной и структурной моделей ТПР // *Тр. междунар. науч.-техн. конф. "Информационные технологии в инновационных проектах"*.— Ижевск, 19—20 апреля 2000 г. — С. 225.
3. Скал А. С. Переход металл—диэлектрик в моделях теории протекания: электропроводность // *ЖТФ*.— 1981.— Т. 51, вып. 11.— С. 2443—2445.
4. Carcia P. F., Ferretti A., Suna A. Particle size effects in thick film resistor // *J. Appl. Phys.*— 1982. — Vol. 53, N 7. — P. 5282—5287.
5. Efros A. L., Shklovskii B. I. Critical behaviour of conductivity and dielectric constant near the metal-non-metal

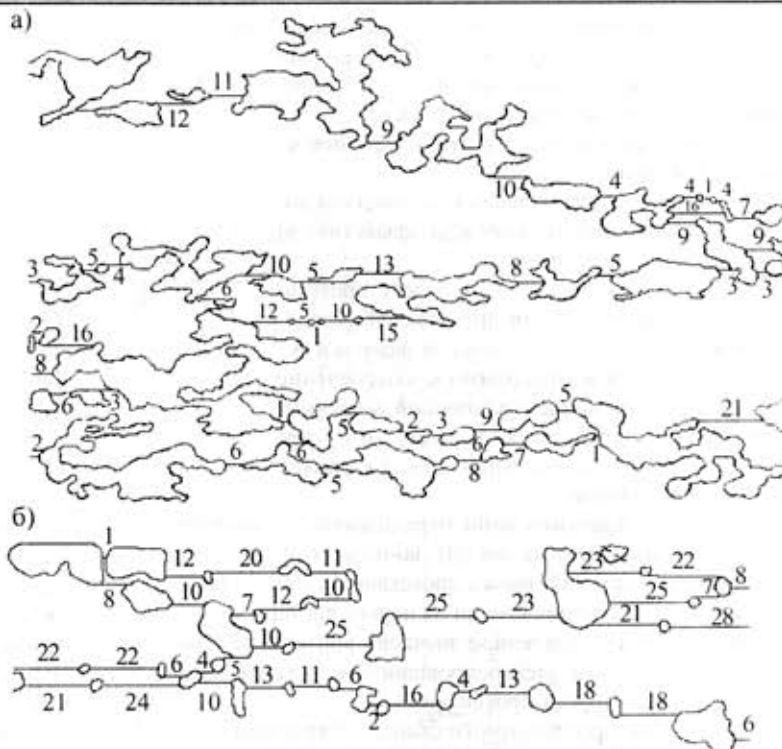


Рис. 3

transition threshold // *Phys. Stat. Sol.*, B. — 1976. — Vol. 76, N 2. — P. 475—485.

6. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред // *УФН*.— 1975.— Т. 117, вып. 3.— С. 401—435.
7. Шкловский Б. И. Критическое поведение коэффициента Холла вблизи порога протекания // *ЖЭТФ*.— 1977.— Т. 72, вып. 1.— С. 288—295.
8. Скал А. С. Топология бесконечного кластера в теории протекания и теория прыжковой проводимости // *ФТП*.— 1974.— Т. 8, № 8.— С. 1586—1592.
9. Морозовский А. Е., Снарский А. А. Критическое поведение 1/f-шума в перколяционных системах // *ЖЭТФ*.— 1989.— Т. 95.— С. 1844—1849.
10. Скал А. С., Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Вычисление уровня протекания в двумерном случайном потенциале // *ФТТ*.— 1973.— Т. 15, вып. 5.— С. 1423—1426.
11. Скал Ф. С., Шкловский Б. И., Эфрос А. С. Уровень протекания в трехмерном случайном потенциале // *Письма в ЖЭТФ*.— 1973.— Т. 17, вып. 9.— С. 522—525.
12. Smith R., Richter A. Modelling thin film growth: Monte-Carlo models of fullerite films // *Thin Solid Films*. 1999.— Vol. 343—344, N 1, 2.— P. 1—4.

В номере 6 журнала за 2001 г. на с. 33 допущена опечатка.

После формулы (1) следует читать:

- T_n и T_p — температуры соответствующих ветвей;
- $\alpha_{n,p}, \sigma_{n,p}, k_{n,p}$ — соответственно коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности (функции температуры);
- $i=I/s$ — плотность тока питания;
- s — площадь поперечного сечения ветвей термоэлементов;
- N — число каскадов охладителя.