

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДНК ПРОВОДНИКОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПАСТ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве методических указаний

САМАРА
Издательство СГАУ
2014

УДК 621.3(075)
ББК 32.85я7

Составитель *М.Н. Пиганов*

Рецензент канд. техн. наук, доц. Г.П. Шопин

Исследование и разработка алгоритма ДНК проводниковых полимерных паст: метод. указания / сост. М.Н. Пиганов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2014. – 16 с.

В методических указаниях рассматривается способ построения реологической кривой проводниковых полимерных паст. Проводится анализ результатов экспериментального исследования паст на основе никеля и меди. Описана процедура разработки алгоритма диагностического неразрушающего контроля (ДНК) проводниковых паст.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 211000 «Конструирование и технология электронных средств» и специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств».

Разработаны на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств.

УДК 621.3(075)
ББК 32.85я7

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2014

Общие сведения

В методических указаниях рассматривается способ построения реологической кривой проводниковых полимерных масс.

Планируемый результат – приобретение навыков разработки алгоритма ДНК проводниковых полимерных паст.

В первом разделе пособия сформулированы теоретические основы работы, во втором – излагается порядок выполнения работы, в третьем – освещено содержание отчета.

1. Теоретические основы работы

1.1. Реологические кривые полимерных паст

Качество выполнения технологических операций трафаретной печати и толсто пленочной металлизации отверстий в значительной степени определяется характером движения применяемых паст под действием внешних деформирующих напряжений, т. е. их реологическими свойствами. Поэтому неотъемлемой частью разработки и производства материалов толсто пленочной технологии является контроль их реологических параметров.

Реологические свойства вязких жидкостей в основном могут быть охарактеризованы набором из параметров коэффициентов n и k , уравнениями Оствальда–Вейля, вязкости η и предела текучести P_m . Эти параметры обычно определяются из реологической кривой (зависимости скорости сдвиговой деформации от напряжения сдвига), построение которой производится по результатам измерений на вискозиметрах различных конструкций.

В настоящих указаниях описан метод построения реологической кривой и приведены результаты исследования методом реологических характеристик некоторых полимерных паст, используемых в трафаретной печати. Метод прост по аппаратурному оснащению и позволяет производить построение реологической кривой с использованием малых количеств исследуемых материалов в широком диапазоне напряжений и скоростей сдвига, в том числе при весьма малых значениях напряжений сдвига (порядка единиц Па). При этом значительный интерес представляет участок реологической кривой, близкий к оси напряжений сдвига, поскольку он позволяет выявить наличие или отсутствие предела текучести материала.

Процедура измерений заключается в следующем. Исследуемой пастой заполняется определенная часть (z_0) горизонтально расположенного стеклянного капилляра диаметром $2R$. С одной стороны капилляра создается постоянное избыточное давление для движения жидкости по капилляру. Прозрачность капилляра позволяет с помощью микроскопа и шкалы фиксировать смещение границы жидкости с точностью до 0,1 мм. Массив значений смещения в различные моменты времени, измеренных при различных значениях избыточного давления ΔP и начальной длине заполнения капилляра z_0 , содержит всю информацию о реологических свойствах исследуемой пасты.

Рассмотрим теоретическую основу метода и способ построения реологической кривой [1]. Как известно, движение вязких жидкообразных систем под действием внешних нагрузок в общем случае описывается уравнением Оствальда–Вейля:

$$p=k(d\gamma/dt)^n, \quad (1)$$

где p – напряжение сдвига; $d\gamma/dt$ – скорость сдвиговой деформации; k и n – параметры, зависящие от свойств конкретной жидкости.

Вязкость жидкости определяется как отношение напряжения сдвига к скорости деформации:

$$\eta = p / (d\gamma / dt) = k (d\gamma / dt)^{n-1}. \quad (2)$$

При $n = 1$ вязкость не зависит от скорости деформации (ньютоновские жидкости) и совпадает с параметром k . При $n < 1$ происходит уменьшение вязкости с увеличением скорости деформации (псевдопластические жидкости), а при $n > 1$ – увеличение вязкости при увеличении скорости деформации (дилатантные жидкости).

Системы твердообразного типа характеризуются тем, что их деформация не происходит до тех пор, пока напряжение сдвига не превысит некоторую величину, называемую пределом текучести. Для твердообразных систем уравнение (1) записывается в виде:

$$p - P_m = K (d\gamma / dt)^n. \quad (3)$$

Выберем для рассмотрения цилиндрическую систему координат, ось z которой направлена по оси капилляра вдоль направления движения пасты. Напряжение сдвига p , возникающее при создании избыточного давления ΔP , можно записать как отношение сдвигающей силы, действующей на слой пасты, находящийся на расстоянии r от оси, к площади скольжения слоев друг относительно друга:

$$p = \Delta P \cdot \pi r^2 / 2\pi r \cdot z_0 = \Delta P \cdot r / 2 \cdot z_0. \quad (4)$$

Для твердообразных систем это соотношение принимает следующий вид:

$$p - P_T = \Delta P \cdot r / 2 \cdot z_0. \quad (5)$$

Выразим из уравнений (1) и (3) скорость деформаций сдвига:

$$d\gamma / dt = (p/k)^{1/n}, \quad (6)$$

$$d\gamma/dt=(p-P_T)/k^{1/n}. \quad (7)$$

В используемой нами цилиндрической системе координат выражение для деформации сдвига можно записать следующим образом:

$$\gamma=dz/d(R-r)=-(dz/dr). \quad (8)$$

Отсюда

$$\gamma=(d/dt)(dz/dr)=-(d/dt)(dz/dt)=-dv/dr, \quad (9)$$

где v – скорость движения пасты в направлении оси z . Следовательно, как для жидкообразных, так и для твердообразных систем имеет место соотношение:

$$-dv/dt=(\Delta P \cdot r/2 \cdot k \cdot z_0)^{1/n}. \quad (10)$$

Интегрируя это уравнение, получим:

$$v=-(\Delta P \cdot r/2 \cdot k \cdot z_0)^{1/n} \int r^{1/n} dr = -(\Delta P \cdot r/2 \cdot k \cdot z_0)^{1/n} r^{1/n+1}/(1/n+1) + const. \quad (11)$$

Значение постоянной интегрирования находим из граничных условий. $v(R) = 0$, т.е. бесконечно тонкий слой, прилегающий к стенке капилляра, остается неподвижным.

Таким образом, для распределения скоростей по сечению капилляра получаем следующее выражение:

$$v(r)=[n/n+1][(\Delta P \cdot r/2 \cdot k \cdot z_0)^{1/n}[R^{(n+1)/n}-r^{(n+1)/n}]]. \quad (12)$$

Следует отметить, что полученное соотношение при $n = 1$ переходит в известную формулу:

$$v(r)=(\Delta P \cdot r/2 \cdot k \cdot z_0)[R^2-r^2], \quad (13)$$

описывающую распределение скоростей при движении ньютоновской жидкости с вязкостью η по каналу круглого сечения длиной l . Таким образом, полученное нами соотношение (12) представляет собой обобщение формулы (13) на случай ньютоновских жидкостей.

Из соотношений (4) и (9) следует, что напряжение и скорость деформации сдвига зависят от удаления слоя от оси капилляра. Следовательно, для различных слоев движущейся пасты эти величины различны. Экспериментально измеряемые значения напряжения и скорости деформации сдвига фактически представляют собой усредненные значения этих величин по сечению трубки:

$$\gamma_{cp} = (1/R) \int_0^R \left(\frac{d\gamma}{dt} \right) dr = (1/R) \int_0^R \left[\frac{dv(r)}{dt} \right] dr = v(r)/R; \quad (14)$$

$$P_{cp} = (1/R) \int_0^R P(r) dr = (1/R) \int_0^R \left(\frac{\Delta P}{2z_0} \right) r dr = \Delta P/4z_0R. \quad (15)$$

При экспериментальных исследованиях фиксируется смещение подвижного конца столбика жидкости в капилляре. Соотношение между определяемой таким образом скоростью движения (v_{\exists}) и распределением скоростей внутри потока $v(r)$ можно установить, воспользовавшись условием непрерывности и несжимаемости жидкости:

$$\pi R^2 v_{\exists} = \int_0^{2\pi} \int_0^R v(r) r dr d\varphi. \quad (16)$$

После подстановки выражения (12) и интегрирования получим:

$$v_{\exists} = n/(3n+1) (\Delta P \cdot r/2 \cdot k \cdot z_0)^{1/n} R^{(n+1)/n} = [(n+1)/3n+1] v(0). \quad (17)$$

Таким образом, для скорости деформации сдвига можно записать соотношение:

$$\gamma_{cp} = [(3n+1)/(n+1)] (v_{\exists}/R). \quad (18)$$

Соотношения (15) и (18) представляют собой искомую зависимость скорости деформации сдвига от напряжения сдвига в параметрической форме. Другими словами, система уравнений:

$$\begin{cases} p = (\Delta P / 4 \cdot 4_0) R \\ \gamma = [(3n + 1) / n + 1] \cdot (v_3 / R) \end{cases} \quad (19)$$

позволяет произвести построение реологической кривой по данным экспериментального исследования скорости смещения жидкости в капилляре при различных значениях избыточного давления, длины начального заполнения и радиуса капилляра и различных значениях избыточного давления и длины начального заполнения. Затем для каждой пары соседних значений скорости движения пасты с помощью соотношения (17) вычисляется параметр n :

$$n = \frac{\frac{\ln(\Delta P_2 z_{01})}{\Delta P_2 z_{02}}}{\frac{\ln v_{31}}{v_{31}}} \quad (20)$$

и с помощью системы уравнений (19) – координаты точки на графике зависимости скорости деформации сдвига γ от напряжения сдвига p . Различные точки графика соответствуют различным значениям начальной длины заполнения z_0 , избыточного давления ΔP и радиуса капилляра R .

Данный метод был применен для изучения реологических свойств полимерных проводниковых паст 60202 и 66223, содержащих в качестве функциональных материалов соответственно порошки никеля и меди [2]. Каждая из паст исследовалась в исходном состоянии и после введения разбавителя (циклогексанола) в количестве, существенно изменяющем первоначальную вязкость. В проведенных экспериментах использовался набор капилляров диаметром от 1 до 2,87 мм; длина начального заполнения варьировалась от 5 до 24 мм. Длина капилляров составляла 200-300 мм, разность давлений на концах капилляра устанавливалась от 1 до 30 Па.

Для капилляров различного диаметра исследовались кинетические характеристики пасты при одинаковой длине заполнения и различной разности давлений, при фиксированной разности давлений и различной длине заполнения и при произвольной комбинации этих величин. При каждом наборе параметров производилось не менее 10-15 измерений смещения пасты в различные моменты времени.

Массивы значений «смещение — время» обрабатывались на ЭВМ с целью аппроксимации аналитической зависимостью по методу наименьших квадратов. Оказалось, что все полученные кинетические характеристики могут быть описаны линейной зависимостью с коэффициентом корреляции от 0,9478 до 0,9998. Это означает, что во всех исследованных случаях имеет место установившийся режим движения пасты. Скорость движения пасты v_3 в каждом конкретном случае представляет собой тангенс угла наклона прямой к оси времени. Значение параметра n вычислялось по формуле (20). Затем из (19) находились координаты определенной точки реологической кривой.

На рис.1 представлены результаты построения реологической кривой для паст 60202 и 66223 в исходном и разбавленном состояниях.

Прежде всего, исследовались начальные участки реологических кривых в области до 20 Па и до $0,2 \text{ с}^{-1}$. В этой области оказалось возможным аппроксимировать начальный участок реологической кривой линейной зависимостью. Одновременно вычислялось положение точек пересечения полученных прямых с осью напряжения сдвига. С коэффициентом корреляции не хуже 0,998 были получены значения, приведенные в табл.1.

Как видно из полученных данных, предел текучести исследованных паст не превосходит 2 Па. Реальные же значения сдвиговых напряжений, возникающих в процессе трафаретной печати и толсто- пленочной металлизации отверстий, составляют порядка 10^5 Па. Поэтому в этих процессах величиной предела текучести паст можно

пренебречь и для аппроксимации полученных значений реологической зависимости во всем исследованном интервале напряжений сдвига пользоваться функцией вида (1).

Из приведенных в табл. 1 данных следует также, что все исследованные пасты относятся к классу псевдопластичных жидкостей ($n < 1$). При введении разбавителя показатель псевдопластичности (отклонение показателя степени n от 1) уменьшается. Зная численные значения параметров n и k , можно построить зависимость вязкости от скорости деформации для каждой из исследованных паст. Как видно из рис. 1, на начальном участке кривых при скорости деформации сдвига до 20 с^{-1} во всех случаях происходит резкое уменьшение вязкости. Это явление характерно для структурированных жидкообразных систем и связано с разрушением структурных элементов, содержащихся в дисперсной смеси.

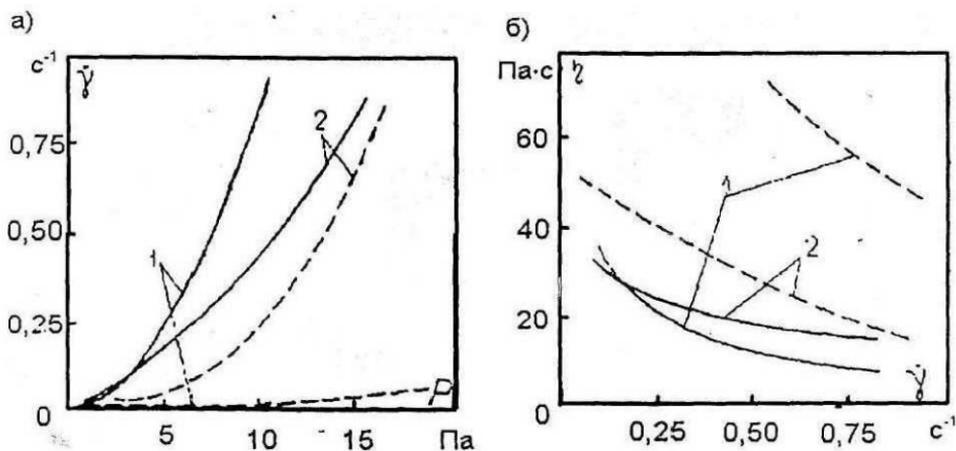


Рис. 1. Реологические кривые (а) и зависимость вязкости от скорости деформации сдвига (б) для паст марок 60202 (—) и 66228 (-----) в исходном (1) и разбавленном (2) состояниях

Таблица 1

Пасты	Условная вязкость, мм	Предел текучести, Па	k, Па	n	Индекс пластичности
60202					
исходная	30	1,5	10,1	0,4	63
разбавленная	38	1,8	16,48	0,69	8
66223					
исходная	27	0,9	47,36	0,21	234
разбавленная	31	0,5	17,64	0,39	68

Для характеристики скорости уменьшения вязкости при увеличении скорости деформации пользуются индексом пластичности, который определяется как отношение вязкости при скорости деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$ к значению вязкости при скорости деформации 100 с^{-1} . Как видно из таблицы, введение разбавителя в исследованные пасты приводит к уменьшению индекса пластичности в несколько раз.

1.2. Разработка алгоритма ДНК проводниковых полимерных паст

Для достижения высокой надёжности гибридных толстопленочных микросхем и микросборок необходим постоянный контроль исходных материалов и физико-химических процессов, протекающих на различных этапах технологического процесса.

Качество исходных композиционных материалов определяет воспроизводимость параметров элементов схемы. Поскольку электрофизические параметры пленочных элементов определяются физико-химическим составом паст и их полиграфическими свойствами, то входной контроль исходных материалов паст и выявление присутствия трудно контролируемых примесей – основная задача контроля за изготовлением паст. Такими методами анализа могут быть хроматографический, спектральный, рентгеновский и др.

Свойства паст определяются множеством факторов, среди которых немаловажными являются размер и форма частиц порошка; гранулометрический состав в значительной степени определяет режимы термохимических реакций, поэтому анализ дисперсности материалов должен предшествовать технологическому процессу. Закон распределения размеров и форма частиц оказывают большое влияние на многие важные физические и электрические свойства.

Особое внимание уделяется также совместимости различных функциональных материалов. Требования совместимости сводятся к тому, чтобы материалы проводников и диэлектриков не вступали в реакцию, которая может повлиять на их характеристики.

Для осуществления трафаретной печати пасты должны обладать хорошими полиграфическими свойствами. Воспроизводимость процесса при этом определяется вязкостью пасты. Ещё одним важным фактором является соответствие КТР подложки и материала наносимой пленки.

Требуемые физические и электрические свойства толстых плёнок проявляются в результате химических реакций, протекающих при вжигании. Контроль процессов вжигания дает возможность подобрать нужный температурный профиль по электрическим характеристикам толстоплёночных элементов.

Таким образом, для качественного изготовления пассивной части микросхем и микросборок методами толстоплёночной технологии для целенаправленного развития требуется большое количество методов контроля материалов (компонентов, композиций) и процессов их обработки. Методы имеют множество научно-технических направлений, и анализ каждого – отдельно решаемая задача.

Исходные материалы композиционных паст применяются в порошковом состоянии. В зависимости от поставленной цели используются следующие методы измерения и определения параметров по-

рошков, которые делятся на пять групп: классификационная, седиментационная, центрифугирования, оптических методов, электрических методов [3].

На основе анализа результатов исследований был предложен следующий алгоритм ДНК проводниковых паст (рис. 2).

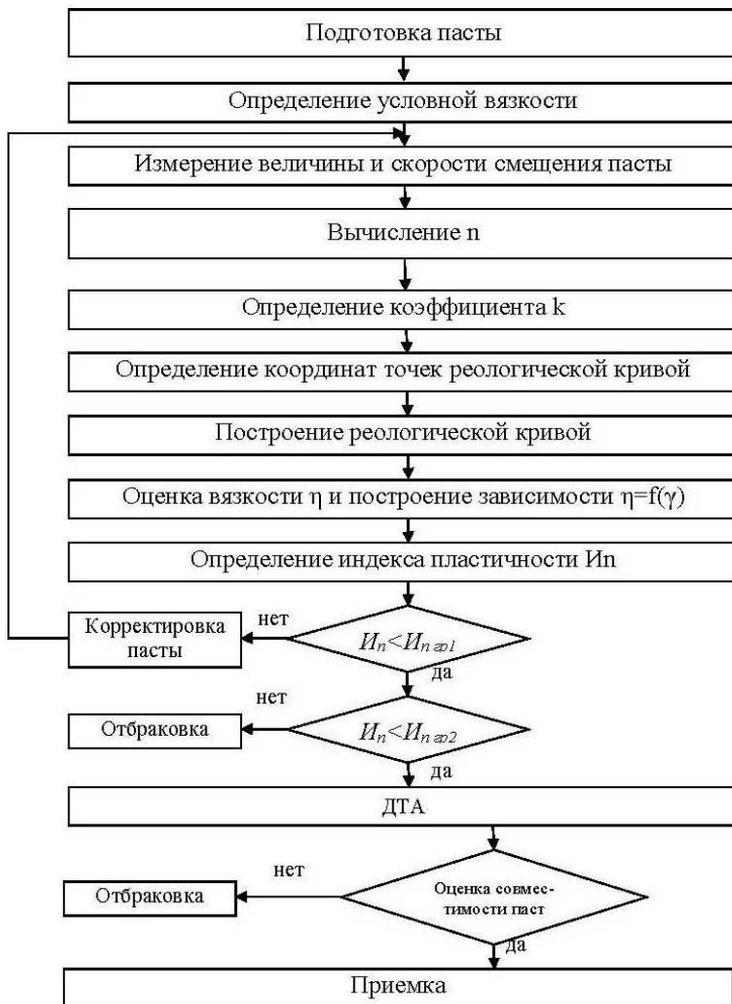


Рис. 2. Алгоритм ДНК паст

2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомится с методикой построения реологической кривой полимерных паст.
2. Провести анализ результатов экспериментального исследования полимерных паст.
3. Изучить процедуру разработки алгоритма ДНК проводниковых полимерных паст.
4. Провести анализ приведённого в разделе 2 алгоритма ДНК. Выявить его недостатки.
5. Разработать новый алгоритм ДНК проводниковых полимерных паст с учётом предыдущего пункта и заданной целевой функции.
6. Оформить отчёт.

3. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Методика построения реологической кривой.
3. Реологические кривые.
4. Зависимости вязкости от скорости деформации сдвига.
5. Разработанный алгоритм ДНК проводниковых полимерных паст.
6. Выводы.
7. Список использованных источников.

Список рекомендуемой литературы

1. Гребёнкина, В.Г. Толстоплёночная микроэлектроника [Текст] / В.Г. Гребёнкина [и др.]. – Киев: Наукова думка. – 1983. – 248 с.
2. Новые паяльные пасты для поверхностного монтажа космической аппаратуры [Текст] / С.В. Тюлевин, И.Ю. Шумских, А.В. Наседкин, М.Н. Пиганов // Радиолокация и радиосвязь: доклады 5-й Всероссийской НТК. – М.: ИРЭ РАН, 2011. – С. 129-131.
3. Пиганов, М.Н. Диагностический неразрушающий контроль элементов и компонентов микросборок [Текст] / М.Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 2003.
4. Пиганов, М.Н. Технологические основы обеспечения качества микросборок [Текст]: учеб. пособие / М.Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 1999. – 231с.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДНК
ПРОВОДНИКОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПАСТ**

Методические указания

Составитель *Пиганов Михаил Николаевич*

Редактор Ю.Н. Литвинова
Доверстка: Л.Р. Дмитриенко

Подписано в печать 29.07.2014. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 1,0. Тираж 100.
Заказ . Арт. 51/2014.

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 г. Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета
443086 г. Самара, Московское шоссе, 34.