

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

В. Л. Ланин, А. А. Хмыль

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ В МНОГООПЕРАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальностей
1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»
и 1-39 02 02 «Проектирование и производство РЭС»*

Минск БГУИР 2015

УДК 621.396.6-021.465(076.5)
ББК 32.844-02я73
Л22

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра конструирования и производства приборов
Белорусского национального технического
университета (протокол №5 от 09.12. 2013);

член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук,
профессор В. А. Пилипенко

Ланин, В. Л.

Л22 Исследование точностных характеристик электронных модулей в многооперационных технологических процессах. Лабораторный практикум : пособие / В. Л. Ланин, А. А. Хмыль. – Минск : БГУИР, 2015. – 71 с. : ил.
ISBN 978-985-543-082-8.

Пособие содержит лабораторные работы по исследованию точности и настроенности технологических процессов сборки электронных блоков, образования неразъемных соединений склеиванием, изготовления печатных плат и осаждения гальванических покрытий в нестационарных режимах электролиза. Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков работы с технологическим оборудованием и специализированной оснасткой.

**УДК 621.396.6-021.465(076.5)
ББК 32.844-02я73**

ISBN 978-985-543-082-8

© Ланин В. Л., Хмыль А. А., 2015
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1

Исследование точности технологического процесса сборки электронных модулей4

Лабораторная работа №2

Формирование точности выходных параметров электронных модулей при многооперационной технологии..... 14

Лабораторная работа №3

Исследование технологического процесса изготовления печатных плат..... 24

Лабораторная работа №4

Исследование процесса образования неразъемных соединений склеиванием44

Лабораторная работа №5

Исследование процесса осаждения гальванических покрытий в нестационарных режимах электролиза..... .59

Приложение

Справочные данные по значениям критериев Кохрена, Стьюдента, Фишера...69

Литература 70

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Цель работы

Изучение методов анализа точности параметров электронных модулей в технологическом процессе сборки и моделирование погрешности выходных параметров методом планирования эксперимента с применением ЭВМ.

Теоретические сведения

Обеспечение технологической точности параметров электронных модулей имеет важное значение в производстве РЭС, поскольку от этого зависят качество и надежность изделий, а также экономические показатели предприятия. Недооценка вопросов точности неизбежно приводит либо к браку, либо к усложнению технологических процессов и повышению стоимости изделий.

При изготовлении электронных модулей функциональная точность их выходных параметров определяется прежде всего производственным разбросом параметров деталей, поступающих на сборку, а также нестабильностью технологических операций сборки. Разброс является следствием несовершенства поступающих материалов, технологических процессов изготовления электронных компонентов и деталей и последующей их разбраковки по классам.

Для оценки влияния погрешностей параметров отдельных компонентов на величину производственной погрешности выходного параметра модуля используют расчетно-аналитический метод в том случае, если имеется аналитическое выражение выходного параметра в виде

$$П = f(q_1, q_2, \dots, q_k), \quad (1.1)$$

где $П$ – выходной параметр модуля;

q_i – параметры элементов, входящих в сборку.

После дифференцирования выражения (1.1) и замены дифференциалов конечными приращениями получим

$$\Delta П = \sum_{i=1}^k \frac{\partial П}{\partial q_i} \Delta q_i, \quad (1.2)$$

где k – количество элементов, участвующих в сборке изделия.

Но на практике удобнее пользоваться не абсолютными значениями параметров, а относительными. Для этого уравнение (1.2) разделим на уравнение (1.1) и, произведя некоторые преобразования, получим

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \sum_{i=1}^k A_i \frac{\Delta q_i}{q_i}, \quad (1.3)$$

где A_i – коэффициент влияния i -го параметра на погрешность выходного параметра

$$A_i = \frac{\partial\Pi}{\partial q_i} \frac{q_i}{\Pi}. \quad (1.4)$$

Используя уравнение (1.4), можно однозначно определить величину производственной погрешности выходного параметра при заданных погрешностях параметров элементов, если известны величины A_i . Для расчета коэффициентов влияния используют расчетный и статистические методы (малых приращений, корреляционный, планирования эксперимента и регрессионного анализа).

Расчетный метод требует обязательного получения аналитического выражения выходного параметра как функции всех параметров элементов модуля, что не всегда представляется возможным. В таких случаях используют экспериментальные методы. При этом наибольшими возможностями обладает метод статистического планирования эксперимента, который в сочетании с регрессионным анализом опытных данных позволяет получить математические модели для изделий, содержащих элементы как с линейными, так и с нелинейными параметрами. Расчет сопровождается статистической оценкой адекватности полученного уравнения и значимости его коэффициентов.

При **планировании эксперимента** искомая модель должна быть в виде полинома, который в общем виде может быть представлен уравнением

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1.5)$$

где y – выходной параметр (критерии оптимизации);

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты уравнения регрессии.

Основой планирования является четкая программа проведения опыта на выбранных экспериментатором уровнях. Центр плана, т. е. точка, в окрестности которой ставится серия опытов, выбирается на основе априорных сведений о процессе. Для удобства обработки результатов опыта вводится кодирование независимых входных факторов x_i :

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}, \quad (1.6)$$

где X_{0i} – основной уровень;

ΔX_i – интервал варьирования.

Факторы в процессе эксперимента принимают нормированные значения, равные +1 и –1 (табл. 1.1). Число опытов в полном факторном эксперименте (ПФЭ) зависит от числа факторов K и определяется как $N=2^K$. Для $K=3$ матрица планирования приведена в табл. 1.2. По данным табл. 1.2 получают математическую модель для оценки выходного параметра в виде

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (1.7)$$

Коэффициенты регрессий определяют по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i; \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i; \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_j \bar{y}_i. \quad (1.8)$$

Таблица 1.1

Начальные условия эксперимента

Значения факторов	X_1	X_2	X_3
Основной уровень X_{0i}			
Интервал варьирования ΔX_i			
Верхний уровень (+1)			
Нижний уровень (-1)			

Дисперсия среднего арифметического в строке матрицы:

$$\sigma^2 \{y\} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2, \quad (1.9)$$

где m – количество параллельных опытов.

Дисперсия коэффициентов регрессии:

$$\sigma^2 \{b_i\} = \frac{\sigma^2 \{y\}}{Nm}. \quad (1.10)$$

Таблица 1.2

Матрица планирования эксперимента 2^3

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Выходной параметр		
									y_1	y_2	y_3
1	+	+	+	+	+	+	+	+			
2	+	+	-	+	-	+	-	-			
3	+	-	+	+	-	-	+	-			
4	+	-	-	+	+	-	-	+			
5	+	+	+	-	+	-	-	-			
6	+	+	-	-	-	-	+	+			
7	+	-	+	-	-	+	-	+			
8	+	-	-	-	+	+	+	-			

Оценку значимости коэффициентов регрессии проводят с помощью *t*-критерия Стьюдента. Если $b_i < t_{\text{табл}} \sigma\{b_i\}$, то коэффициент считается незначимым. Значения критерия Стьюдента $t_{\text{табл}}$ определяются по данным табл. П. 2 приложения в зависимости от числа степеней свободы $f_1 = N(m-1)$ и выбранного уровня значимости. Для оценки адекватности полученной математической модели используют *F*-критерий Фишера:

$$F = \frac{\sigma_{ag}^2}{\sigma^2\{y\}}, \quad (1.11)$$

где σ_{ag}^2 – дисперсия адекватности, определяемая как

$$\sigma_{ag}^2 = \frac{1}{N - \alpha} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (1.12)$$

где α – число значимых членов в уравнении регрессии;

\hat{y}_i – значение выходного параметра, полученное расчетным путем из математической модели.

Если $F < F_{\text{табл}}$, то модель признается адекватной. $F_{\text{табл}}$ определяется по данным табл. П. 3 приложения в зависимости от числа степеней свободы $f_1 = N(m-1)$, $f_2 = N - \alpha$ и выбранного уровня значимости. При $F > F_{\text{табл}}$ модель считается неадекватной и эксперимент необходимо повторить, уменьшив интервалы варьирования либо увеличив количество параллельных опытов m . Для ускорения процесса вычисления статистических характеристик используют ЭВМ.

Из других методов оценки коэффициентов влияния чаще применяют *метод малых приращений*. Он основан на линейности уравнения (1.3), из чего следует принцип независимости действия погрешностей параметров. При малом отклонении одного параметра q_1 от номинального и сохранении постоянными значений других параметров погрешность выходного параметра $\Delta\Pi$ будет определяться только погрешностью параметра q_1 :

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = A_1 \frac{\Delta q_1}{q_1}. \quad (1.13)$$

Отсюда коэффициент влияния

$$A_1 = \frac{\Delta\Pi}{\Delta q_1} \cdot \frac{q_1}{\Pi}. \quad (1.14)$$

Определив тем или иным способом коэффициенты влияния, вычисляют среднее значение и поле рассеяния относительной погрешности выходного параметра по формулам:

$$M\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sum_{i=1}^k A_i M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right); \quad (1.15)$$

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^k A_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) + 2r_{ij} A_i A_j \delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) \delta\left(\frac{\Delta q_j}{q_j}\right)}, \quad (1.16)$$

где r_{ij} – коэффициент корреляции между i - и j -параметрами;

$M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right), \delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)$ – среднее значение относительной погрешности и половина поля допуска на параметр.

Эти уравнения справедливы в том случае, если распределение производственных погрешностей параметров отдельных элементов подчиняется нормальному закону и симметрично относительно среднего значения. Но практические кривые распределения отклоняются относительно значений, заложенных в технических условиях (ТУ) на элементы, в результате действия доминирующих факторов, смещения партий, выборов и т. п. Количественно эти отклонения оцениваются коэффициентами асимметрии β_i и рассеяния k_i :

$$\beta_i = \frac{M_{Xi} - M_{Xi(TU)}}{\delta_i(TU)}; \quad (1.17)$$

$$k_i = \frac{S_{ni}}{2\delta_i(\text{TУ})}, \quad (1.18)$$

где $\delta_i(\text{TУ})$ – половина поля допуска на параметр, определяемая по TУ;

S_{ni} – величина поля рассеяния параметра, определяемая экспериментально.

Для вычисления величин β_i и k_i используют статистический метод анализа производственных погрешностей, основанный на обработке большого количества однородного экспериментального материала. В результате обработки определяется закон распределения производственных погрешностей (при помощи критериев Пирсона χ^2 или Колмогорова λ) и его параметры. Основными законами, применяемыми в технологии РЭС, являются: нормальный, равновероятный и обобщенный типа А.

В процессе сборки электронных модулей параметры элементов могут изменяться под воздействием технологических операций пайки, герметизации, электро- и термотренировки. Анализ распределения параметров резисторов и конденсаторов после пайки показывает, что смещение центра группирования незначительно, в то время как статистические характеристики параметров транзисторов испытывают более значительное изменение. Под воздействием пайки коэффициент усиления транзистора уменьшается в среднем на 6 %, при этом среднее квадратическое отклонение параметра снижается на 4 %.

Используя значение величин β_i и k_i , вычисляют среднее значение и поле рассеяния относительной погрешности выходного параметра:

$$M\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sum_{i=1}^k A_i \beta_i M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right); \quad (1.19)$$

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^k A_i^2 k_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) + 2r_{ij} A_i A_j k_i k_j \delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) \delta\left(\frac{\Delta q_j}{q_j}\right)}. \quad (1.20)$$

Описание лабораторного макета

В качестве исследуемого электронного модуля выбран усилитель низкой частоты (УНЧ), собранный на транзисторе МП41 по схеме с общим эмиттером и предназначенный для усиления синусоидальных колебаний в диапазоне частот 100–6000 Гц. Электрическая схема макета УНЧ представлена на рис. 1.1.

Выходным параметром данного модуля является коэффициент усиления по напряжению, который на средней частоте диапазона определяется по формуле

$$K_c = \frac{h_{21} \cdot R_{н.э}}{h_{11} + \Delta h \cdot R_{н.э}}, \quad (1.21)$$

где $R_{н.э}$ – эквивалентная нагрузка каскада, образованная параллельным соединением резисторов R_3 и R_5 ;

Δh – определитель матрицы h -параметров транзистора:

$$\Delta h = h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21}. \quad (1.22)$$

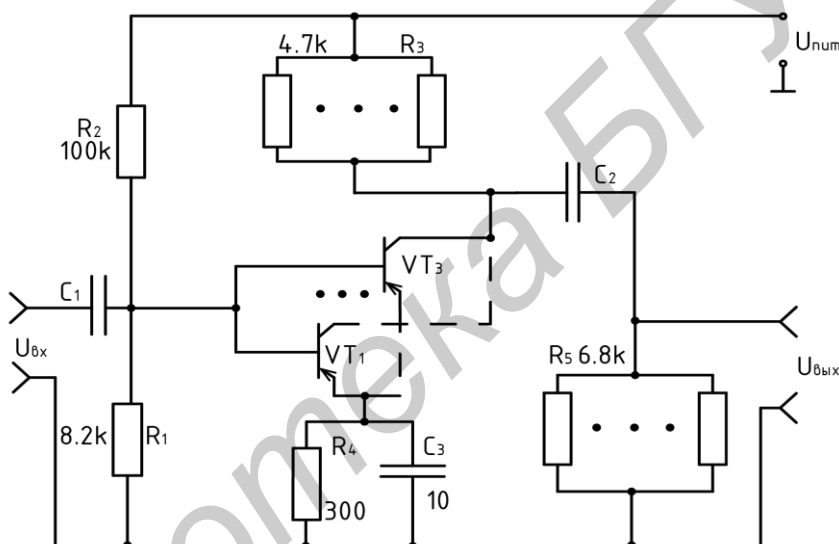


Рис. 1.1. Электрическая схема макета для определения производственных погрешностей выходных параметров УНЧ

Здесь h_{11} – входное сопротивление транзистора, при коротком замыкании на выходе; h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению; h_{21} – коэффициент передачи по току; h_{22} – выходная проводимость транзистора в режиме холостого хода на входе.

Порядок выполнения работы

1. Изучить описание лабораторного макета, ознакомиться с электрической схемой модуля и рассчитать коэффициент усиления УНЧ на средней частоте диапазона для заданных параметров транзистора МП41 и номинальных значений резисторов R_3 и R_5 .

2. Составить матрицу планирования ПФЭ для $K=3$ с учетом варианта индивидуального задания (табл. 1.3).

3. Собрать макет для исследования влияния параметров элементов схемы на выходные параметры электронного модуля (рис. 1.2). Включить питание макета. Подать на вход УНЧ напряжение 5,0 мВ частотой 1000 Гц от генератора низкой частоты (ГНЧ).

4. Измерить вольтметром В7-40 напряжение на выходе УНЧ, при этом на экране осциллографа должна наблюдаться синусоидальная форма сигнала. В случае искажений скорректировать величину входного сигнала. Определить коэффициент усиления УНЧ $K_{с.н}$ при номинальных значениях всех параметров и сравнить его с расчетным.

5. Провести эксперимент в соответствии с матрицей планирования при $m=3$; результаты измерений оформить в виде табл. 1.1 и 1.2.

6. Провести обработку статистических данных по стандартной программе PFE на ПЭВМ. В результате расчета составить математическую модель для выходного параметра блока, проверить коэффициенты в уравнении регрессии на достоверность, а полученную модель на адекватность по F -критерию Фишера.

Таблица 1.3

Варианты индивидуальных заданий

Параметр схемы	Номер варианта				
	1	2	3	4	5
R_3 4,7 кОм	± 10	± 10	± 10	± 20	± 10
R_5 6,8 кОм	± 10	± 10	± 10	± 20	± 10
h_{21} 80	± 10	± 20	—	± 20	± 20
h_{11} 2,2 кОм	—	—	± 20	± 20	± 20

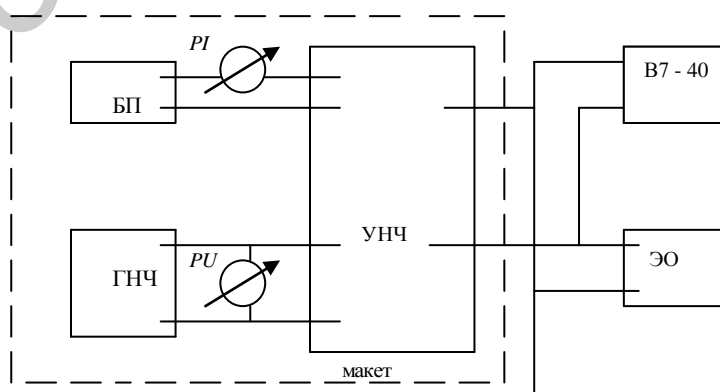


Рис. 1.2. Схема исследования погрешностей выходных параметров УНЧ

7. Определить частные коэффициенты влияния параметров q_i на выходной параметр K_c методом малых приращений. Для этого один из параметров q_i изменить на ± 10 или ± 20 % от номинального значения (в соответствии с вариантом индивидуального задания), а остальные параметры поддерживать на номинальном уровне. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 1.4.

8. На основании расчетов по программе LAB 1_2 составить математическую модель с использованием коэффициентов, полученных методом малых приращений.

9. Провести исследование закона распределения производственных погрешностей элементов схемы, для чего измерить на другом макете параметры партии элементов (R, h_{21}) в количестве, задаваемом преподавателем.

10. Используя стандартную программу HIST, привести обработку статистических данных на ПЭВМ, рассчитать величины K_i и β_i , построить гистограмму распределения производственных погрешностей элементов схемы.

11. С учетом величин K_i и β_i , коэффициента корреляции $r=0,9$ между параметрами h_{21} и h_{11} , а также погрешностей, вносимых процессом пайки, вычислить среднее значение $M(\Delta K / K)$ и величину поля допуска погрешности коэффициента усиления $\delta(\Delta K / K)$.

Таблица 1.4

Расчет коэффициентов влияния

Параметр	$\frac{\Delta q_i}{q_i} \cdot 100\%$	K_{ci}	$A_i = \frac{\Delta K_i \cdot q_i}{K_{сн} \cdot \Delta q_i}$	$A_{иср}$
$q_1 - R_3$	+10			
	-10			
	+20			
	-20			
$q_2 - R_5$	+10			
	-10			
	+20			
	-20			
$q_3 - h_{21}$	+10			
	-10			
	+20			
	-20			
$q_4 - h_{11}$	+10			
	-10			
	+20			
	-20			

12. Провести анализ полученных математических моделей, определить наиболее влияющие параметры блока, предложить мероприятия по уменьшению погрешности коэффициента усиления.

Содержание отчета

1. Схема электрическая принципиальная электронного модуля.
2. Матрица планирования ПФЭ.
3. Основные расчетные формулы и расчеты по ним.
4. Таблицы экспериментальных данных и распечатки моделей.
5. Гистограммы распределения производственных погрешностей R, h .
6. Анализ коэффициентов влияния элементов электронного модуля и расчет величины поля допуска погрешности коэффициента усиления.

Контрольные вопросы

1. Методика расчета допуска на выходной параметр УНЧ.
2. Методы определения коэффициентов влияния.
3. Методика полного факторного эксперимента.
4. Как оценивается значимость коэффициентов уравнения регрессии и адекватность модели при ПФЭ?
5. Законы распределения производственных погрешностей.
6. Как оценить величину поля допуска погрешности коэффициента усиления УНЧ с учетом всех погрешностей технологического процесса?
7. Как учитываются корреляционные связи между погрешностями элементов электронных модулей?

Лабораторная работа №2

ФОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ПРИ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Цель работы

Построение математической модели многооперационного технологического процесса методом корреляционного анализа, анализ его точностной диаграммы и оценка устойчивости процесса.

Теоретические сведения

Все технологические операции производства РЭС по их влиянию на выходные параметры электронных блоков условно можно разбить на три основные группы:

- *активные формирующие*, в процессе которых формируются выходные параметры блока (сборочно-монтажные операции);
- *активные преобразующие*, в результате которых изменяются количественные показатели выходных параметров блока (герметизация, термотренировка и др.);
- *пассивные*, которые не влияют на количественные показатели выходных параметров (покраска, маркировка, контроль).

Технологический процесс производства электронных блоков можно представить в виде схемы, состоящей из ряда технологических операций: формирующих, преобразующих и пассивных (рис. 2.1).

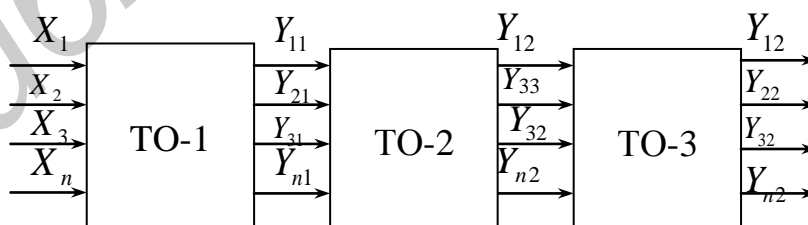


Рис. 2.1. Схема многооперационного технологического процесса:
ТО-1 – формирующая; ТО-2 – преобразующая; ТО-3 – пассивная операции

На вход первой формирующей операции поступают компоненты и детали со своими параметрами $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$. На выходе его образуются новые показа-

тели блока $Y_{11}, Y_{21}, Y_{31}, \dots, Y_{n1}$, которые после преобразующей операции приобретают значения $Y_{12}, Y_{22}, Y_{32}, \dots, Y_{n2}$.

Основная задача анализа точности многооперационного технологического процесса состоит в том, чтобы определить количественные показатели влияния технологических операций по результатам изменения входных и выходных характеристик блоков. Для оценки точности и устойчивости технологических процессов применяют *метод точностных диаграмм*, основанный на построении кривых распределения производственных погрешностей изучаемого параметра во времени. На оси абсцисс откладывают отрезки времени, соответствующие выполняемым технологическим операциям, по завершении которых небольшие партии изделий (25–30 шт.) подвергают статистическому анализу. На оси ординат откладывают вычисленные для каждой группы значения среднего арифметического \bar{y}_i , среднего квадратического отклонения σ и поля рассеяния S_{ni} . Соединяя последовательно точки, соответствующие средним значениям выходного параметра, получают временную функцию (рис. 2.2).

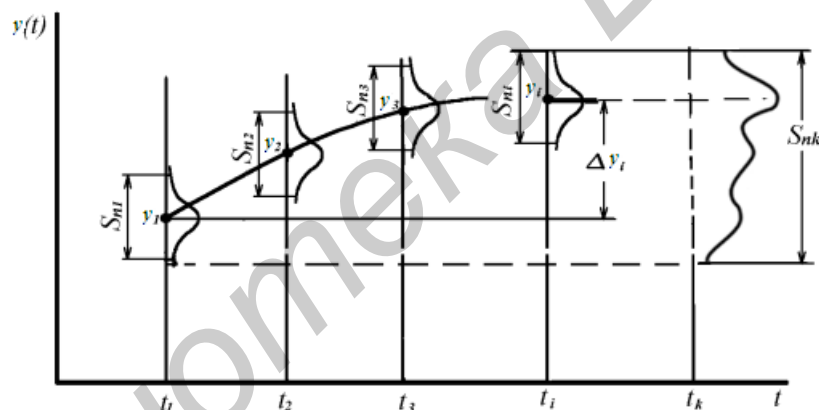


Рис. 2.2. Точностная диаграмма многооперационного процесса

По точностной диаграмме можно выявить влияние систематических погрешностей на точность выходных параметров блока и определить устойчивость технологического процесса. Степень устойчивости процесса по параметру Y определяется коэффициентом устойчивости T_y .

$$T_y = \frac{\sigma_i}{\sigma_\Sigma}, \quad (2.1)$$

где σ_i – среднее квадратическое отклонение по операциям в моменты t_1, t_2, \dots, t_i ;

σ_Σ – суммарное среднее квадратическое отклонение на выходе процесса, определяемое из точностной диаграммы.

При многооперационном технологическом процессе на каждой технологической операции входные погрешности частично компенсируются, частично переносятся на следующую операцию, появляются новые составляющие погрешности под действием систематических и случайных возмущений, сопутствующих данной операции. Процесс считается устойчивым при $T_y \geq 0,95$.

Согласно стандарту по обеспечению качества ISO 9000 для технологических процессов определяют следующие коэффициенты:

– воспроизводимости процесса $C_p = \frac{\Delta}{3\sigma}$;

– стабильности процесса $C_{pk} = \frac{\Delta - |Y_n - Y_{cp}|}{3\sigma}$,

где Δ – половина поля допуска на выходной параметр,

Y_n – номинальное значение выходного параметра.

Для идеального состояния технологического процесса $1,33 < C_{pk} < 1,67$, для удовлетворительного $1,0 < C_{pk} < 1,33$.

Чтобы определить величину переносимой и вновь образуемой погрешности, применяют корреляционный анализ статистических данных, полученных для каждой операции технологического процесса, и рассчитывают уравнения регрессии. Если распределения большого числа наблюдений выходных параметров функциональных модулей после каждой операции подчиняются нормальному закону, то уравнение регрессии выражается прямой линией:

$$\bar{\Pi}_{\text{вых}} = a_0 + a_1 \bar{\Pi}_{\text{вх}}, \quad (2.2)$$

где a_0, a_1 – среднее значение выходного параметра на входе и выходе операции;

$\bar{\Pi}_{\text{вых}}, \bar{\Pi}_{\text{вх}}$ – параметры уравнения регрессии.

Линия регрессии показывает, как в среднем изменяется параметр на выходе данной операции при соответствующем изменении его на входе. Коэффициент a_0 определяет систематическую погрешность, вызываемую технологией, и рассчитывается следующим образом:

$$a_0 = \bar{\Pi}_{\text{вых}} - a_1 \bar{\Pi}_{\text{вх}}. \quad (2.3)$$

Коэффициент a_1 показывает, какая часть погрешности выходного параметра до операции переходит в погрешность после операции, и определяется по уравнению

$$a_1 = r \frac{\sigma(\bar{\Pi}_{\text{ВЫХ}})}{\sigma(\bar{\Pi}_{\text{ВХ}})}, \quad (2.4)$$

где r – коэффициент корреляции, который показывает тесноту связи между производственными погрешностями выходного параметра до и после технологической операции;

$\sigma(\bar{\Pi}_{\text{ВХ}}), \sigma(\bar{\Pi}_{\text{ВЫХ}})$ – средние квадратические отклонения производственных погрешностей выходного параметра до и после операции.

При определении коэффициента корреляции удобно пользоваться понятиями моментов, которые в математической статистике разделяются на начальные, центральные и основные. Начальным моментом \mathfrak{S}_h , вычисленным относительно условного начала, называется сумма произведений отклонений значений статистического ряда Π_i от Π_0 в степени h на соответствующую частоту (n_i/N):

$$\mathfrak{S}_h = \sum_{i=1}^N (\Pi_i - \Pi_0) \left(\frac{n_i}{N} \right), \quad (2.5)$$

где n_i – число значений Π_i в статистическом ряду;

N – общее количество наблюдений.

Вычисление начальных моментов значительно упрощается, если его производить относительно нуля, т. е. $\Pi_0 = 0$. В этом случае начальный момент первого порядка равен математическому ожиданию (среднему значению) статистического ряда.

Центральный момент μ_h представляет собой сумму произведений отклонений значений статистического ряда Π_i относительно среднего значения $\bar{\pi}$ в степени h на соответствующую частоту:

$$\mu_h = \sum (n_i - n_0)^h \left(\frac{n_i}{N} \right). \quad (2.6)$$

Центральный момент второго порядка легко выражается через начальный момент второго порядка и представляет собой дисперсию ряда распределения σ^2 , где среднее квадратическое отклонение $\sigma = +\sqrt{\mu_2}$.

При рассмотрении рядов распределений двух взаимосвязанных величин пользуются понятиями начальных и центральных смешанных моментов, полу-

чение аналитических выражений которых не вызывает затруднений по аналогии с уравнениями (2.5) и (2.6).

Отношение соответствующего смешанного центрального момента к средним квадратическим отклонениям в соответствующей степени называется *коэффициентом корреляции*:

$$r = \frac{\mu_h}{\sigma(\Pi_{\text{ВХ}}) \cdot \sigma(\Pi_{\text{ВЫХ}})}. \quad (2.7)$$

Коэффициент корреляции рассчитывают в такой последовательности:

а) средние значения выходного параметра до и после операции

$$\bar{\Pi}_{\text{ВХ}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Pi_{\text{ВХ}i}}{N}; \quad \bar{\Pi}_{\text{ВЫХ}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Pi_{\text{ВЫХ}i}}{N}; \quad (2.8)$$

б) начальные моменты второго порядка

$$\mathfrak{G}_{2\text{ВХ}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Pi_{\text{ВХ}i}^2}{N}; \quad \mathfrak{G}_{2\text{ВЫХ}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Pi_{\text{ВЫХ}i}^2}{N}; \quad (2.9)$$

в) центральные моменты второго порядка

$$\mu_{2\text{ВХ}} = \mathfrak{G}_{2\text{ВХ}} - (\bar{\Pi}_{\text{ВХ}})^2; \quad \mu_{2\text{ВЫХ}} = \mathfrak{G}_{2\text{ВЫХ}} - (\bar{\Pi}_{\text{ВЫХ}})^2; \quad (2.10)$$

г) средние квадратические отклонения

$$\sigma(\Pi_{\text{ВХ}}) = \sqrt{\mu_{2\text{ВХ}}}; \quad \sigma(\Pi_{\text{ВЫХ}}) = \sqrt{\mu_{2\text{ВЫХ}}}; \quad (2.11)$$

д) начальный и центральный моменты связи

$$\mathfrak{G}_h = \frac{\sum_{i=1}^N \Pi_{\text{ВХ}i} \Pi_{\text{ВЫХ}i}}{N}; \quad \mu_{11} = \mathfrak{G}_{11} - \bar{\Pi}_{\text{ВХ}} \bar{\Pi}_{\text{ВЫХ}}; \quad (2.12)$$

е) коэффициент корреляции

$$r = \frac{\mu_{11}}{\sigma(\Pi_{\text{ВХ}}) \sigma(\Pi_{\text{ВЫХ}})}. \quad (2.13)$$

Средняя квадратическая ошибка определения r

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{N}}. \quad (2.14)$$

Значимость коэффициента корреляции определяют по номограмме, приведенной на рис. 2.3, в зависимости от уровня вероятности P и числа экспериментальных данных N .

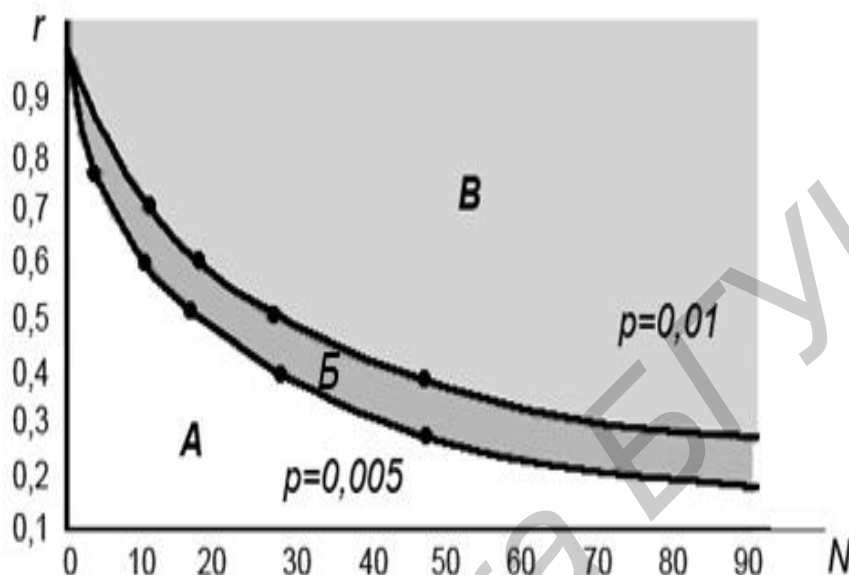


Рис. 2.3. Номограмма значимости коэффициента корреляции:

А – незначимый; Б – значимый; В – весьма значимый

Если основными технологическими операциями при изготовлении функциональных модулей РЭС являются пайка, заливка и термотренировка, то уравнение регрессии, связывающее расчетное среднее значение выходного параметра с тем значением, которое будет после изготовления модулей, имеет вид

$$\bar{\Pi}_{\text{вых}} = \{a_{0T} + a_{1T} \cdot [a_{03} + a_{13} \cdot (a_{0n} + a_{1n} \cdot \bar{\Pi}_{\text{вх}})]\}, \quad (2.15)$$

где a_{0n}, a_{03}, a_{0T} – систематические погрешности выходного параметра на операциях пайки, заливки и термотренировки;

a_{1n}, a_{13}, a_{1T} – коэффициенты переноса систематической погрешности на операциях пайки, заливки и термотренировки;

$\bar{\Pi}_{\text{вх}}$ – математическое ожидание выходного параметра функционального модуля перед пайкой, т. е. расчетное значение.

Средняя квадратическая погрешность выходного параметра после каждой операции определяется по правилу суммирования случайных погрешностей:

$$\sigma(\bar{\Pi}_{\text{ВЫХ}}) = \sqrt{\sigma\left(\frac{\bar{\Pi}_{\text{ВЫХ}}}{\bar{\Pi}_{\text{ВХ}}}\right) + a_1^2 \sigma(\bar{\Pi}_{\text{ВХ}})}. \quad (2.16)$$

Первое слагаемое уравнения представляет собственную случайную погрешность операции:

$$\sigma\left(\frac{\bar{\Pi}_{\text{ВЫХ}}}{\bar{\Pi}_{\text{ВХ}}}\right) = \frac{a_1 \sqrt{1-r^2}}{r} \sigma(\bar{\Pi}_{\text{ВХ}}), \quad (2.17)$$

а второе – долю случайной погрешности выходного параметра, переходящей со входа операции на выход.

Описание лабораторного макета

В качестве объекта исследования выбран мультивибратор, выполненный в микромодульном варианте (рис. 2.4). Основными выходными параметрами мультивибратора в автоколебательном режиме являются амплитуда напряжения на нагрузке $U_{\text{Н}}$, длительность импульса $t_{\text{и}}$ и частота колебаний f , для которых справедливы следующие равенства:

$$U_{\text{Н}} = \frac{E_k \cdot R_5}{R_5 + R_4}; \quad (2.18)$$

$$t_{\text{и}} \approx 0,7 C_1 R_3; \quad (2.19)$$

$$f = \frac{1}{0,7(C_1 R_3 + C_2 R_2)}. \quad (2.20)$$

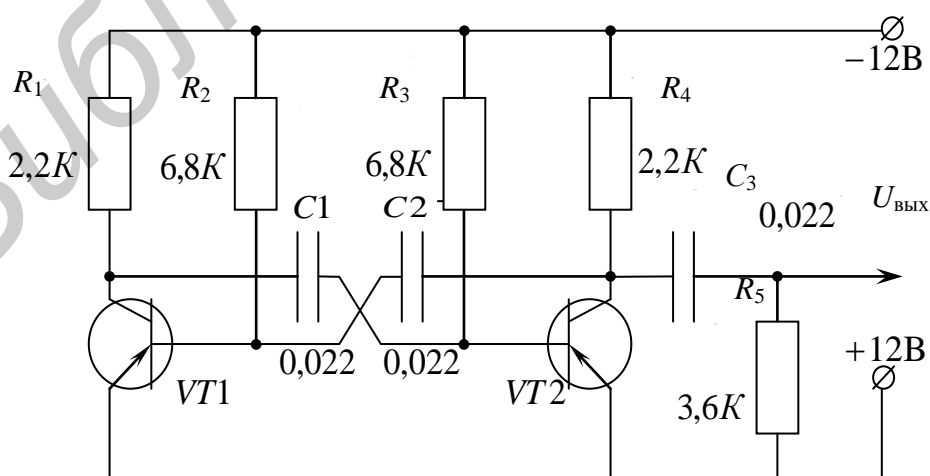


Рис. 2.4. Схема мультивибратора

Отобранные функциональные модули (ФМ) после операций пайки, заливки и термотренировки (по 25 шт.) смонтированы на трех печатных платах. Питание всех ФМ осуществляется от источника стабилизированного напряжения через выключатель П1. Контрольные приборы подключаются к клемме « $U_{\text{ВЫХ}}$ ». Соединение выхода каждого модуля с контрольными приборами осуществляется через переключатель П2 с помощью контактов шагового искателя.

Порядок выполнения работы

1. Изучить описание лабораторного макета, ознакомиться с электронной схемой блока и рассчитать амплитуду напряжения на нагрузке U_n , длительность t_n и частоту импульсов f по формулам (2.18) – (2.20).

2. Собрать схему измерения выходных параметров функционального модуля (рис. 2.5).

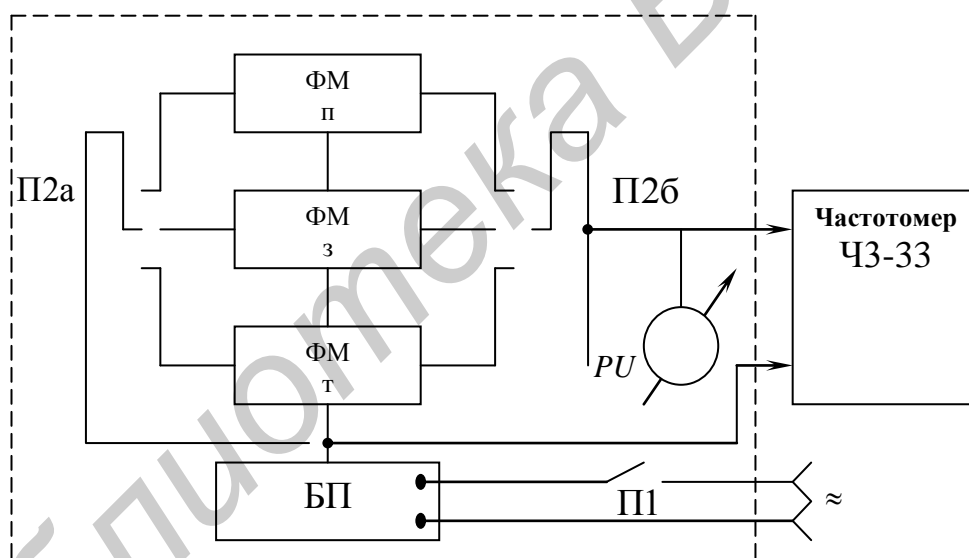


Рис. 2.5. Схема измерения параметров ФМ

3. Установить переключатель П2 в положение 1 «ПАЙКА». Включить питание макета и произвести измерение выходного параметра, заданного преподавателем в количестве 25 шт. При каждом измерении на световом табло высвечивается номер контролируемого функционального модуля.

4. Установить переключатель П2 в положение 2 «ЗАЛИВКА», а затем 3 «ТЕРМОТРЕНИРОВКА» и произвести измерения выходного параметра. Результаты измерений занести в табл. 2.1.

5. Используя программу LAB 2, рассчитать на ПЭВМ для каждой технологической операции среднее значение выходного параметра $\bar{P}_{\text{ВЫХ}}$, среднюю квадратическую погрешность, коэффициенты корреляции r , параметры уравнения регрессии a_0, a_1 характеризующие тесноту связи погрешностей выходного параметра между операциями пайка – заливка, заливка – термотренировка. Заполнить графы табл. 2.1.

6. Построить точностную диаграмму многооперационного технологического процесса, рассчитать коэффициент устойчивости T_y по каждой операции.

7. Построить графически точностную диаграмму многооперационного процесса, определить по ней σ_{Σ} и оценить влияние каждой операции на среднее значение выходного параметра и его погрешность. Предложить мероприятия по повышению устойчивости многооперационного технологического процесса.

Таблица 2.1

Результаты экспериментов и расчетов

Контролируемый параметр	Показатели операции	Пайка	Заливка	Термотренировка
Частота импульсов f	$\bar{P}_{\text{ВЫХ}}$			
Длительность $t_{\text{и}}$	$\sigma (P_{\text{ВЫХ}})$			
	r			
	a_1			
	a_0			
	$\sigma \left(\frac{\bar{P}_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} \right)$			

Содержание отчета

1. Схема измерения параметров функционального модуля.
2. Расчеты выходных параметров модуля $U_{\text{н}}$, $t_{\text{и}}$ и f .
3. Точностная диаграмма многооперационного процесса, расчеты коэффициентов устойчивости по операциям.
4. Результаты экспериментальной работы и расчетов (см. табл. 2.1).
5. Аналитические выражения и графики моделей технологического процесса.
6. Результаты анализа моделей и точностной диаграммы.

Контрольные вопросы

1. Структура многооперационного технологического процесса и основные группы технологических операций.
2. Методика построения точностной диаграммы, определения суммарной погрешности и оценки коэффициента устойчивости технологического процесса.
3. Порядок расчета коэффициента корреляции.
4. Анализ уравнения регрессии и выявление наиболее влияющих параметров процесса.
5. Определение значимости коэффициента корреляции.
6. Как изменяются выходные параметры электронного модуля после операций пайки, заливки и термотренировки?
7. Как оценивается устойчивость многооперационного технологического процесса в соответствии с ISO 9000?

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Цель работы

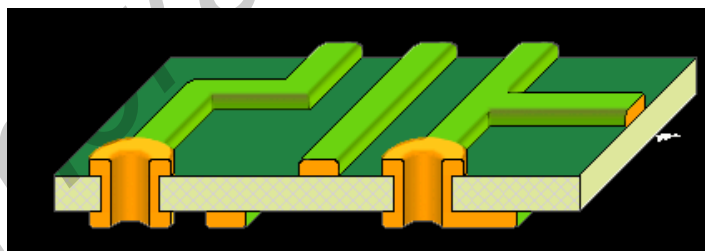
Изучение технологического процесса изготовления печатных плат фотохимическим методом и исследование основных параметров плат.

Теоретические сведения

Печатным монтажом называется система печатных проводников (ПП), обеспечивающих электрические соединения элементов схемы, экранирование, заземление. Элементами ПП являются диэлектрическое основание, металлическое покрытие в виде рисунка печатных проводников и контактных площадок, металлизированные монтажные и фиксирующие отверстия (рис. 3.1).



а



б

Рис. 3.1. Печатные проводники (а) и металлизированные отверстия (б) плат

Современный печатный монтаж обеспечивает:

- большую плотность монтажных соединений (до 40–50 паек/см²);
- резкое снижение числа паяных соединений, что способствует увеличению надежности изделий;
- повышение электрических нагрузок в цепях в 5–10 раз;
- улучшение вибропрочности, теплоотдачи и стойкости аппаратуры к климатическим воздействиям;
- стабильную повторяемость параметров изделий;
- микроминиатюризацию, унификацию и стандартизацию конструкций электронной аппаратуры;

– возможность автоматизации сборочно-монтажных работ.

Основные технические требования к печатному монтажу:

- точность получения изображения рисунка $\pm(0,05-0,3)$ мм в зависимости от метода изготовления;
- разрешающая способность 0,1– 1,0 мм;
- токонесущая способность проводников до 20 А/мм²;
- прочность сцепления с основанием не менее 15 МПа;
- сопротивление изоляции между токоведущими элементами 10^4 МОм;
- омическое сопротивление проводника шириной 0,5 мм не более 1,4 Ом/м;
- сопротивление межслойного перехода не более 0,001 Ом.

Основными тенденциями развития печатного монтажа являются:

- повышение рабочей частоты схемы до 100 МГц и выше;
- увеличение отвода тепла от электронных компонентов;
- снижение уровня электромагнитных помех.

Основные материалы для изготовления печатных плат: стеклотекстолит, гибкий фольгированный диэлектрик ФГ, гетинакс, лавсан, фторопласт, полиамид фольгированный. Медную фольгу к диэлектрикам приклеивают клеем БФ-4. Фольгированные гетинаксы марки ГФ имеют нагревостойкость до 90 °С, эпоксидный стеклотекстолит СФ – до 150 °С, огнестойкий эпоксидный стеклотекстолит FR-4 – до 190 °С. Повышение огнестойкости диэлектриков (ГПФ, ГПФВ, СПНФ, FR-4), используемых в блоках питания, достигается введением в их состав антипиренов (например тетрабромдифенилопана).

Гибкий фольгированный диэлектрик ФГ-1-35 используется для изготовления гибких шлейфов и кабелей. Он выдерживает не менее 300 перегибов с радиусом закручивания 3 мм и углом перегиба 70°. Для микроэлектронных устройств применяют тонкие фольгированные стеклотекстолиты ФДМ, ФДМЭ, ФДМТ толщиной 0,1– 0,25 мм.

К наиболее важным параметрам печатных плат, определяющим надежность их работы в составе электронных модулей, относятся прочность сцепления фольги с основанием и стойкость к термоудару при пайке. Прочность сцепления с основанием проверяют методом отслаивания полоски фольги с постоянной скоростью (рис. 3.2).

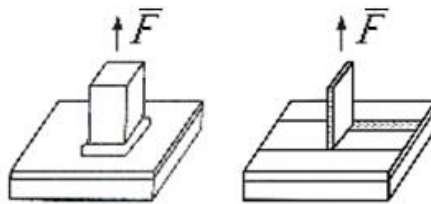


Рис. 3.2. Измерение прочности сцепления фольги

В этом случае она выражается отношением прикладываемого усилия к 1 см ширины отрываемой полоски. При испытаниях на термоудар образец на 10 с помещается на поверхность расплавленного припоя в ванне при температуре 280 °С, после чего измеряется усилие отрыва фольги. Для FR-4 усилие отрыва составляет 10–12 г/мм, а после нагрева и выдержки 8–9 г/мм.

Методы изготовления печатных плат классифицируют по способам переноса рисунка печатных проводников на диэлектрик и получения токопроводящего покрытия печатного монтажа. Перенос рисунка осуществляют методом трафаретной печати, фотопечати и офсетной печати. При трафаретной печати резисты, нанесенные через сетчатый трафарет на материал основы, образуют устойчивый к травлению слой толщиной 10–30 мкм. Разрешающая способность метода 0,5 линий/мм, он эффективен при использовании автоматического оборудования для больших серий.

При методе фотопечати поверхность фольгированного диэлектрика покрывают позитивным или негативным светочувствительным материалом, устойчивым к воздействию агрессивных сред и называемым фоторезистом, на который копируют рисунок печатного монтажа. Метод обеспечивает наивысшую разрешающую способность (до 2–3 линий/мм), высокую точность и четкость контуров проводников.

Получение рисунка печатного монтажа осуществляется либо путем травления фольги с незащищенных мест, либо электрохимическим методом. Методы травления обеспечивают равномерную толщину проводников, высокую прочность сцепления с основанием, высокую электропроводность и простой технологический цикл изготовления платы. Недостатки: значительный расход меди, невозможность металлизации в отверстиях.

Электрохимические методы предполагают первоначальное нанесение схемы на поверхность диэлектрика химическим способом в соответствии с рисунком и последующее гальваническое наращивание металла до требуемой толщины. При этом подвергаются металлизации и монтажные отверстия, экономится медь. Недостатки: слабая адгезия проводников к основанию, неравно-

мерность толщины проводников, значительное время воздействия химических реагентов на основание.

Развитием электрохимических методов являются аддитивные и полуаддитивные методы, которые позволяют увеличить плотность монтажа, уменьшить подтравливание проводников, сократить расход травильных растворов. В аддитивных методах нанесение проводников осуществляется путем селективного химического восстановления ионов металла, а в полуаддитивных – наряду с химическим наращиванием производится электрохимическое формирование проводников.

Высокая прочность сцепления проводников с основанием при аддитивном методе достигается использованием либо диэлектрика с введенным катализатором, либо специального адгезива. В качестве катализатора применяют палладий, который дисперсно распределяется в материале в количестве от 0,1 до 10 %. Адгезивы представляют собой различные композиции, например на основе акрилонитрилбутадиенового сополимера (АБС), толщиной 20–30 мкм, наносимые на основание окунанием и последующей термообработкой.

Для изготовления двусторонних печатных плат с металлизацией отверстий применяют комбинированные негативный и позитивный методы, сочетающие в себе принципы химических и электрохимических методов.

При *негативном методе* экспонирование рисунка печатного монтажа осуществляется с фотонегатива, травление медной фольги с пробельных мест производится до металлизации отверстий.

Позитивный метод предусматривает экспонирование с фотопозитива. Операция травления осуществляется после металлизации отверстий. Металлическая поверхность проводников и стенки отверстий перед травлением защищаются металлическим резистом, устойчивым к травильным растворам, например сплавом олово – свинец.

При позитивном методе исключаются возможности срыва контактных площадок при сверлении монтажных отверстий, уменьшается воздействие химических реагентов на основание платы, однако происходит пассивация поверхности металла внутри отверстий при травлении фольги.

Комбинированный негативный метод включает операции (рис. 3.3):

- получение контура заготовки и подготовка ее поверхности;
- нанесение негативного рисунка схемы, ретуширование;
- травление металлической фольги с пробельных мест;
- нанесение защитной пленки лака для защиты всей поверхности платы от химического меднения краскораспылителем и подсушивание при температуре 50–60 °С (цапонлак, клей АК-20);

- сверление отверстий, зенковка, которая улучшает электрическую связь металлизированного отверстия с контактной площадкой;
- химическое меднение;
- снятие защитного слоя лака;
- гальваническое меднение стенок отверстий;
- снятие фоторезиста;
- покрытие проводников припоем для обеспечения их паяемости.

Преимущества метода: освоенность процесса производства, широкая номенклатура травителей. Недостатки: возможность срыва контактных площадок при сверлении; требуются специальные контактирующие приспособления при металлизации отверстий; вредное воздействие химических растворов на платы; большая величина подтравливания.

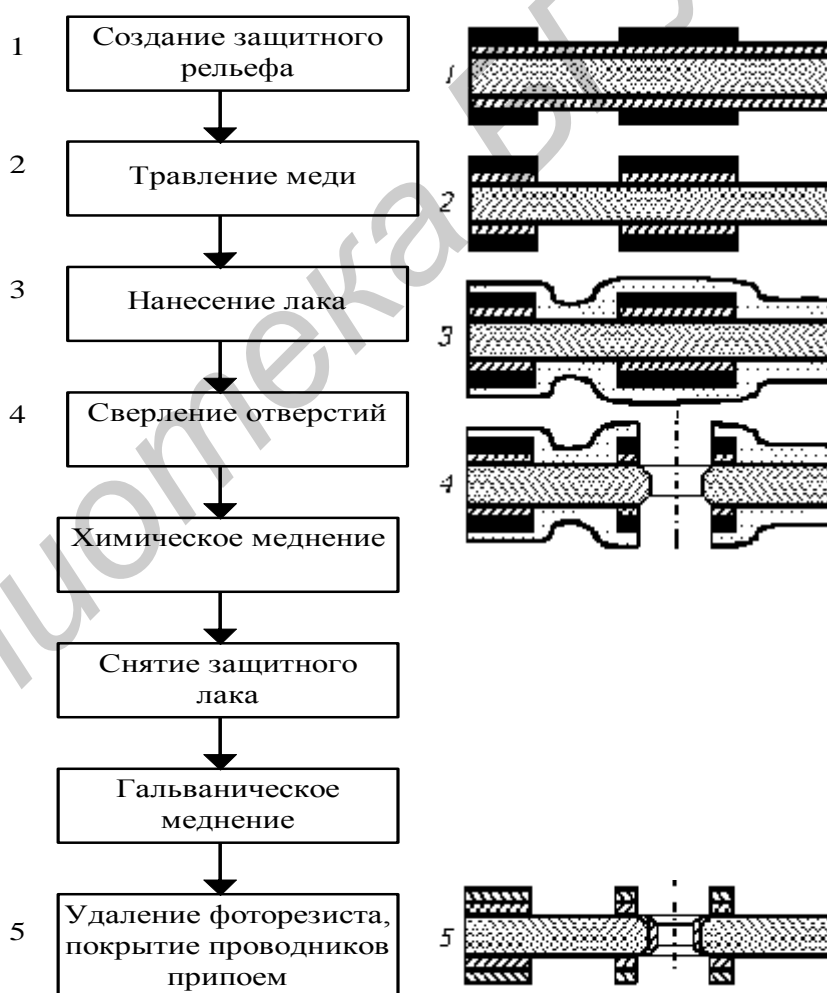


Рис. 3.3. Схема технологического процесса изготовления печатных плат комбинированным негативным методом

Комбинированный позитивный метод включает операции (рис. 3.4):

- получение контура заготовки и подготовка ее поверхности;
- нанесение позитивного рисунка схемы;
- нанесение защитного слоя лака (нитроклей АК-20, эмаль ХСЭ, ХСЛ) для предохранения от воздействия химически активных растворов при химической металлизации, количество слоев 2–3, нанесение окунанием, поливом или с помощью краскораспылителей, сушка в течение 20–40 мин при 60–80 °С;
- сверление отверстий в плате;
- химическое меднение отверстий толщиной слоя 1–2 мкм при скорости 20–30 мкм/ч;
- гальваническое меднение толщиной 25–30 мкм;
- удаление защитного слоя лака;
- нанесение металлического резиста для защиты проводников и отверстий от травления (серебрение толщиной 10–12 мкм, гальваническое покрытие сплавами Sn-Pb; Sn-Bi толщиной 20–25 мкм);
- удаление фоторезиста;
- травление пробельных мест;
- оплавление металлического резиста для удаления припоя из покрытий и улучшения паяемости покрытия;
- контроль платы, маркировка.

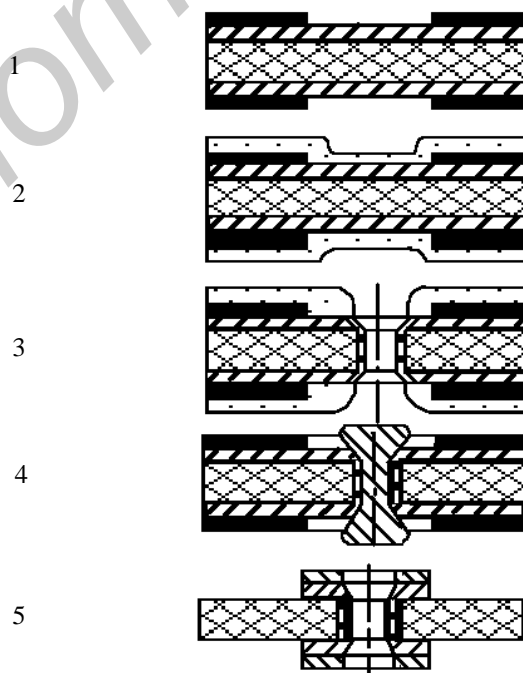


Рис. 3.4. Схема процесса изготовления ДПП комбинированным позитивным методом:
1 – нанесение защитного рельефа; 2 – нанесение лака; 3 – сверление и металлизация отверстий; 4 – нанесение металлического резиста; 5 – травление и оплавление резиста

Гальванически нанесенный металлический резист (сплав Sn-Pb) имеет пористую структуру, быстро окисляется, теряет способность к пайке. Для устранения этих недостатков проводят оплавление резиста либо с помощью ИК-излучения, либо в нагретой жидкости (глицерине), либо горячим воздухом. В результате покрытие приобретает структуру металлургического сплава и хорошую паяемость.

Заготовки печатных плат получают резкой листа фольгированного материала на дисковой пиле или штамповкой с одновременной пробивкой технологических отверстий. При толщине штампуемого листа более 1,5 мм, сложном профиле заготовки обрабатываемый материал подогревают до 60 °С. Заусенцы и фаски снимают на абразивных кругах.

Сверление отверстий в платах осуществляют на одно- и многошпиндельных сверлильных автоматах с цифровым программным управлением при числе оборотов шпинделя 12 000–45 000 в минуту, подаче 0,02–0,05 мм/оборот.

Применяют сверла из твердых сплавов типа ВК6М со стойкостью режущей части до 5000 отверстий и оптимальным углом при вершине 120–125°.

Вследствие нагревания сверла отверстия обволакиваются расплавленной эпоксидной смолой, которая может очищаться химическим травлением диэлектрика, при этом не только удаляются остатки смолы, но и подтравливается материал в отверстиях, что увеличивает поверхность для осаждения меди.

Получение изображения защитного рисунка осуществляется с помощью негативных или позитивных фоторезистов. Негативные фоторезисты под действием ультрафиолетового излучения фотополимеризуются и образуют защитные непрозрачные участки на поверхности основания. Негативные фоторезисты изготавливают на основе поливинилового спирта с добавлением к его водному раствору бихромата аммония для придания светочувствительности.

Разрешающая способность негативных фоторезистов – 50 линий/мм, они не содержат токсичных соединений, проявляются теплой водой, имеют низкую стоимость. Недостатками являются эффект темнового дубления, проявляющийся в полимеризации резиста не только под действием света, но и в темноте, а также низкая стойкость к химическим реагентам.

Позитивные фоторезисты, получаемые на основе диасоединений, при действии излучения подвергаются фотохимической деструкции и вымываются при проявлении. Разрешающая способность таких фоторезистов 350–400 линий/мм, в них отсутствует эффект темнового дубления.

Позитивные фоторезисты имеют более высокую разрешающую способность, что объясняется различиями в поглощении излучения фоточувствительным слоем. На разрешающую способность слоя влияют дифракционное огибание света на краю непрозрачного элемента шаблона и отражение света от подложки (рис. 3.5).

В негативном фоторезисте дифракция не играет заметной роли, поскольку шаблон плотно прижат к резисту, но в результате отражения вокруг защитных участков появляется ореол, который снижает разрешающую способность. В слое позитивного резиста под влиянием дифракции разрушится и вымоется при проявлении только верхняя область резиста под непрозрачными участками фотошаблона, что мало скажется на защитных свойствах слоя. Свет, отраженный от подложки, может вызвать некоторое разрушение прилегающей к ней области, но проявитель эту область не вымывает, так как под действием адгезионных сил слой опустится вниз, вновь образуя четкий край изображения без ореола.

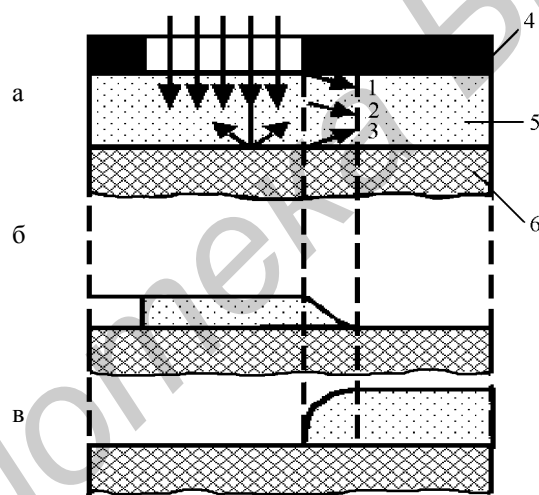


Рис. 3.5. Схема экспонирования светочувствительного слоя:
 а – засветка; б – негативный фоторезист; в – позитивный фоторезист;
 1 – дифракция; 2 – рассеяние; 3 – отражение, 4 – шаблон; 5 – резист; 6 – подложка

Широко применяются сухие фоторезисты типа СПФ, которые по своей разрешающей способности не уступают фоторезистам на основе диасоединений, а по технологичности намного их превосходят, так как исключаются операции сушки, термического дубления, окрашивания. Сухой фоторезист представляет собой тонкую пленку, состоящую из трех слоев: оптически прозрачной пленки полиэтилентерефталата 1, пленки светочувствительного полимера 2 и защитной полиэтиленовой пленки 3 (рис. 3.6). Перед нанесением фоторезиста на поверхность заготовки слой защитной пленки снимают, а фотополимер при-

клеивают с помощью валковой установки – ламинатора. Оптически прозрачная полиэфирная пленка удаляется перед операцией проявления.

Применение сухого фоторезиста значительно упрощает процесс изготовления ПП, увеличивает процент выхода годных изделий с 60 до 90 %. При этом исключаются операции сушки, дубления и ретуширования, а также загрязнение, нестабильность слоев; обеспечивается защита металлизированных отверстий от затекания фоторезиста; достигается автоматизация процесса изготовления ПП и контроля изображения.

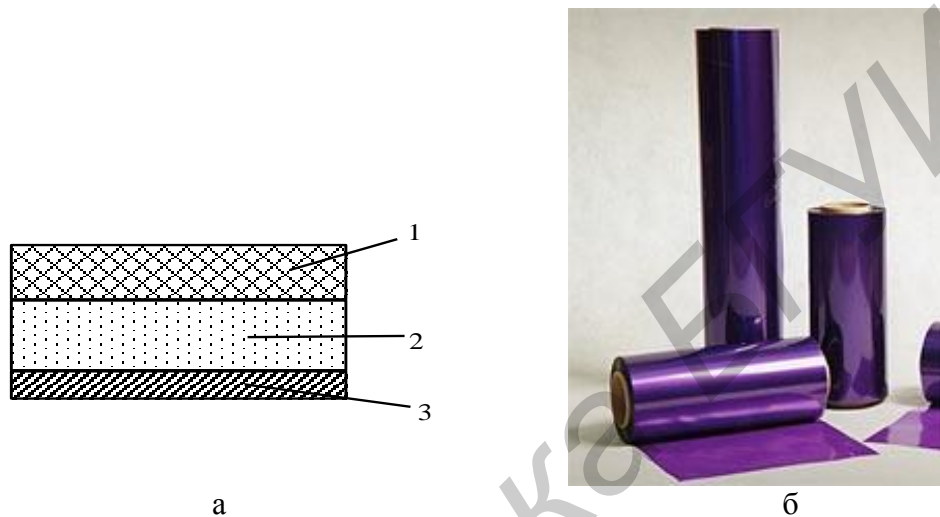


Рис. 3.6. Сухой пленочный фоторезист:
а – структура; б – внешний вид

Установка для нанесения сухого пленочного фоторезиста – ламинатор (рис. 3.7) – состоит из валков 2, подающих плату 6 и прижимающих фоторезист к поверхности заготовок, валков 3 и 4 для снятия защитной полиэтиленовой пленки, бобины с фоторезистом 5, нагревателя 1 с терморегулятором. Скорость движения заготовки платы достигает 0,1 м/с, температура нагревателя 105 ± 5 °С. Конструкция установки обеспечивает постоянное усилие прижатия независимо от зазора, устанавливаемого между валками-нагревателями. Максимальная ширина заготовки ПП – 560 мм. Особенностью накатывания является опасность попадания пыли под слой фоторезиста, поэтому установка должна работать в гермозоне. Накатанная пленка фоторезиста выдерживается не менее 30 мин перед экспонированием для завершения усадочных процессов, которые могут вызвать искажение рисунка и уменьшить адгезию.

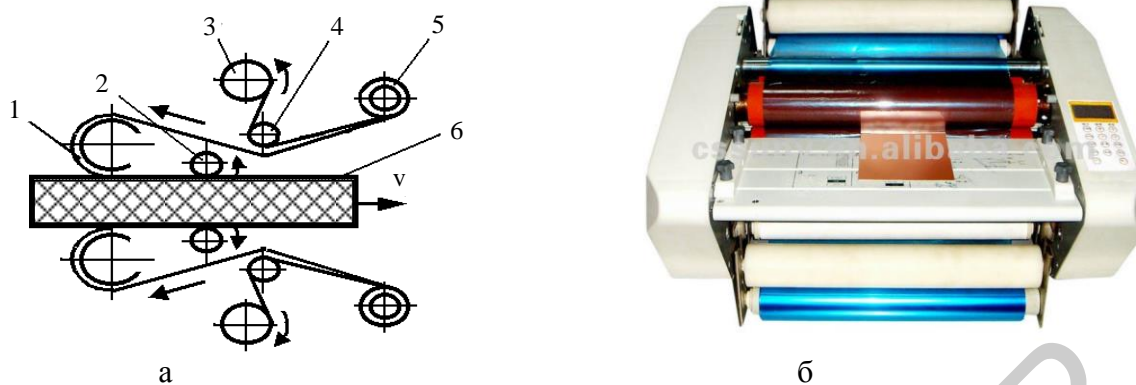


Рис. 3.7. Схема (а) и внешний вид (б) ламинатора

Экспонирование фоторезистов осуществляют в вакуумных светокопировальных рамах, обеспечивающих плотное прилегание фотошаблона к фоторезисту, под воздействием ультрафиолетового излучения (300–450 нм), получаемого от ртутно-паровых или галогенных ламп. Экспонирование фоторезиста предназначено для инициирования в нем фотохимических реакций и проводится в установках, имеющих источники света (сканирующие или неподвижные), работающие в ультрафиолетовой области. Для плотного прилегания фотошаблонов к заготовкам плат используют рамы, где создается разрежение. Время экспозиции ртутной лампой ДРШ-1000 при интенсивности до 35 мВт/см^2 составляет 3–5 мин. После экспонирования для завершения фотохимической реакции полимеризации необходима выдержка в темном месте при комнатной температуре в течение 20–30 мин перед удалением лавсановой пленки.

На смену обычной фотолитографии приходят процессы прямого формирования рисунка на фоторезисте (LDI—Laser Direct Imaging), где исключаются фотошаблоны, обработка фотопленки, корректировка дефектов. Процессы LDI обеспечивают лучшую четкость рисунка, более точное совмещение элементов, высокую гибкость и управляемость, что в конечном итоге позволяет увеличить количество выходных годных печатных плат высоких классов точности. Для LDI процессов применяют газовые или твердотельные лазеры мощностью несколько ватт, работающие в ультрафиолетовом диапазоне. Недостатком является низкая производительность, которая не превышает 80–90 заготовок в час, тогда как контактная печать с фотошаблона позволяет экспонировать до 200–300 заготовок в час.

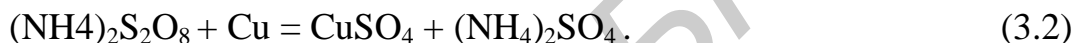
Травление меди – сложный окислительно-восстановительный процесс, в котором окислителем является травильный раствор, переводящий медь из металлического состояния в ионное. В качестве травильных применяют растворы на основе хлорного железа, персульфата аммония, хлорной меди, перекиси во-

дорода и др. Наиболее распространен раствор хлорного железа (удельный вес 1,3–1,4 г/см³) с небольшим количеством (до 50 г/л) соляной кислоты. Травление меди происходит по реакции



Температура раствора 35–50 °С, время травления фольги толщиной 35 мкм 15–20 мин. Предельная концентрация меди в растворе составляет 50–60 кг/м³, после чего раствор регенерируют. Недостатками состава являются малая скорость травления, потеря меди, трудность отмывки плат.

Травильный раствор на основе персульфата аммония применяется для удаления меди с плат, проводники которых защищены сплавом олово – свинец. Процесс травления описывается уравнением



Температура раствора 45–50 °С, время травления фольги толщиной 35 мкм 10–15 мин, предельная концентрация меди в растворе – 40 кг/м³.

Преимущества : более высокая скорость травления, легкость регенерации. Недостатки: наблюдается эффект подтравливания проводников, выпадение кристаллического осадка на вытравленной поверхности, что приводит к дополнительной обработке в 10%-й серной кислоте, токсичность продуктов разложения. Травление осуществляют либо погружением заготовок плат в ванны с подогреваемым раствором и перемешиванием его сжатым воздухом, либо на установках струйного травления с автоматизированной подачей раствора и перемещением плат на конвейере со скоростью 0,04–0,25 м/мин.

Скорость травления оказывает существенное влияние на качество формируемых элементов ПП. При малых скоростях время травления увеличивается, что приводит к ухудшению диэлектрических свойств основания и увеличению бокового подтравливания. Оно возникает из-за того, что травитель также взаимодействует с боковой поверхностью проводников. Вследствие этого уменьшается их токонесущая способность и прочность сцепления с диэлектриком. Величина подтравливания характеризуется коэффициентом, представляющим собой отношение глубины травления h к боковому подтравливанию c (рис. 3.8):

$$k = \frac{h}{c} = \frac{2h}{a-b}. \quad (3.3)$$

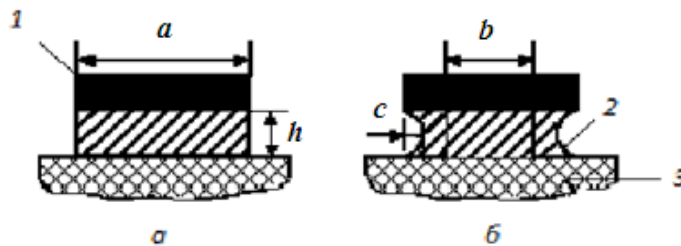


Рис. 3.8. Формы поперечного сечения проводников до (а) и после (б) травления:
1 – резист; 2 – проводник; 3 – основание платы

Химическая металлизация поверхности диэлектрика основана на реакции восстановления металла из раствора и его осаждении на поверхности, имеющей каталитические свойства. Для того чтобы передать диэлектрику способность к металлизации, проводят операции сенсбилизации и активирования. Для достижения требуемой надежности и обеспечения ремонтпригодности толщина металлизации в отверстиях печатных плат должна быть не менее 25 мкм. Толщина слоя химической меди должна составлять 0,25–1,0 мкм, покрытие должно быть однородным, пластичным, хорошо сцепленным с диэлектриком.

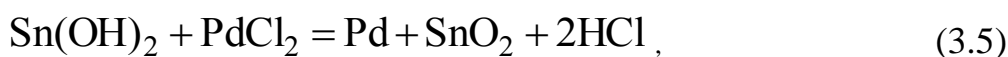
Для придания диэлектрику способности к металлизации проводят такие подготовительные операции, как сенсбилизация и активация поверхности.

Сенсбилизация (от лат. *sensibilis* – чувствительный) имеет целью формирование на поверхности диэлектрика пленки ионов двухвалентного олова Sn^{2+} , являющихся восстановителем для ионов активатора металлизации. Платы обрабатывают в растворе двуххлористого олова и соляной кислоты в соотношении 1:4 в течение 5–7 мин и промывают в деионизованной воде. Образование гидроксида олова происходит по реакциям



Электронно-микроскопические исследования показали, что гидроксид двухвалентного олова адсорбируется в виде отдельных участков размером порядка 10 нм, на расстоянии 20–30 нм друг от друга, так, что им покрывается вся поверхность диэлектрика. Гидроксид двухвалентного олова обладает сильными восстановительными свойствами. Активация поверхности диэлектрика проводится в растворах солей благородных металлов, преимущественно палладия, и способствует последующему осаждению меди. Активирующий раствор имеет следующий состав: 3,5–4,0 г/л PdCl_2 , 10–20 мл/л HCl , остальное – вода, а процесс осуществляют при температуре 40–50 °С ($\text{pH} = 3,5–0,5$) в течение 5–7 мин.

Реакция восстановления палладия на диэлектрике



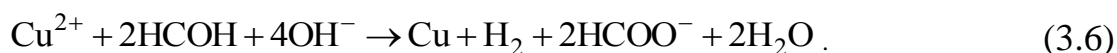
в ионном виде $\text{Sn}^{2+} + \text{Pb}^{2+} = \text{Sn}^{4+} + \text{Pb}^0$,
на торцах контактных площадок $\text{Cu} + \text{PbCl}_2 = \text{Pb} + \text{CuCl}_2$.

На поверхности изоляционного материала вследствие адсорбции и восстановления палладия образуется тонкая сетка частиц размером порядка 10 нм. Связь частиц палладия с подложкой определяется их внедрением в поры диэлектрика, а также образованием ковалентных связей между металлом и материалом подложки. Для хорошего сцепления необходимо, чтобы на поверхности диэлектрика было не менее $1 \cdot 10^{-6}$ кг/см² палладия. Пленка палладия, образующаяся на торцах контактных площадок, является нежелательной, так как приводит к снижению прочности химически осажденной меди в результате образования гидридов палладия при захватывании палладием водорода. Кроме того, это приводит к образованию высокого и неравномерного переходного электрического сопротивления.

Химическое осаждение меди – окислительно-восстановительный процесс, который происходит вследствие восстановления ионов двухвалентной меди на активированных поверхностях из ее комплексных солей. Основными компонентами раствора химического меднения являются:

- а) 15–20 г/л сернокислой меди CuSO_4 – источника катионов Cu^{2+} ;
- б) 2–4 г/л солей никеля NiCl_2 для большей прочности сцепления меди с диэлектриком;
- в) 10–15 г/л щелочи NaOH для создания $\text{pH} = 10\text{--}13$;
- г) 2–4 г/л Na_2CO_3 для увеличения скорости химического меднения и как буферная добавка;
- д) 4–16 г/л восстановителя – 33 %-го раствора формалина (CHON);
- е) комплексообразователь – калий винно-кислый как стабилизатор раствора – 50–60 г/л.

При введении формалина в раствор реакция восстановления меди при комнатной температуре становится автокаталитической. Процесс химического меднения представляет собой сумму электрохимических реакций катодного восстановления металла и анодного окисления восстановителя. Основная катодная реакция восстановления меди выражается уравнением



Анодная реакция заключается в окислении формалина при $pH = 12-13$ и потенциале $+0,80$ В. Время осаждения подслоя меди толщиной $0,5$ мкм при температуре 20 °С составляет $15-20$ мин. Для облегчения удаления водорода и лучшего омывания раствором отверстий малого диаметра процесс ведется с плавным покачиванием плат ($8-10$ качаний в минуту при амплитуде $50-100$ мм).

Гальваническое меднение осуществляют в пирофосфатных борфтористоводородных и сернокислых блестящих электролитах. Для повышения скорости осаждения применяют перемешивание электролита, проточный электролит, нестационарные режимы электроосаждения.

Контроль качества плат производят после основных операций технологического процесса, что обеспечивает обнаружение и устранение причин брака.

Наиболее типичные дефекты печатных плат:

- короткое замыкание между проводниками и контактными площадками по причине сдвига внутренних слоев при прессовании или попадание раствора химического меднения в зазоры;

- разрыв проводников из-за царапин на поверхности или подтравливания;

- отсутствие контакта между проводниками слоев и металлизированными отводами вследствие плохой подготовки к химической металлизации или малой площади контактирования;

- выход окружности отверстия за пределы контактной площадки по причине плохой точности при сверлении отверстий;

- снижение сопротивления изоляции – проникновение в межслойные соединения влаги, растворов.

Типичными причинами брака могут быть: непрочное прилегание фоторезиста к плате, малое время экспонирования, плохая подготовка поверхности, подтравливание печатных проводников. Готовую плату проверяют визуально. Печатные проводники должны быть четкими, с ровными краями, без отслаиваний и подтравливания. Электрические и механические параметры печатных проводников исследуют с помощью специальных тестовых плат, имеющих контрольные элементы.

Порядок выполнения работы

1. Получить необходимые материалы, инструмент и заготовку из фольгированного материала.

2. Обезжирить поверхность заготовки с помощью салфетки, смоченной ацетоном. *Работу производить в вытяжном шкафу.*

3. Декапировать плату в растворе соляной кислоты в ванночке из органического стекла в течение 2 мин. Раствор слить обратно в сосуд.

4. Промыть плату в проточной воде. Высушить и прогреть плату до температуры 50–60 °С под феном.

5. Снять защитную пленку с одной стороны сухого фоторезиста и наложить его этой стороной на нагретую плату и прикатать фоторезист к поверхности медной фольги с помощью валика, начиная с центра платы к ее краям, прижимая валик сначала с небольшим усилием, затем более сильно.

6. Ознакомиться с устройством и правилами работы на установке экспонирования Master PCB по инструкции. Под наблюдением инженера необходимо:

– включить клавиши питания на панели управления, выставить на счетчике требуемое время экспонирования (60–80 с) (рис. 3.9);

– расстегнуть защелку, удерживающую верхнюю крышку, и поднять крышку установки, уложить заготовку с фотошаблоном в вакуумную камеру;

– плотно закрыть камеру верхней крышкой, включить вакуумный насос и откачать воздух из вакуумной камеры в течение не менее 30 с.



Рис. 3.9. Настольная установка экспонирования Master PCB

7. Закрыть установку, застегнуть защелки и включить ультрафиолетовые лампы. Светодиодный дисплей таймера начнет отсчет оставшегося времени экспонирования и подаст сигнал по окончании цикла экспонирования.

8. Выключить вакуумный насос, открыть корпус и через несколько секунд открыть вакуумную камеру и извлечь заготовку платы.

ВНИМАНИЕ! При экспонировании избегать смотреть на ультрафиолетовые лампы, поскольку это вредно для глаз.

9. После остывания платы снять вторую защитную пленку с фоторезиста.

10. Проявить фоторезист. Для этого небольшое количество проявителя (50–100 мл) налить в ванночку, опустить в ванночку плату и легким протиранием смоченной салфеткой всей поверхности фоторезиста проявить его.

Проявление производить в вытяжном шкафу. Отработанный раствор слить.

11. Произвести необходимые измерения параметров заготовки платы в соответствии с рис. 3.10 под микроскопом МБС-2.

12. Протравить пробельные места медной фольги в растворе треххлористого железа. Для этого налить в керамическую ванночку травильный раствор; поместить плату в раствор так, чтобы она была полностью закрыта раствором; включить плитку и нагреть раствор до 60 °С. После травления слить раствор обратно в сосуд, вымыть ванночку, промыть плату в проточной воде.

13. Снять фоторезист. Для этого налить в ванночку раствор снимателя; смоченной салфеткой протирать плату до полного снятия фоторезиста. Промыть и высушить плату.

14. Произвести измерения минимальной ширины проводника 1, минимального расстояния между проводниками 2 и диаметра контактной площадки 6 с помощью микроскопа МБС-2 (см. рис. 3.10). Измерения производить на фототаблоне и изготовленной плате, полученные данные занести в табл. 3.1.

15. Измерить сопротивление изоляции между проводниками 3 и 4:

– собрать схему (рис. 3.11, а);

– установить измерительные щупы на

контактные площадки исследуемых проводников;

– включить прибор Е7-14, для чего сетевой переключатель перевести в положение «Вкл»; после установки прибора в рабочий режим нажать на его передней панели кнопки: «R», «Усреднение 10» и автоматический предел измерения;

– запустить прибор нажатием кнопки «Запуск» в автоматическом либо ручном режиме; полученные значения сопротивления занести в табл. 3.2.

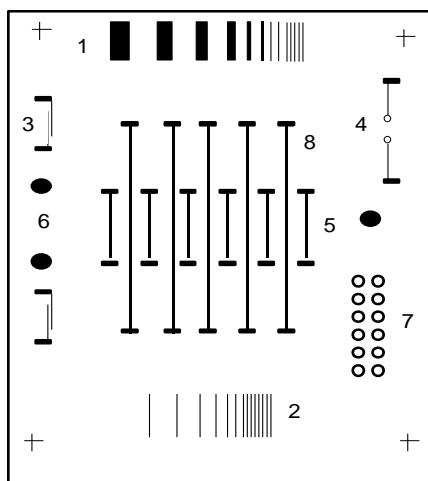


Рис. 3.10. Тестовая печатная плата с контрольными элементами для определения следующих параметров:

1 – минимальная ширина проводника; 2 – минимальное расстояние между проводниками; 3 – сопротивление изоляции поверхностное; 4 – сопротивление изоляции объемное; 5 – токонесящая способность проводников; 6 – прочность сцепления с основанием; 7 – количество перепаек; 8 – удельное электрическое сопротивление

Таблица 3.1

Параметры печатных проводников на различных стадиях технологического процесса

Операции	Минимальная ширина проводника, мм	Минимальные промежутки, мм	Диаметр контактной площадки, мм	Причины отклонений от номинальных значений
Фотонегатив				
Получение защитного рисунка				
Травление				
Гальваническое покрытие				
Лужение печатных проводников				

Таблица 3.2

Параметры печатных проводников

Исследуемые параметры	Ширина проводника b , мм					Примечание
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
1. Электрическое сопротивление, Ом/м						
2. Токонесущая способность, А/мм ²						
3. Сопротивление изоляции, МОм						
4. Прочность сцепления с основанием, Па						
5. Количество перепаек						

16. Определить удельное электрическое сопротивление проводников по схеме измерения падения потенциала на проводнике (рис. 3.11, б):

- включить вольтметр путем перевода сетевого переключателя в положение «Вкл»;
- на лицевой панели вольтметра нажать кнопки «АВП», «U» и «T₀»;
- измерительный щуп установить на контактные площадки проводника 8 наибольшей ширины (см. рис. 3.10.);
- вывести ручку регулировки напряжения источника тока ВСА-5К в крайнее левое положение и включить его ручкой «Режим работы» в положение 1;
- вращая ручку регулировки напряжения вправо, выставить ток 5 А;
- измерить величину падения напряжения на проводнике с помощью вольтметра В7-34А;
- выключить выпрямитель и переставить измерительные щупы на контактные площадки следующего проводника.

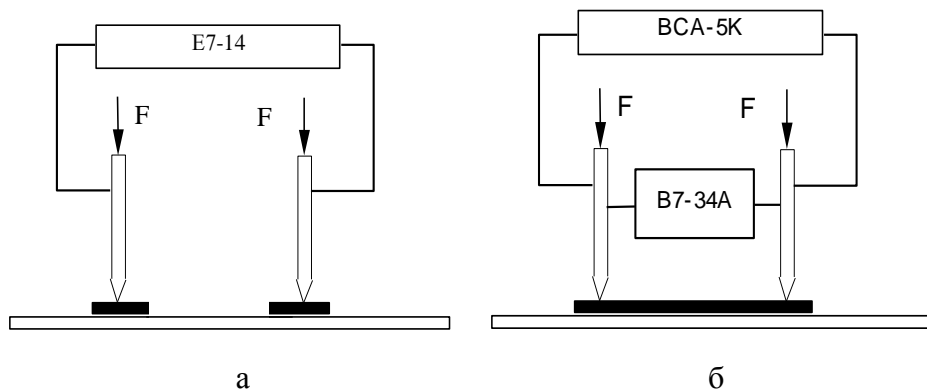


Рис. 3.11. Схемы измерения сопротивления изоляции между проводниками (а) и падения напряжения на проводнике (б)

В случае изменения величины тока не пытаться выставить его первоначальное значение, а переписать установившееся. Повторить измерения для оставшихся проводников. В процессе измерений следить, чтобы на передней панели вольтметра была включена кнопка «U».

Рассчитать удельное электрическое сопротивление проводников:

$$\rho = R \cdot S / L, \quad (3.7)$$

где R – электрическое сопротивление, рассчитанное по закону Ома;

S – площадь сечения проводника;

L – длина проводника.

17. Определить максимальную токонесущую способность проводников:

– из схемы (см. рис. 3.11, б) исключить вольтметр, измерительные щупы установить на контактные площадки проводника 5 с наибольшей шириной (см. рис. 3.10);

– вывести ручку регулировки напряжения в крайнее левое положение;

– включить выпрямитель ручкой «Режим работы» в положение 1;

– поворачивая ручку регулировки напряжения вправо, заметить на амперметре значение тока, при котором произойдет выгорание проводника;

– вывести ручку регулировки напряжения в крайнее левое положение;

– выключить выпрямитель и переставить измерительные штанги приспособления на контактные площадки следующего проводника;

– повторить измерения для оставшихся проводников и полученные данные занести в табл. 3.2.

18. Определить количество перепаек. Для этого включить тумблер «Сеть» на источнике питания паяльника; после нагрева паяльника залудить несколько

контактных площадок 7 и, имитируя процесс пайки, определить количество перепаяек до отслоения контактной площадки от основания.

19. Определить усилие отрыва. Для этого залудить контактную площадку 6 и припаять к ней специальное приспособление; затем с помощью разрывного приспособления оторвать контактную площадку от основания, зафиксировав при этом величину усилия отрыва.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема исследуемого технологического процесса с эскизами по операциям.
3. Чертеж тестовой печатной платы.
4. Результаты исследований (табл. 3.1, 3.2).
5. Расчеты ρ_m , $I_{\text{доп}}$, σ_v .
6. Графики зависимостей $R = f(b)$; $I = f(b)$; $R_{\text{изол}} = f(a)$.
7. Выводы, содержащие анализ экспериментальных данных.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные материалы в производстве печатных плат.
2. Какие существуют методы изготовления односторонних плат?
3. Чем различаются негативный и позитивный комбинированные методы?
4. Какие фоторезисты используются в производстве печатных плат?
5. Как определить коэффициент подтравливания?
6. Химическая металлизация проводников и отверстий.
7. Методы контроля параметров печатных проводников.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СКЛЕИВАНИЕМ

Цель работы

Исследование влияния технологических факторов (температуры, давления, времени сушки) на механическую прочность клеевых соединений, а также моделирование процесса склеивания методом планирования эксперимента.

Теоретические сведения

Склеивание – это технологический процесс соединения изделий, осуществляемый с помощью специальных веществ, которые вследствие взаимодействия с поверхностью изделий и изменения своего физического состояния способны при определенных условиях прочно их скреплять. Соединение различных материалов с помощью клеев является результатом проявления сил адгезии, аутогезии и когезии.

Адгезией называется явление прилипания, которое возникает при контакте двух разнородных материалов. Процесс склеивания сопровождается не только возникновением специфических сил сцепления между клеем (адгезивом) и склеиваемой поверхностью (субстратом), но также проникновением адгезива в поры склеиваемого материала и удержанием в них затвердевшего адгезива благодаря механическому заклиниванию.

Аутогезией называется явление прилипания поверхностей однородных материалов (самослипание). Это явление наблюдается при соединении резин, термопластов.

Когезия – это явление сцепления молекул склеивающего вещества между собой в объеме тела. В тонкой пленке клея наблюдается образование прочных молекулярных цепей от границы раздела фаз в глубь полимера. Для прочности клеевого соединения важно, чтобы эта структура не имела пор.

Основным явлением при склеивании является адгезия, которая возникает в результате проявления сил молекулярного взаимодействия между клеем и соединяемой поверхностью. Эти связи подразделяются на физические, которые проявляются при сближении двух веществ до расстояния межмолекулярного взаимодействия, и химические, возникающие в результате перестройки электронных оболочек атомов при их сближении.

Физические (ван-дер-ваальсовы) связи разделяются на три типа: полярные,

индукционные, дисперсионные. Наибольшая энергия соответствует полярным силам, а наименьшая – индукционным. Мерой полярности молекул служит дипольный момент μ , равный произведению величины зарядов q на расстояние между их центрами r ($\mu = rq$). Индукционные силы возникают в результате взаимодействия молекул, имеющих постоянный диполь, с неполярными молекулами, способными поляризоваться под действием постоянного диполя.

Дисперсионное взаимодействие свойственно всем молекулам: полярным, неполярным и их комбинациям – и обусловлено тем, что при вращении электронов вокруг ядра в отдельные мгновения создаются такие положения, при которых центры тяжести положительных и отрицательных зарядов смещаются относительно среднего положения. При этом даже у неполярных молекул образуются мгновенные диполи, которые вызывают их притяжение друг к другу.

Химические связи также делятся на три типа: ионные, ковалентные, металлические. При образовании ионной связи один из взаимодействующих атомов передает другому один или несколько валентных электронов, в результате чего атомы превращаются в ионы, а ионы, притягиваясь друг к другу вследствие противоположного знака их заряда, образуют молекулу с типичной ионной связью. Обычно такими атомами-донорами являются атомы металлов с эллиптическими орбитами электронов.

Ковалентные (атомные) связи образуются путем передачи каждым из взаимодействующих атомов одного или нескольких электронов в так называемое совместное пользование. Из них образуется электронная пара (или пары), общая для обоих атомов, посредством которой и осуществляется атомная связь между ними. Металлическая связь имеет особенности ионной и атомной связей. Атомы удерживаются в решетке так же, как и при ионной связи, но силы притяжения/отталкивания возникают в результате действия электронного облака. Этот тип связей характерен для металлов.

Анализ возникающих при склеивании материалов связей показывает, что наиболее прочными из рассмотренных выше являются химические связи, так как у них значительно превосходящие межмолекулярные силы.

Существует несколько теорий, в основе которых лежит различное представление о природе сил взаимодействия и механизме образования адгезионного соединения.

Адсорбционная теория объясняет адгезию действием сил Ван-дер-Ваальса между поверхностными молекулами адгезива и субстрата. Процесс образования клеевого соединения протекает в две стадии. На первой стадии в результате броуновского движения происходит миграция больших молекул полимера из раствора или расплава к поверхности субстрата. Это приводит к накоплению

молекул клеящего вещества у поверхности субстрата, т. е. к увеличению концентрации раствора клея у поверхности и снижению содержания полимера в остальном объеме раствора. Перемещение молекул адгезива интенсифицируется давлением и нагревом. Вследствие такого перемещения уменьшается расстояние между активными группами адгезива и субстрата.

Второй стадией адгезии является адсорбция. Когда расстояние между молекулами клея и субстрата станет меньше 5 \AA , начинают действовать межмолекулярные силы, приводящие к образованию различных связей (диполь – диполь, диполь – наведенный диполь). Связи между молекулами адгезива и субстрата оказываются более прочными, чем взаимодействие молекул полимера с молекулами растворителя клея. Это еще более усиливает миграцию цепей полимера к субстрату, в результате чего возникает большое количество точек контакта (якорные точки). Прочность адгезионного соединения зависит от природы межмолекулярных сил и от количества якорных точек между адгезивом и субстратом. Величину работы адгезии можно определить несколькими методами. Метод краевого угла основан на смачиваемости твердых поверхностей. В том случае, когда капля жидкости находится на поверхности (рис. 4.1), справедливо уравнение Дюпре:

$$W_{т.ж} = \sigma_{т.г} + \sigma_{ж.г} + \sigma_{т.ж}, \quad (4.1)$$

где $W_{т.ж}$ – работа адгезии между твердым телом и жидкостью;

$\sigma_{т.г}$ – поверхностное натяжение на границе твердое тело в газе;

$\sigma_{ж.г}$ – поверхностное натяжение на границе жидкость – газ;

$\sigma_{т.ж}$ – поверхностное натяжение твердого тела на границе с жидкостью.

Соотношение между $\sigma_{т.г}$, $\sigma_{ж.г}$, $\sigma_{т.ж}$ и Θ можно получить, если рассмотреть проекцию их на горизонтальную поверхность твердого тела:

$$\sigma_{т.г} = \sigma_{т.ж} + \sigma_{ж.г} \cos\theta. \quad (4.2)$$

Подставив данное выражение в уравнение (4.1), получим

$$W_{т.ж} = \sigma_{т.г} (1 + \cos\theta). \quad (4.3)$$

Из уравнения (4.3) следует, что максимальная работа адгезии будет получена тогда, когда $\cos\theta = 1$, т. е. когда угол смачивания $\theta \rightarrow 0^\circ$. В этом случае жидкость смачивает полностью поверхность твердого тела и величина адгезии будет определяться когезионной прочностью жидкости, равной $2\sigma_{ж.г}$. Этот факт часто используется в практике склеивания металлов при подготовке по-

верхности. Если угол смачивания будет 90° , то величина работы адгезии будет равна половине величины работы когезии. При $\Theta=180^\circ$ работа адгезии равна 0.

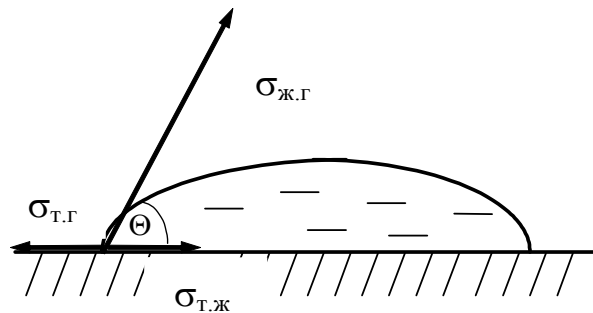


Рис. 4.1. Растекание капли жидкости по твердой поверхности

Работа адгезии может определяться и в неравновесном состоянии по величине усилия отрыва:

$$w_0 = \frac{F}{b}(1 - \cos\alpha), \quad (4.4)$$

где F – усилие при отрыве;

b – ширина образца;

α – угол, под которым пленка отрывается от пластины.

Результаты испытаний клеевых соединений первым и вторым методами показали, что работа адгезии, полученная методом краевого угла, значительно отличается от величины работы адгезии в неравновесных условиях. Это говорит о том, что на величину адгезии оказывают влияние не только межмолекулярные силы взаимодействия, но и электростатические. В этом состоит сущность одной из слабых сторон адсорбционной теории.

Диффузионная теория исходит из цепного строения и подвижности гибких макромолекул, обуславливающих диффузию полимеров в пограничном слое. Продиффундировавшие части макромолекулы удерживаются в полимерах межмолекулярными силами. Прочность образуемого адгезионного соединения пропорциональна числу молекулярных цепей, пересекающих границу раздела, и глубине проникновения макромолекул. Если концевые участки макромолекул проникают в другой полимер на глубину, соответствующую длине цепочки макромолекулы, образованной из 200–600 молекул мономера, то при разрушении адгезионной связи происходит скольжение цепей, т. е. концы макромолекул одного полимера выдергиваются из другого. Следовательно, энергия затрачивается на преодоление межмолекулярного взаимодействия, установившегося между продиффундировавшими участками двух полимеров. Если же

продиффундировавшие участки полимера длиннее, то при разрушении контакта происходит разрыв макромолекулы по химическим связям. Глубина проникновения макромолекул одного полимера в другой зависит от времени контакта, внешних условий, химической природы полимеров и их физического состояния. Взаимная диффузия двух приведенных в контакт полимеров возможна при условии их взаиморастворимости и достаточной подвижности молекул. Взаиморастворимость определяется в основном соотношением полярностей. Высокая адгезия возможна только тогда, когда оба высокополимера либо полярны, либо неполярны, и затруднена в том случае, когда один полимер полярен, а другой неполярен.

При адгезии к пористым телам, а также при адсорбционном механизме образования адгезионной связи можно также наблюдать возрастание адгезии при увеличении длительности контакта. При выяснении влияния на адгезию давления было установлено, что когда в контакт с субстратом приводится твердый адгезив, повышение давления способствует более полному взаимодействию склеиваемых слоев вследствие упругих сил или пластических деформаций неровностей поверхности и адгезия возрастает. Если же адгезив наносится на поверхность субстрата из раствора, то повышение давления при склеивании не оказывает никакого влияния на адгезионную прочность, так как в этом случае полный контакт между поверхностями устанавливается и без давления.

С увеличением температуры контакт адгезива повышается. Это следствие увеличения теплового движения молекул. Адгезия практически не зависит от толщины слоя адгезива, если он обладает высокой эластичностью. Если же адгезив неэластичен, прочность склеивания уменьшается с возрастанием толщины слоя адгезива. Это объясняется возникновением тангенциальных упругих напряжений в слое адгезива вследствие усадки при высыхании клея.

На адгезию высокополимеров очень сильно влияют природа адгезива и субстрата, такие свойства их молекул, которые определяют взаиморастворимость и диффузионную способность (молекулярный вес, форма, строение, гибкость молекул, присутствие в них полярных групп и т. д.). Диффузионная теория объясняет влияние на адгезию ряда технологических факторов: применение при склеивании растворителя, общего для адгезива и субстрата, введение в адгезив пластификатора или наполнителя, освежение перед склеиванием поверхностей растворителями и т. д. При склеивании двух высокополимеров целесообразно применять растворитель, способный растворять оба полимера, так как этим обеспечивается взаимная диффузия молекул адгезива и субстрата, что обуславливает их наибольшее взаимопроникновение и наибольшую адгезию.

Введение пластификатора в высоковязкий адгезив, тепловое движение молекулярных цепей которого затруднено, может способствовать диффузии, следовательно, повышать адгезию и прочность склеивания. При этом количество пластификатора должно быть небольшим, так как иначе прочность склеивания падает из-за снижения механических свойств клеящего вещества.

Однако диффузионная теория адгезии не дает полного представления о механизме образования связи адгезив – субстрат в случае склеивания металлов. Как известно, металлы имеют кристаллическую решетку, расстояние между ионами которой мало по сравнению с поперечным сечением цепей полимерных клеев и их длиной. Кроме того, площадь поверхностных дефектов, микротрещин и дефектов кристаллической решетки занимает лишь небольшую часть склеиваемой поверхности металла. Следовательно, роль диффузии и возникающей вследствие этого адгезии будет незначительна. Отсюда видно, что диффузионная теория адгезии объясняет лишь некоторые явления склеивания высокополимерных материалов термопластичными клеями.

Электрическая теория систему адгезив – субстрат отождествляет с конденсатором, обкладками которого является двойной электрический слой, возникающий в зоне контакта двух разнородных полимеров. Механизм образования двойного электрического слоя объясняется следующим. В общем случае двойной слой образуется благодаря переходу заряженных частиц (электронов) из одной фазы в другую (донорно-акцепторное взаимодействие). При контакте аморфных тел двойной слой может возникнуть, если одна из поверхностей насыщена донорными, а другая – акцепторными группами.

Подтверждением этой теории адгезии могут служить следующие экспериментальные данные: зависимость работы адгезии от скорости отслаивания, повышение сопротивления отслаивания в вакууме вследствие более высокого потенциала разряда; изменение работы адгезии при замене газовой среды, в которой производилось отслаивание и др.

Электрическая теория адгезии также не имеет универсального характера, она не может объяснить, например, возрастания адгезии с приближением природы соединяемых полимеров друг к другу. Неполярные полимеры не могут образовать прочную связь. Из электрической теории следует, что они не способны быть донорами электронов и, следовательно, не могут образовать двойной электрический слой.

Ни одна из рассмотренных существующих теорий адгезии не может исчерпывающе объяснить возникновение прочной связи между различными адгезивами и субстратами. Поэтому для объяснения явлений адгезии при склеивании необходимо использовать сочетание этих теорий.

Технологический процесс склеивания

1. Подготовка склеиваемых поверхностей.

Для получения высококачественных клеевых соединений необходимо с соединяемых поверхностей удалить загрязнения, обезжирить их в трихлорэтилене или ацетоне, промыть горячей водой и высушить.

2. Подготовка клея к применению.

Клей должен обладать хорошей текучестью и способностью смачивать склеиваемую поверхность, чтобы обеспечить наибольшую поверхность контакта. Для придания клею необходимой вязкости его можно разжижать растворителем, состав которого обусловлен маркой клея.

3. Нанесение клея на склеиваемые поверхности.

Клей наносится на склеиваемые поверхности в основном кистью или пульверизатором, а также способом окунания детали в жидкий клей. Обычно используется двойное нанесение слоя клея, иногда бывает и многократное. Количество клея в клеевых соединениях может быть разным, обычно толщина клеевого шва находится в пределах от 0,07 до 0,25 мм. Во многих случаях может быть увеличена толщина клеевого шва. Но во всех случаях, когда желательно получить от соединения оптимальные механические характеристики, клеевые швы не должны превышать по толщине 0,6 мм.

4. Подсушивание нанесенного клея перед соединением деталей.

Если растворитель остается в клеевом слое во время сборки склеиваемых частей, он может привести к образованию соединения с недостаточной прочностью. Поэтому для удаления растворителя необходимо подсушить склеиваемые детали. Сушка обычно производится короткое время и на воздухе.

5. Соединение склеиваемых деталей и отверждение клея.

На отверждение различных типов клеев по-разному влияют температура, давление и время процесса склеивания. Применяемые методы нагрева и давления весьма разнообразны. Самые удобные источники тепла – камеры или печи, нагреваемые электричеством и газом. Внешнее давление осуществляется обычно прессами, струбцинами, зажимами, в некоторых случаях, при особо сложных деталях, процесс отверждения осуществляется в вакууме.

6. Зачистка клеевых соединений.

Если внешний вид изделия или другие требования обязывают обеспечить отсутствие на готовом изделии клея, необходимо счищать этот избыток до отверждения клея. Основными методами очистки являются механическое соскабливание, обдувка песком и замачивание в горячих щелочных растворах мест с отвердевшим клеем. Для сохранения клеевых соединений чистыми осо-

бенно эффективны предупредительные меры. Для этого на поверхность изделия, примыкающего к склеиваемым участкам, наносится слой защитной пленки.

7. Контроль качества склеивания.

Осуществляется следующими методами: визуальным осмотром изделий; проверкой формы и размеров клеевого шва; простукиванием; с помощью специальных приборов (метод свободных колебаний, метод сквозного прозвучивания, ультразвуковой резонансный метод); испытаниями образцов; испытаниями на разрушение готовых изделий в определенном проценте от партии; проведением статических или динамических испытаний готовых изделий в определенном проценте от партии по специальной методике. Последние три метода испытаний дают возможность определить качество склеивания в зависимости от внешних факторов. При деформации многослойной системы материалов наблюдаются четыре типа разрушений (рис. 4.2):

- адгезионный – полное отслаивание адгезива от субстрата;
- аутогезионный – разрушение происходит по месту слипания склеиваемых поверхностей;
- когезионный – разрушение одного из склеиваемых материалов или самой клеевой пленки;
- смешанный – характеризуется частичным расслаиванием по месту первоначального контакта или частичным разрушением адгезива или субстрата.

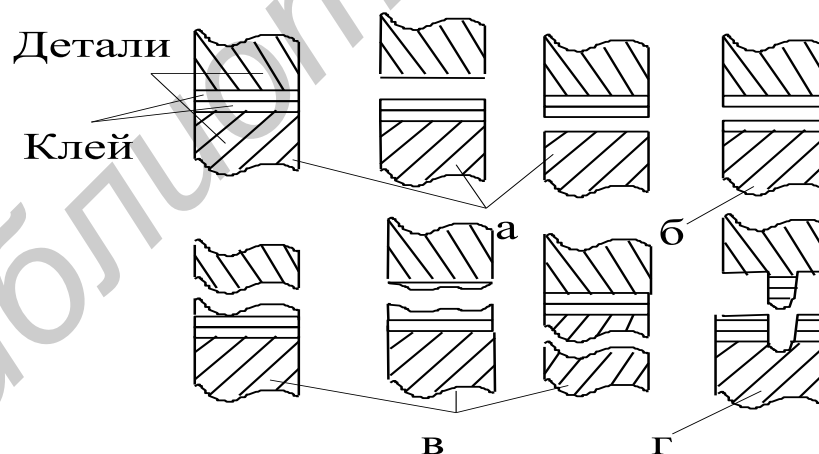


Рис. 4.2. Типы разрушений:

а – адгезионный; б – аутогезионный; в – когезионный; г – смешанный

Для получения качественного и прочного клеевого соединения необходимо, чтобы клей отвечал тем высоким требованиям, которые предъявляются к нему. Подбор клеящего материала в этом случае является ответственной и важ-

ной задачей. Клей, применяемый в радиоэлектронной промышленности, должен обладать:

- 1) удовлетворительными электроизоляционными свойствами;
- 2) хорошей адгезией к различным материалам;
- 3) достаточной вибропрочностью и вязкостью, позволяющей наносить его на вертикальные поверхности;
- 4) жизнеспособностью и быстрым отверждением при нормальных условиях (20–30 °С); способностью выдерживать температуру паяльника, равную 250 °С, в течение нескольких секунд;
- 5) свойством не вызывать коррозии и длительное время находиться в реальных эксплуатационных и атмосферных условиях.

По типу связующих материалов эти клеи подразделяются на 4 вида:

- а) термореактивные (БФ-2, БФ-4, БФ-6, эпоксидные Д9, ЭКС-4, ВК-9);
- б) термопластичные (полиметакриловый ПМП, полистироловый ПС);
- в) эластомеры (88НП, ЛН, КТ-15);
- г) клеи животного происхождения (казеиновый).

Свойства некоторых типов клеев и области их применения даны в табл. 4.1.

Моделирование технологического процесса склеивания

При исследовании технологических процессов с целью получения аналитических моделей и последующей их оптимизации стремятся проводить опыты таким образом, чтобы при их минимальном количестве получить исчерпывающую информацию об объекте исследования. Эту задачу можно решить, используя математическую теорию планирования эксперимента, которая позволяет представлять информацию в краткой, стандартной и удобной форме. Одним из самых распространенных методов, применяемых для этих целей, является метод полного факторного эксперимента (ПФЭ), который приводит к нахождению математической модели технологического процесса в виде полинома первой степени с учетом парных взаимодействий:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j, \quad (4.5)$$

где y – выходной параметр;

b_i, b_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии;

x_i, x_{ij} – независимые переменные.

Типы клеев и их характеристики

Марка клея	Состав	Интервал рабочих температур, °С	Режим склеивания	Предел прочности, МПа	Удельное объемное сопротивление, Ом/см	Электрическая прочность, кВ/см	Область применения
БФ	Фенолформальдегидная смола, поливинилбутиральный, спирт	-60...+85	120 °С, 1-2 ч, 0,1-0,5 МПа	10-11	$2 \cdot 10^{10}$	--	Универсальное приклеивание ферритовых сердечников. Закрепление изоляции проводов
ВК-32-200	Фенолформальдегидная смола, каучук, лак бакелитовый	-60...+200	190 °С, 1 ч, 0,6 МПа	8-20	$4 \cdot 10^{10}$	64	Крепление интегральных схем к основаниям и корпусам
ВК-9	Эпоксидная смола, полиамидная смола, полиэтиленполиамин, карбонильное железо, алюминиевая пудра	-60...+200	60 °С, 1 ч, 0,2 МПа	36-38	$2 \cdot 10^{10}$	20	Крепление ЭРЭ к металлу, гетинаксу, стеклотекстолиту. Склеивание разрезных магнитопроводов, сердечников магнитных головок
Д-9	Эпоксидная смола, дибутилфталат, кварц молотый, полиэтиленполиамин	-60...+85	20 °С, 24 ч, 0,2 МПа	23-24	10^{14}	16	Крепление ЭРЭ
88НП	Бутилфенолформальдегидная смола, бензин	-60...+70	20 °С, 12 ч, 0,1 МПа	1-2	$3 \cdot 10^{14}$	54	Приклеивание прокладок из резины, кожи, ткани, войлока, пробки к металлу, стеклу, древесине

В качестве выходного параметра при склеивании целесообразно выбрать предел прочности при равномерном отрыве σ_B или предел прочности на срез $\sigma_{\text{ср}}$ (Па). Независимыми переменными являются технологические режимы склеивания – температура сушки, время сушки, удельное давление. Остальные режимы – подготовка поверхности, нанесение слоя клеевого грунта и его сушка – должны в данном исследовании быть одинаковыми для всех образцов.

Для упрощения записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных пользуются не натуральными значениями независимых переменных (факторов), а кодированными, причем кодирование производят так, чтобы верхний уровень соответствовал «+1», нижний – «-1», а основной – нулю. Для факторов с непрерывной областью определения это всегда можно сделать с помощью преобразования

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i + \tilde{x}_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (4.6)$$

где \tilde{x}_i – натуральное значение фактора;

\tilde{x}_{i0} – натуральное значение основного уровня фактора;

Δx_i – интервал варьирования.

Условия факторного эксперимента обычно записывают в виде таблицы, называемой матрицей планирования, в которую вносятся кодовые значения факторов (+1 и -1), а план эксперимента строится путем перебора всех комбинаций уровней. Для случая двух независимых переменных матрица планирования приведена в табл. 4.2.

После реализации ПФЭ, используя метод наименьших квадратов, определяют коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_0 \tilde{y}_i}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \tilde{y}_i}{N}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i x_j \tilde{y}_i}{N}. \quad (4.7)$$

В связи с ограниченным объемом экспериментальных данных при планировании эксперимента проверяют значимость найденных коэффициентов уравнения регрессии, используя критерий Стьюдента t_c :

$$t_c = \frac{|b_i|}{s(b_i)}; \quad s^2(b_i) = \frac{s^2(\tilde{y})}{N}; \quad (4.8)$$

$$s^2(\tilde{y}) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \tilde{y}_i)^2}{N(m-1)}, \quad (4.9)$$

где $s^2(\tilde{y})$ – дисперсия воспроизводимости;

\tilde{y}_i – среднее значение выходного параметра из m параллельных опытов.

$s^2(b_i)$ – дисперсия коэффициентов уравнения регрессии.

Таблица 4.2

Матрица планирования (ПФЭ)

Условия эксперимента				Факторы				
				t , ч (x_1)		p , МПа (x_2)		$y_{\text{ср}}$, Н
Основной уровень, x_0								
Интервал варьирования, Δx_i								
Верхний уровень (+1)								
Нижний уровень (-1)								
Номер опыта	x_0	x_1	x_2	Прочность, y_i , Н			$y_{\text{ср}}$, Н	$S(y)$
				1	2	3		
1	+	+	+					
2	+	-	+					
3	+	+	-					
4	+	-	-					

Если вычисленная величина t_c превышает табулированное критическое значение $t_{\text{ск}}$ (табл. П. 2 приложения) для выбранного уровня значимости (обычно 0,05) и числа степеней свободы $f = N(m-1)$, то коэффициент b признается значимым. В противном случае коэффициент b считается статистически незначимым и соответствующий член исключается из уравнения регрессии без пересчета остальных. Можно также проводить расчет доверительного интервала и сравнивать его с коэффициентом регрессии:

$$a_i > \Delta b_i \pm t_{\text{ск}} S\{b_i\}. \quad (4.10)$$

Полученное уравнение регрессии должно адекватно описывать изучаемый технологический процесс. Проверка гипотезы адекватности проводится с помощью критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S^2_{\text{ост}}}{S^2\{\tilde{y}\}}, \quad S^2_{\text{ост}} = \frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - \hat{y}_i)^2}{N - \alpha}, \quad (4.11)$$

где $S^2_{\text{ост}}$ – остаточная дисперсия, обусловленная ошибкой эксперимента,
 \hat{y}_i – величина выходного параметра, рассчитанная по уравнению регрессии;
 α – число значимых членов в уравнении регрессии.

Уравнение признается адекватным при выполнении условия $f_p < f_{kp}$, определенного по табл. П. 3 приложения для выбранного уровня значимости (обычно 0,01) и числа степеней свободы $f_1 = N - \alpha$ и $f_2 = N(m - 1)$. При получении неадекватной модели необходимо сузить интервалы варьирования независимых переменных, центр эксперимента перенести в условия наилучшего опыта первой серии и реализовать новую серию опытов.

Получение адекватной модели позволяет перейти к ее оптимизации. В случае линейного уравнения регрессии это достигается логическим рассуждением. Оптимальные значения выходных параметров лежат на границах интервалов варьирования.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить по указанию преподавателя склеиваемые образцы (рис. 4.3) к работе (удалить загрязнения, обезжирить ацетоном, промыть горячей водой и высушить склеиваемые поверхности). В каждом опыте должно принимать участие не менее трех образцов.

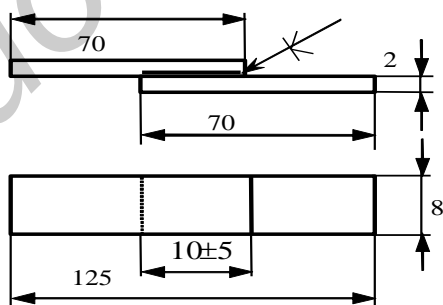


Рис. 4.3. Образцы для исследования прочности соединений

2. Рассчитать теоретическую прочность соединений для реальных размеров нахлестки. Составить матрицу планирования эксперимента применительно к своему варианту исследования (табл. 4.3). Вариант задания определяется преподавателем для каждого студента заранее.

3. Клей БФ нанести на поверхности, подготовленные к склеиванию, и выдержать их на воздухе 10 мин. Потом повторно нанести слой клея и выдержать поверхности на воздухе перед соединением 2–3 мин.

4. В соответствии с матрицей планирования создать удельное давление на склеиваемые образцы в кассетах, поместить их в термошкаф и выдержать при заданной температуре в течение определенного времени согласно номеру опыта.

Если для одного из факторов в варианте исследования не указан интервал варьирования, то это означает, что планирование эксперимента осуществляется только по двум факторам, имеющим интервалы варьирования.

5. Определить на испытательном приспособлении разрушающую нагрузку и рассчитать механическую прочность клеевых соединений по формуле

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (4.12)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н;
 S – площадь склеивания, м².

Таблица 4.3

Варианты проведения исследований

Тип клея	Варианты заданий				
	Режимы	1	2	3	4
БФ-4	p , МПа	0,1–0,5	0,3	0,1–0,5	0,1–0,5
	T , °С	150	100–150	100–150	100–150
	t , ч	0,5–1,0	0,5–1,0	1,0	0,5–1,0
ВК-9	p , МПа	0,1–0,3	0,1–0,3	0,3	0,1–0,3
	T , °С	100	50–100	50–100	50–100
	t , ч	0,5–1,0	1,0	0,5–1,0	0,5–1,0
88НП	p , МПа	0,02–0,1	0,1	0,02–0,1	0,02–0,1
	T , °С	50–100	50–100	50	50–100
	t , ч	1,0	0,5–1,0	0,5–1,0	0,5–1,0

6. Обработать экспериментальные данные по программе *PFE* с помощью ПЭВМ, провести анализ математической модели склеивания, определить наиболее влияющие технологические параметры процесса, проанализировать тип разрушения клеевых соединений.

Содержание отчета

1. Эскиз испытаний механической прочности соединений и теоретический расчет прочности соединения.
2. Эскизы типов разрушений соединений.
3. Матрица планирования эксперимента.
4. Основные расчетные формулы.
5. Результаты эксперимента в виде таблиц, графиков и уравнений регрессии.
6. Кривые равного выхода по уравнению регрессии в координатах двух переменных.
7. Оптимальные технологические режимы склеивания.
8. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Определение адгезии, когезии и аутогезии.
2. Виды связей, возникающих при склеивании материалов.
3. Сущность диффузионной, адсорбционной и электрической теории склеивания.
4. Работа сил адгезии в соответствии с адсорбционной теорией .
5. Как связана работа сил адгезии с углом смачивания поверхности?
6. Влияние растворителя клея на процесс склеивания.
7. Назначение наполнителя и пластификатора, вводимых в клей.
8. Основные типы разрушений при испытании клеевых соединений.
9. Операции технологического процесса склеивания.
10. Требования, предъявляемые к клеям.
11. Характеристика некоторых видов клеев.
12. Сущность планирования методом ПФЭ.
13. Основные расчетные формулы для определения коэффициентов уравнения регрессии и их значимости.
14. Проверка адекватности полученной модели реальному технологическому процессу.

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОЛИЗА

Цель работы

Исследование влияния технологических факторов процесса осаждения гальванических покрытий в нестационарных режимах электролиза на качество покрытий и эффективность процесса.

Теоретические сведения

Функциональные гальванические покрытия, широко применяемые для электронных компонентов и печатных плат, собираемых с использованием пайки или микросварки, должны обладать комплексом электрофизических и физико-механических свойств, обеспечивающих высокую надежность аппаратуры. Для формирования заданных свойств покрытий перспективно применение новых методов гальванического осаждения в нестационарных режимах. Наряду с общими требованиями к гальваническим покрытиям, такими, как механическая прочность, беспористость, стойкость к атмосферным и коррозионным воздействиям, предъявляются жесткие требования к электрофизическим параметрам: удельному и контактному сопротивлению, стабильности этих параметров в условиях эксплуатации, а также к технологическим свойствам покрытий, обеспечивающих свариваемость и паяемость.

Контактное сопротивление гальванических покрытий зависит от многих факторов: удельной электрической проводимости, твердости, пластичности и коррозионной стойкости покрытий, площади и шероховатости фактической поверхности контакта, условий нанесения покрытий и т. д. Пористость называют одним из основных свойств покрытий, считая ее ответственной за коррозионную стойкость изделий. Поры в покрытии могут располагаться перпендикулярно подложке и под углом к ее поверхности, иметь разную форму, размеры и характер распределения.

Медное и золотое покрытия широко применяются в производстве печатных и многослойных плат для обеспечения стабильных электрических свойств

и паяемости проводников, а также для контактных поверхностей соединителей различной конструкции, что обеспечивает стабильность контактного электрического сопротивления (рис. 5.1).

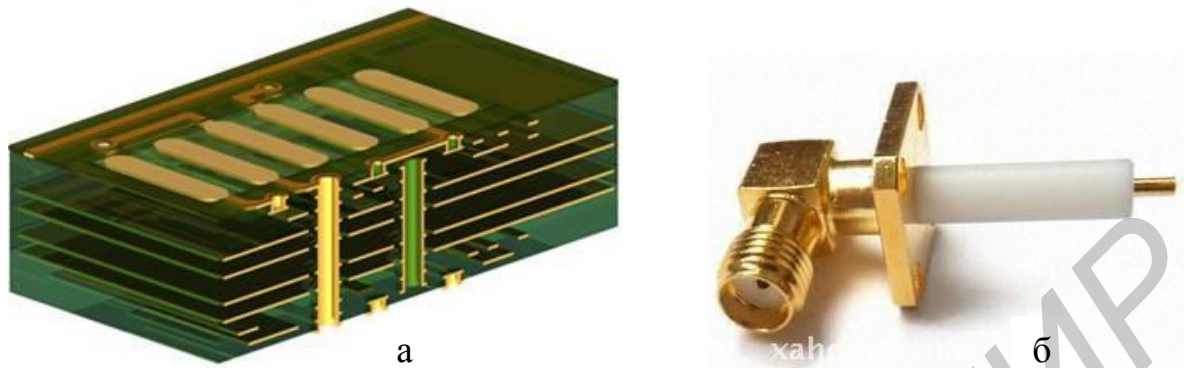


Рис. 5.1. Многослойная печатная плата с металлизацией сквозных отверстий (а) и СВЧ разъем с частотой до 20 ГГц (б)

В электронике золото осаждают как мягкое финишное покрытие для внутреннего монтажа ИС золотой или алюминиевой проволокой и для формирования матричной структуры выводов корпусов BGA, а также как твердое – для электрических соединителей и контактов, где требуется низкое контактное электрическое сопротивление. В производстве печатных плат применяют покрытие из химического никеля/иммерсионного золота (*ENIG*), которое представляет тонкую (0,05–0,2 мкм) золотую пленку, наносимую поверх подслоя никеля (4–5 мкм). Золото хорошо растворяется в припое, не подвержено быстрому потускнению и окислению и обеспечивает лучшую плоскостность, чем у HASL, при сохранении хорошей паяемости. Ровный, мелкокристаллический и малопористый слой золота обеспечивает хорошую паяемость и защищает никель от окисления, а никель, в свою очередь, выполняет функцию барьера между медью и золотом, предотвращая их взаимную диффузию и последующее окисление меди, ведущее к образованию несмачиваемой припоем поверхности.

Одним из перспективных направлений улучшения качества функциональных покрытий является осаждение их на периодическом токе, что позволяет оперативно управлять технологией формирования толщины покрытия, снизить количество примесей и пор, повысить плотность и износостойкость покрытий. Главные особенности импульсного электролиза:

- высокие мгновенные плотности тока, которые ускоряют кинетику осаждения и способствуют росту зародышеобразования ядер;
- наличие времени выключения тока положительно влияет на протекание процессов адсорбции и десорбции, а также рекристаллизации осадка.

Установки импульсного электролиза генерируют импульсы тока амплитудой от 10 до 200 А, длительностью импульсов от 50 до 100 мс и частотой 10–1000 Гц. На форму импульсов тока оказывает влияние двойной электрический слой на межфазной границе электрод – раствор, который обладая емкостной составляющей, искажает форму (рис. 5.2).

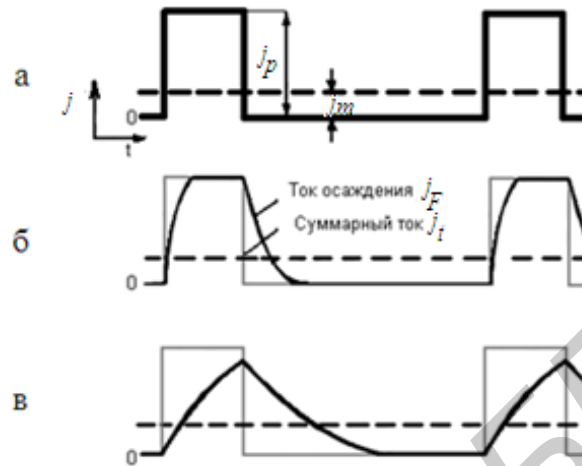


Рис. 5.2. Влияние емкости двойного электрического слоя на форму импульсов тока: а – исходные импульсы; б – низкое значение емкости; в – высокое значение емкости

Суммарный ток складывается из тока осаждения J_F и емкостного тока J_C :

$$J_t = J_C + J_F. \quad (5.1)$$

Ток осаждения (составляющая Фарадея) определяется как

$$J_F = J_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha z F \eta}{RT}\right) - \exp\left\{-\frac{(1-\alpha)z F \eta}{RT}\right\} \right], \quad (5.2)$$

а емкостная составляющая – соотношением:

$$J_C = dQ / dt = C d\eta / dt, \quad (5.3)$$

где α – постоянная;

z – заряд иона;

F – постоянная Фарадея;

η – выход по току;

R – газовая постоянная;

T – длительность импульса;

C – емкость двойного электрического слоя;

t – время.

Для формирования функциональных гальванических покрытий с автоматизированным управлением электролизом на основе программируемого контроллера со встроенным микропроцессором разработана программно-управляемая установка нестационарного электролиза (ПУНЭЛ) (рис. 5.3). В ПУНЭЛ автоматически изменяются: форма тока (постоянный, переменный, импульсный, реверсный, асимметричный и др.), его амплитуда, длительность импульсов прямого и обратного токов, паузы между ними, углы отсечки, а также длительность работы установки в различных режимах. Обеспечена стабилизация среднего и максимального тока в нагрузке с точностью 1 %, индикация как обрыва в цепи нагрузки, так и короткого замыкания с автоматическим отключением установки. Измеритель тока определяет максимальную нагрузку отдельно для прямого и реверсного тока с индикацией совместно с текущими значениями параметров данного цикла. Предусмотрен подсчет и индикация количества электричества, прошедшего через гальваническую ванну, что позволяет автоматически учитывать расход металла.



Рис. 5.3. Программно-управляемая установка нестационарного электролиза

Установка обеспечивает максимальный ток нагрузки от 10 до 150 А, длительность импульсов тока от 20 мс до 10 с, длительность цикла программы от 1 до 99 мин.

Новые возможности формирования функциональных свойств гальванических покрытий дают методы нестационарного электролиза: чередование импульсного, реверсного и асимметричного переменного тока. Отработаны программы нестационарных режимов (рис. 5.4), обеспечивающие получение мно-

гослойных высококачественных покрытий, каждый слой которых отличается как своей структурой, так и физико-механическими свойствами (рис. 5.5).

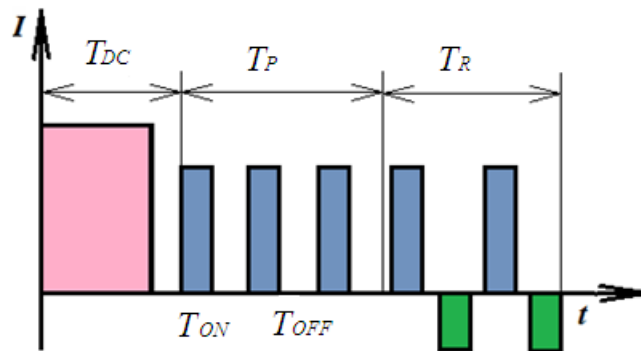


Рис. 5.4. Форма импульсов тока нестационарного электролиза

Так, первый слой обеспечивает хорошую адгезию к подложке, второй – коррозионную стойкость, электропроводность и пластичность, а наружный слой – отражающую способность для декоративных покрытий либо паяемость или свариваемость для функциональных покрытий.



Рис. 5.5. Структура функциональных гальванических покрытий

При импульсном электролизе коэффициент цикла осаждения составляет

$$K_{И} = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} = T_{ON} f, \quad (5.4)$$

где T_{ON} – длительность импульса;

T_{OFF} – время выключения,

а при импульсном реверсном электролизе

$$K_{P} = \frac{T_{K}}{T_{A} + T_{K}}, \quad (5.5)$$

где T_{A} – длительность анодного периода;

T_{K} – длительность катодного периода.

При импульсном электролизе выход по току для медных покрытий растет с 82 до 94 %, пористость тонких золотых покрытий (1,5–2,0 мкм) снижается с 400 до 10 пор/см². В покрытиях, формируемых на периодических токах, размер блоков мозаики снижается до 242 Å, напряжения растяжения переходят в напряжения сжатия. Наиболее тестированные покрытия получены на частоте импульсов 25 Гц и скважности 2.

Гальванический метод осаждения металлических покрытий заключается в том, что деталь, подлежащая покрытию, помещается в электролитно-водный раствор солей металла в качестве катода, а анодом является осаждаемый металл (медь). Необходимые для восстановления электроны поступают от внешнего источника постоянного тока. Под действием напряжения ионы металла движутся к катоду, присоединяют электроны и осаждаются на нем как нейтральные атомы (рис. 5.6). Понятия «анод» (от греч. anodos – движение вверх, восхождение) и «катод» (от греч. kathodos – ход вниз, возвращение) были введены М. Фарадеем для обозначения направлений движения частиц, выделенных на электродах. Реакция восстановления меди



Количественно гальваническая металлизация описывается первым законом Фарадея, согласно которому масса выделяемого вещества при электролизе пропорциональна прошедшему количеству электричества $I t$:

$$m = k I t , \quad (5.7)$$

где k – теоретический электрохимический эквивалент, пропорциональный молярной массе M и обратно пропорциональный химической валентности металла n (второй закон Фарадея):

$$k = M / (F n) ; \quad (5.8)$$

F – постоянная Фарадея (96 500 г/А·с).

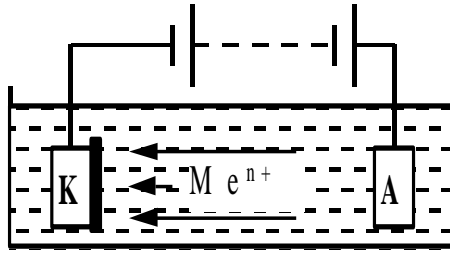


Рис. 5.6. Схема гальванической металлизации

Для двухвалентной меди $k = 1,186 \text{ г}/(\text{А}\cdot\text{с})$, однако на практике теоретическое значение электрохимического эквивалента не достигается из-за побочных процессов, например осаждения водорода. Поэтому второй, не менее важной, характеристикой процесса гальванической металлизации является выход металла по току:

$$\eta = \frac{M}{M_p} \cdot 100 \% . \quad (5.9)$$

Время для нанесения покрытия заданной толщиной δ определяется как

$$t = \frac{\rho_m S_k \delta}{k I \eta_k} , \quad (5.10)$$

считая, что масса:

$$M = \rho_m S_k \delta , \quad (5.11)$$

где ρ_m – плотность металла;
 S_k – площадь катода).

Для печатных плат рекомендуются борфтористоводородные и сернокислые электролиты меднения. Первый состоит из 230–250 г/л борфтористой меди $\text{Cu}(\text{BF}_4)_2$ – источника ионов; 5–15 г/л борфтористоводородной кислоты HBF_4 , вводимой для повышения электропроводности электролита; 15–40 г/л борной кислоты H_3BO_3 , необходимой для стабилизации электролита. Процесс ведут при температуре $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, катодной плотности тока 3–4 $\text{А}/\text{дм}^2$, скорости осаждения 20–30 $\text{мкм}/\text{ч}$. Достоинства электролита: высокая скорость осаждения; покрытие получается более мелкокристаллическим, чем из сернокислого электролита. Недостаток – высокая агрессивность электролита.

Лучшей рассеивающей способностью характеризуется сернокислый электролит следующего состава: 60–70 г/л сернокислой меди; 150–180 г/л серной кислоты; 0,03–0,06 г/л хлористого натрия; 1–3 мл/л комплексной добавки (трилон Б).

Порядок выполнения работы

1. Подготовить по указанию преподавателя образцы для осаждения покрытий (удалить загрязнения, обезжирить ацетоном, промыть теплой водой и высушить феном). В каждом опыте должно принимать участие не менее трех образцов.

2. Взвесить на весах образцы.

3. Завесить образцы в гальваническую ванну, обеспечив контакт с токоподводами.

4. Под контролем инженера согласно инструкции по эксплуатации включить программно-управляемую установку нестационарного электролиза и установить режимы осаждения в соответствии с заданием (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Варианты проведения исследований

Варианты заданий				
Режимы	1	2	3	4
Постоянный ток	$D_k = 2,0 \text{ А/дм}^2$	$D_k = 2,5 \text{ А/дм}^2$	$D_k = 3,0 \text{ А/дм}^2$	$D_k = 4,0 \text{ А/дм}^2$
Импульсный ток	$D_k = 3,0 \text{ А/дм}^2$ $f = 25 \text{ Гц}$ $T_{и} = 1 \text{ с}$	$D_k = 3,0 \text{ А/дм}^2$ $f = 25 \text{ Гц}$ $T_{и} = 0,5 \text{ с}$	$D_k = 4,0 \text{ А/дм}^2$ $f = 30 \text{ Гц}$ $T_{и} = 0,5 \text{ с}$	$D_k = 5,0 \text{ А/дм}^2$ $f = 35 \text{ Гц}$ $T_{и} = 0,5 \text{ с}$
Импульсно-реверсный	$D_k = 3,0 \text{ А/дм}^2$ $f = 25 \text{ Гц}$ $T_{ON} = 1 \text{ с}$ $T_R = 0,5 \text{ с}$	$D_k = 3,0 \text{ А/дм}^2$ $F = 25 \text{ Гц}$ $T_{ON} = 1 \text{ с}$ $T_R = 0,5 \text{ с}$	$D_k = 4,0 \text{ А/дм}^2$ $f = 30 \text{ Гц}$ $T_{ON} = 1 \text{ с}$ $T_R = 0,5 \text{ с}$	$D_k = 5,0 \text{ А/дм}^2$ $f = 35 \text{ Гц}$ $T_{ON} = 1 \text{ с}$ $T_R = 0,5 \text{ с}$

5. Осадить покрытия из сернокислого электролита в соответствии с выбранными режимами в течение 30 мин. Извлечь образцы из ванны, промыть теплой водой и высушить феном.

6. Взвесить на весах образцы и рассчитать выход по току.

7. Погрузить образцы в 10%-й раствор NaCl на 10 мин и контролировать под микроскопом МБС-2 количество очагов коррозии на поверхности покрытий.

8. Промыть образцы теплой водой, высушить феном.

9. Определить коэффициент растекания припоя по покрытию. Для этого поместить на поверхность образца навеску припоя массой 250 мг, нанести пипеткой спиртоканифольный флюс 5 мл и расположить образец на нагревателе устройства контроля паяемости. Установить температуру нагревателя 220 ± 5 °С.

10. После растекания припоя по поверхности осторожно снять пинцетом образец и положить его на охлаждающий столик.

11. С помощью микрометра измерить высоту капли припоя после растекания и рассчитать коэффициент растекания припоя.

$$K_p = \frac{H_0 - H_p}{H_0}, \quad (5.12)$$

где H_0 , H_p – высота капли припоя до и после растекания,

Высота капли до растекания находится из условия несмачивания поверхности:

$$H_0 = \sqrt{\frac{2\sigma_{1,2} \cdot (1 - \cos \Theta)}{\rho \cdot g}}, \quad (5.13)$$

где ρ – плотность припоя;

g – ускорение силы тяжести.

12. Обработать экспериментальные данные и провести их анализ, определить наиболее технологические параметры процесса, влияющие на качество покрытий.

Содержание отчета

1. Формы импульсов тока нестационарного электролиза.
2. Схема гальванического осаждения в нестационарных режимах электролиза.
3. Основные расчетные формулы и расчет выхода по току для различных режимов осаждения.
4. Схема оценки коэффициента растекания припоя и расчет его величины.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Назначение и основные свойства гальванических покрытий, применяемых в электронике.
2. Виды нестационарного электролиза, формы импульсов тока и основные расчетные формулы.
3. Порядок расчета выхода по току для процесса гальванического осаждения.
4. Методика оценки паяемости гальванических покрытий.
5. Методика контроля коррозионной стойкости покрытий.
6. Влияние технологических режимов нестационарного электролиза на свойства покрытий.
7. Структура программно-управляемой установки нестационарного электролиза.

Библиотека БГУИР

ПРИЛОЖЕНИЕ

Справочные данные по значениям критериев Кохрена, Стьюдента, Фишера

Таблица П.1

Значения критерия Кохрена для $P = 0,05$

	N						
G	1	2	3	4	5	6	7
2	0,9958	0,9750	0,9392	0,9057	0,8772	0,8332	0,7880
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6530	0,6025
4	0,9065	0,7674	0,6841	0,6287	0,5895	0,5365	0,4884

Таблица П.2

Квантили распределения Стьюдента

f	$P=0,05$	$P=0,01$
8	2,31	3,36
12	2,18	3,05
16	2,12	2,92
24	2,06	2,80
30	2,04	2,75

Таблица П.3

Значения $F_{0,05}$ (верхние) и $F_{0,01}$ (нижние)

	f_1				
f_2	4	5	6	7	8
10	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07
	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06
20	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45
	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56

Литература

1. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: учебник / А. П. Достанко [и др.]. – Минск : Выш. шк., 2002. – 415 с.
2. Медведев, А. М. Печатные платы. Конструкции и материалы / А. М. Медведев. – М. : Техносфера, 2005. – 304 с.
3. Медведев, А. М. Технология производства печатных плат / А. М. Медведев. – М. : Техносфера, 2005. – 360 с.
4. Печатные платы. Справочник. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. К. Ф. Кумбза. – М. : Техносфера, 2011. – 1016 с.
5. Ануфриев, Л. П. Коммутационные платы электронной аппаратуры / Л. П. Ануфриев, В. Л. Ланин, А. А. Хмыль. – Минск : Бестпринт, 2000. – 85 с.
6. Груев, И. Д. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры / И. Д. Груев, Н. И. Матвеев, Н. Г. Сергеева. – М. : Радио и связь, 1988. – 304 с.
7. Гальваническое осаждение функциональных покрытий в нестационарных режимах электролиза / И. Кузьмар [и др.] // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – №4. – С. 70–74.
8. Ланин, В. Л. Электромонтажные соединения в электронике. Технология, оборудование, контроль качества / В. Л. Ланин, В. А. Емельянов. – Минск : Интегралполиграф, 2013. – 406 с.

Учебное издание

Ланин Владимир Леонидович
Хмыль Александр Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ В МНОГООПЕРАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 26.01.2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс». Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 100 экз. Заказ 114.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014, №2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014. ЛП №02330/264 от 14.04.2014. 220013, Минск, П. Бровки, 6