

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. А. Черник, А. В. Пянко, И. В. Макарова

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано
учебно-методическим объединением по химико-технологическому
образованию в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования по специальности
I-48 01 04 «Технология электрохимических производств»*

Минск 2025

УДК 621.389.049.75(076.5)
ББК 35.35я73
Ч49

Рецензенты:
кафедра физической химии и электрохимии
Белорусского государственного университета
(заведующий кафедрой доктор химических наук,
профессор *Е. А. Стрельцов*);
заведующий лабораторией физики пламенных процессов
государственного научного учреждения «Физико-технический
институт Национальной академии наук Беларуси»
кандидат технических наук *А. А. Паршута*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Черник, А. А.

Ч49 Технология производства печатных плат. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-48 01 04 «Технология электрохимических производств» / А. А. Черник, А. В. Пянко, И. В. Макарова. – Минск : БГТУ, 2025. – 80 с.
ISBN 978-985-897-234-9.

В учебно-методическом пособии подробно изложены необходимые теоретические сведения для подготовки к лабораторным работам, методические указания к их выполнению и оформлению, а также приведены вопросы для самостоятельной подготовки по дисциплине «Технология производства печатных плат». В издании рассмотрены различные электрохимические и химические процессы, встречающиеся в производстве печатных плат: электрохимическое и химическое меднение, химическая активация, электрохимическое осаждение сплавов олово – никель, олово – свинец. Также представлены лабораторные работы, связанные с проектированием печатных плат и определением различных видов брака в их припроизводстве.

УДК 621.389.049.75(076.5)
ББК 35.35я73

ISBN 978-985-897-234-9

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2025
© Черник А. А., Пянко А. В.,
Макарова И. В., 2025

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Технология производства печатных плат» занимает важное место при подготовке инженеров-химиков-технологов по специальности «Технология электрохимических производств». Объектами профессиональной деятельности специалистов являются: печатные платы и микросхемы, технологические процессы подготовки металлической и неметаллической поверхностей перед нанесением металлических и неметаллических покрытий; технологические процессы нанесения металлических и оксидных покрытий электрохимическими и химическими методами; приборы и методы исследования свойств наносимых покрытий.

Миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) зависит от прогресса в производстве печатных плат (ПП), особенно многослойных. Применение многослойных печатных плат (МПП) позволяет решить задачу коммутации компонентов РЭА на гибридных и полупроводниковых интегральных микросхемах, повышает плотность печатного монтажа и упрощает сборку РЭА.

Изготовление ПП – сложный, многооперационный процесс, требующий строгого соблюдения технологических режимов с применением высококачественных материалов, специального технологического оборудования, контрольно-измерительной аппаратуры, включающий многочисленные физико-химические операции. Независимо от технологической схемы изготовления ПП такие химические процессы, как травление меди и диэлектрика, химическое меднение диэлектрика, гальваническое осаждение меди и других электрохимических покрытий, занимают в них ведущее место.

Настоящее пособие содержит описание методик выполнения лабораторных работ, позволяющих изучить закономерности, лежащие в основе наиболее значимых химических и электрохимических процессов в технологии производства печатных плат.

Каждая лабораторная работа сопровождается кратким теоретическим введением. Изложенная информация (базовые сведения по изучаемой технологии) поможет студентам лучше ориентироваться в специальной и справочной литературе, материалах периодических изданий, необходимых для проведения анализа полученных результатов и успешного усвоения материала курса в целом.

1. СОЗДАНИЕ ЗАЩИТНОГО РЕЛЬЕФА И ТРАВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Травление печатной платы – это окислительно-восстановительный процесс, в котором медь – восстановитель, а раствор – окислитель. Процесс травления предназначен для создания токонесущих проводников.

За точность травления отвечают основные технологические характеристики: скорость травления, боковое подтравливание, емкость по меди.

К растворам, используемым для травления печатных плат, предъявляются следующие требования:

- нетоксичность;
- высокая скорость травления;
- малое боковое подтравливание;
- большая емкость по меди;
- устойчивость;
- легкость регенерирования;
- отсутствие взаимодействия с металло- и фоторезистами.

Скорость травления (v , обычно мкм/мин) – толщина слоя меди, удаленная с поверхности в единицу времени.

Боковое подтравливание (l , мкм) – растворение меди с боковых стенок токонесущих проводников, приводящее к уменьшению их толщины, а в некоторых случаях – к разрывам в проводнике.

Емкость по меди (C , г/л) – количество меди, которое можно stráвить с поверхности печатных плат 1 л травильного раствора.

Выбор травильных растворов зависит от нескольких факторов:

- типа применяемого резиста, так как он может быть несовместим с данным раствором;
- типа оборудования, так как для травильных растворов, выделяющих при травлении вредные газы, необходимы герметизированные установки;
- требуемого коэффициента подтравливания;
- скорости травления (обычно скорость травления составляет $\sim 0,0125$ мм/мин).

Промышленностью используются травильные растворы на основе хлорида железа (III); персульфата аммония; хлорида меди (II); смеси оксида хрома (VI) и серной кислоты; пероксида водорода; хлорита натрия (щелочной раствор).

Состав, основные технологические особенности, достоинства и недостатки данных растворов приведены в табл. 1.1.

Основные технологические характеристики растворов травления

Характеристики	Растворы				Персульфатные
	Хлоридные	На основе пероксида водорода	Медноаммонийные	Универсальные хромовокислые	
Состав, г/л	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 55–60 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 300–400 NH_4Cl 70–85 HCl 40–50	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 70–130 $\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}_2$ 3 : 1	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 60–70 NH_4Cl 100–110 NH_4OH 145–160	CrO_3 150 H_2SO_4 40–50 Глицерин 5	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 100–120 H_2SO_4 8–10
$t, ^\circ\text{C}$	35	35	40–50	50	40–50
Механизм травления	$\text{FeCl}_3 + \text{Cu} = \text{FeCl}_2 + \text{CuCl}$ $\text{CuCl} + \text{FeCl}_3 = \text{CuCl}_2 + \text{FeCl}_2$ $\text{CuCl}_2 + \text{Cu} = 2\text{CuCl}$	$\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{CuO} + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CuO} + 2\text{HCl} = \text{CuCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CuCl}_2 + \text{Cu} = 2\text{CuCl}$ $2\text{CuCl} + \text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{HCl} = 2\text{CuCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{Cu} + \text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2 = 2\text{Cu}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}$	$3\text{Cu} + 2\text{CrO}_3 + 6\text{H}_2\text{SO}_4 = 3\text{CuSO}_4 + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Cu} + (\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8 = \text{CuSO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (по аналогии протекают реакции с резистом)
Емкость по меди, г/л	75–105	130	90–100	–	–
Скорость травления, мкм/мин	35	–	–	30–40 (струйные машины)	2,5–3 (неперемешиваемые растворы), 10 (струйные машины)
Контроль	Диффузионный с катодным контролем	Электрохимический	Диффузионный	Электрохимический с катодным контролем	Каталитический
Достоинства	– диффузионный контроль; – высокая скорость травления; – меднохлоридные растворы хорошо отмываются с печатных плат	– постоянная скорость травления; – исходное состояние веществ – жидкое, что обеспечивает их автоматическую дозировку;	– диффузионный контроль; – совместим со всеми фото- и металлогрестами, кроме резистов щелочного проявления	– высокая скорость и коэффициент травления; – совместим с большинством резистов, графитовой краской и фоторезистами	– низкая коррозионная активность; – низкая вредность состава; – невысокие требования к вытяжной вентиляции;

Окончание табл. 1.1

Характеристики	Растворы				Персульфатные
	Хлоридные	На основе пероксида водорода	Медноаммонийные	Универсальные хромовокислые	
Достоинства		<ul style="list-style-type: none"> – в результате реакции не образуется шлам; – раствор легко смывается с платы; – совместим с большинством резистов; – исключается операция осветления Sn-Pb 			<ul style="list-style-type: none"> – растворы хорошо отмываются с плат
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> – при промывке происходит гидролиз, образующийся шлам портит целостность плат; – несовместим с Sn-Pb; – фенольные смолы гетинакса адсорбируют Fe³⁺, что снижает противление изоляции; – сложная регенерация и утилизация, связанная с многокомпонентностью; – полы и стены загрязняются ярко-оранжевым раствором FeCl₃ 	<ul style="list-style-type: none"> – пероксид – крайне неустойчивое соединение, легко разлагается в присутствии Cu²⁺, частиц пыли, под действием света 	<ul style="list-style-type: none"> – трудность контроля состава; – высокая летучесть аммиака, а частая коррозия по нему ухудшает условия труда персонала 	<ul style="list-style-type: none"> – электрохимический механизм травления; – регенерация раствора невозможна до исходного состава; – неэкологичный состав регенерации; – химический метод регенерации не позволяет поддержать скорость травления постоянной; – образуется соединение CuSO₄·(NH₄)₂SO₄ 	<ul style="list-style-type: none"> – низкая скорость травления; – нестабильность состава; – практическая невозможность полной регенерации; – химический метод регенерации не позволяет поддержать скорость травления постоянной; – образуется соединение CuSO₄·(NH₄)₂SO₄

В табл. 1.2 приводятся данные об использовании травильных растворов в зависимости от применяемого защитного резиста при травлении.

Таблица 1.2

Применяемость травильных растворов

Травильный раствор	Резист				
	Трафаретная краска	Фото-резист	Сплав Sn-Pb	Sn	Au, Ni, Au-Ni
Хлорид железа (III)	+	+	—	—	+
Персульфат аммония	+	+	+	+	+
Хлорид меди	+	+	—	+	+
Хромовый ангидрид и серная кислота	+	+	+	+	+
Пероксид водорода	+	+	+	+	+
Щелочные растворы на основе хлорита натрия	+ ¹	+ ¹	+	+	+

¹ Не применяются с резистами, удаляемыми щелочами.

Точно воспроизвести рисунок схемы не удастся, если не обеспечен необходимый технологический припуск размеров элементов схемы на величину подтравливания.

Величину подтравливания характеризуют **коэффициентом, или фактором, травления K** – это отношение глубины травления b к боковому растравливанию c или толщины фольги a к 0,5 величины уменьшения ширины проводника d за счет подтравливания:

$$K = \frac{b}{c}; \quad c = \frac{a-d}{2}. \quad (1.1)$$

Подтравливание схематически показано на рис. 1.1.

Наибольшая точность травления наблюдается в растворах, в которых процесс травления протекает с диффузионным контролем, когда наиболее медленной стадией будет стадия диффузии реагирующих веществ или получающихся продуктов травления. Фактор травления в таких растворах равен нескольким единицам, но его значение, кроме того, будет определяться толщиной металлической фольги, шириной вытравливаемого участка и другими параметрами. Следует отметить, что применение толстой фольги автоматически вызывает большее подтравливание. Значительно ниже точность травления при активационном контроле (химическом, электрохимическом, фазовом).

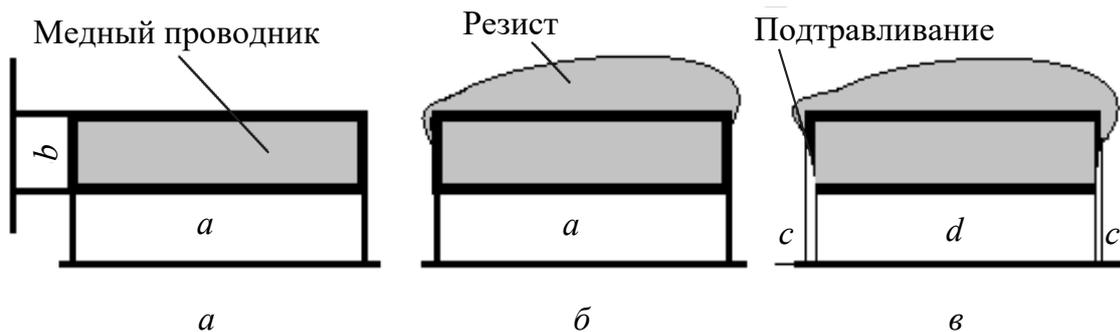


Рис. 1.1. Изменение формы поперечного сечения проводника в процессе изготовления печатной платы:
a – медный проводник (условно) до нанесения металлического резиста;
б – проводник с резистом; *в* – проводник после травления меди

В качестве защиты проводящего рисунка при вытравливании меди в негативном варианте производства (рис. 1.2, *б*) служит краска или **фоторезист** (светочувствительная пленка), в позитивном (рис. 1.2, *а*) – металлическое покрытие (**металлорезист**), например Sn, Sn-Pb, Ag, Au, Au-Ni и т. д. Названия эти способы получили от фотошаблона, применяемого при создании защитного рельефа.

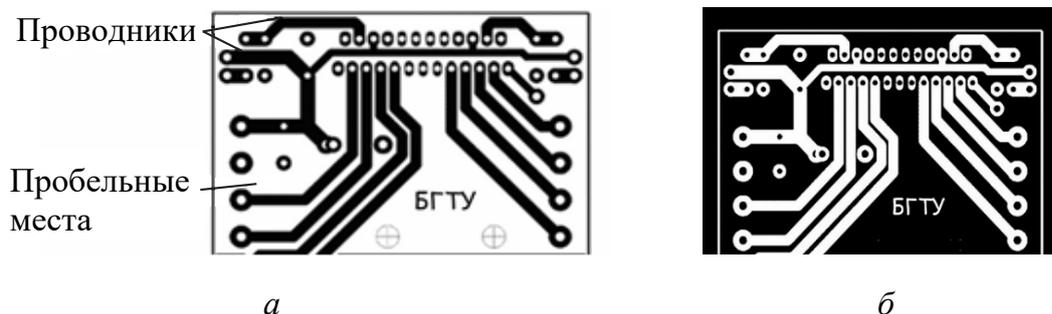


Рис. 1.2. Фотошаблоны для производства печатной платы:
a – позитивный (после экспонирования закрыты пробельные места);
б – негативный (после экспонирования закрыты проводники)

Фотошаблон прикладывается к основанию печатной платы, на которую нанесен фоторезист. В ходе процесса **экспонирования** (засветки ультрафиолетом) происходит задубливание (сквозь светлые участки фотошаблона проходит свет и делает их нечувствительными к дальнейшему травлению), а с темных участков фоторезист смывается водой или слабым раствором щелочи в зависимости от характеристик фоторезиста (процесс **проявления**). Оголившаяся медь в дальнейшем убирается травильным раствором. Негативный метод используется редко, так как не обеспечивает высокую плотность монтажа и качество, а также достаточно трудоемок.

Вид металла (сплава) для резиста должен определяться исходя не только из его функциональных характеристик (высокой паяемости), но и с учетом его химической стойкости в травильном растворе. Резист с медью образует гальванический элемент. В первую очередь будет травиться тот металл, который обладает более отрицательным потенциалом, и пока компромиссный (рабочий) потенциал коррозионной пары при травлении не достигнет значения потенциала другого металла, последний не будет подвергаться травлению. С этой точки зрения был бы предпочтительнее металлорезист, обладающий более положительным собственным потенциалом, чем медь (например, Ag, Au). На таких резистах не образуется оксидная пленка, однако точность травления снижается за счет образования микропары металл – резист. К тому же применение данных резистов дорогостоящее. При контакте меди с более электроотрицательным резистивным металлом (Sn и его сплавы) в травильном растворе в первую очередь начинает травиться резист. Использование подобных металлорезистов возможно на практике за счет их перехода в пассивное состояние и вследствие этого сдвига потенциала к более положительным значениям. Использование Sn, Sn-Ni и Sn-Pb с хлоридными растворами невозможно вследствие перехода резиста в активное состояние.

В промышленности постоянно совершенствуется как собственно процесс травления, так и методы контроля его качества. Травление меди может выполняться следующими способами:

- погружением платы в раствор;
- наплескиванием травильного раствора на плату;
- барботированием;
- подачей травильного раствора на плату в виде струй.

Травление погружением – медленный процесс, приводящий к большому подтравливанию. Травление наплескиванием, например при помощи лопастей, погружаемых в травильный раствор, обеспечивает лучшее качество травления. Однако при наплескивании коэффициент полезного использования раствора весьма низок, т. е. из общего количества наплескиваемого раствора в процессе травления активно участвует около 1% раствора. Травление с барботированием позволяет лучше использовать раствор и находит применение в промышленности. В струйных травильных установках активно используется весь объем раствора и скорость травления во много раз больше, поэтому в производстве печатных плат широкое применение нашли в основном струйные методы. Технические характеристики установок для травления и составы электролитов приведены в литературе [1].

Лабораторная работа № 1

СОЗДАНИЕ ЗАЩИТНОГО РЕЛЬЕФА И ТРАВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Цель работы – ознакомление с процессами ламинирования, экспонирования, проявления, а также процессом травления меди в технологии производства печатных плат; определение основных характеристик травления и их сравнение для ряда травильных растворов; определение факторов, влияющих на скорость травления.

Экспериментальная часть

Подготовка образцов. После устного допуска к лабораторной работе у преподавателя получают негативный фотошаблон и вырезают образцы из фольгированного диэлектрика соответствующего размера. С одной стороны образца наносят сухой пленочный фоторезист (СПФ). Перед созданием защитного рельефа поверхность меди должна быть **тщательно** подготовлена:

- механическая подготовка наждачной бумагой с мелким размером зерна (крупная наждачная бумага травмирует поверхность – это недопустимо);
- обезжиривание в стандартном растворе;
- горячая промывка;
- холодная промывка;
- активация в разбавленной серной кислоте.

Хорошо подготовленная поверхность не должна иметь подтеков, потемнений и отпечатков, ее цвет должен быть равномерным, светлым.

Сухой пленочный фоторезист (СПФ) – это светочувствительный материал, заключенный между лавсановой и полиэтиленовой пленками. Работать с СПФ следует в темной комнате (при закрытых жалюзи). Для **ламинирования** (нанесения) фоторезиста на поверхность заготовки необходимо снять более толстую лавсановую пленку и нанести на поверхность разглаживающими движениями (как скотч). Нужно убедиться, что СПФ хорошо приклеился по краям, иначе во время травления он быстро отстанет от заготовки. Полученную заготовку подвергают **экспонированию** сквозь фотошаблон. Для того чтобы фотошаблон плотно пристал к поверхности заготовки, допускается слегка смочить его водой, соединить с заготовкой и положить под ультрафиолетовую лампу, которая находится на расстоянии 5–7 см. Экспонирование проводится 3–5 мин (рис. 1.3). По истечении этого времени

должен сформироваться рисунок. Далее снимают верхнюю прозрачную полиэтиленовую пленку и проявляют (убирают незадублированные участки) в 1%-ном растворе кальцинированной соды при температуре 26–32°C с последующей промывкой в холодной воде. Согласно полученному заданию изучают процесс травления погружением в соответствующие травильные растворы.

После стравливания меди снимают СПФ в 2–4%-ном растворе гидроксида калия (натрия) или 3–5%-ном растворе аммиака.

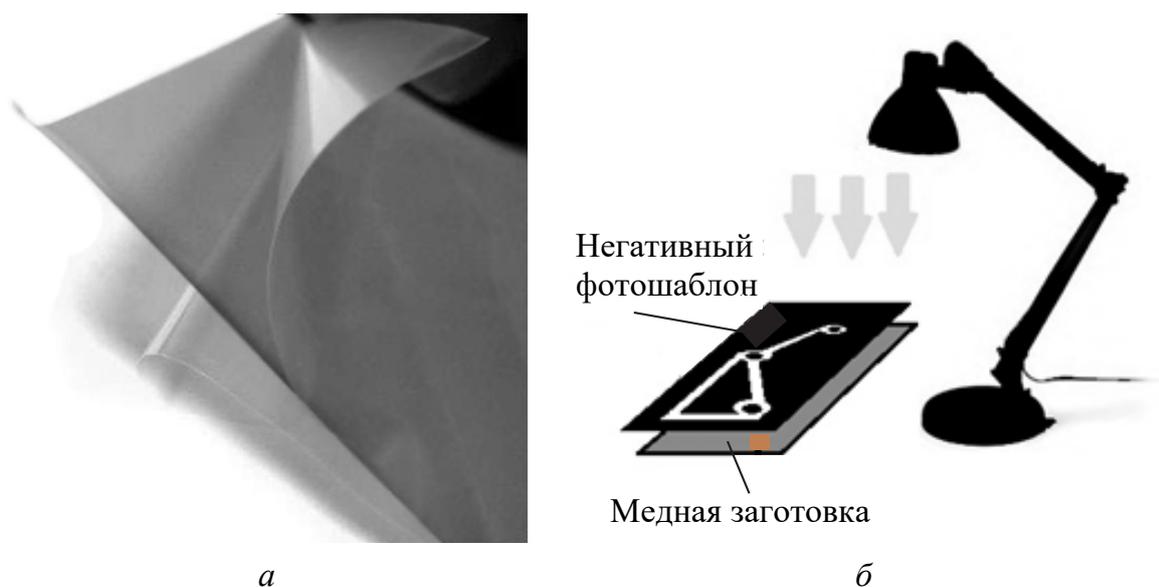


Рис. 1.3. Экспонирование:
а – фоторезист; б – установка для экспонирования

На прямолинейном медном участке определяют боковое подтравливание.

Кроме вышеописанных, из фольгированного диэлектрика с толщиной фольги 35 мкм готовятся образцы, отображенные на рис. 1.4.

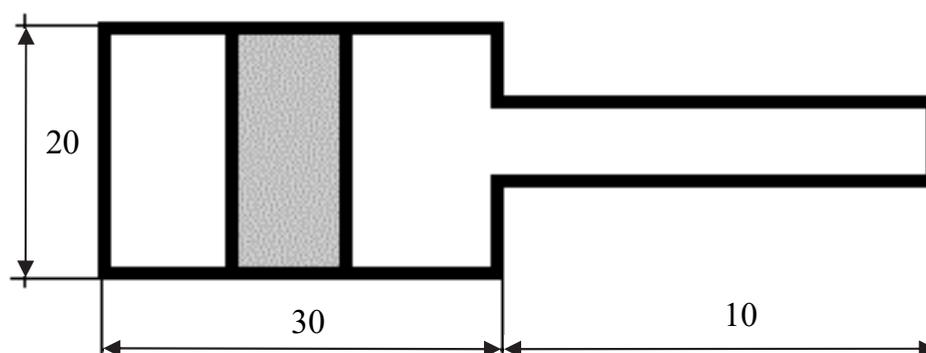


Рис. 1.4. Образцы для определения скорости травления и бокового подтравливания

С одной стороны образца наносят лаковую полоску. После стравливания меди и снятия ацетоном лака по оставшейся медной полоске определяют при помощи микроскопа боковое подтравливание.

На основании выполненной работы необходимо сделать вывод о влиянии температуры, концентрации ионов меди, вида электролита на скорость травления и боковое подтравливание.

Вариант 1. Сравнить травильные растворы по скорости травления и боковому подтравливанию (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Составы травильных растворов

Номер раствора	Состав раствора		Рабочая температура, °С
	Компонент	Концентрация, г/дм ³	
1	CuCl ₂ · 2H ₂ O	55–60	35
	FeCl ₃ · 6H ₂ O	300–400	
	NH ₄ Cl	70–85	
	HCl (ρ = 1,19)	40–50	
2	CuCl ₂	80 (Cu ²⁺)	40–50
	HCl	100	
	KCl	30	
3	CuCl ₂	80 (Cu ²⁺)	40–50
	NH ₄ Cl	110–120	
	NH ₄ OH (25%)	400–500	
4	CrO ₃	150	50
	H ₂ SO ₄	40–50	
	Глицерин	5	
5	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	100–120	40–50
	H ₂ SO ₄	8–10	

Процесс травления в лабораторных условиях проводят в стеклянных стаканчиках (V = 50 мл) при рабочей температуре.

После помещения образцов в электролиты травления необходимо определить время до полного стравливания меди на образцах.

Скорость травления рассчитывается по формуле

$$v = \frac{\delta}{\tau}, \quad (1.2)$$

где v – скорость травления мкм/мин; δ – толщина слоя меди, мкм ($\delta = 35$ мкм); τ – время, мин.

Результаты оформляют в виде табл. 1.4.

Таблица 1.4

Таблица экспериментальных данных по варианту 1

Показатель	Номер раствора				
	1	2	3	4	5
Состав электролита					
$t, ^\circ\text{C}$					
τ , мин					
δ , мкм					
v , мкм/мин					
$K = \frac{b}{c}$					
$c = \frac{a-d}{2}$					

Вариант 2. Изучить влияние температуры и концентрации ионов меди в растворе травления на скорость процесса.

Для проведения работы готовят раствор № 2 и описанные выше образцы (рис. 1.4), но без лаковой полоски.

Для изучения влияния температуры задают как минимум 3 значения температуры (по указанию преподавателя) в диапазоне значений $25\text{--}75^\circ\text{C}$ так, чтобы 1 значение было ниже, 1 – выше и 1–2 значения в рекомендованном диапазоне (табл. 1.1).

Для изучения влияния избыточной концентрации ионов Cu^{2+} на скорость травления при рабочей температуре в указанный электролит добавляют 2, 5 и 10 г/л раствора $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Результаты оформляют в виде табл. 1.5.

Таблица 1.5

Таблица экспериментальных данных по варианту 2

Задание 1				
$t, ^\circ\text{C}$	$t_1 =$	$t_2 =$	$t_3 =$	$t_4 =$
$C (\text{Cu}^{2+}), \text{г/дм}^3$				
τ , мин				
δ , мкм				
v , мкм/мин				
Задание 2				
$C (\text{Cu}^{2+}), \text{г/дм}^3$	$C_1 =$	$C_2 =$	$C_3 =$	$C_4 =$
$t, ^\circ\text{C}$				
τ , мин				
δ , мкм				
v , мкм/мин				

Контрольные вопросы

1. Методы производства двухсторонних и многослойных печатных плат.
2. Методы нанесения защитного рельефа.
3. Виды фоторезистов.
4. Механизмы действия, регенерации всех видов травильных растворов.
5. Сравнение травильных растворов по их основным характеристикам.
6. Совместимость травильных растворов с металлорезистами.
7. Виды брака при травлении.

2. ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ

Технологический процесс получения металлических покрытий на диэлектрике независимо от природы диэлектрика и назначения деталей состоит из трех основных стадий: подготовки поверхности (обезжиривания, придания поверхности микрошероховатости и полной смачиваемости), получения электропроводного слоя и нанесения гальванических покрытий.

В технологии производства печатных плат химическая металлизация используется для покрытия металлом отверстий, а также для электрического соединения слоев многослойных печатных плат (МПП). Химическая металлизация, как правило, предшествует третьей более производительной и дешевой стадии – гальванической, при которой на химически нанесенный тонкий слой металла наращивается плотный и достаточно толстый гальванический осадок, как правило, меди. Прочность сцепления между химически осажденной медью и диэлектриком улучшается после нанесения слоя электролитической меди. Химически осажденная медь обычно имеет небольшую толщину ~0,5 мкм и обладает слабыми защитными свойствами, легко окисляется на воздухе, ее сразу защищают наращиванием («затяжкой») гальванической меди слоем 1–2 мкм.

К предварительным операциям процесса химического меднения относятся: обезжиривание; подтравливание; декапирование в H_2SO_4 или HCl ; активирование в растворе, содержащем $PdCl_2$; обработка в ускорителе.

Обезжиривание – удаление различных жировых загрязнений, образующихся на поверхности в процессе механической или иной обработки, при хранении и транспортировании. Обезжиривание ведется в щелочных растворах или органических растворителях. Основным обезжиривающим компонентом является щелочь в виде гидроксида и (или) солей щелочных металлов. Она омыляет находящиеся на поверхности растительные и животные жиры, способствует переводу минеральных масел в эмульсии. Для обезжиривания чаще всего используется раствор на основе фосфата и карбоната натрия.

Подтравливание – химический процесс, в результате которого изменяются структура и химические свойства поверхности; при этом ей придают требуемые шероховатость, гидрофильность и способность к реакции при выполнении последующих операций. Подтравливание приводит к увеличению прочности сцепления основы с покрытием.

Для подтравливания в производстве ПП используется раствор на основе $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ и H_2SO_4 . Серная кислота действует преимущественно как обезжиривающий агент и растворитель окисленных фракций.

Декапирование – проводится для снятия оксидов с поверхности меди, для подготовки среды. Растворы декапирования содержат разбавленные H_2SO_4 или HCl .

Активирование – процесс, в результате которого обрабатываемая поверхность приобретает каталитические свойства, обеспечивающие инициирование реакции химического восстановления металла. Процесс химического осаждения меди – автокаталитический, т. е. продукт реакции – металлическая медь – катализирует процесс. Но первоначально, чтобы процесс начался, необходим катализатор. Лучшим катализатором восстановления меди на поверхности является палладий; он, несмотря на значительную стоимость, не имеет себе равных по стабильности работы.

Операция нанесения катализатора (каталитических центров) на поверхность диэлектрика называется активированием поверхности. Активирование может быть проведено классическим способом – когда поверхность сначала сенсibiliзируют, обрабатывая ее раствором солей Sn (II), затем активируют раствором соли каталитически активного металла.

Методы прямого активирования обычно требуют предварительного травления поверхности, после чего ее обрабатывают непосредственно раствором активирования. Иногда каталитические свойства активированной поверхности бывают слабо выражены и недостаточны для инициирования реакции химической металлизации. В таких случаях поверхность дополнительно обрабатывают раствором **акселератора**.

В технологии производства ПП наибольшее распространение получил метод прямого активирования в совмещенном растворе, содержащем одновременно ионы Pd и Sn. Состав приведен в табл. 2.1.

В этом растворе Pd находится в двух формах – в виде коллоидных частиц металла и комплексной соли. После обработки плат в совмещенном растворе следуют промывки в воде, в результате чего происходит гидролиз солей и адсорбция гидроксидных соединений Sn вместе с солями Pd и его коллоидными частицами на поверхности диэлектрика. Полное восстановление Pd и удаление солей Sn имеет место при последующей обработке в растворе «ускорителя» в течение 2 мин и промывке в проточной воде. При этом происходит коагуляция частиц Pd и отмывка от соединений Sn (IV).

Таблица 2.1

Последовательность технологических операций, условия технологического процесса, составы растворов

Операция	Состав электролита	Концентрация, г/дм ³	t, °С	τ, мин
1. Химическое обезжиривание	<i>Вариант 1</i> Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O Na ₂ CO ₃ ОС-20	25,0 25,0 5,0	50,0–60,0	3,0–5,0
	<i>Вариант 2</i> МЭА : ТЭА = 2 : 1 Промывка в горячей и холодной воде ОС-20 H ₂ SO ₄	25,0 – 20,0–30,0 40,0	20,0 – 40,0–45,0	3,0–5,0 – 10,0
2. Промывка в горячей и холодной воде	–	–	40,0–45,0 20,0	1,0–2,0 0,5
3. Подтравливание	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ H ₂ SO ₄	90,0–120,0 10,0–12,0	20,0	0,7–1,0
4. Проточная промывка	–	–	20,0	0,5
5. Декапирование	H ₂ SO ₄	5,0–7,0%-ный	20,0	1,0
6. Проточная промывка	–	–	20,0	0,5
7. Преактивация	HCl	15,0–30,0	–	1,0
8. Активация	PdCl ₂	0,3	35,0	4,0–5,0
	SnCl ₂	25,0–30,0		
	HCl	150,0		
9. Проточная промывка	–	–	20,0	0,5
10. Акселерация	<i>Вариант 1</i> NaOH	20,0–30,0	20,0	2,0
	<i>Вариант 2</i> HBF ₄ Глицерин	25,0 г/л 8,0–12,0	20,0	4,0–5,0
11. Промывка	–	–	20,0	0,5
12. Химическое меднение	<i>Вариант 1</i> CuSO ₄ · 5H ₂ O Тартрат Na, К NaOH Формалин, мл/л	170,0–200,0 50,0–75,0 20,0–30,0 1,0–3,0	45,0–50,0	20,0
	<i>Вариант 2</i> CuSO ₄ · 5H ₂ O Тартрат Na, К NaOH Формалин, мл/л	10,0–15,0 60,0–80,0 6,0–8,0 4,0–5,0	20,0–25,0	22,0
	<i>Вариант 3</i> CuSO ₄ · 5H ₂ O Трилон Б NaOH Формалин, мл/л	15,0 25,0–30,0 8,0–10,0 3,5–4,5	20,0–25,0	22,0

Следующим этапом является процесс *химического меднения*.

В основе нанесения слоя металла на диэлектрик химическим путем лежит реакция восстановления иона металла из раствора.

Для протекания этой реакции необходимо, прежде всего, присутствие в растворе достаточно сильного и активного восстановителя. Очевидно, что выбор возможных восстановителей тем шире, чем положительнее стандартный потенциал металла, т. е. чем он благороднее. Кроме того, необходимым является также автокаталитический характер реакции восстановления. Степень автокатализа зависит от природы восстановителя.

Движущей силой автокаталитического процесса восстановления является окисление восстановителя. В отсутствие автокатализа реакция восстановления если и протекает, то во всем объеме раствора и приводит к образованию порошкообразного металла.

Применяемые восстановители – в основном водородосодержащие соединения. Восстанавливающая способность водородосодержащих соединений увеличивается с повышением рН раствора. В основном по этой причине большинство растворов металлизации являются щелочными. Эффективность действия восстановителя может оцениваться по его окислительно-восстановительному потенциалу. Если окислительно-восстановительный потенциал очень мал, процесс восстановления протекает медленно, если же высок – слишком бурно.

Формальдегид является единственным восстановителем, который катализирует реакцию восстановления меди при комнатной температуре, т. е. делает ее автокаталитической. Потенциал формальдегида при различных значениях рН характеризуется следующими величинами.

рН	0	9	10	11	12	13	14
$E, В$	-0,06	-0,62	-0,71	-0,80	-0,85	-0,98	-1,07

Так, раствор с рН = 13 и выше обладает очень плохой стабильностью. При изменении рН раствора с 13 до 12 скорость осаждения уменьшается почти вдвое. При рН = 11 покрываемая медью поверхность пассивируется. Практически рН поддерживается в интервале 12–13.

Раствор химического меднения должен содержать:

- 1) Cu^{2+} – любая растворимая соль, чаще сульфат меди;
- 2) лиганд – сегнетова соль или трилон Б, иногда их сочетание; связывает ион металла в растворимый комплекс, ингибирует реакцию восстановления таким образом, чтобы этот процесс не мог начаться самопроизвольно и происходил бы не в объеме раствора, а только на активированной поверхности диэлектрика;

- 3) NaOH – рН = 12 для достижения необходимого окислительно-восстановительного потенциала;

4) восстановитель – формальдегид доступен и дешев, позволяет получать медные покрытия при комнатной температуре, а самое главное то, что процесс восстановления меди является автокаталитическим только при использовании формальдегида;

5) стабилизирующие добавки – серноватистокислый натрий, роданистый калий, роданин, железосинеродистый калий предотвращают образование Cu_2O .

Кроме того, в растворы химического меднения могут быть добавлены CO_3^{2-} – увеличивает их стабильность; Ni^{2+} – повышает сцепление осадка с поверхностью диэлектрика и стабильность раствора за счет блокирования наиболее активных каталитических центров поверхности.

Процесс химического меднения качественно рассматривается как сумма частных сопряженных электрохимических реакций катодного восстановления металла и анодного окисления восстановителя. Основная катодная реакция восстановления меди может быть представлена уравнением

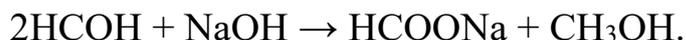


Анодная реакция заключается в окислении формальдегида:

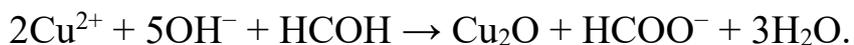


Обе реакции протекают на поверхности меди.

Увеличенный против реакции расход формальдегида и щелочи объясняется протеканием реакции Канниццаро:



Побочной реакцией, происходящей при химическом восстановлении меди, является частичное восстановление меди до одновалентного состояния и образования закиси меди Cu_2O :



Образование частиц оксида меди (I) является одной из причин разложения раствора, так как они играют роль катализатора, обуславливают восстановление меди в объеме раствора. Cu_2O может окисляться за счет растворения кислорода, поэтому перемешивание растворов, особенно сжатым воздухом, способствует повышению их стабильности.

Прочность сцепления между химически осажденной медью и диэлектриком улучшается после нанесения слоя электролитической меди. Химически осажденная медь обычно имеет небольшую толщину ($\cong 0,5$ мкм), обладает слабыми защитными свойствами и легко окисляется на воздухе. После осаждения ее необходимо сразу защитить наращиванием («затяжкой») по крайней мере 1–2 мкм гальванической меди.

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОГО МЕДНЕНИЯ

Цель работы – изучение влияния предварительной подготовки поверхности диэлектрика, вида лиганда, рН раствора на скорость процесса химического меднения и качество покрытия.

Экспериментальная часть

Для выполнения этой работы предварительно готовится стеклоткань, используемая в производстве ПП. Для этого стравливается эпоксидная смола, которой эта стеклоткань пропитана, и процесс химического осаждения ведут на эту основу. Предварительно вырезают образцы 30×30 мм и взвешивают их на аналитических весах.

Далее образцы подвергают последовательной обработке, строго соблюдая временной режим в соответствии с табл. 2.1. После прохождения всех стадий образец снова взвешивают, вычисляют скорость меднения и оценивают качество покрытия.

Большое значение имеет порядок приготовления растворов.

Как правило, NaOH растворяют в 1/3 необходимого количества дистиллированной воды, затем там же растворяют комплексообразователь. Раствор охлаждают до комнатной температуры. В отдельной емкости растворяют CuSO₄ и тонкой струей при интенсивном перемешивании выливают в щелочной раствор, после чего полученный раствор доводят до необходимого объема.

Непосредственно перед работой (за 20 мин до проведения химического меднения) в раствор вводят остальные добавки (стабилизаторы, буферные добавки) и после этого – расчетное количество формалина.

Вариант 1. Определить влияние предварительной подготовки диэлектрика на скорость процесса химического меднения и качество покрытия.

Для выполнения данной работы необходимо на лабораторном столе расположить необходимое количество химических стаканчиков объемом 50 см³ заполненных рабочими растворами в соответствии с табл. 2.1.

Образцы подвергаются предварительной обработке различными растворами.

Образец № 1: химическое обезжиривание – раствор № 1;

акселерация – раствор № 1;

химическое меднение – раствор № 2.

Образец № 2: химическое обезжиривание – раствор № 2;
 акселерация – раствор № 1;
 химическое меднение – раствор № 2.

Образец № 3: химическое обезжиривание – раствор № 2;
 акселерация – раствор № 2;
 химическое меднение – раствор № 2.

Скорость меднения v_m , г/мин, рассчитывается по формуле

$$v_m = \frac{\Delta m}{\tau},$$

где Δm – изменение массы, г; τ – время, мин.

Скорость меднения в пересчете на видимую поверхность v_{Cu} , мкм/мин, определяется по формуле

$$v_{Cu} = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S \cdot \rho},$$

где τ – время, мин; S – видимая поверхность образцов, см²; ρ – плотность меди, г/см³ ($\rho = 8,96$ г/см³).

Результаты экспериментов заносятся в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Таблица экспериментальных данных по вариантам 1 и 2

Номер образца	$m_{\text{образца}}$, Г		Δm	Скорость меднения v_m , г/мин	Скорость меднения в пересчете на видимую поверхность v_{Cu} , мкм/мин
	исходная	после меднения			
1					

Вариант 2. Установить влияние типа лиганда и концентрации основной соли на скорость осаждения меди и качество покрытия.

Образцы обрабатывают в последовательности соответственно табл. 2.1, используя для химического обезжиривания и акселерации раствор № 2.

Химическому меднению образцы подвергаются соответственно в растворах № 1, 2, 3.

Результаты экспериментов заносятся в табл. 2.2.

Вариант 3. Определить влияние pH раствора и концентрации свободной щелочи на скорость процесса химического меднения и качество покрытия.

Предварительную обработку образцов проводят, как в варианте 2, химическое меднение в растворе – согласно табл. 2.3.

Результаты экспериментов заносят в табл. 2.3.

Экспериментальные данные по варианту 3

Состав электролита, г/дм ³	рН раствора	Концентрация свободной щелочи, г/л	Скорость меднения, мкм/ч
CuSO ₄ · 5H ₂ O – 25	11,5		
Формальдегид – 40	11,8		
Трилон Б – 50	12,0		
	12,5		
	12,8		
	13,0		

Определение количества свободной щелочи проводят следующим образом.

В колбу на 250 мл добавляют 20 мл свежеприготовленного раствора химического меднения, добавляют 60–70 мл H₂O, 10 мл 10%-ного BaCl₂, 8–10 капель фенолфталеина и все титруют 0,1 н. раствором HCl.

Концентрацию свободной щелочи C , г/л, определяют по формуле

$$C = \frac{V_{\text{HCl}} \cdot T \cdot 1000}{V},$$

где V_{HCl} – количество HCl, израсходованное на титрование, мл; T – титр 0,1 н. раствора HCl по NaOH, г/мл ($T = 0,004$); V – количество исследуемого раствора, мл.

Контрольные вопросы

1. Способы активации.
2. Сенсibilизирование. Механизм процесса. Факторы, влияющие на протекание процесса.
3. Активирование. Механизм процесса. Прямое активирование. Акселерация.
4. Критерии выбора восстановителей. Движущая сила процесса химического меднения.
5. Анодное окисление восстановителя. Механизмы: химический и электрохимический, сопряженные реакции восстановления. Свойства мелких частиц металлов.
6. Растворы металлизации: состав растворов, основные характеристики растворов химического меднения.
7. Основные закономерности восстановления Cu формальдегидом.
8. Влияние лигандов на процесс химического меднения. Сравнительная оценка лигандов.
9. Пассивация меди.
10. Стабилизаторы растворов химического меднения. Механизм действия.
11. Виды брака при химическом меднении.

Лабораторная работа № 3

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ОТВЕРСТИЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Цель работы – ознакомление с процессом осаждения меди в отверстиях печатной платы путем химического восстановления Cu и дальнейшим наращиванием гальванического медного осадка на поверхности и в отверстиях ПП.

Экспериментальная часть

Для выполнения работы вырезают образец из фольгированного диэлектрика и делают 5–10 отверстий. Образец необходимо взвесить и определить его площадь поверхности, учитывая боковые грани. Далее образец подвергают последовательной обработке, строго соблюдая временной режим (табл. 2.4).

Таблица 2.4

**Составы растворов для подготовки поверхности
к нанесению металлических покрытий и их технологические параметры**

Операция	Состав электролита	C , г/дм ³	t , °C	τ , мин
Травление	$\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{HF} = 5 : 1$	–	–	1,0–1,5
Проточная промывка	–	–	20	0,5
Химическое обезжиривание	$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	25	50–60	10–15
	Na_2CO_3	25		
	OC-20	5		
Горячая промывка	–	–	40–45	1–2
Холодная промывка	–	–	20	0,5
Подтравливание	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$	90–120	20	3–6
	H_2SO_4	10–12		
Проточная промывка	–	–	20	0,5
Декапирование	H_2SO_4	5–7%-ный	20	1
Активация	PdCl_2	0,15–0,3	35	4–5
	SnCl_2	25–30		
	HCl	150		
Проточная промывка	–	–	20	0,5
Акселерация (ускоритель)	HBF_4	25	20	4–5
	Глицерин	8–12		
Проточная промывка	–	–	20	0,5
Химическое меднение	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25–35	20–25	15–20
	Трилон Б	50–70		
	NaOH	18–20		
	Формалин (37%-ный)	3,5–4,5		

Операция	Состав электролита	C , г/дм ³	t , °С	τ , мин
Проточная промывка	–	–	20	0,5
Электрохимическое меднение (гальванозатяжка)	CuSO ₄ · 5H ₂ O H ₂ SO ₄ ЛТИ ОС-20	100–120 160–180 0,06–0,08 0,4–0,6	20–25	20
Проточная промывка	–	–	20	0,5

Непосредственно перед химическим меднением (за 20 мин до проведения) в электролит необходимо ввести добавки (стабилизаторы, буферные добавки) и после этого – расчетное количество формалина.

Для электрохимического осаждения меди необходимо заблаговременно собрать лабораторную установку (рисунок в приложении 1). Ток устанавливают исходя из поверхности образца и допустимой плотности тока (150–200 А/м²): $I = S \cdot i$.

В качестве анодов применяют фосфорсодержащие медные аноды (АМФ).

После завершения эксперимента образец промывают, высушивают и взвешивают. На основании полученных данных рассчитывают средние толщины химически и электрохимически осажденной меди. Качество полученной металлизации исследуют визуально и под микроскопом. Результаты эксперимента тщательно протоколируют и заносят в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Экспериментальные данные по лабораторной работе № 3

Площадь поверхности образца S , см ²		
Масса образца исходная m_0 , г		
Масса образца после меднения m_k , г		
Изменение массы Δm , г	$\Delta m = m_k - m_0$	
Время электролиза τ , мин		
Масса гальванической меди m_r , г	$m_r = q \cdot I \cdot \tau \cdot \text{ВТ}$	
Толщина химической меди δ_x , мкм	$\delta_x = \frac{\Delta m - m_r}{S \cdot \rho}$	
Толщина гальванической меди δ_r , мкм	$\delta_r = \frac{q \cdot I \cdot \tau \cdot \text{ВТ}}{S \cdot \rho}$	
Суммарная толщина меди δ , мкм	$\delta = \delta_x + \delta_r$	

Контрольные вопросы

1. Стадии предварительной подготовки ПП перед процессом химического меднения (подробно).
2. Способы изготовления ПП.
3. Химическое меднение.
4. Гальваномеднение. Требования к покрытию, электролитам.

3. ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ МЕДНЕНИЕ

К гальваническим осадкам меди предъявляют ряд обязательных требований:

- равномерность толщины металлизации элементов проводящего рисунка (не менее 25 мкм в отверстиях);
- мелкокристаллическая структура;
- высокая адгезия к проводящей поверхности;
- пластичность (относительное удлинение осажденной меди не менее 4–6%);
- низкое удельное электрическое сопротивление ($1,8\text{--}2,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см).

Чрезвычайно важное значение имеет пластичность осажденного слоя меди, так как в условиях эксплуатации платы подвергаются значительному нагреву и происходит тепловое расширение металла, из которого изготовлена плата, и слоя меди. Коэффициент линейного расширения эпоксидной смолы почти в 5 раз больше коэффициента линейного расширения меди ($\alpha_{\text{эпоксид}} = 9,2 \cdot 10^{-5}$ мм/мм·°С и $\alpha_{\text{Cu}} = 1,77 \cdot 10^{-5}$ мм/мм·°С), поэтому в результате термоударов в слое меди, осажденной на стенках отверстий, возникают значительные напряжения и, если медь недостаточно эластична, происходит ее разрыв, а разрыв меди в переходном отверстии приводит к выходу из строя всего блока.

Расчеты показывают, что на многослойной плате толщиной 2 мм удлинение по оси z при пайке на волне припоя при температуре 250°С составляет: для диэлектрика – 0,048 мм; для меди – 0,009 мм. В этом случае слой должен «вытянуться» почти на 40 мкм и, если относительное удлинение меди менее 3%, неизбежен разрыв.

Учитывая вышеизложенное, необходимо обращать большое внимание на пластичность осажденной меди, которая с учетом ужесточенных эксплуатационных требований к печатным платам, должна составлять по величине относительного удлинения не менее 6%.

При выборе электролита прежде всего необходимо учитывать его рассеивающую и выравнивающую способности, которые обеспечивают равнотолщинное распределение металла.

Повышение pH уменьшает среднюю толщину покрытия, сокращает расход металла, обеспечивает точность и высокую плотность монтажа. Кроме того, электролиты должны быть просты в эксплуатации, стабильны в работе и высокопроизводительны.

Лучшим электролитом считался бы такой, в котором толщина металлизации в отверстиях и на поверхности плат, в центре ее и на периферии была бы одинакова.

К сожалению, органические соединения, используемые в качестве выравнивающих добавок, трудно поддаются контролю, оптимальная концентрация их часто находится в узких пределах, и в ряде случаев они либо образующиеся продукты их разложения вызывают хрупкость осадков, а иногда ухудшают их вид.

Для повышения рассеивающей способности (РС) и улучшения равномерности металлизации в отверстиях необходимо обеспечить интенсивное прохождение электролита через отверстия покачиванием катодных штанг в горизонтальной плоскости с частотой 30–40 колебаний катодной штанги в минуту, амплитуда колебаний – до 50 мм.

Электрический режим осаждения также влияет на равномерность покрытий. При использовании низких плотностей тока участки в середине плат будут иметь заниженную толщину покрытия. При работе на верхнем пределе плотностей тока толщина покрытия на углах и кромках плат оказывается превышенной, что приводит к увеличению шероховатости слоя на этих участках. Тем не менее интенсификация процесса гальванопокрытий для печатных плат весьма существенна, так как сокращается время выдержки плат в электролитах и снижается брак, обусловленный отслаиванием и разрушением фоторезистов.

С точки зрения практики более удобным был бы такой технологический процесс, при котором электролиз проводился бы с простым составом электролита (менее чувствительным к различного рода загрязнениям и изменению состава), а получение осадков с различными свойствами осуществлялось бы несложными приемами, например изменением электрического режима питания ванн. Такую возможность обеспечивает применение нестационарных токовых режимов, к которым относятся реверсный ток (переменной полярности), периодический ток и импульсный (прерывистый) ток.

На нестационарных токовых режимах за счет увеличения скорости осаждения и одновременного улучшения физико-механических свойств покрытия можно в 2–3 раза интенсифицировать процесс осаждения металлов по сравнению с их осаждением на постоянном токе. Меднение на нестационарных токовых режимах позволяет не только интенсифицировать процесс, но и повысить качество осадков.

Применение периодически изменяющегося тока может оказывать значительное влияние на электродный процесс. В этом случае по сравнению с электролизом на постоянном токе нарушается обычный ход

образования и роста кристаллов, происходит периодическое перераспределение центров кристаллизации и растущих граней кристаллов, что приводит к изменению физико-химических свойств осадков.

Таким образом, нестационарный электролиз открывает возможность управления ходом электролизного процесса и качеством осадков путем изменения параметров периодического тока.

Как уже отмечалось выше, при металлизации отверстий МПП по подслою химической меди особое значение приобретает рассеивающая способность электролита. По литературным экспериментальным данным, рассеивающая способность электролитов меднения составляет: цианистого – 64%, пирофосфатного – 62%, сернокислого – 24%, борфтористоводородного – 17%, кремнефтористоводородного – 8%.

Оптимальными для меднения отверстий в печатных платах являются цианистые и пирофосфатные электролиты. При меднении в этих электролитах может быть получено близкое к 1:1 отношение толщины покрытия в отверстиях и на поверхности платы.

Однако несмотря на высокую РС цианистого и пирофосфатного электролитов, их применение для металлизации ПП весьма ограничено. Цианистые электролиты, как известно, весьма ядовиты, и требуют специальных устройств очистки. Из пирофосфатной ванны надежные сквозные отверстия получить нельзя, так как из-за высокой твердости и внутренних напряжений, обусловленных включением фосфора, в осадке могут возникнуть трещины. Кроме того, данные электролиты щелочные, что не позволяет их использовать ввиду воздействия на фоторезист (применяемые в настоящее время фоторезисты – водно-щелочного проявления).

Наибольшее распространение в технологии меднения в производстве ПП получили сернокислые электролиты. Достаточно долго в производственной практике использовался электролит следующего состава: CuSO_4 – 200–250 г/дм³, H_2SO_4 – 50–70 г/дм³, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ – 5–10 мл/дм³ при $i_k = 1\text{--}2$ А/дм².

В настоящее время на рынке производства печатных плат, гальванотехники и обработки поверхности появилось большое количество патентованных составов электролитов с закрытой формулой. Как правило, данные составы поставляются в готовом виде, что, несомненно, позволяет добиться стабильности качества получаемых покрытий. Однако у такой системы поставок есть и негативные стороны: зависимость поставок только от одного поставщика, повышенные расходы на закупку реактивов, невозможность корректировки электролита по отдельным компонентам.

В данном лабораторном практикуме закономерности осаждения медных покрытий рассматриваются на примере электролитов с открытым составом.

В качестве примера эффективно работающего электролита меднения можно привести электролит с блескообразующей добавкой ЛТИ: CuSO_4 – 220–230 г/дм³, H_2SO_4 ($\rho = 1,84$ г/см³) – 50–70 г/дм³, NaCl – 5–10 г/дм³, ЛТИ – 0,03–0,06 мл/л. Режим электролиза: $i_k = 1–2$ А/дм², $t = 20–25^\circ\text{C}$.

Добавка ЛТИ – комплексная. В качестве первичного блескообразователя используется ароматический дисульфид, а в качестве вторичных смачивающих агентов – смачиватель ОС-20 и органические красители – метиловый голубой и нитрозин водорастворимый.

Концентрация H_2SO_4 в электролите меднения не может выбираться произвольно, так как растворимость CuSO_4 зависит от содержания H_2SO_4 , снижаясь с ростом ее концентрации.

Серная кислота в электролите выполняет ряд функций:

- повышает электропроводность, что позволяет при более низком напряжении поддерживать повышенную плотность тока;
- уменьшает активную концентрацию ионов осаждаемого металла, способствуя образованию более мелкокристаллических структур;
- предотвращает гидролиз ионов Cu^+ , который способствовал бы образованию рыхлого осадка.

Рост рассеивающей способности сульфатного электролита достигается путем изменения концентрации сульфата меди и H_2SO_4 .

Уменьшение концентрации ионов металла в сочетании с увеличением концентрации свободной кислоты вызывает изменение катодной поляризации, при которой зоны, близкие к анодам, имеют склонность к поляризации в последнюю очередь, поэтому на участках, более удаленных от анода, осаждается больше металла. Такое изменение катодной поляризации приводит к существенному выравниванию и плотности тока по всей поверхности катода, включая стенки отверстий.

Сернокислый электролит весьма чувствителен к органическим примесям, что приводит к шероховатости, хрупкости покрытия, появлению трещин в отверстиях ПП при термических воздействиях, а также указывает на частичное растворение в электролитах материалов, используемых для изготовления ПП. Для нейтрализации этого негативного воздействия электролит меднения необходимо подвергать очистке фильтрацией с использованием активированных угольных волокнистых материалов (АУВМ).

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ГАЛЬВАНОМЕДНЕНИЯ

Цель работы – ознакомление с процессом меднения и изучение влияния состава электролита и режима электролиза на выход по току меди, потенциалы катода и анода, качество (по внешнему виду).

Экспериментальная часть

В данной работе в качестве анодов используются АМФ, в качестве катодов – двусторонний фольгированный диэлектрик. Подготовка электродов проводится в соответствии с приложением 2. Принципиальные схемы установки для проведения электролиза и снятия поляризационных кривых приведены в приложениях 3 и 4.

Методика определения рассеивающей способности дана в приложении 5.

В качестве электролизеров используют емкости из оргстекла вместимостью 250 мл. В каждую помещают по 2 анода из АМФ и катодную основу. Базовые составы электролитов электрохимического меднения представлены в табл. 3.1.

Время электролиза необходимо рассчитать, приняв выход по току равным 1 и учитывая требуемую толщину покрытия:

$$\tau = \frac{\delta \cdot \rho}{q_{\text{Me}} \cdot i_{\text{к}} \cdot \text{ВТ}},$$

где δ – толщина покрытия, мкм; ρ – плотность металла, г/см³; q_{Me} – электрохимический эквивалент осаждаемого металла, г/А·ч; $i_{\text{к}}$ – катодная плотность тока, А/м²; ВТ – выход по току, %.

По результатам эксперимента рассчитывается реальный выход по току, образцы подвергаются внешнему осмотру и исследованию под микроскопом.

Таблица 3.1

Составы электролитов меднения

Номер электролита	Состав электролита	C, г/дм ³	t, °C	i _к , А/дм ²
1	CuSO ₄ · 5H ₂ O H ₂ SO ₄ БЭСМ	200–230 50–60 0,04	18–25	2,0
2	CuSO ₄ · 5H ₂ O H ₂ SO ₄ БЭСМ ОС-20	100–120 160–180 0,04 0,1–0,2	18–25	2,0

Окончание табл. 3.1

Номер электролита	Состав электролита	C , г/дм ³	t , °C	i_k , А/дм ²
3	CuSO ₄ · 5H ₂ O	35	18–25	1,0–2,0
	Щавелевокислый аммоний	50		
	Щавелевая кислота	10		

Вариант 1. Получить катодные поляризационные кривые выделения меди в электролитах № 1 и 2 и определить их рассеивающую способность. Объяснить влияние H₂SO₄ на процесс гальваномеднения. Результаты поместить в табл. 3.2.

Вариант 2. Получить катодные поляризационные кривые выделения меди в электролитах № 2 и 3 и определить их рассеивающую способность. Результаты поместить в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Экспериментальные данные по вариантам 1 и 2

Номер электролита	Состав электролита	РС, %

Вариант 3. Изучить влияние содержания H₂SO₄ на скорость меднения, выход по току меди, качество покрытия (электролиты № 1, 2).

При выполнении данного варианта проводят осаждение медного покрытия на толщину не менее 10 мкм при трех плотностях тока (1,5; 2,0; 2,5 А/дм²) или по согласованию с преподавателем. Результаты помещают в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Экспериментальные данные по варианту 3

Параметр	Формула	Состав электролита	
		№ 1	№ 2
Исходная масса образца m_0 , г			
Конечная масса образца m_k , г			
Изменение массы образца Δm , г	$\Delta m = m_k - m_0$		
Время электролиза τ , ч			
Выход по току ВТ, %	$ВТ = \frac{\rho \cdot \delta}{q \cdot i \cdot \tau}$		
Толщина покрытия δ , мкм	$\delta = \frac{\Delta m}{S \cdot \rho}$		

Вариант 4. Получить катодные поляризационные кривые выделения меди из раствора № 2 с различным содержанием CuSO₄ · 5H₂O

(50, 110, 200 г/л). Объяснить влияние концентрации соли основного металла на катодный процесс.

Вариант 5. Изучить влияние добавок на катодный процесс выделения меди. Для этого необходимо снять катодные поляризационные кривые в растворе № 2 и в этом же растворе, но без добавок БЭСМ и ОС-20.

Вариант 6. Сравнить пластичность и микротвердость гальванических осадков меди, полученных из электролитов № 1, 2, 3.

На электроды из нержавеющей стали шириной 10 мм наносят слои меди толщиной 30–40 мкм. Предварительно электроды обезжиривают (приложение 1), промывают водой, активируют в 10%-ном растворе HCl, промывают водой и вторично активируют в 10%-ном растворе HBF₄. Затем электроды завешивают в ячейке и осаждают медь с использованием анодов АМФ.

Электроды с осажденной медью высушивают при $t = 80–100^{\circ}\text{C}$ в сушильном шкафу в течение 30 мин.

Проводят определение микротвердости в соответствии с приложением 4. Затем снимают медь с нержавеющей основы с помощью скальпеля.

Испытание пластичности образцов проводят методом перегиба. Для этого сгибают образец пополам и прижимают сверху линейкой. Если образец выдерживает 2–5 изгибов, то покрытие имеет хорошую пластичность. Для каждого электролита испытывают по 2 образца и берут среднее арифметическое значение.

Таблица 3.4

Экспериментальные данные по варианту 6

Параметр	Значение	Состав электролита		
		№ 1	№ 2	№ 3
Исходная масса образца m_0 , г				
Конечная масса образца m_k , г				
Изменение массы образца Δm , г	$\Delta m = m_k - m_0$			
Время электролиза τ , ч				
Выход по току ВТ, %	$\text{ВТ} = \frac{\rho \cdot \delta}{q \cdot i \cdot \tau}$			
Толщина покрытия δ , мкм	$\delta = \frac{\Delta m}{S \cdot \rho}$			
Микротвердость				
Количество перегибов				

Контрольные вопросы

1. Общие требования к гальванической металлизации.
2. Электрохимические, электрические, геометрические условия осаждения.
3. Гальваническое меднение. Требования к осадку гальванической меди и электролитам меднения.
4. Электролиты меднения щелочные (пирофосфатный) и кислые (кремнефтористый, борфтористоводородный, сульфатный). Сравнительная характеристика электролитов меднения.
5. Низкоконцентрированные сульфатные электролиты, используемые добавки, аноды, составы.
6. Нестационарные токовые режимы.
7. Регенерация и очистка электролитов гальванического меднения.
8. Механические свойства медного гальванопокрытия. Возможные виды брака.

4. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ СПЛАВОВ ОЛОВА

Электроосаждение сплавов является одним из эффективных методов улучшения качества металлических покрытий. Покрытия сплавами часто обладают высокими антикоррозионными и лучшими декоративными свойствами, большей твердостью, износостойкостью и жаростойкостью по сравнению с покрытиями индивидуальными металлами. Известны электрохимические сплавы, обладающие особыми физико-механическими и механическими свойствами: магнитной проницаемостью, сверхпроводимостью, паяемостью, полупроводниковыми, антифрикционными и др. Совместное восстановление двух металлов возможно, когда потенциалы их разряда (E_1 и E_2) равны или близки, т. е. когда

$$E_1^0 + \frac{R \cdot t}{z_1 \cdot F} \cdot \ln a_1 + \eta_1 = E_2^0 + \frac{R \cdot t}{z_2 \cdot F} \cdot \ln a_2 + \eta_2,$$

где E_1^0 и E_2^0 – стандартные потенциалы металлов; R – универсальная газовая постоянная; t – температура; z_1 и z_2 – степени окисления ионов; F – число Фарадея; a_1 и a_2 – активности ионов металлов; η_1 и η_2 – перенапряжения.

Если потенциалы выделения двух металлов различны, то для их сближения применяют следующие методы. При близких значениях стандартных потенциалов и перенапряжений двух металлов (в растворах простых солей) потенциалы их выделения сближают путем уменьшения активности ионов более электроотрицательного металла и увеличения активности ионов более электроположительного металла. Когда стандартные потенциалы металлов заметно различаются, сближение потенциалов выделения практически невозможно, так как при изменении активности в 10 раз значение равновесного потенциала сдвигается всего на 0,059 В для одновалентных ионов и на 0,029 В – для двухвалентных.

Наиболее эффективным методом сближения потенциалов является образование прочных комплексных соединений ионов выделяемых металлов. Подбираются такие комплексообразующие лиганды, которые позволяют получить комплексы электроположительного металла более прочными, чем электроотрицательного, и, следовательно, которые

уменьшают активность ионов более электроположительного металла сильнее, чем электроотрицательного. Это приводит к сближению потенциалов выделения металлов как за счет сближения равновесных потенциалов, так и вследствие изменения значений перенапряжений, которые зависят от природы комплексного иона и избытка лиганда в растворе. Используют также добавки ПАВ, которые вызывают более сильное торможение реакции разряда ионов электроположительного металла по сравнению с электроотрицательным металлом.

При электроосаждении сплавов возможно как повышение скорости разряда ионов, т. е. облегчение процесса образования сплава (деполяризация), так и уменьшение скорости – затруднение разряда ионов (сверхполяризация). Эффект деполяризации проявляется в результате взаимодействия компонентов сплава при образовании кристаллической решетки твердого раствора или химического соединения. В этом случае облегчение выделения сплава объясняется уменьшением парциальной молярной энергии образования компонентов осадка. Такое влияние отмечается при электроосаждении сплавов Sn-Ni, Sn-Pb, Cu-Zn, Cu-Sn и др.

Физико-химические свойства сплава зависят от относительного содержания в нем компонентов. Поэтому, если состав сплава сильно изменяется в зависимости от плотности тока, то на рельефной поверхности изделий вследствие неравномерного распределения тока осадки сплава будут различными по составу, структуре и другим свойствам.

При электроосаждении сплавов применяют аноды из термического сплава (латунь, бронза, олово – свинец), а также из отдельных металлов, входящих в состав сплава, с отдельной или общей подводкой тока к ним. В случае использования анодов из одного металла убыль ионов второго металла компенсируется добавлением в электролит его соли.

Сплавы на основе олова. Одним из недостатков покрытий чистым оловом является быстрая потеря способности к пайке (после 1–2 недель), а также образование самопроизвольно растущих нитевидных кристаллов («вискеров» и «усов»), что недопустимо при изготовлении радиоэлектронных приборов, особенно печатных плат. Легирование олова висмутом, никелем, свинцом, кобальтом предотвращает как возникновение «усов», так и аллотропные видоизменения олова при низких температурах, сопровождающиеся превращением его в порошкообразное состояние («оловянная чума»). Кроме того, сплавы Sn-Bi (до 1%),

Sn-Co (до 1%), Sn-Pb (10–60%) (матовые после оплавления или блестящие) значительно дольше, чем олово (до года), сохраняют способность к пайке.

Сплав олово – свинец. Сплав Sn-Pb (10–60%) находит широкое применение в промышленности как антифрикционное покрытие, для защиты от коррозии и облегчения пайки деталей, а также в качестве функционального покрытия в производстве печатных плат.

Оловянно-свинцовый сплав выдерживает действие хромовой кислоты, хлоридов, щелочных металлов, персульфата аммония и щелочного раствора хлорной меди. Сплав разрушается в кислых растворах хлорной меди и хлорного железа.

Стандартные потенциалы Sn и Pb близки, и восстановление ионов этих металлов из растворов простых солей происходит при незначительной поляризации. Поэтому можно получать сплавы различного состава путем изменения относительной концентрации солей Sn и Pb в электролите. Для электроосаждения сплава Sn-Pb часто применяют фторборатные электролиты, в которых оба металла находятся в виде соответствующих солей. Для предупреждения окисления Sn^{2+} в Sn^{4+} , а также для улучшения растворения анодов в электролите необходим избыток борфтористоводородной кислоты. Свободная HBF_4 повышает электропроводность электролита, увеличивает стойкость к гидролизу борфтористоводородных солей ионов металла:



сдвигая равновесие реакции в левую сторону, снижает концентрацию ионов металлов, уменьшает разрастание покрытия, измельчает зерно сплава. В электролит вводят также борную кислоту для связывания борфтористоводородной кислоты, образующейся в растворе в результате разложения HBF_4 по уравнению $\text{HBF}_4 \leftrightarrow \text{BF}_3 + \text{HF}$.

С повышением плотности тока содержание олова в сплаве увеличивается, так как потенциал выделения олова имеет несколько более отрицательное значение по сравнению с потенциалом выделения свинца.

Для улучшения качества покрытия в состав электролита вводятся различные ПАВ. С увеличением содержания ПАВ в электролите повышается содержание олова в осадке, а при отсутствии ПАВ практически осаждается один свинец. Процесс осаждения свинца тормозится в значительно большей степени при введении в электролит ПАВ, чем при осаждении олова. Именно этим можно объяснить повышение содержания олова в осадке по мере увеличения содержания ПАВ в электролите.

Гальванически осажденный сплав Sn-Pb, имеющий развитую пористую поверхность, быстро окисляется, что ухудшает паяемость. Быстрое окисление покрытия объясняется, в основном, наличием в капиллярных порах остатков электролита, удалить которые промывкой практически не удастся.

Поэтому для получения хорошей паяемости гальваническое покрытие необходимо оплавлять. Кроме того, при травлении ПП происходит потемнение сплава Sn-Pb из-за образования пленок, препятствующих пайке. Для улучшения смачиваемости припоем необходимо проводить осветление поверхности металлического резиста. Для этого используются растворы, содержащие в качестве основных реагентов тиомочевину и HCl.

После осветления требуется тщательная промывка плат горячей водой, протирание их поролоновой губкой и сушка.

Далее необходима стадия оплавления.

В производстве печатных плат используются блестящие покрытия сплавами, которые сохраняют способность к пайке без оплавления до 18 месяцев, а также проявляют высокую химическую стойкость в растворах травителей, применяющихся для вытравливания меди с поверхности печатных плат. Электроосаждение блестящих осадков в присутствии композиции органических добавок сложного состава, неионогенных ПАВ и формальдегида, ингибирующих процесс электроосаждения сплава, протекает при плотности тока в 2–3 раза больше обычной. Среди известных блескообразующих добавок наиболее стабильными по составу являются композиции типа «Станекс-3НЗ» и «Лимеда ПОС-1», которые получили широкое применение в промышленности. Высокая рассеивающая способность электролита позволяет обеспечить максимально возможную равномерность покрытия по толщине в отверстиях печатной платы.

Сплав олово – висмут. Наиболее простым для электроосаждения сплава Sn-Bi является электролит, в состав которого входят сульфаты олова и висмута, серная кислота и добавки органических ПАВ. Из этого электролита светлые мелкокристаллические осадки получаются при плотностях тока до 200 А/м^2 , температуре $18\text{--}25^\circ\text{С}$ с высоким выходом по току. Используют аноды из олова, убыль в электролите висмута восполняется добавлением его соли.

Сплав олово – никель. Покрытие сплавом олово – никель (35% Ni и 65% Sn) отличается высокой антикоррозионной стойкостью и получается блестящим непосредственно из ванн. Хорошая химическая стойкость в растворах многих кислот, повышенная твердость,

износостойкость и ряд других свойств определили возможность его широкого использования.

Стандартные потенциалы этих металлов близки ($E^0_{\text{Sn}^{2+}/\text{Sn}} = -0,14 \text{ В}$, $E^0_{\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}} = -0,25 \text{ В}$), однако никель из простых электролитов осаждается при значительно более высоких перенапряжениях, чем олово. В работе [17] установлено, что электрохимическое осаждение никеля и олова в сплав Sn-Ni происходит с эффектом деполяризации.

Гальванический сплав Sn-Ni представляет собой соединение SnNi, которое может быть получено лишь электролитическим методом.

Совместное осаждение Sn и Ni на катоде достигается при добавлении фторидов к хлоридам олова и никеля, которые образуют с оловом прочные комплексные анионы SnF_4^{2-} и $\text{SnF}_2\text{Cl}_2^{2-}$. При этом равновесные и катодные потенциалы олова приобретают более электроотрицательные значения. Благодаря чему при определенных плотностях тока достигается сближение потенциалов этих металлов на катоде. Совместному осаждению Sn и Ni способствует также одинаковая деполяризация при разряде ионов обоих металлов вследствие образования химического соединения SnNi. В работе [18] показано, что увеличение плотности тока до $2,5 \text{ А/дм}^2$ сопровождается существенным изменением фазового состава покрытий.

Состав сплава мало зависит от изменения концентрации компонентов в электролите в рабочем интервале плотностей тока $50\text{--}400 \text{ А/м}^2$, температуры и pH раствора (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Зависимость состава сплава олово – никель от плотности тока

Плотность тока, А/м ²	Состав сплава, %, при pH = 2,5 и t = 70°C		Состав сплава, %, при pH = 4,5 и t = 55°C	
	никель	олово	никель	олово
50	44,0	56,0	42,0	58,0
100	42,0	58,0	37,0	63,0
150	41,0	59,0	35,5	64,5
200	38,0	62,0	34,0	66,0
300	36,0	64,0	32,5	67,5
400	35,0	65,0	—	—

Однако на свойства осадков (особенно на внутренние напряжения) температура и pH раствора оказывают существенное влияние. Осадки сплава с меньшими внутренними напряжениями получают из хлорид-фторидного электролита при 70°C и pH = 2,5.

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ СПЛАВА ОЛОВО – СВИНЕЦ

Цель работы – ознакомление с процессом электроосаждения сплава олово – свинец, выяснение условий совместного осаждения металлов и влияния отдельных факторов на состав и свойства получаемых сплавов.

Экспериментальная часть

Составы электролитов для осаждения сплавов и режимы электролиза приведены в табл. 4.2. Учитывая агрессивность и токсичность борфторидных электролитов, электролиз следует проводить в ячейках из несиликатного материала (полиэтилена, оргстекла и т. п.) в вытяжном шкафу. Схема установки для электролиза и условия подготовки образцов перед опытом приведены в приложениях 1 и 2.

Определение содержания свинца в сплаве. Точную навеску осадка (около 0,1 г), снятого с катода, растворяют в HNO_3 (1:1), переносят в мерную колбу на 100 см³ и доводят до метки дистиллированной водой. 20 см³ раствора помещают в коническую колбу на 300 см³, добавляют 100 см³ дистиллированной воды, 1 см³ H_2O_2 (30%-ный раствор) для окисления Sn^{2+} до Sn^{4+} и нагревают до кипения. После охлаждения добавляют 20–25 см³ буферного раствора до pH = 10 (к 54 г NH_4Cl приливают 350 см³ NH_4OH и доводят дистиллированной водой до 1 дм³), 5 см³ 20%-ного раствора триэтанолamina для маскировки Sn^{4+} , 20 см³ 0,1 н. раствора трилона Б и немного индикатора эриохрома черного Т (0,1 г индикатора растирают с 30 г NaCl), который в растворе дает зеленую окраску. Затем избыток трилона Б в растворе оттитровывают 0,1 М раствором сульфата цинка до перехода зеленой окраски в красно-фиолетовую. Массовую долю ω_{Pb} , %, свинца в сплаве рассчитывают по формуле

$$\omega = (V_1 - V_2) \cdot l \cdot T \cdot 100 \cdot \frac{100}{V_3 \cdot m_{\text{спл}}},$$

где V_1 – объем 0,1 н. раствора трилона Б, см³; V_2 – объем 0,1 М раствора сульфата цинка, израсходованный на титрование избытка трилона Б, см³; l – соотношение объемов растворов трилона Б и сульфата цинка ($V_1:V_2$); T – титр 0,1 н. раствора трилона Б по свинцу, г/см³; V_3 – объем раствора, взятый для анализа, см³; $m_{\text{спл}}$ – масса сплава, г. Выход по току сплава рассчитывают по формулам, приведенным в приложении 3.

Вариант 1. Исследовать зависимость состава сплава олово – свинец и его выхода по току от концентрации солей металла в электролите.

В цепь электролиза включают последовательно 2 электролизера с электролитами № 4 и 5 (табл. 4.2). При 200 А/м^2 на предварительно взвешенных медных катодах осаждают сплав в течение 1 ч. После окончания электролиза катоды промывают холодной и горячей водой, сушат и взвешивают на аналитических весах. В обоих случаях определяют содержание свинца в сплаве комплексонометрическим методом и выход по току сплава.

Таблица 4.2

Составы электролитов и режимы электролиза

Компоненты электролита, режимы электролиза	Номер электролита							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Концентрация, г/дм ³							
NiCl ₂ · 6H ₂ O	250–300	300	–	–	–	–	–	–
SnCl ₂ · 2H ₂ O	45–50	–	50	–	–	–	–	–
SnSO ₄	–	–	–	–	–	–	–	40–60
H ₂ SO ₄	–	–	–	–	–	–	–	100–110
NH ₄ F	60–70	60	60	–	–	–	–	–
H ₃ BO ₃	–	30	30	20–40	25–40	15–35	15–35	–
Bi(NO ₃) ₂	–	–	–	–	–	–	–	0,5–1,5
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	–	130	130	–	–	–	–	–
Pb(BF ₄) ₂	–	–	–	60–80	23–42	5,5–8,5	25	–
Sn(BF ₄) ₂	–	–	–	6–10	35–60	11–15	60	–
Синтанол ДС	–	–	–	–	–	5–12	–	–
Лимеда ПОС-1	–	–	–	–	–	0,4–0,8	–	–
Станекс-3НЗ	–	–	–	–	–	–	–	5
HBF ₄	–	–	–	50–100	40–100	100–350	350–400	–
ОС-20	–	–	–	–	–	–	25	4–5
Клей столярный	–	–	–	0,5–1	3–5	–	–	–
Формалин	–	–	–	3–5	–	–	20	–
pH	2–3	2,5–4,5	2,5–4,5	–	–	–	–	–
t, °С	50–70	50–70	50–70	18–30	18–30	15–25	15–25	15–25
i, А/м ²	50–400	100	100	100–200	100–200	300–400	300–800	50–200
Материал анода	Никель	Никель	Олово	ОС 90%, Р 10%	ОС 40%, Р 60%	ПОС-60	ПОС-60	Олово

Вариант 2. Определить выход по току при осаждении блестящих и матовых покрытий сплавом олово – свинец.

Предварительно взвешенные 2 пластины из меди и нержавеющей стали покрывают сплавом олово – свинец из электролитов № 5 и 6 при плотности тока 800 А/м^2 в течение 10 мин. По окончании электролиза медный катод со сплавом промывают холодной и горячей водой,

сушат и взвешивают на аналитических весах. Катоды из нержавеющей стали промывают, снимают осадок сплава и анализируют на содержание свинца комплексонометрическим методом. При определении выхода по току используют данные по составу сплава Sn-Pb, полученные в этом опыте.

Вариант 3. Снять поляризационные кривые гальваностатически с помощью потенциостата (приложение 1) при электроосаждении матовых осадков сплава Sn-Pb из электролита № 5 в интервале плотностей тока от 50 до 300 А/м² и блестящих осадков сплава из электролитов № 6 и 7 в интервале плотностей тока от 50 до 1000 А/м². Определяют выход по току сплава в этих электролитах при равной плотности тока (100–200 А/м²). Сравнивают полученные поляризационные кривые. Дают объяснение причин различия в поляризационных выходах по току при электроосаждении матовых и блестящих осадков.

Вариант 4. Определить влияние технологических параметров на состав, выход по току и микротвердость сплава Sn-Pb.

Используют 4 электролизера. Предварительно взвешенные катоды из меди покрывают сплавом олово – свинец из электролита № 5 при плотности тока 200 А/м² (электролизеры № 1, 2, 3) и при плотности тока 800 А/м² – электролизер № 4 в течение 30 мин. В электролизере № 2 используют перемешивание, в электролизере № 3 – нагревание. По окончании электролиза медный катод с осадком сплава промывают, сушат и взвешивают на аналитических весах. Затем снимают осадок сплава и проводят его анализ на содержание свинца комплексонометрическим методом.

Определяют выход по току сплава. При этом измеряют микротвердость сплава Sn-Pb на приборе ПМТ-3 по методике, приведенной в приложении 4 и сравнивают с микротвердостью покрытий отдельными металлами (Sn и Pb).

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ СПЛАВА ОЛОВО – НИКЕЛЬ

Цель работы – ознакомление с процессом электроосаждения сплава олово – никель, выяснение условий совместного осаждения

металлов и влияния отдельных факторов на состав и свойства получаемых сплавов.

Экспериментальная часть

Составы электролитов для осаждения сплавов и режимы электролиза приведены в табл. 4.2. Учитывая агрессивность и токсичность хлорид-фторидных электролитов, электролиз следует проводить в ячейках из несиликатного материала (полиэтилена, оргстекла и т. п.) в вытяжном шкафу.

Схема установки для электролиза и условия подготовки образцов перед опытом приведены в приложениях 1 и 2.

Вариант 1. Определить выход по току сплава олово – никель.

Предварительно взвешенные три пластины из меди или латуни покрывают сплавом Sn-Ni из электролита № 1 при плотностях тока 100, 200, 300 А/м² в течение 40, 20 и 10 мин соответственно. При расчете выхода по току используют данные о составе сплава при указанных плотностях тока, приведенные в табл. 4.1.

Вариант 2. Определить деполяризацию при осаждении сплава олово – никель.

Потенциалы измеряют гальваностатически с помощью потенциостата (приложение 1) для совместного (электролит № 1) и отдельного осаждения никеля (электролит № 2) и олова (электролит № 3) в интервале плотностей тока 50–500 А/м². Перед снятием поляризационных кривых электроды покрывают сплавом Sn-Ni в электролите № 1 ($i_k = 200$ А/м²) и соответствующими металлами ($i_k = 100$ А/м²) в электролитах № 2 и 3. Толщина осадка 5–7 мкм. По данным измерений строят поляризационные кривые совместного и отдельного осаждения олова и никеля.

Для построения парциальных поляризационных кривых осаждения Sn и Ni в сплав, зная состав сплава (табл. 4.1) и выход по току суммарного процесса при каждой плотности тока (i_k), определяют доли тока ($i_{\text{парц}}$), приходящиеся на разряд ионов олова и никеля при совместном их выделении. Так как выход по току сплава близок к 100%, то можно не учитывать доли тока на выделения водорода. В общем же случае расчет парциальной плотности тока $i_{\text{парц}}$, А/м², ведут по формуле

$$i_{\text{парц}} = i_k \cdot \text{ВТ}_{\text{спл}} \cdot \frac{w_i}{q_i \cdot 100},$$

где i_k – катодная плотность тока, А/м²; $\text{ВТ}_{\text{спл}}$ – выход по току сплава; w_i – массовая доля металла (олова или никеля) в сплаве; q_i – электрохимический

эквивалент олова (никеля), г/А·ч. $WT_{\text{спл}}$ и $q_{\text{спл}}$ рассчитывают по формулам, приведенным в приложении 3.

Рассчитанные значения $i_{\text{парц}}$ фиксируют на ординатах точками при каждом значении потенциала, соответствующем плотности тока суммарного процесса, и строят парциальные поляризационные кривые для процессов осаждения в сплав олова и никеля. По разнице между потенциалами выделения Sn и Ni в сплав и потенциалами отдельного осаждения их при плотностях тока 100–200 А/м² определяют значение деполяризации.

Вариант 3. Измерить на приборе ПМТ-3 по методике, приведенной в приложении 5, микротвердость сплава Sn-Ni и сравнить с микротвердостью покрытий отдельными металлами (Sn и Ni).

Лабораторная работа № 7

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ СПЛАВА ОЛОВО – ВИСМУТ

Цель работы – определение области допустимых плотностей тока и выхода по току при электроосаждении сплава олово – висмут.

Экспериментальная часть

В цепь электролиза включают последовательно рабочую ячейку и кулонометр. Сплав олово – висмут осаждают из электролита № 8. Вырезанные из медной фольги катоды кулонометра и ячейки предварительно взвешивают на аналитических весах. Сплав осаждают поочередно при $i_k = 50, 200, 300$ А/м² в течение 60, 30 и 15 мин соответственно. После окончания электролиза катоды кулонометра и ячейки тщательно промывают, сушат и взвешивают.

Отмечают качество осадков сплава Sn-Vi при указанных плотностях тока и рассчитывают выход по току, не учитывая долю, приходящуюся на выделение висмута ввиду его малого количества.

Контрольные вопросы

1. Требования и назначение металлорезиста.
2. Состав и диаграмма состояния сплава олово – свинец. Основные закономерности совместного разряда ионов различных металлов.

3. Условия электроосаждения сплава олово – свинец. Влияние технологических параметров на состав сплава олово – свинец.
4. Состав электролитов. Осветление и оплавление покрытия олово – свинец. Интерметаллические соединения.
5. Осаждение сплава олово – никель. Свойства покрытий.
6. Влияние технологических параметров на состав сплава олово – никель.
7. Составы электролитов, анодные материалы.
8. Использование оловянного покрытия в качестве металлорезиста.
9. Возможные виды брака при нанесении металлорезиста.
10. Покрытия концевых контактов печатных плат. Снятие металлорезиста.

5. КЛАСС ТОЧНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Точность изготовления печатных плат зависит от комплекса технологических характеристик и с практической точки зрения определяет основные параметры элементов печатной платы. В первую очередь это относится к минимальной ширине проводников, минимальному зазору между элементами проводящего рисунка, выполненного из меди, и к ряду других параметров (рисунок).

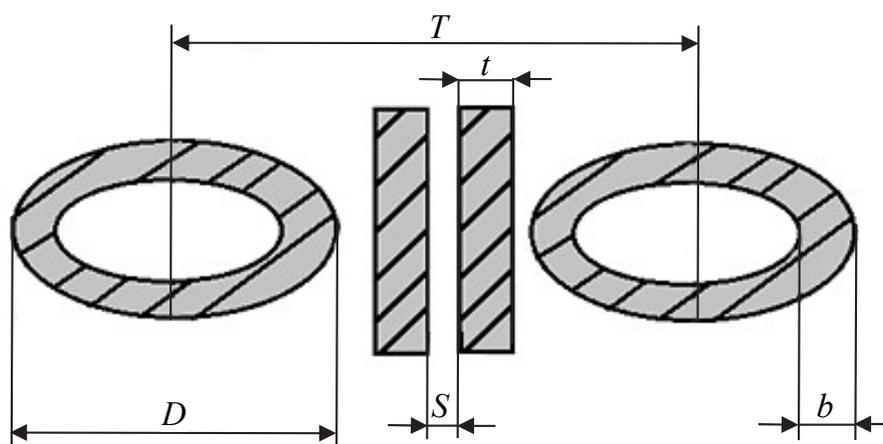


Схема элементов печатного монтажа, определяющих класс точности:
 T – расстояние между центрами отверстий; t – ширина печатного проводника;
 D – диаметр металлизированного отверстия с контактной площадкой;
 S – расстояние между краями соседних элементов проводящего рисунка;
 b – гарантированный пояс

ГОСТ 23751–86 «Платы печатные. Основные параметры конструкции» предусматривает 5 классов точности печатных плат, которые указываются в конструкторской документации на печатную плату в зависимости от уровня технологического оснащения производства (табл. 5.1). Поэтому выбор класса точности всегда связан с конкретным производством.

Таблица 5.1

Конструкторские параметры, определяющие класс точности печатной платы

Параметр	Номинальное значение параметра для класса точности				
	1-го	2-го	3-го	4-го	5-го
t , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
S , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
b , мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025
f^*	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20

* f – отношение номинального значения диаметра наименьшего из металлизированных отверстий к толщине печатной платы.

Выпуск печатных плат 1-го и 2-го классов осуществляется на рядовом оборудовании, а иногда даже на оборудовании, не предназначенном для изготовления печатных плат. Такие ПП с невысокими (и даже с низкими) конструктивными параметрами применяются для недорогих устройств с малой плотностью монтажа. К этому классу относятся печатные платы любительского и макетного уровня, часто единичного и мелкосерийного производства.

Наиболее распространены печатные платы 3-го класса, поскольку, с одной стороны, обеспечивают достаточно высокую плотность трассировки и монтажа, а с другой – для их производства необходимо рядовое, хотя и специализированное, оборудование.

Печатные платы 4-го класса выпускаются на высокоточном оборудовании, но критерии выбора материалов, оборудования и помещений ниже, чем для 5-го класса.

Изготовление печатных плат 5-го класса требует применения уникального высокоточного оборудования, специальных (как правило, дорогих) материалов, безусадочной фотопленки и даже создания в производственных помещениях «чистой зоны» с термостатированием. Таким условиям отвечает далеко не каждое производство. Но ПП небольшого размера могут выполняться по 5-му классу на оборудовании, обеспечивающем получение плат 4-го класса. Комплексно решить все эти проблемы удастся только в реальном производстве.

Прецизионные печатные платы используют в областях, в которых требуется высокий уровень надежности при непрерывном режиме работы (изделия, для которых важна длительная безотказная эксплуатация, обеспечение жизнедеятельности человека, изделия военного назначения и др.) Для этих ПП необходим высокий уровень контроля, испытаний и высокие критерии приемки.

В настоящее время прецизионные платы можно разделить на высокоплотные без микропереходов (high density printed circuit или high density interconnections – HDI) и высокоплотные с микропереходами.

Прецизионные ПП изготавливают с шириной проводников и зазоров от 125 до 40–50 мкм.

За рубежом принята другая классификация печатных плат по уровню точности, где регламентируются не только конструктивные параметры, но и шаг трассировки, что фактически связывает уровень производства с параметрами печатных плат и степенью интеграции элементной базы.

Лабораторная работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ТОЧНОСТИ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Цель работы – ознакомление с методикой определения класса точности печатной платы и изучение основных элементов печатного монтажа.

Экспериментальная часть

В данной лабораторной работе индивидуально студенту или звену выдается несколько печатных плат, на которых, согласно рисунку на с. 44, при помощи окуляра они определяют размеры основных элементов печатного монтажа. Полученные результаты сводят в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Результаты измерений

Параметр	Номер печатной платы		
	1	2	3
t , мм			
S , мм			
b , мм			
f			

В результате делается вывод о принадлежности печатной платы к определенному классу точности.

Для многослойных печатных плат определяется количество слоев.

Контрольные вопросы

1. Факторы от которых зависит точность изготовления печатных плат.
2. Параметры, определяющие класс точности печатной платы.
3. Прецизионные печатные платы.
4. Виды и размеры отверстий в печатных платах.

6. ВИДЫ БРАКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Виды брака на линии гальванического меднения. Рассмотрим типичные дефекты гальванопокрытий, вызванные нарушением режимов процесса и состава электролита.

Питтинг – дефект покрытия, характеризующийся наличием мелких точечных углублений, образовавшихся в процессе электрохимического покрытия вследствие задержки на поверхности пузырьков водорода и невозможности разряда металла.

Дендритные наросты – дефект покрытия в виде характерных кораллообразных наростов.

Вздутие покрытия – дефект куполообразной формы на покрытии, образующийся от потери прочности сцепления между покрытием и основным покрываемым металлом.

Нитевидные кристаллы – металлические нитевидные наросты, образующиеся самопроизвольно при хранении, эксплуатации или во время электроосаждения.

Трещины в столбе металлизации возникают из-за низкой пластичности осадка гальванической меди.

Подгар – дефект покрытия, выражающийся в наличии шероховатостей и мелких наростов, образующихся при плотности тока выше критической и загрязнении электролита (рис. 6.1).

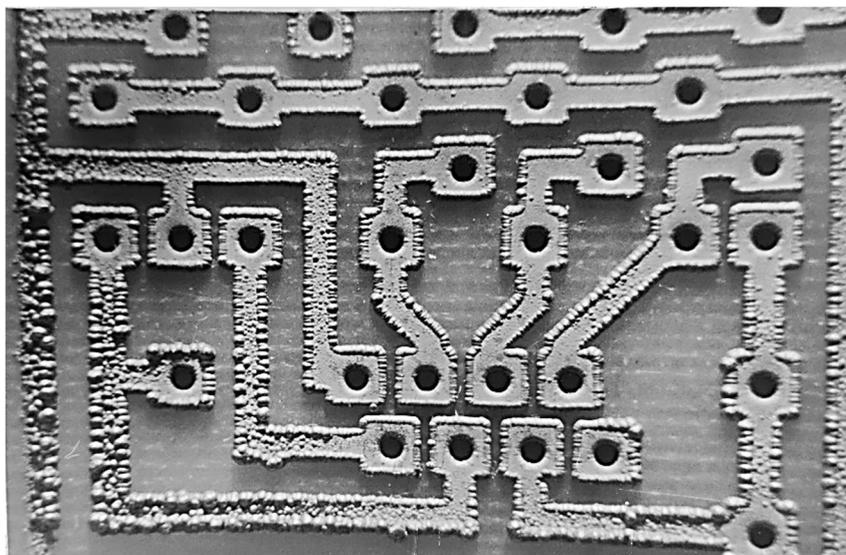


Рис. 6.1. Подгар гальванического покрытия

Отслаивание покрытия – отделение покрытия от основного покрываемого металла из-за некачественной подготовки поверхности (рис. 6.2, *а*).

Данный вид разрыва гальванического покрытия может происходить по следующим причинам:

- нарушение оптимального времени экспонирования и межоперационных сроков хранения;
- загрязнение гальванических ванн остатками фоторезиста, скалывающимися с краев заготовок вследствие несоответствия размеров фотошаблона и заготовки (рис. 6.2, *б*).

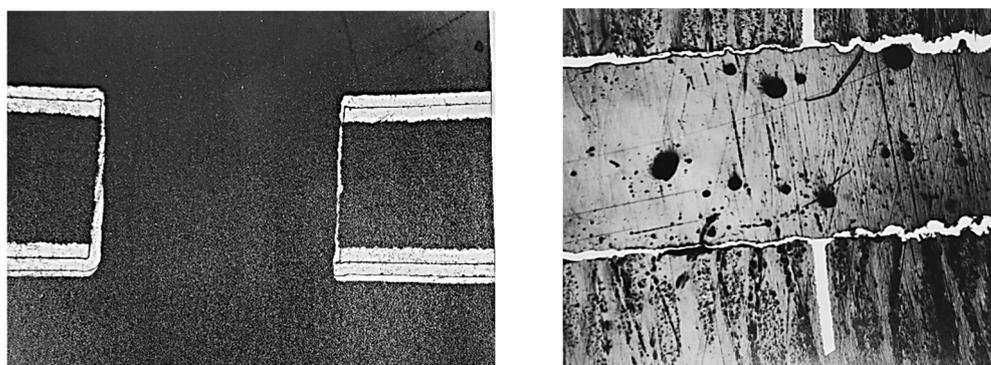


а

б

Рис. 6.2. Браки при производстве печатных плат:
а – отслаивание гальванического покрытия; *б* – разрывы гальванического покрытия из-за остатков фоторезиста в отверстиях

Заниженная толщина металлизации в отверстиях – осаждение слоя меди в отверстиях по толщине меньше 20 мкм для двусторонних печатных плат и 25 мкм для многослойных печатных плат (рис. 6.3).



а

б

Рис. 6.3. Заниженная толщина меди в отверстиях:
а – неправильный режим осаждения гальванической меди, некачественная зачистка контактов; *б* – остатки пузырьков воздуха в отверстиях

Основные неполадки при меднении в кислых электролитах представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Основные неполадки при меднении в кислых электролитах

Характер неполадок	Причина
Темные, шероховатые осадки	Высокая плотность тока, недостаток кислоты по отношению к содержанию меди. Включение в осадок механических примесей и закиси меди при недостатке кислоты
Светлые (блестящие) полосы; пассивирование анодов	Загрязнение органическими веществами. Недостаток кислоты (H_2SO_4 , HBF_4). Излишек фосфора в анодах АМФ
Скорость осаждения покрытия меньше расчетной	Снижение выхода по току из-за накопления железа
Плохое качество металлизации в отверстиях плат	Недостаточная скорость покачивания плат при осаждении меди
Растворение меди с проводников на одной стороне заготовки	Отсутствие контакта платы с подвеской и растворение меди вследствие биполярного эффекта
Хрупкость медных покрытий	Накопление в электролите органических примесей
Отслаивание осажденной меди от медной фольги	Наличие окисных разделительных слоев на фольге или неудаленного плохосцепленного слоя химически осажденной меди
Темно-серый подгар осадков из электролита с добавкой ЛТИ	Недостаток хлоридов

Виды брака на линии химического меднения. Образование раковин является наиболее важной проблемой управления качеством, возникающей при автоматической сборке посредством пайки печатных плат со сквозными металлизированными отверстиями. Количество образовавшихся раковин при пайке волной непосредственно связано со способностью медного столба противостоять давлению газа позади него в течение нескольких секунд, во время которых газ вырабатывается термическим воздействием расплавленного припоя. Если образуются раковины, то газ может выходить либо через существующие поры, либо разрывать столб металлизации. Оба эти явления уменьшаются по мере возрастания толщины столба. Однако соотношение между образованием раковин и толщиной столба является функцией качества химического меднения. Для того чтобы избежать появления пор и слабых точек, в столбе металлизации необходимо полное покрытие стенок просверленных отверстий химической медью. Химическое меднение зависит от эффективности и однородности адсорбции катализатора.

Природа образований раковин при пайке сквозных металлизированных отверстий. Газ, приводящий к образованию раковин при пайке сквозных металлизированных отверстий, возникает из-за поглощения влаги из атмосферы эпоксидной составляющей слоя FR-4. Образование раковин можно эффективно избежать в том случае, если печатную плату хорошо высушить до пайки, но это не всегда практично.

Столб металлизации должен оставаться цельным в течение нескольких секунд с момента, когда термическое воздействие расплавленного припоя начинает вызывать в металлизированных отверстиях выделение влаги, поглощенной эпоксидной составляющей, и до того момента, когда припой застынет. Давление газа за медной стенкой может стать значительным, и таким образом столб не только должен быть непроницаемым, но и не иметь слабых точек, которые могут пробиваться во время пайки (рис. 6.4, *а*, *б*). Однако если столб непроницаем, он должен еще также иметь достаточную адгезию к стенкам просверленных отверстий и не отрываться из-за давления газа позади него (рис. 6.4, *в*, *г*).

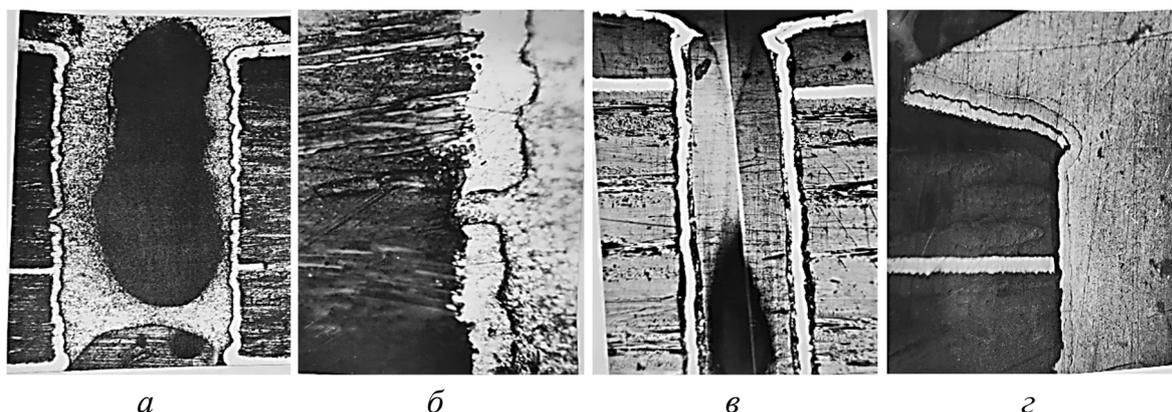


Рис. 6.4. Микрофотографии шлифов металлизированного отверстия: *а*, *б* – разрыв столба металлизации; *в*, *г* – отрыв медного столба от стенок отверстия

Один из аспектов решения данных проблем лежит в нанесении химической меди и подготовке стенок просверленных отверстий, на которые она наносится.

Причины плохого химического покрытия. Существует много причин, которые приводят к неосаждению химической меди на просверленной поверхности стеклоэпоксидного слоя.

На просверленной поверхности могут встречаться полости (углубления), возникающие либо вследствие плохой пропитки стекловолокна эпоксидной составляющей, либо из-за вырывания концов стекловолокна при сверлении.

В этих углублениях процесс осаждения химической меди затруднен. Эти полости также задерживают раствор из-за поверхностного натяжения, приводя к загрязнению и препятствуя последующим процессам.

Осколки, остающиеся на стенках отверстий в процессе сверления, могут оказаться вытесненными позднее при производстве. Если это произойдет при активировании, но до металлизации, то ясно, что некоторые участки поверхности окажутся обнаженными.

Методы очистки. После плазменной очистки стенки отверстия могут оказаться покрытыми тонким слоем пыли, что приводит к недостаточной адсорбции катализатора.

При хромовокислом травлении шестивалентный хром действует как яд на коллоидный палладиевый катализатор, что может привести к отсутствию активирования поверхности.

При сернокислом травлении диэлектрика обнажается стекловолокно, кроме того, эпоксидная смола загрязняется анионными сульфированными остатками, которые уменьшают каталитическую адсорбцию при использовании активатора, имеющего отрицательный электрокинетический потенциал. Эпоксидная смола в отверстии становится гладкой, что не способствует хорошей адгезии при химическом осаждении.

Лучше всего эти недостатки преодолеваются при использовании щелочного перманганатного раствора для травления диэлектрика.

Адсорбция катализатора. Коллоидный активатор, который имеет отрицательный электрокинетический потенциал, будет с трудом адсорбироваться на отрицательно заряженной поверхности стекловолокна.

Поэтому поверхность отверстия должна быть специально подготовлена путем обработки в растворе кондиционирования.

Таким образом, качество химической металлизации отверстия зависит в основном от способов подготовки поверхности диэлектрика.

Низкое качество предварительной подготовки может вызывать различные виды брака: разрывы металлизации, «утопление» торцов внутренних контактных площадок, частичное отсутствие металлизации в отверстии (рис. 6.5).

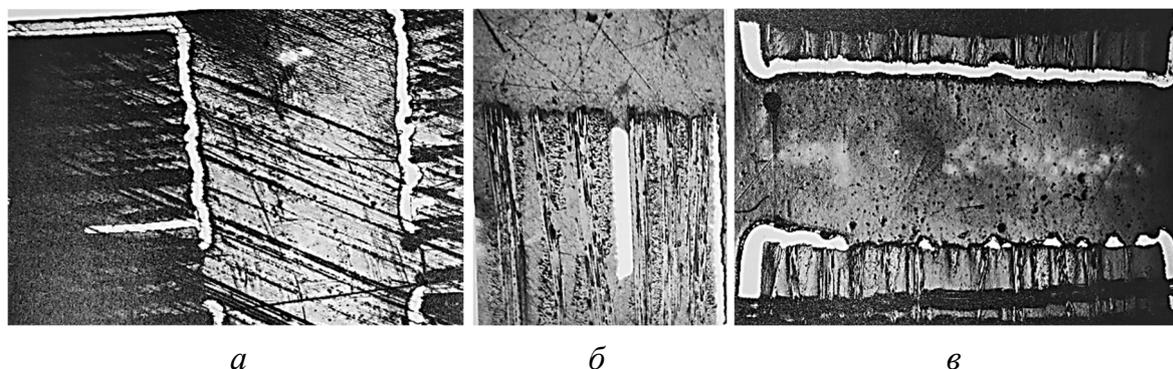


Рис. 6.5. Виды брака при химическом меднении:
а – разрывы металлизации в отверстии; *б* – «утопление» торцов внутренних контактных площадок; *в* – частичное отсутствие металлизации в отверстии

Еще одним видом брака является отслаивание. На готовых заготовках идет отслаивание химически осажденной меди от фольги диэлектрика или отслаиваются проводники. Причина отслаивания – плохая адгезия химически осажденной меди и фольги.

Это может быть связано со стадией сверления отверстий, подлежащих металлизации. При сверлении отверстий необходимо соблюдать многие параметры: учитывать диаметр отверстия, скорость вращения сверла, остроту сверла и т. д. При некачественном сверлении на стенках отверстия и местах будущей контактной площадки образуется «налет» из эпоксидной смолы. «Налет», появившийся при сверлении, удаляется при дальнейшей механической обработке поверхности. Однако удалить его можно не полностью. В итоге химическая медь осаждается не на фольгу, а на эпоксидную смолу, что приводит к дальнейшему отслаиванию контактных площадок. Таким образом, сверление становится первой возможной причиной отслаивания.

Ко второй и третьей возможным причинам можно отнести подготовку поверхности перед химическим меднением. Если со сверлением отверстий есть проблемы (в частности, остается много заусенцев или слишком неровные стенки отверстия из-за биения сверла), то перед зачисткой поверхности необходимо обрабатывать заготовки на гидроабразивной установке. При этом следует контролировать износ шлиф-порошка: от его качества напрямую зависит, будут ли удалены все заусенцы или нет. Неудаленные заусенцы при следующей операции (зачистка поверхности) будут как бы впрессовываться в поверхность фольги, что является недопустимым. Если же при сверлении отверстий не возникает никаких проблем, можно ограничиться одной зачисткой поверхности. Зачистка необходима для удаления значительных неровностей, царапин и заусенцев, остающихся после сверления.

Для зачистки поверхности рекомендуется использовать валы с нанесенным на них абразивным материалом либо щеточные круги. При пропускании заготовок через установку зачистки задействована не вся поверхность зачистного вала, а только некоторая его часть. Со временем вал изнашивается, причем износ неравномерный, вследствие этого происходит недостаточная зачистка некоторой части заготовки либо заполировка поверхности из-за отсутствия абразивного материала, нанесенного на ворсинки вала, что приводит к плохой адгезии фольги и химической меди.

Четвертой причиной может служить несвоевременный анализ и корректировка вспомогательных растворов. Необходимо следить за

качеством обезжиривания и ванной микроотравления. При накоплении меди в ванне микроотравления происходит постепенное ухудшение качества подтравливания, т. е. оксидные пленки удаляются не полностью, а это отрицательно сказывается на качестве раствора активатора.

Пятая причина – снижение каталитической активности раствора активатора, в котором при длительной эксплуатации накапливаются нежелательные примеси, и в первую очередь медь – за счет растворения оксидов с поверхности медной фольги соляной кислотой, содержащейся в растворе. Раствор меняет цвет и практически теряет активирующее действие при концентрации меди 1,3–1,4 г/л, адсорбционная активность активатора уменьшается. К тому же необходимо вести постоянный и строгий контроль за содержанием палладия в ванне активирования.

Промывочные операции после обработки заготовок в растворе ускорителя тоже имеют немаловажное значение. При недостаточной промывке не происходит гидролиза каталитического комплекса, при чрезмерной промывке осуществляется смыв реагирующих компонентов, и эффект активирования не будет достигнут. Другими словами, необходимо подобрать «золотую середину» в кратности обмена воды.

Шестая причина – ванна химического меднения. Процесс химического меднения является довольно сложным и капризным. Во время работы необходимо постоянно контролировать содержание формалина, гидроксида натрия, сульфата меди, комплексообразователя, а также следить за уровнем pH. В химическом меднении адгезия слоя осажденной меди и фольги менее прочная, чем между гальванической медью и химически осажденной. Это объясняется следующим: ионы меди, получая электрон от формалина, находящегося в растворе, восстанавливаются на поверхности катализатора (палладий или медь), но прочного соединения с этой поверхностью не образуется, так как нет плотной кристаллической решетки.

Седьмая причина отслаивания – использование для воздушного перемешивания ванн химического меднения воздуха окружающей среды. Если на системе воздуховода не установлены фильтры, то в раствор могут попадать посторонние частицы химического и механического происхождения, которые, оседая на поверхность фольги или катализатора, ухудшают будущее соединение слоя химической меди и фольги.

Многие вспомогательные растворы готовятся на основе водопроводной воды. Необходимо контролировать качество данной воды.

Лучшим решением этой проблемы будет опять же установка фильтров в систему водоподачи и периодическая проверка состояния данных фильтров – восьмая причина.

Таким образом, определяющими операциями при химическом меднении печатных плат являются стадии предварительной подготовки поверхности фольги и диэлектрика.

Виды брака при получении защитного рисунка с помощью пленочного фоторезиста. Основные виды брака и их причины изложены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Основные неполадки, встречающиеся при получении защитного рисунка с помощью пленочного фоторезиста

Вид дефекта	Причина
Складки и вздутия в пленке	Плохая намотка рулона, не отрегулировано натяжение в пленке
Отслаивание пленки от заготовки	Плохая подготовка поверхности заготовок, нарушение режимов нанесения
Механические включения	Загрязненность фоторезиста или воздушной среды помещения
Плохое отделение лавсановой пленки при проявлении	Повышенная температура или увеличенная продолжительность экспонирования
Набухание, приподнятие края, разрушение защитного рисунка	Недостаточное экспонирование, передержка при проявлении, нарушение режимов нанесения
Смещение рисунка схемы относительно отверстий	Усадка фотошаблона, неисправность оснастки для экспонирования, ошибки при сверлении
Прилипание фотошаблона к пленке при экспонировании	Завышена температура в зоне экспонирования, несоответствие времени выдержки характеристикам ламп
Вуаль, уменьшение ширины линий или зазоров	Передержка при экспонировании, недостаточная оптическая плотность фотошаблона, перегрев при нанесении или экспонировании; плохой контакт фотошаблона с платой при экспонировании из-за наличия забоин, заусенцев; слабый вакуум; штифты в фиксирующих отверстиях коробят фотошаблон; недостаточное время проявления и недостаточное давление проявителя
Невозможность проявить экспонированные участки	Термическая полимеризация фоторезиста вследствие повышенной температуры в раме или при ламинировании, случайное освещение, слишком низкая температура проявителя

Виды брака при получении защитного рисунка сеткографией. В табл. 6.3 изложены основные дефекты, встречающиеся при получении защитного рисунка сеткографией.

Таблица 6.3

Основные дефекты, встречающиеся при получении защитного рисунка сеткографией

Вид дефекта	Причина
Непропечатка элементов изображения рисунка на оттиске	Недостаточное количество краски на сетке, недостаточное или излишнее давление на сетку при печати, недостаточная жесткость ракеля, трафарет плохо проявлен, низкая текучесть краски
Неровность краев, пористость («проколы») в краске	Слишком жидкая краска, пыль и другие частицы забивают поры трафарета
Растекание краски	Низкая вязкость краски, большое давление ракеля
Оттиск липнет к сетке	Повышенная липкость краски, недостаточный зазор между сеткой и заготовкой
Уменьшение элементов рисунка схемы на оттиске	Рисунок схемы на трафарете не допроявлен, повышенная вязкость краски, большой угол наклона ракеля к трафарету
Неровность распределения краски	Завышенное расстояние между сеткой и платой, слабое давление ракеля
Несовмещение элементов рисунка	Потеря упругих свойств сетки, чрезмерное давление ракеля на сетку, коробление заготовки, большая величина зазора между трафаретом и заготовкой

Виды брака при травлении меди. Наиболее типичными видами брака являются: *значительное подтравливание* (больше, чем на $\frac{1}{3}$ ширины проводника) и нарушение целостности проводников в результате *перетравливания*. При истощении работоспособности травильного раствора на поверхности печатной платы остается недотравленная медь. Такой вид брака называется *недотрав* (рис. 6.6).

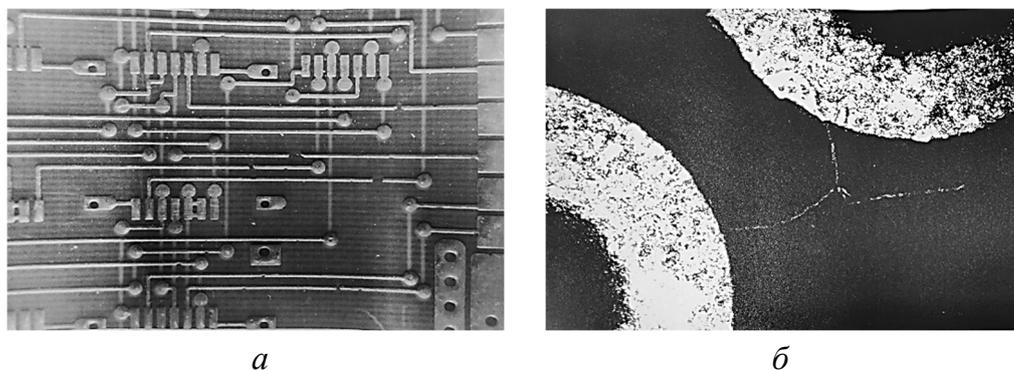


Рис. 6.6. Виды брака при травлении:
а – протравы проводящего рисунка печатной платы; *б* – недотравы меди на наружном слое ПП, замыкающие элементы печатного рисунка

Лабораторная работа № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА БРАКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Цель работы – ознакомление с видами брака при производстве печатных плат и способами их устранения.

Экспериментальная часть

В данной лабораторной работе индивидуально студенту или звену выдается несколько шлифов и (или) печатных плат, на которых виден брак. Полученные результаты сводят в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Результаты анализа

Вид брака, причина	Способ устранения

В результате делается вывод о причинах брака и способах его устранения.

Контрольные вопросы

1. Возможные виды брака на линии химического меднения.
2. Основные виды брака при гальваническом меднении.
3. Характерные дефекты при сверлении.
4. Основные виды брака, встречающиеся при получении защитного рисунка с помощью пленочных фоторезистов.
5. Основные дефекты при получении защитного рисунка сеткографией.
6. Методы контроля качества печатных плат.

7. ТРЕБОВАНИЯ К РЕФЕРАТУ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Тема реферата по печатным платам выдается преподавателем в начале учебного семестра индивидуально каждому студенту и служит для более детального ознакомления с предметом. Студент может предложить тему реферата самостоятельно или выбрать из представленных в приложении 7. Реферат выполняется в виде пояснительной записки и презентации, которая докладывается в назначенный срок. Презентацию можно делать в Power Point или других доступных видеоредакторах. Общий объем текстового материала должен быть в пределах 20–30 страниц, минимальный 10–15 страниц.

Текст пояснительной записки излагается логично и последовательно. Состоит из 5 основных частей: введения, обзора по производству конкретного вида продукции, описания метода производства и инженерных решений, заключения.

Во введении дается цель реферата и излагается содержание выполняемой работы, показываются ее актуальность и значимость, описываются задачи, которые нужно решить в ходе выполнения реферата.

В обзоре продукции приводится история создания и условия эксплуатации прибора, серийность, требования по качеству и надежности, описывается, где в устройстве располагается ПП и какую роль она выполняет, указываются себестоимость продукции и отдельно стоимость ПП, которую в зависимости от ее сложности можно принять равной от 20–30 до 50–80% стоимости прибора. В конце делается обоснованный вывод о том, к какому классу точности относится ПП. Наиболее удобный вариант обоснования – замер минимальной ширины проводника и минимального зазора между элементами проводящего рисунка.

В методе производства описывается последовательность операций, которые дополняются инженерными решениями. Последние могут быть представлены отдельным разделом.

В заключении делается вывод, оценка решения поставленной задачи и эффективности предлагаемых инженерных решений, подтверждающая целесообразность их использования.

Оформляется реферат согласно ГОСТ СТП БГТУ 001–2019. Шрифт текста Times New Roman, размер 12 или 14 пт, одинарный интервал, абзацный отступ 1,25 пт, выравнивание по ширине.

В приложении 8 представлен пример оформления титульного листа реферата.

8. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТОВ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Выполнение каждой лабораторной работы заканчивается составлением отчета. В начале отчета дается название лабораторной работы, соответствующее приведенному в практикуме. Вариант выполнения работы определяет преподаватель. Изложение должно быть грамотным как с научно-технической, так и со стилистической стороны. Теоретический и экспериментальный материал следует излагать в доступной форме без сокращения слов, кроме общепринятых. Используемые в формулах или иных соотношениях буквенные и цифровые обозначения должны быть расшифрованы и объяснены. При упоминании известных справочных данных в тексте отчета должна находиться ссылка на литературный источник, а сам источник приводиться в конце отчета в списке использованной литературы.

Каждый отчет должен состоять из следующих частей: цель работы, оборудование, теоретические исследования, методика эксперимента, экспериментальные результаты, обсуждение результатов, выводы, список использованной литературы.

В разделе «Теоретические исследования» должны быть изложены основные теоретические положения, относящиеся к теме выполняемой работы. Раздел должен содержать соответствующие математические соотношения, с помощью которых будут обработаны получаемые при выполнении работы данные, необходимые для объяснения или сопоставления полученных результатов. Целесообразно использовать материалы оригинальной научно-технической информации (монографии, статьи, материалы конференций), которую может указать перед подготовкой к выполнению работы преподаватель или находят самостоятельно студенты. Объем раздела не должен превышать 1–2 страницы.

В разделе «Методика эксперимента» приводятся схемы экспериментальных ячеек и электрические схемы, применяемые при выполнении работы (в некоторых случаях схемы могут не полностью совпадать с приведенными в практикуме: используется иное оборудование, изменен способ измерения результатов и т. д.). При описании экспериментальной установки необходимо особо обратить внимание на

устройство и работу тех частей, которые могут оказать влияние на точность и воспроизводимость получаемых результатов. При описании используемых приборов указывается их тип, класс точности, способ подключения в электрическую цепь, возможные ограничения в их использовании. В этом же разделе приводятся методики анализа растворов и веществ, указывается степень чистоты применяемых реактивов, допустимая точность анализа и задаваемые параметры. Далее описывается последовательность проведения эксперимента и возможные особенности: способы измерения величин, поддержания отдельных параметров процесса, периодичность снятия показаний, методы регистрации получаемых результатов.

В разделе «Экспериментальные результаты» приводятся данные, непосредственно определяемые в ходе эксперимента, а также рассчитываемые на основании полученных результатов. При этом должны быть приведены все формы расчета с указанием начальных и конечных значений и размерностей используемых величин.

Результаты измерений должны предоставляться в виде таблиц, не требующих дополнительных пояснений. Таблицы должны иметь заголовки, отражающий сущность приводимого в них цифрового материала, и нумероваться в пределах отчета арабскими цифрами. При выполнении серии параллельных опытов все данные должны быть приведены в таблице. Из них путем статистической обработки получают усредненную величину, используемую в расчетных формулах. При ссылке на таблицу в тексте указывают ее номер, например (табл. 2). Размерности числовых величин в головке таблицы приводят в сокращенном виде. Таблицу помещают после первого упоминания о ней в тексте. Если отчет содержит мало текста и много таблиц, можно помещать таблицы по порядку номеров в конце текста.

Рисунки в отчете нумеруют последовательно арабскими цифрами, так же как и таблицы. Каждый рисунок сопровождают надписью с указанием вида графического изображения. Например: «Схема экспериментальной установки ..., микрофотография кристаллов ..., изменение выхода по току от ...» и т. п. Основным элементом надписи является краткое изложение содержания рисунка. Под рисунком приводятся поясняющие подписи, а затем указывается номер.

Все рисунки должны располагаться в отчете по тексту сразу после ссылки на них.

При обсуждении результатов необходимо провести анализ полученных зависимостей, расчетных величин, обсудить механизм и характер влияния тех или иных параметров, изученных при выполнении

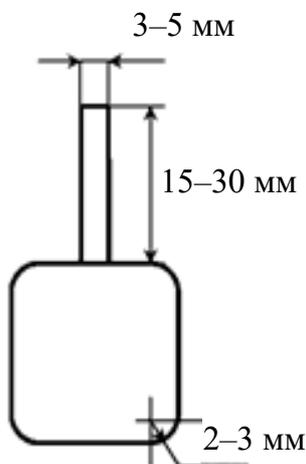
работы, указать возможные причины ошибок и соответственно точность полученных результатов, сравнить полученные данные со справочными величинами.

В выводах дается краткое изложение результатов: какая работа проведена, какие данные получены и как они объяснены с учетом известных закономерностей или насколько отличаются от известных величин.

Список использованной литературы должен содержать информацию о литературных источниках, использованных при составлении отчета по данной лабораторной работе. При составлении списка использованной литературы необходимо руководствоваться соответствующими нормативными документами, например Положением о дипломном проекте (дипломной работе) учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» (2025 г.).

ФОРМА И ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ

Форма образца. Для всего лабораторного практикума базовыми материалами образцов под нанесение гальванопокрытий является медь (полированные образцы фольгированного медью стеклотекстолита СТФ-2, СТФ-1 с толщиной медной фольги 18–35 мкм размером 20×30×1 мм) или в виде листов или ленты, пригодных к разметке и резке ножницами.



Примерная форма
образца

Образцы имеют форму прямоугольника (рисунок) со скругленными углами, что позволяет уменьшить на них концентрацию линий тока и повысить равномерность распределения плотности тока по поверхности образца. Более равномерное распределение наблюдается на образцах в форме диска или сферы.

Форма образца предусматривает наличие тонкого (0,3–0,5 см) отвода, предназначенного для закрепления образца в клемме катодного токоподвода или его захвата пинцетом в ходе операций химической обработки или промывки. Рабочая поверхность электрода должна быть полностью погружена в электролит. Граница «электролит – воздух» должна проходить по отводу.

Рабочая площадь поверхности образцов. Данный параметр определяет токовую нагрузку на электролизер в процессе электролиза и возможность анализа свойств полученного покрытия.

Рекомендуемый диапазон токовых нагрузок 0,05–2,00 А. Это связано с тем, что в лабораторных условиях объемы электролитов невелики (до 300 см) и при больших токовых нагрузках происходит их разогрев, что меняет условия опыта и может привести к разложению электролита. В то же время использование маленьких образцов и соответствующих токовых нагрузок не позволяет осуществить

необходимые исследования свойств поверхности и определить выход по току процесса с достаточной точностью. Поэтому рекомендуемые средние размеры рабочей поверхности образца 3×3 см при двустороннем осаждении покрытия.

При определении выхода по току эту величину следует уточнить исходя из необходимости привеса массы образца не менее 0,03 г.

Если вариант лабораторной работы включает в себя изучение взаимосвязи показателей электролиза и материала основы, снятие поляризационных кривых, исследование распределения металла, то размеры и форму образцов следует оговорить с преподавателем дополнительно.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ

Поверхность образцов для нанесения покрытий должна быть однородной, без пятен, деформаций и других дефектов. Любое задание лабораторной работы предусматривает тщательную предварительную очистку поверхности образцов от механических загрязнений, жировых и оксидных пленок. Образцы, изготовленные из фольгированного медью стеклотекстолита, необходимо вначале тщательно протереть венской известью или содовой пастой для удаления консервационного слоя, предохраняющего медную фольгу от окисления при хранении.

Подготовку поверхности образцов производят по одной из схем, приведенных в таблице.

Последовательность операций при подготовке поверхности медных образцов перед нанесением покрытий

Операция	Состав раствора		Режим работы	
	Компонент	C, г/дм ³	t, °C	τ, мин
1. Обезжиривание: химическое	Na ₂ CO ₃	20–30	60–80	5–10
	Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O	25–30		
	Синтанол ДС-10	3–5		
протирка венской известью	–	–	–	–
2. Промывка водой после операций: химического обезжиривания	–	–	60	1–2
электрохимического обезжиривания	–	–	18–25	1–2
3. Активирование	H ₂ SO ₄	30	18–25	1
4. Промывка водой	–	–	18–25	1–2

Для выполнения операций предварительной подготовки поверхности необходимо выставить ряд стаканов, в каждый из которых в нужной последовательности залить раствор обработки или воду. Объем растворов подбирают так, чтобы образцы были полностью погружены в него, промывная вода берется в избытке. При необходимости растворы и воду подогревают до нужной температуры на электроплитке. Образцы при помощи пинцета переносят из одного раствора в другой. Во время обработки их следует покачивать в растворе, нельзя допускать склеивания поверхности плоских образцов между собой.

Качество обезжиривания считается удовлетворительным, если вода холодной промывки образует на поверхности образца ровную (без разрывов) пленку. В противном случае эту операцию следует повторить, выяснив предварительно причину плохого качества обработки (низкая температура, недостаточная длительность и др.). После травления и активации поверхность образца должна быть светлой, без налета и пятен.

Финишная промывка может быть проточной, с последующим ополаскиванием горячей дистиллированной водой перед сушкой и взвешиванием.

После нанесения покрытия образец немедленно переносят в стакан с промывной водой, который необходимо иметь на рабочем месте рядом с электролизером, затем промывают проточной водой и ополаскивают дистиллированной, высушивают в сушильном шкафу или горячим воздухом при температуре 70–80°C.

В любом случае перед сушкой образца с его поверхности нужно тщательно удалить влагу при помощи фильтровальной бумаги. После сушки наличие солевых разводов, пятен, следов коррозии на поверхности недопустимо.

РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИЗА, ВЫХОДА ПО ТОКУ МЕТАЛЛА И СРЕДНЕЙ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ

Расчеты продолжительности электролиза, выхода по току металла и средней толщины покрытия основаны на законах Фарадея.

Обозначим: m_0 – масса катода до электролиза, г; m_τ – масса катода после электролиза; $\Delta m = (m_\tau - m_0)$ – масса металла, выделившегося на катоде, г; $q(\text{Me})$ – электрохимический эквивалент осаждаемого металла, г/(А·ч); $M(1/z\text{Me})$ – молярная масса эквивалента металла, г/моль; F – число Фарадея ($F = 26,8 \text{ А·ч/моль}$); I – ток, А; τ – продолжительность электролиза, ч; $Q = I \cdot \tau$ – количество прошедшего через ячейку электричества, А·ч; δ – толщина покрытия, м; ρ – плотность металла, г/м³; S – рабочая площадь поверхности образца, м; i_k – катодная плотность тока при электроосаждении металла, А/м²; $\text{ВТ}(\text{Me})$ – выход по току металла, доли.

Электрохимический эквивалент металла:

$$q(\text{Me}) = \frac{M\left(\frac{1}{z}\text{Me}\right)}{F}.$$

Электрохимический эквивалент сплава:

$$q_{\text{спл}} = \frac{q_1 \cdot q_2}{q_1 \cdot \omega_2 + q_2 \cdot \omega_1},$$

где q_1, q_2 – электрохимические эквиваленты компонентов сплава, г/(А·ч); ω_1, ω_2 – массовые доли металлов в сплаве.

Продолжительность электролиза для получения покрытия заданной толщины:

$$\tau = \frac{\delta \cdot \rho}{q(\text{Me}) \cdot i_k \cdot \text{ВТ}(\text{Me})}.$$

Выход по току металла оценивают по литературным сведениям для электролитов данного типа. При определении продолжительности

электролиза в лабораторных электролизерах колокольного или барабанного типа рассчитанное по вышеприведенной формуле значение увеличивают на 15–25% из-за возможного уменьшения толщины покрытия вследствие взаимного трения деталей и временных перерывов в процессе электролиза при пересыпании.

Экспериментальный **выход по току металла**:

$$\text{ВТ(Мe)} = \frac{\Delta m}{q(\text{Мe}) \cdot Q} \cdot 100\% = \frac{\Delta m}{q(\text{Мe}) \cdot I \cdot \tau} \cdot 100\%.$$

Количество прошедшего электричества Q рассчитывают как произведение тока I на продолжительность электролиза τ . Достаточная точность результатов определения обеспечивается при этом применением проверенного амперметра высокого класса с минимально возможной для данного значения тока точностью индикации значений. Необходимо соблюдать рассчитанную продолжительность электролиза τ с точностью ± 5 с.

Выход по току металла можно также определить по соотношению плотностей тока парциальной поляризационной кривой процесса выделения металла $i(\text{Мe})$ и суммарной катодной поляризационной кривой i_k при любом значении потенциала электрода:

$$\text{ВТ(Мe)} = \frac{i(\text{Мe})}{i_k} \cdot 100\% = \frac{i(\text{Мe})}{i_{\text{Мe}} + i_{\text{H}_2}} \cdot 100\%.$$

С другой стороны, знание выходов по току металла при нескольких катодных плотностях тока позволяет построить парциальные поляризационные кривые целевого процесса.

Средняя толщина покрытия:

$$\delta = \frac{\Delta m}{\rho \cdot S} = \frac{q(\text{Мe}) \cdot i_k \cdot \tau \cdot \text{ВТ(Мe)}}{\rho}.$$

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ УСТАНОВОК

Электролиз. Для осаждения покрытий предназначена схема, приведенная на рис. П4.1, *а*, которая включает в себя источник питания стабилизированного тока с его регулированием *1* (Б5-47, Б5-48 и др.), амперметр *2*, электролизер *3*. В центре электролизера закрепляют электрод *б*, реакция на котором является целевой, по обе стороны от него находятся вспомогательные электроды *7*, обеспечивающие равномерное распределение токовой нагрузки по поверхности образца. Полярность подключения приборов на схеме соответствует целевому катодному процессу.

Для сокращения времени выполнения работы часть опытов можно выполнять одновременно, соединяя несколько электролизеров последовательно. Пример такой схемы с тремя электролизерами приведен на рис. П4.1, *б*.

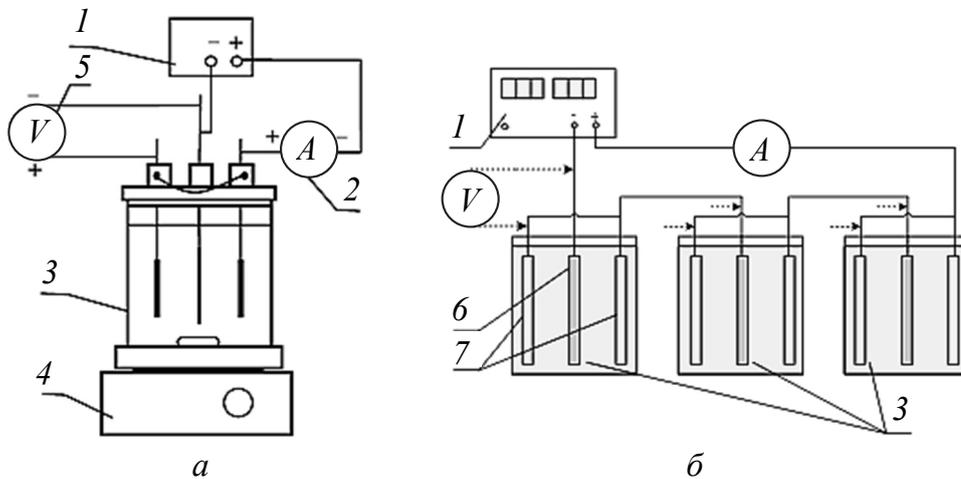


Рис. П4.1. Принципиальная схема установки для электролиза с одним электролизером (*а*) и с последовательным подключением нескольких электролизеров (*б*):

1 – источник питания; *2* – амперметр; *3* – электролизер; *4* – магнитная мешалка; *5* – вольтметр; *6* – рабочий электрод; *7* – вспомогательные электроды

При необходимости замера падения напряжения на электролизере в процессе электролиза между выводами катода и анода подключают вольтметр *5*. Электролизер может быть установлен на магнитную мешалку *4* (типа ММ-5) с возможностью подогрева электролита.

Измерение потенциала электрода и получение гальваностатических поляризационных кривых. Для измерения потенциала электрода и получения гальваностатических поляризационных кривых необходимо собрать схему, приведенную на рис. П4.2.

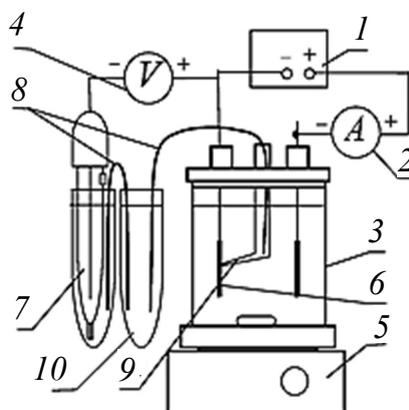


Рис. П4.2. Принципиальная схема установки для снятия гальваностатических поляризационных кривых:
 1 – источник питания; 2 – амперметр; 3 – электролизер;
 4 – вольтметр; 5 – магнитная мешалка; 6 – исследуемый электрод;
 7 – электрод сравнения; 8 – солевые мостики;
 9 – капилляр Луггина – Габера; 10 – промежуточный сосуд

Измерение потенциала электрода заключается в измерении электродвижущей силы гальванического элемента, составленного из исследуемого электрода *б* и электрода сравнения *7*. Внутренняя цепь гальванического элемента замыкается при помощи системы солевых мостиков *8* и капилляра Луггина – Габера *9*, соединяющих электролиты электрода сравнения и рабочего электрода. При необходимости взаимной изоляции электролитов применяют промежуточный сосуд *10*, заполненный рабочим электролитом.

Для измерения ЭДС (потенциала исследуемого электрода в шкале выбранного электрода сравнения $E_{x(\text{э.с})}$) необходимо использовать высокоомные вольтметры (милливольтметры с входным сопротивлением не ниже 10^9 Ом), причем вывод электрода сравнения подключается к «–» вольтметра, а исследуемый электрод – к «+».

Чаще всего в лабораторных условиях используют насыщенный хлорсеребряный электрод сравнения типа ЭВЛ-1М1. Потенциал этого электрода относительно стандартного водородного электрода $E_{\text{э.с.}(с.в.э)}$ составляет +0,222 В, что дает возможность расчета потенциала исследуемого электрода в шкале стандартного водородного электрода $E_{x(с.в.э)}$, В:

$$E_{x(с.в.э)} = E_{x(\text{э.с})} + E_{\text{э.с.}(с.в.э)} = E_{x(\text{э.с})} + 0,222.$$

Для получения гальваностатических поляризационных кривых вначале следует рассчитать ряд токовых нагрузок на электрод, соответствующий исследуемому интервалу плотностей тока и площади рабочего электрода. Расчетные значения последовательно устанавливаются на панели источника питания, и производится измерение соответствующего значения электродного потенциала.

Потенциостатические (потенциодинамические) поляризационные кривые. Потенциостатический и потенциодинамический режимы получения поляризационных зависимостей рекомендуется использовать в случае сложной зависимости плотности тока от потенциала, например при наличии пассивационных явлений на электроде, участков предельных токов и др. Именно в таком режиме следует получать поляризационные кривые, характеризующие процессы хромирования, электрохимического полирования, процессы осаждения металлов при высоких плотностях тока.

Для получения потенциостатических поляризационных кривых используется схема, приведенная на рис. П4.3. Электролизер с исследуемым электродом и электрод сравнения подключаются к комплексу оборудования, включающему потенциостат 8, программатор 9, при необходимости двухкоординатный регистрирующий прибор 10.

Измерения производят в соответствии с инструкцией по эксплуатации потенциостата и регистрирующего прибора.

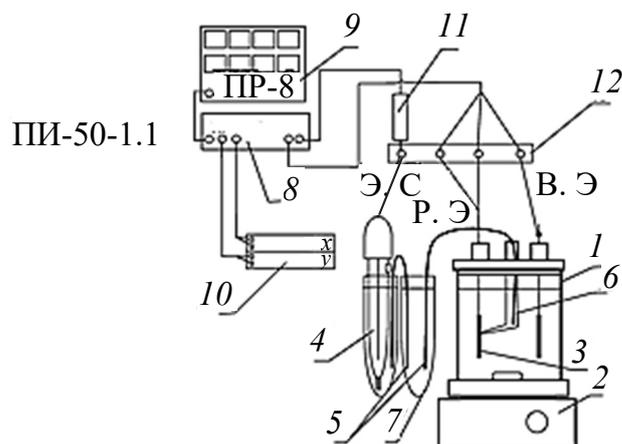
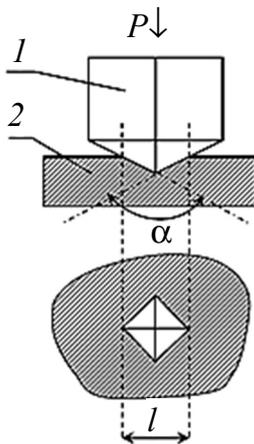


Рис. П4.3. Принципиальная схема снятия потенциостатических (потенциодинамических) поляризационных кривых:
 1 – электролизер; 2 – магнитная мешалка; 3 – исследуемый электрод;
 4 – электрод сравнения; 5 – солевые мостики;
 6 – капилляр Лuggина – Габера; 7 – промежуточный сосуд;
 8 – потенциостат; 9 – программатор; 10 – регистрирующий прибор
 (вместо позиций 8–10 может применяться потенциостат РС-Pro);
 11 – электрометрический усилитель; 12 – клеммная колодка

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ

Измерение *микротвердости* металлов и их сплавов проводят путем вдавливания алмазной квадратной пирамиды под нагрузкой P , равной 0,490–4,900 Н, что соответствует массе нагрузки от 0,005 до 0,500 кг.



Принципиальная схема измерения микротвердости:
 1 – алмазный наконечник;
 2 – испытуемый образец

Принцип метода определения микротвердости заключается в том, что алмазный наконечник 1 в форме правильной четырехугольной пирамиды (рисунок) вдавливают в испытуемый участок образца 2 под действием нагрузки P , приложенной в течение определенного времени. После удаления нагрузки измеряют диагонали квадратного отпечатка l , оставшегося на поверхности образца. Микротвердость H , Па, равна:

$$H = \frac{2 \cdot P \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{l^2} = 1,8544 \cdot \frac{P}{l^2},$$

где α – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136° ;

l – среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка, м. В случае *однородного испытуемого материала* нагрузку выбирают в соответствии с его толщиной d ; минимальная толщина образца или слоя должна быть больше диагонали отпечатка в 1,5 раза, т. е. $d = 1,5l$.

Минимальная толщина металлического покрытия, при которой металл основы не оказывает искажающего влияния на результаты измерений, зависит от соотношения твердости основы и покрытия.

Если твердость основы равна твердости покрытия или больше ее, то достаточно соотношения $d > 0,21l$. В противном случае $d > 2,9l$. При несоблюдении этого правила получают либо завышенные, либо заниженные в сравнении с действительными значениями твердости.

Для сопоставления получаемых результатов измерения проводят при постоянной нагрузке.

Чтобы определить микротвердость применяют прибор ПМТ-3. При этом используют образцы небольшого размера, например 2×2 или $1,5 \times 1,5$ см. Микротвердость определяют в следующем порядке.

После ознакомления с инструкцией по эксплуатации прибора и основными элементами конструкции образец при помощи пластилина, ручного прессы и съемной подставки прикрепляют строго параллельно к рабочей плоскости предметного столика. Затем на верхнюю площадку штока нагружающего механизма устанавливают необходимый груз. Далее при помощи микроскопа и микрометрических винтов столика выбирают место укола на образце и, плавно повернув столик, подводят образец под алмазный наконечник. **Медленно поворачивая ручку арретира**, опускают шток и делают укол алмазной пирамидой с выдержкой в течение 5 с. Продолжительность поворота ручки должна составлять 10–15 с.

Подняв алмазную пирамиду в исходное положение, поворачивают столик, подводят место укола на образце под объектив микроскопа и измеряют диагональ отпечатка. Для этого устанавливают барабан окуляр-микрометра на нулевое значение. Отпечаток на образце с помощью винтов столика подводят к перекрестию так, чтобы две стороны перекрестия прилегали к двум сторонам отпечатка. Затем перемещают перекрестие до совпадения с двумя другими сторонами отпечатка и фиксируют число делений барабана. Эта величина, умноженная на цену деления барабана окуляр-микрометра (1 дел. = 0,308 мкм), дает истинную длину диагонали отпечатка.

Для получения более точных результатов за показатель микротвердости покрытия принимают среднее из 10 определений. Результаты определений записывают в таблицу.

Условия и результаты измерения микротвердости покрытий

Номер образца	Нагрузка на образец P , Па	Цена деления измерительного барабана x , мкм	Длина диагонали отпечатка l , мкм	Микротвердость H , Па

КОНТРОЛЬ ВНЕШНЕГО ВИДА ПОКРЫТИЙ

Метод основан на выявлении дефектов поверхности покрытия внешним осмотром и применим для образцов любой формы и габаритных размеров.

Контроль проводят осмотром образцов невооруженным глазом на расстоянии 25 см от контролируемой поверхности при естественном или искусственном освещении. Освещенность должна быть не менее 300 лк при применении ламп накаливания и не менее 500 лк при использовании люминесцентных ламп, что в пределах нормы освещенности химической лаборатории.

При необходимости изучают морфологию поверхности и измеряют размеры и поверхностную плотность микродефектов при помощи окуляр-микрометра твердомера ПМТ-3. Цена деления окуляр-микрометра при объективе с 16-кратным увеличением – 0,308 мкм. Основные элементы конструкции и порядок работы на твердомере приведены в соответствующей инструкции по эксплуатации.

При оценке внешнего вида покрытий необходимо учитывать состояние поверхности детали перед их нанесением. Справочная плотность металлов представлена в табл. П6.1.

Таблица П6.1

Справочная плотность для металлов

Металл	Плотность ρ , г/см ³	Металл	Плотность ρ , г/см ³	Металл	Плотность ρ , г/см ³
Алюминий	2,70	Марганец	7,44	Серебро	10,50
Железо	7,87	Медь	8,96	Сурьма	6,69
Кадмий	8,65	Никель	8,90	Хром	7,19
Кобальт	8,84	Олово	7,30	Цинк	7,13
Магний	1,74	Платина	21,45	CuO	6,40

Справочная плотность для сплавов представлена в табл. П6.2.

Таблица П6.2

Справочная плотность для сплавов

Сплавы	Плотность ρ , г/см ³
Бронза алюминиевая БрА7	7,80
Бронза оловянистая БрО10	8,70
Латунь Л68	8,60
Латунь (томпак) Л90	8,78
Свинцово-сурьмяный сплав (6% сурьмы)	10,89
Сталь конструкционная 1Х18Н9Т	7,80
Сталь углеродистая Ст3	7,84
Сталь нержавеющая Х13	7,75

ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА РЕФЕРАТОВ

Производство печатных плат:

- 1) для мобильного телефона;
- 2) для кардиостимулятора;
- 3) для кофемашины;
- 4) для сканера;
- 5) для радиоуправляемой игрушки;
- 6) для жидкокристаллического монитора;
- 7) для потенциостата;
- 8) для автомобиля;
- 9) для видеокамеры;
- 10) для флеш-карты;
- 11) для эхолота;
- 12) для сканера штрих-кода;
- 13) для банкомата;
- 14) для профессионального фотоаппарата;
- 15) для энергосберегающей лампочки;
- 16) для паркомата;
- 17) для планшета;
- 18) для валидатора;
- 19) для робототехники;
- 20) для ноутбука;
- 21) для автономного пожарного извещателя;
- 22) для модема;
- 23) для елочной гирлянды;
- 24) для слухового аппарата;
- 25) для тонометра;
- 26) для GPS-трекера;
- 27) для электронного табло;
- 28) для кассового аппарата;
- 29) для магнитофона;
- 30) для светофора;
- 31) для электронных часов;
- 32) для панели управления электрической машины.

**ПРИМЕР ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА
ДЛЯ РЕФЕРАТА**

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет химической технологии и техники
Кафедра химии, технологии электрохимических производств и ма-
териалов электронной техники
Специальность 1-48 01 04 – технология электрохимических произ-
водств

Реферат

по дисциплине Технология производства печатных плат

Тема: _____

Исполнитель:
студентка 4-го курса
группы 11
Иванова А. А.
Руководитель:
доцент Иванова А. А.

Минск 2025

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Капица, М. С. Технология производства печатных плат: учеб. пособие / М. С. Капица, Н. П. Иванова, И. М. Жарский. – Минск: БГТУ, 2005. – 396 с.
2. Медведев, А. М. Технология производства печатных плат / А. М. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. – 360 с.
3. Медведев, А. М. Печатные платы. Конструкции и материалы / А. М. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.
4. Пирогова, Е. В. Проектирование и технология печатных плат: учебник / Е. В. Пирогова. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2005. – 560 с.

Дополнительная

5. Технологии в производстве электроники. Справочник. Часть II. Производство печатных плат / под ред. П. В. Семенова. – М.: Группа ИДТ, 2007. – 568 с.
6. Уразаев, В. Г. Влагозащита печатных узлов / В. Г. Уразаев. – М.: Техносфера, 2006. – 344 с.
7. Федулова, А. А. Технология многослойных печатных плат / А. А. Федулова, Ю. А. Устинов. – М.: Радио и связь, 1990. – 208 с.
8. Федулова, А. А. Печатные платы / А. А. Федулова, Е. П. Котов, Э. Р. Явич. – М.: Радио и связь, 1977. – 280 с.
9. Ильин, В. А. Химические и электрохимические процессы в производстве печатных плат / В. А. Ильин. – М.: Б. и., 1994. – 142 с.
10. Лунд, П. Прецизионные печатные платы. Конструирование и производство / П. Лунд. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 359 с.
11. Медведев, А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа / А. М. Медведев. – М.: Радио и связь, 1986. – 215 с.
12. Федулова, А. А. Химические процессы в технологии изготовления печатных плат / А. А. Федулова, Е. П. Котов, Э. Р. Явич. – М.: Радио и связь, 1981. – 136 с.
13. Мелашенко, Н. Ф. Гальванические покрытия диэлектриков / Н. Ф. Мелашенко. – Минск: Беларусь, 1987. – 179 с.
14. Шалкаускас, Н. Химическая металлизация пластмасс / Н. Шалкаускас, А. Вашкялис. – Л.: Химия, 1985. – 180 с.

15. Свиридов, В. В. Химическое осаждение металлов из водных растворов / В. В. Свиридов. – Минск: Беларусь, 1987. – 287 с.

16. Вансовская, К. М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом / К. М. Вансовская; под ред. П. М. Вячеславова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 103 с.

17. Композиционное покрытие олово – никель – диоксид титана / А. В. Пянко, И. В. Макурова, Д. С. Харитонов [и др.] // Неорганические материалы. – 2019. – Т. 55, № 6. – С. 609–616.

18. Effects of incorporating TiO₂ aggregates on the growth, anticorrosion, and antibacterial properties of electrodeposited multifunctional coatings based on Sn-Ni materials / H. Pianka, V. P. Boufal, O. Alisiyounok [etc.] // Coatings. – 2024. – No. 14. – P. 1344–1373. – DOI: 10.3390/coatings14111344.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. СОЗДАНИЕ ЗАЩИТНОГО РЕЛЬЕФА И ТРАВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....	4
Лабораторная работа № 1. СОЗДАНИЕ ЗАЩИТНОГО РЕЛЬЕФА И ТРАВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....	10
2. ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ.....	15
Лабораторная работа № 2. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОГО МЕДНЕНИЯ.....	20
Лабораторная работа № 3. МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ОТВЕРСТИЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....	23
3. ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ МЕДНЕНИЕ	25
Лабораторная работа № 4. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ГАЛЬВАНМЕДНЕНИЯ.....	29
4. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ СПЛАВОВ ОЛОВА	33
Лабораторная работа № 5. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ СПЛАВА ОЛОВО – СВИНЕЦ	38
Лабораторная работа № 6. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ СПЛАВА ОЛОВО – НИКЕЛЬ.....	40
Лабораторная работа № 7. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ СПЛАВА ОЛОВО – ВИСМУТ.....	42
5. КЛАСС ТОЧНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....	44
Лабораторная работа № 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ТОЧНОСТИ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ	46
6. ВИДЫ БРАКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	47
Лабораторная работа № 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА БРАКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ	56
7. ТРЕБОВАНИЯ К РЕФЕРАТУ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....	57
8. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТОВ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ.....	58

Приложение 1. ФОРМА И ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ.....	61
Приложение 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ	63
Приложение 3. РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИЗА, ВЫХОДА ПО ТОКУ МЕТАЛЛА И СРЕДНЕЙ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ.....	65
Приложение 4. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ УСТАНОВОК....	67
Приложение 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ.....	70
Приложение 6. КОНТРОЛЬ ВНЕШНЕГО ВИДА ПОКРЫТИЙ.....	72
Приложение 7. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА РЕФЕРАТОВ	74
Приложение 8. ПРИМЕР ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ДЛЯ РЕФЕРАТА.....	75
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	76

Учебное издание

Черник Александр Александрович
Пянко Анна Владимировна
Макарова Ирина Владимировна

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Редактор *Т. Е. Самсанович*
Компьютерная верстка *Д. А. Кускильдина*
Дизайн обложки *Д. А. Полешова*
Корректор *Т. Е. Самсанович*

Подписано в печать 21.05.2025. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 4,7. Уч.-изд. л. 4,8.

Тираж 40 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.