

УДК 621.3.049.75:621.357.53

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ОТВЕРСТИЙ В ПОЛИИМИДНЫХ ОСНОВАНИЯХ ГИБКИХ ШЛЕЙФОВ

Вячеслав Валериевич Хриченко,

студент 4 курса

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель Ю.С. Боброва,

ассистент кафедры МТИ

Аннотация: Прямая металлизация известна как способ предварительной металлизации диэлектрика, позволяющий получать качественный токопроводящий подслои. В статье рассматривается ее применимость к полиимидным основаниям, получившим широкое распространение среди гибких шлейфов, способных в ряде случаев заменить массивные жгутовые соединения. В работе представлены результаты эксперимента по металлизации отверстий разного диаметра. Выведен способ оценки толщины покрытия через сопротивление структуры. Значения толщин, полученные описанным методом, проанализированы и сравнены с практическими измерениями.

На данный момент, гибкие печатные платы применяются во многих областях науки и техники: от медицины до космических спутников и домашней электроники. [1, стр.12]

Гибкие шлейфы, получающие все большее распространение, имеют ряд преимуществ, которые в большинстве случаев позволяют заменить громоздкие жгутовые соединения.

Такие преимущества выражаются в [1, стр. 13]:

- Упрощении сборки: отсутствии необходимости прокладки проводов по намеченным трассам соединений и их закрепления, зачистки и пайки каждого проводника по отдельности. Воспроизведение системы соединений машинными методами сводит ручной монтаж к минимуму, что приводит к уменьшению ошибок сборки.
- Увеличении надежности за счет снижения числа контактов.

Неоспоримо и превосходство гибких шлейфов над жгутовым монтажом и в вопросе виброустойчивости. [2]

Более того, полиимидные пленки, являющиеся одними из наиболее распространенных материалов оснований гибких печатных плат, могут быть применены и в производстве печатных плат и многослойных структур в классическом их понимании. Этому способствует их соответствие как диэлектрическим, так и механическим требованиям, предъявляемым диэлектрическим основаниям.

Таблица 1. Механические характеристики фольгированных диэлектриков [3, с.28]

	FR4	Полиэфирные пленки	Полиимидные пленки
Сгибание (R=2,5мм)	Нормально	Нормально	Хорошо
Модуль жесткости, МПа	2600-3400	2800-5500	2500
Усилия разрыва, г	600	800	500
Усилия расслоения, Н/м	1400	1050	1750

Так, потенциал гибких плат еще не исчерпан. Области их применения растут с каждым годом и находят новые решения. [4]

Величина отношения объёмов новых и выполненных заказов
на североамериканском рынке гибких печатных плат

Рис.1. Стабильная активность рынка гибких плат в 2013-м году [4]

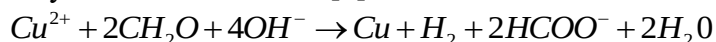
Тем не менее применимость некоторых ходовых и распространенных технологий в области гибких плат до сих пор не до конца изучена. Таким образом, исследование и оценка приемлемости существующих технологий, таких как прямая металлизация, является важной задачей в разработке технологических процессов структур на полиимидных основаниях.

Прямая металлизация

Процесс гальванического наращивания меди требует предварительного формирования токопроводящего подслоя. [5]

До самого конца двадцатого века для подобных целей применялось химическое меднение, которое можно условно разделить на две стадии: активация поверхности диэлектрика и непосредственное формирование токопроводящего подслоя в ходе реакции химического восстановления меди.

Процесс сопровождается выделением водорода, объем которого эквивалентен количеству осажденной меди. [6]



Выделяющийся водород закупоривает отверстия малого диаметра, мешая завершению процесса. Для дегазации отверстий приходится предпринимать специальные меры: наложение ультразвука, вибрацию подвесок, принудительное прокачивание отверстий рабочими растворами, что не всегда удается. [7]

Таким образом, использование химического меднения для металлизации отверстий субмиллиметрового диаметра в полиимидных пленках неприемлемо без использования дополнительных средств технологического оснащения.

Целесообразным методом предварительной металлизации является прямая металлизация. Главное ее отличие от химической в том, что токопроводящее покрытие в ней формируется на этапе активации поверхности, не прибегая к химическому восстановлению меди. Процесс прямой металлизацией отмечен отсутствием выделения водорода, большей устойчивостью, вызванной малой вязкостью и поверхностным натяжением раствора и отсутствием в растворах комплексообразующих веществ и формальдегидов, хелатов, тяжелых металлов, что уменьшает проблемы, связанные с очисткой сточных вод и делает процесс экологически безопасными. [7]

Немаловажную роль в прямой металлизации традиционных материалов печатных плат играет предварительное кондиционирование заготовки, в ходе которого снимаются электростатические заряды на поверхности, а сама поверхность очищается. Поднимается вопрос целесообразности кондиционирования полиимидного основания как подготовительной операции в ходе прямой металлизации. Причиной скопления зарядов на поверхности стеклотекстолита FR4, одного из наиболее распространенных материалов классических печатных плат, зачастую становится эпоксидная смола. Акриловая смола, ставшая заменой

эпоксидной в материалах гибких печатных плат, как видно из таблицы 2, обладает значительно меньшей диэлектрической проницаемостью, именно эта величина характеризует способность диэлектрика накапливать энергию электрического поля в виде дополнительно связанных зарядов. Более того, известно о неустойчивости полиимида в щелочной среде [1, стр. 41]. Таким образом, важным технологическим аспектом освоения металлизации отверстий в индустрии гибких шлейфов является вопрос целесообразности кондиционирования заготовки перед проведением непосредственной прямой металлизации.

Таблица 2. Сравнение диэлектрической проницаемости эпоксидной и акриловой смолы

Материал	Диэлектрическая проницаемость
Эпоксидная смола	3,6
Акриловая смола	2,7

Оценка целесообразности кондиционирования в прямой металлизации полиимидных пленок

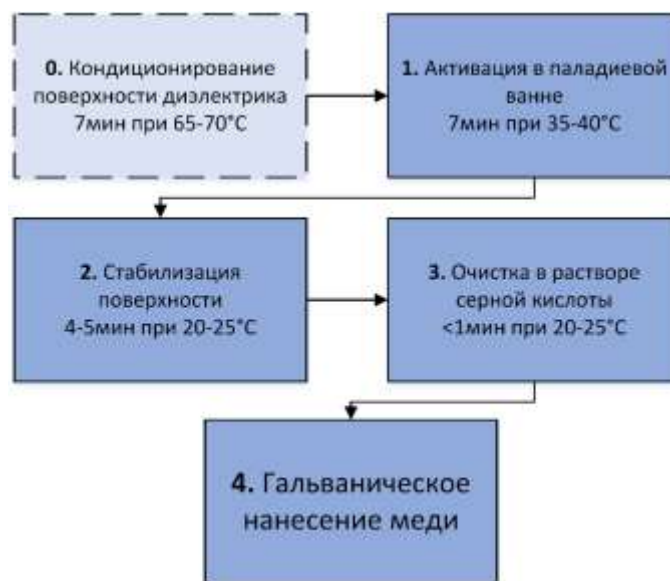
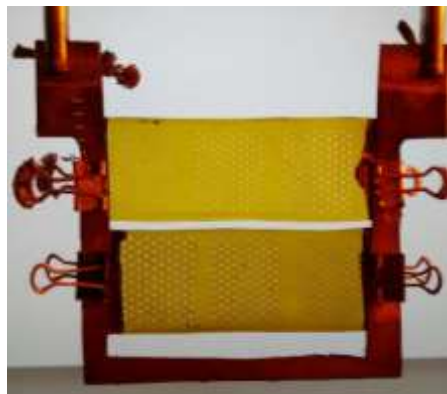


Рис. 2. Порядок нанесения гальванического покрытия с использованием прямой металлизации

Для оценки целесообразности кондиционирования заготовки перед проведением непосредственной прямой металлизации предлагается взять две идентичные заготовки, провести на одной из них кондиционирование в растворе DS270 в течение 7 минут при температуре среды 60°C. Далее объединить две заготовки в одну групповую, что помогает достичь совпадения режимов каждой операции.



а) Заготовка перед прохождением кондиционирования в рамке, обеспечивающей ей дополнительную жесткость и препятствующую неравномерному контакту со средой



б) Заготовки после активации поверхности в палладиевой ванне. Снизу – прошедшая кондиционирование.

Рис. 3. Заготовки в ходе подготовки поверхности перед непосредственной гальванизацией

После проведения кондиционирования одной из заготовок и закрепления со второй, полученная групповая заготовка была помещена в нагретый до 35°C оловянно-палладиевый активатор с ванилином на 7 минут. После извлечения из ванны заготовок, автором было замечено изменение цвета заготовки, предварительно помещенной в DS270. Такие изменения говорят об образовании более сплошного и плотного токопроводящего слоя. Предполагается, что гальваническое осаждение меди будет проходить быстрее именно на этой заготовке. После промывки групповая заготовка помещалась в стабилизатор на 4,5 минут при комнатной температуре раствора, еще раз промывалась и окуналась в раствор серной кислоты на 15 секунд. По завершении всех подготовительных операций, был осуществлен токоподвод с помощью рамки, выфрезерованной на станке Bungard с ЧПУ, и видоизмененная групповая заготовка была помещена в электролизер на 50 минут. Промежуточный визуальный контроль был осуществлен спустя 10 и 30 минут после погружения.



а) две заготовки перед окутанием в электролизер в рамке, обеспечивающей дополнительную жесткость и токоподвод.



б) заготовки спустя 10 мин. пребывания в гальванической ванне (Сверху- прошедшая кондиционирование)



в) заготовки спустя 30 мин. пребывания в гальванической ванне

Рис. 4. Рост меди на заготовках в процессе гальванизации

Из рисунка 4 видно, что заготовка, поверхность которой была подвергнута кондиционированию, оказалась более восприимчивой к гальваническому осаждению меди, так как ее поверхность была «разрыхлена», что привело к максимально эффективной адсорбции

палладия на стадии активации. Предположение о том, что на этой заготовке гальваническое покрытие будет формироваться быстрее подтвердилось. Необходимость и польза кондиционирования в прямой металлизации была наглядно подтверждена



а) без кондиционирования

б) с кондиционированием

Рис. 5. Покрытие, нанесенное за 50 мин.

Разработка тестовой структуры

Для более подробного изучения применимости прямой металлизации в полиимидных основаниях гибких шлейфов, было предложено создать групповую заготовку из тестовых структур, сосредоточенных на отверстиях различного диаметра.

На одной групповой заготовке предлагается по 6 типов тестовых структур, состоящих из n рядов, каждый из которых включает n отверстий, диаметром d_0 , с гарантийным пояском $0,5$ мм и диаметром контактной площадки, соответственно, $d_0+0,5$ мм. Длина проводника между двумя соседними контактными площадками составит $l_p=2$ мм, его толщина- $b_p=1$ мм

Для достижения максимальной плотности упаковки отверстия, подвергаемые металлизации, размещены в вершинах равностороннего треугольника ABC, как показано на рисунке 2.

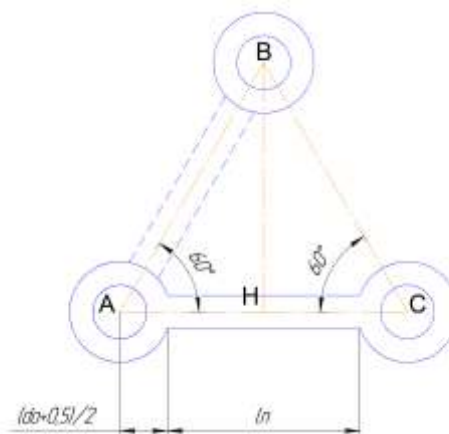


Рис. 6. Взаимное расположение двух рядов отверстий

В треугольнике

$$AB = BC = AC = l_n + d_k = l_n + d_o + 0,5$$

$$BH = \sin 60^\circ AB = \frac{\sqrt{3}}{2}(l_n + d_o + 0,5), \text{ при постоянной длине проводника } l_{np}=2\text{мм, получим:}$$

$$AB = BC = AC = 2,5 + d_o \text{ мм}$$

$$BH = \frac{\sqrt{3}}{2}(2,5 + d_o) \text{ мм}$$

Определим горизонтальный габарит структуры

$$L_c = n(d_o + 0,5) + (n-1)l_{np} + (l_{np} + d_o + 0,5)/2$$

Расстояния между центрами крайних отверстий будут меньше габарита на диаметр контактной площадки:

$$L_{1-n} = L_c - (d_o + 0,5)$$

$$L_{1-n} = (d_o + 0,5 + l_{np})(n-1/2)$$

При длине каждого проводника $l_{np}=2\text{мм}$ и 10 отверстиях в ряду в каждой структуре:

$$L_c = 10,5d_o + 24,5$$

$$L_{1-10} = 9,5(d_o + 2,5)$$

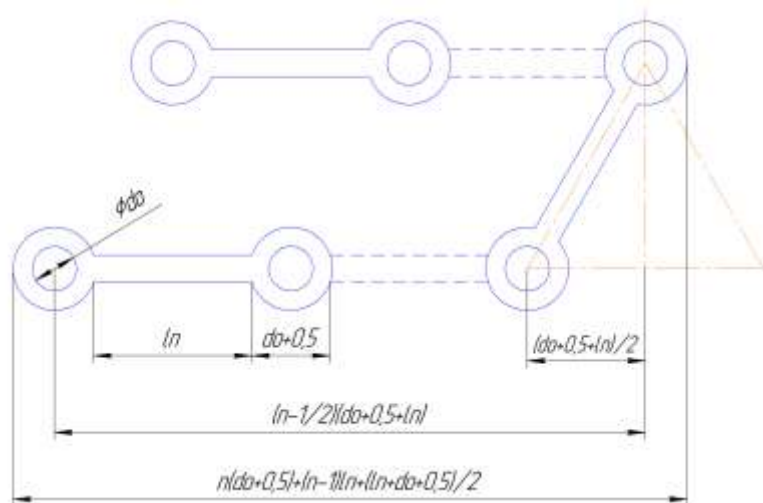


Рис. 7. Определение горизонтального габарита структуры

Говоря о вертикальном габарите, расстояние между центрами верхней и нижней точки найти куда проще, для этого требуется умножить количество рядов на высоту ВН треугольника, в вершинах которого располагаются отверстия

$$H_{1-n} = (n-1) * BH = (n-1) \frac{\sqrt{3}}{2}(l_n + d_k), \text{ при данных условиях:}$$

$$H_{1-10} = 10 * BH = 9 \frac{\sqrt{3}}{2}(2 + d_o + 0,5) = 4,5\sqrt{3}(d_o + 2,5) = 7,79423(d_o + 2,5) \text{ мм}$$

Зная габариты тестовой структуры, определим отступ от краев каждого равного сегмента заготовки

Таблица 3. Геометрические параметры каждого из би сегментов групповой заготовки

d	L1-10	отступ X	Отступ Y	H1-10
0,50	28,50	6,00	6,00	23,38
0,60	29,45	5,53	5,62	24,16
0,70	30,40	5,05	5,23	24,94
0,80	31,35	4,58	4,84	25,72
0,90	32,30	4,10	4,45	26,50
1,00	33,25	3,63	4,06	27,28

Планирование методики определения толщины металлизации отверстий полученных структур

В общем виде электрическое сопротивление поверхности рассчитывается по формуле:

$$R = \int_{z1}^{z2} \frac{\rho dz}{S(z)}, \text{ при рассмотрении поверхностей с неизменным поперечным сечением,}$$

выражение приобретает вид: $R = \frac{\rho l}{S}$

В полном сопротивлении структуры можно выделить две основные составляющие: сопротивление проводника R_p , сопротивление металлизированных отверстий R_o , таким образом: $R = (n^2 - 1)R_n + n^2 R_o$. Рассмотрим каждую из составляющих по отдельности

1) Сопротивление проводника R_p

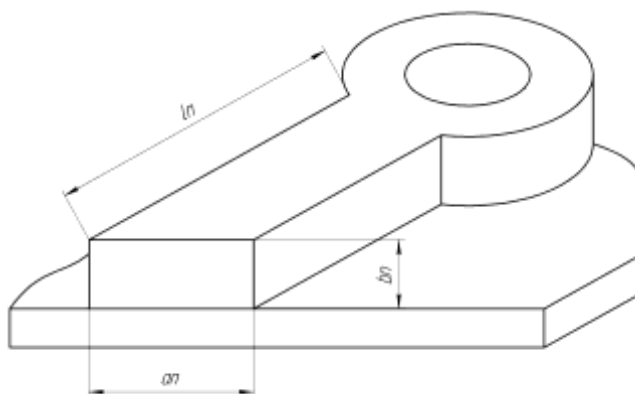


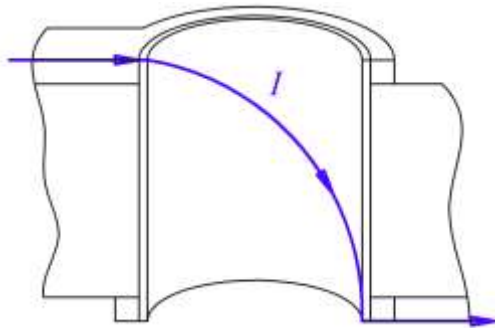
Рис. 8. Проводник и его геометрические характеристики

Поперечное сечение проводника представляет собой прямоугольник со сторонами a (шириной проводника) и b (его толщиной), в общем случае b - толщина фольги, напессованной на материал основания. Не стоит забывать и о контактных площадках, располагающихся по обе стороны от краев проводника, которые так же вносят свой вклад в формирование общего сопротивления структуры. Таким образом,

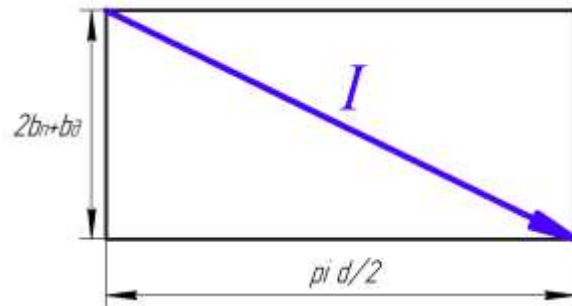
$$R_n = \frac{\rho(l_n + 2d_g)}{a_n b_n}$$

2) Сопротивление металлизированных отверстий R_o

Ток, доходя до металлизированного отверстия, течет по внутренней поверхности цилиндра в противоположную точку по кратчайшей дуге. При развертке цилиндра, несложно найти длину его пути, как длину гипотенузы треугольника, где высотами являются половина длины окружности металлизированного отверстия и толщина диэлектрического основания с толщиной медного покрытия.



а) ток во внутренней поверхности цилиндра



б) расчетная схема

Рис. 9. Течение тока в металлизированном отверстии

$$l_o = \sqrt{\frac{4(2b_n + b_o)^2}{\pi^2} + d_o^2}$$

Поперечным сечением металлизированного отверстия является половина кольца, полученного в результате нанесения слоя металла толщиной h на диэлектрическую поверхность просверленного отверстия с диаметром d_o .

$$2S_o = \pi r_o^2 - \pi(r_o - h)^2$$

$$S_o = \frac{\pi(d_o h - h^2)}{2}$$

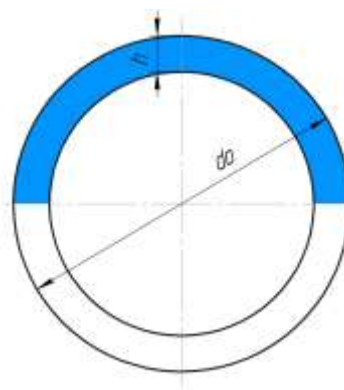


Рис. 10. Поперечное сечение металлизированного отверстия

$$R_o = \frac{2\rho \sqrt{\frac{4(2b_n + b_o)^2}{\pi^2} + d_o^2}}{\pi(d_o h - h^2)}$$

Таким образом, полное сопротивление тестовой структуры:

$$R = (n^2 - 1)R_n + n^2 R_o$$

$$R = \frac{2\rho \sqrt{\frac{4(2b_n + b_o)^2}{\pi^2} + d_o^2}}{\pi(d_o h - h^2)} + \frac{\rho(l_n + 2d_g)}{a_n b_n}$$

Приведение суммы к нормальному виду квадратного уравнения позволит найти толщину металлизации, измерив суммарное сопротивление тестовой структуры.

В общем виде:

$$h^2 - d_o h + \frac{n^2 \sqrt{\frac{4(2b_n + b_d)^2}{\pi^2} + d_o^2}}{\frac{R \cdot 10^3}{\rho} - \frac{(n^2 - 1)(l_{np} + 2d_g)}{a_n b_n}} = 0$$

В рамках эксперимента:

$$h^2 - d_o h + \frac{1,75 \cdot 10^{-3} \sqrt{30,8 + d_o^2}}{R - 0,308} = 0 \text{ [мм]}$$

Изготовление образцов

Изготовление шести опытных образцов проходило по технологическому процессу, описанному на рисунке 8.



Рис. 11. Технологический процесс создания опытных образцов

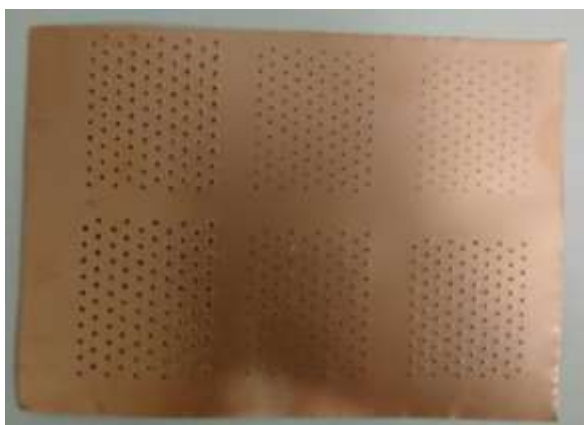
Из сплошного листа фольгированного с двух сторон полиимида было вырезано 6 заготовок размером 120x86 мм.

В среде Cam350 была разработана структура сверления отверстий согласно описанию тестовых структур, а также фотошаблоны для двух сторон заготовки, которые будут использоваться на этапе фотолитографии.

В каждой из шести заготовок были просверлены по 600 отверстий шестью диаметрами от 0,5 до 1,0 мм с шагом 0,1 мм, согласно описанию тестовой структуры.



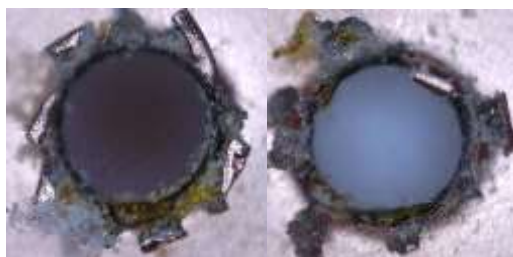
а) процесс сверления



б) заготовка после сверления

Рис. 12. Операция сверления отверстий

После сверления заготовки с низкой жесткостью, вокруг отверстий наблюдались заусенцы, наличие которых могло пагубно отразиться на результатах фотолитографии. Заусенцы были удалены в процессе шлифования поверхности.



а) непосредственно после сверления



б) после удаления заусенцев шлифованием

Рис. 13. Отверстия, полученные сверлением

Далее на заготовки была гальванически нанесена медь по проводящему подслою, сформированному прямой металлизацией, согласно режимам, описанным в разделе «Целесообразность кондиционирования в прямой металлизации полиимидных пленок» с применением кондиционера. Одним из ключевых вопросов работы с гибкими материалами, является обеспечение жесткости заготовке, равномерности контакта поверхности с рабочей средой на всей площади заготовки. В ходе работы этот вопрос решен с помощью рамки, разработанной под габариты опытных образцов (Рис. 11 (а)). Закрепленные с двух сторон образцы сохраняют положение при перемешивании и помещении в раствор. Сохраняется равные условия в каждой точке заготовки.



а) заготовки перед гальваническим
осаждением меди



б) заготовки после извлечения из
электролизера



в) заготовка с прометаллизированными
отверстиями

Рис. 14. Осаждение токопроводящего покрытия в отверстиях

После была проведена фотолитография и удаление меди с поверхности, на которой исключается токопроводящий слой согласно топологии.



а) заготовки с нанесенным на них ламинированием фоторезистом



б) фотошаблон, совмещенный с заготовкой



в) заготовка после процесса проявления незащищенного фоторезиста

Рис. 15. Некоторые фотолитографические процессы

Анализ результатов

В ходе выполнения эксперимента были получены следующие сопротивления структур[Ом]:

Таблица 4. Значения сопротивлений полученных образцов

dotв	№Обр	1	2	3	4	5	6
0,5		0,457	0,351	0,33	0,33	0,312	0,316
0,6		0,5	0,365	0,358	0,312	0,372	0,321
0,7		0,82	0,363	0,368	0,35	0,31	0,34
0,8		0,6	0,396	0,39	0,32	0,357	0,361
0,9		0,8		0,438	0,373	0,349	0,41
1		0,565		0,452	0,83	0,41	0,67

На основании полученных данных были найдены решения уравнений [мкм]

Таблица 5. Значения толщин металлизации отверстий, согласно разработанной модели

dotв	№Обр	1	2	3	4	5	6
0,5		12	45	99,8	90	-	-
0,6		9,3	32,6	37,45	-	28	205
0,7		4,5	35	30,6	44,6	-	59,9
0,8		6,04	20,4	22	-	51,4	34,57
0,9		3,58	-	14	27	45	17,5
1		6	-	12,3	3,4	17	4
Средн. Знач		6,9	33,25	36,025	41,25	35,35	64,2

Бежевым обозначены участки, поврежденные в ходе изготовления опытных образцов, красным – участки, толщины отверстий которых не удалось определить через сопротивление поверхности (дискриминант квадратного уравнения <0)

Среднее значение полученных толщин составляет 36,16 мкм при плотности тока в 2 А/дм² и времени осаждения 50 мин, что соизмеримо со скоростями осаждения меди [8]:

$$1 \text{ А/дм}^2 - 14 \text{ мкм/час};$$

$$3 \text{ А/дм}^2 - 40 \text{ мкм/час};$$

$$5 \text{ А/дм}^2 - 65 \text{ мкм/час}.$$

Стоит отметить, что разброс полученных величин ощутим, это говорит о малой точности модели и необходимости ее доработки. Тем не менее такой метод позволяет достаточно быстро определить толщину металлизации отверстий и оценить ее качественные свойства.

Заключение

1. Прямая металлизация показала себя как приемлемый способ формирования токопроводящего подслоя в полиимидных основаниях гибких плат и шлейфов
2. Необходимость кондиционирования полиимидной поверхности была подтверждена экспериментально.
3. Использование рамок позволяет обеспечить необходимую жесткость гибких полиимидных заготовок в жидкостных процессах формирования топологии.
4. Модель, выведенная для определения толщины гальванического покрытия металлизированных отверстий по величине общего сопротивления системы, позволяет приемлемо оценить толщину нанесенного покрытия без применения дорогостоящего оборудования. Модель не подходит для промышленного использования ввиду низкой точности и нуждается в верификации и доработке путем введения поправочных коэффициентов.

Литература

1. *Медведев А.М., Мылова Г.В.* Технологии в производстве электроники. Часть III. Гибкие печатные платы. М.: «Группа ИДТ», 2008, с.49
2. *SHI J., WU Z., HUANG C.* Anti-vibration design of rigid-flex backplane based on BP neural network and genetic algorithm //Electronic Components and Materials. – 2009. – Т. 6. – С. 031.
3. *Медведев А.М., Можаров В., Мылов Г.* Печатные платы. Современное состояние базовых материалов \ Печатный монтаж 2011 – №5 – с. 24-30
4. Market Research from IPC The Electronics Industry's Source of Original Data and Insights for Smart Business Decisions, 2015
5. *Гамбург Ю.Д.* Гальванические покрытия. Справочник по применению. М: «Техносфера», 2006г.
6. Электрохимия, т. 2, №6, 1984г.
7. *Медведев А., Салтыкова В.* Печатные платы. Системы прямой металлизации //Компоненты и технологии. – 2003. – №. 30.
8. *Терешкин В. А., Фантгоф Ж., Григорьева Л.* Гальваническое меднение при производстве печатных плат //Технологии в электронной промышленности. – 2005. – №. 1. – С. 16-18