

# Плазмохимическая очистка медных торцов в просверленных отверстиях МПП

Франц Галецкий, д.т.н., начальник отделения ИТМ и ВТ им. Лебедева

Илья Лейтес, начальник отдела ИТМ и ВТ им. Лебедева

Е. Николаева, к.х.н., начальник сектора ИТМ и ВТ им. Лебедева

*При изготовлении МПП методом металлизации сквозных отверстий (МСО) при сверлении отверстий на торцы внутренних контактных площадок (КП) наволакивается смола диэлектрика. Степень этого наволакивания различна по полю платы — часть отверстий может вообще не иметь наволакивания, часть имеет наволакивание только с одной стороны окружности КП, часть — по всей окружности КП. Это можно увидеть визуально под микроскопом при обзоре отверстий под углом к оптической оси микроскопа или с помощью микроскопа Microbor.*

Наличие смолы на торцах КП является препятствием для надежного сцепления медного торца с медью, осаждаемой при металлизации отверстий. Это приводит к отсутствию электрической связи вообще или к неполной связи по окружности КП. При этом не обеспечивается также необходимая механическая прочность связи, что впоследствии при воздействиях на плату при сборке и эксплуатации может привести к разрыву связи и отказу изделия (см. рис. 1).

В связи с наволакиванием смолы на медные торцы в сквозных отверстиях при разработке и изготовлении МПП возникает необходимость в очистке торцов от смолы.

В середине 1980-х годов рядом фирм (Shiple, Schering и др.) была предложена трехступенчатая технология удаления наволакивания (Smear Removal) с помощью щелочного раствора перманганата калия.

На первой стадии процесса плата обрабатывается в ванне обезжиривания, снабженной ультразвуковым генератором. В состав раствора обезжиривания входит химический агент (полярный органический растворитель), обеспечивающий набухание наружного слоя смолы (см. рис. 2) [1, 2]. Под действием ультразвука молекулы органического растворителя активно проникают в трехмерную сетку полимера на глубину 1...3 мкм, ослабляя связи между макромолекулами. При этом поперечные звенья сетки, перпендикулярные направлению действия растворителя, испытывают более сильное его воздействие, чем продольные.

На обработанную таким образом смолу на второй стадии процесса воздействуют щелочным перманганатным раствором, который окисляет,

а затем удаляет с поверхности смолы те звенья сетки, связь которых с мат-

рицей смолы ослаблена органическим растворителем. В результате прояв-

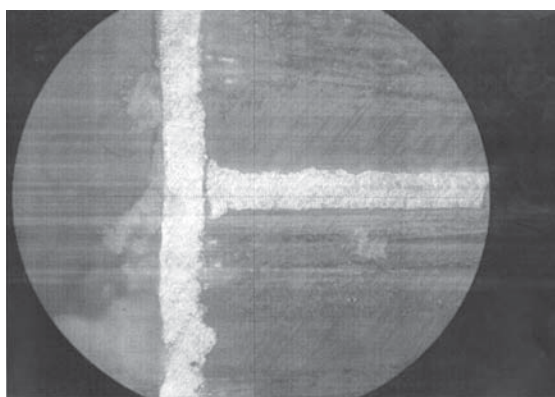


Рис. 1. Дефект торцевого контакта МПП

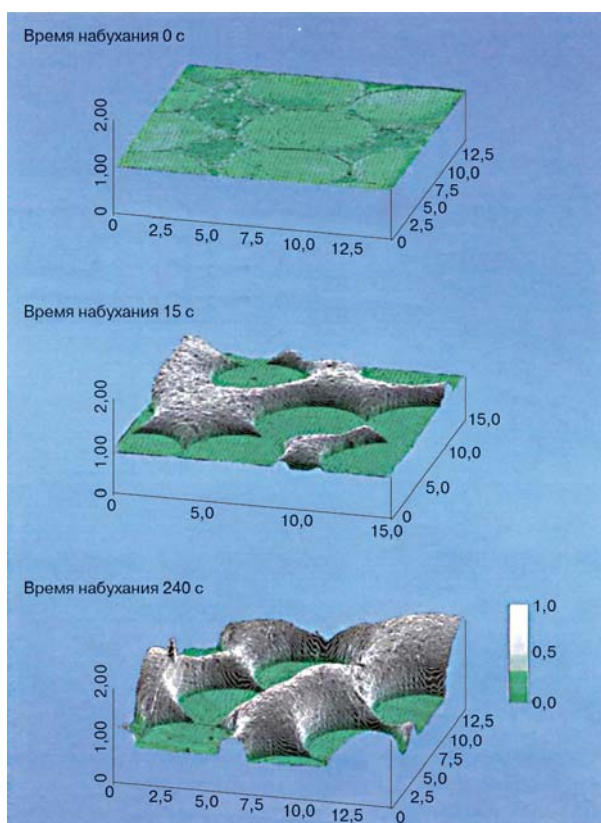


Рис. 2. Набухание наружного слоя смолы в растворе обезжиривания Securiganth P техпроцесса Smear Removal фирмы Atotech

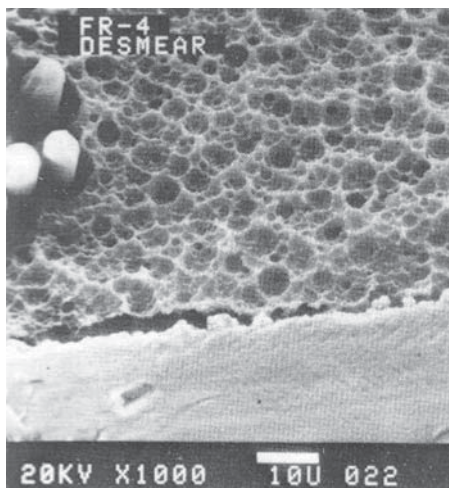


Рис. 3. Электронная микрофотография поверхности сквозного отверстия после 3-ступенчатого перманганатного процесса Circuposit 200 фирмы Shipley (1000-кратное увеличение)

ляется сотовая структура смолы (см. рис. 3).

Трехстадийный перманганатный способ удаления наволакивания смолы характеризуется следующими положительными факторами:

- поверхность эпоксидной смолы приобретает микрошероховатость (см. рис. 3), что повышает прочность сцепления меди с диэлектрическими участками поверхности и способствует снижению вероятности появления таких дефектов, как отслоение, вздутие, неравномерное покрытие;

- в результате увеличения удельной поверхности смолы за счет образования сотовой структуры облегчается выход газов, включенных в материал диэлектрика;

- явление прометаллизации по стекловолкну в значительной степени сглажено;

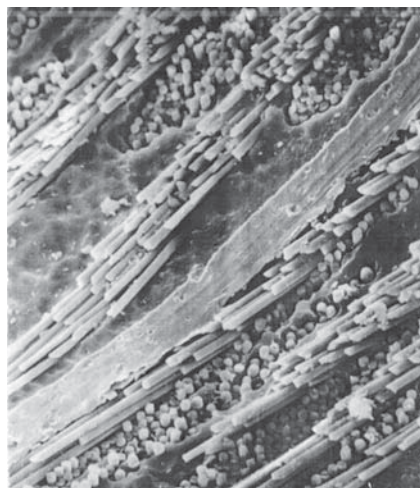


Рис. 4. Электронная микрофотография поверхности сквозного отверстия МПП после плазмохимического травления (300-кратное увеличение)

- растворы не агрессивны, поэтому существенного ухудшения электрических параметров плат не происходит.

Вместе с тем применение этого метода в производстве МПП усложняет технологию обезвреживания стоков и требует дополнительных мер по совместимости стоков с уже имеющимися очистными сооружениями.

В середине 1970-х годов для удаления наволакивания смолы с торцов КП внутри сквозных отверстий был предложен плазменный метод.

В установках для плазменного метода генератором возбужденного состояния газов является сильное электромагнитное поле, а в качестве газов используется смесь кислорода ( $O_2$ ) и фреона ( $CF_4$ ). Под влиянием электромагнитного поля кислород и фреон образуют высокоактивные частицы,

которые взаимодействуют с полимерным связующим диэлектрика, превращая его в летучие соединения [3].

Главным преимуществом плазмохимического метода удаления наволакивания смолы по сравнению с химическими методами является то, что это «сухой» процесс, и поэтому:

- нет воздействия агрессивных растворов на материал диэлектрика;
- нет проблем с утилизацией сточных вод и отходов травления.

Однако плазменный метод имеет и ряд недостатков:

- технологический процесс имеет прерывистый характер;

- тефлоновые пленки, образующиеся на поверхности смолы за счет реакции замещения атомов водорода в цепи полимера на атомы фтора, остатки золы (пепла) требуют дополнительных стадий обработки отверстий для устранения труднометаллизируемых участков;

- поверхность смолы остается гладкой (см. рис. 4).

Наряду с удалением наволакивания смолы с торцов КП при плазмохимическом травлении происходит стравливание полимерного связующего с диэлектрических участков стенок сквозного отверстия. Величина этого стравливания («Etch Back») играет очень важную роль для последующей металлизации стенок отверстия и по критерию стандартов IPC-A600 для плат класса 3 и выше не должна превышать 5...10 мкм. Если эта величина достигает 20...25 мкм, то это означает, что на 20...25 мкм над смолой начинают выступать пучки стекловолкна. В местах пучков смола между отдельными нитями вытравливается еще глубже и по сравнению с уровнем смолы на свободных от пучков участках образуются впадины глубиной 10...15 мкм (см. рис. 5). Это создает значительные трудности, как при химической, так и при гальванической металлизации.

Для процесса химического меднения ситуация осложняется тем, что на поверхности стенок сквозного отверстия увеличивается доля труднометаллизируемых участков в виде оголенных пучков стекловолкна.

При гальванической металлизации вначале начинают зарастать вышеупомянутые впадины, в которых слой металла разделен стеклонитями (см. рис. 5). Толщина металлизации в этих местах оказывается недостаточной

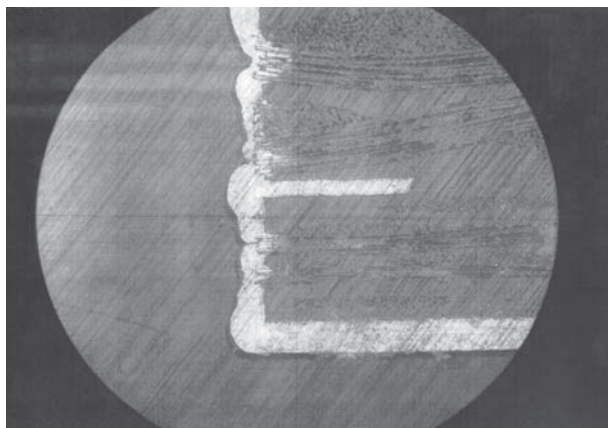


Рис. 5. Дефекты металлизации поверхности сквозного отверстия МПП, возникшие вследствие перетравки смолы в плазме

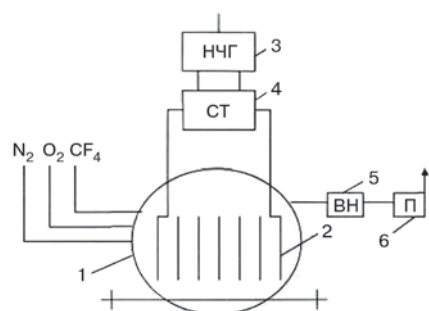


Рис. 6. Схема установки Technics 3067 E

для надежного функционирования печатной платы при ее дальнейшей эксплуатации. Омическое сопротивление металлического пистона при этом значительно возрастает, а уменьшение толщины металлизации стенок приводит к отказам плат при термо-воздействиях.

При подборе оптимальных режимов плазмохимического травления необходимо принимать во внимание как эффективность удаления наволакивания с торцов контактных площадок, так и допустимую величину подтравки смолы, которая для плат разного класса может быть различной.

В понятие оптимальный режим травления в плазме входят следующие параметры:

- время травления;
- температура процесса;
- соотношение газов (кислород/фреон);
- мощность радиочастотного генератора;
- давление в камере (величина вакуума).

Все перечисленные параметры непосредственно влияют на скорость травления, которая при правильно подобранном режиме должна обеспечивать эффективное удаление наволакивания с величиной, не превышающей 5...10 мкм.

В ИТМ и ВТ работы по использованию плазменного травления впервые начаты в 1978 г. на установке Technics 3000 и далее продолжены на установке Technics 3067 и Te Pla 4011.

На этих установках цикл обработки программируется на контроллер, и обработка ведется в автоматическом режиме. На системе индикации отображаются текущие параметры стадий процесса. Имеется возможность оперативного их сравнения с заданными в программе значениями и перепрограммирования еще не наступивших

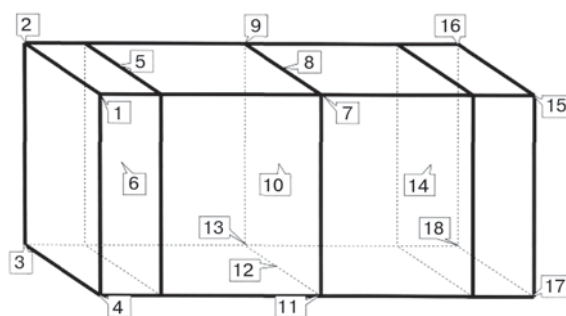


Рис. 7. Схема размещения образцов в камере травления установки Technics 3067 E

стадий процесса. Отображается также состояние узлов установки и причина нарушения работы в случае возникшей неполадки. Смесь газов подается в реакционную камеру в двенадцати местах через сопла, расположенные по всему периметру реактора, что способствует равномерному воздействию плазмы на обрабатываемые заготовки. Отработанный газ через клапан, расположенный в нижней части камеры, отсасывается насосом.

Разогрев камеры производится в среде азота (N<sub>2</sub>) на стадии, предшествующей пуску в камеру смеси реакционных газов (O<sub>2</sub> и CF<sub>4</sub>), что так же способствует более равномерному протеканию процесса травления.

Схема установки Technics 3067 E представлена на рисунке 6. Установка представляет собой резервуар из алюминиевого сплава, не обладающего магнитными свойствами (1). Внутри резервуара на изоляторах укреплена система электродов (2). От низкочастотного генератора (3) через согласующий трансформатор (4) на электроды подается электропитание мощностью до 3 кВт.

Воздух и продукты реакции откачиваются вакуумным насосом (5). В резервуар из баллонов подаются газы: азот для предварительного разогрева плат, кислород и фреон для получения реакционной плазмы. Летучие продукты реакции и непрореагировавшие газы проходят через нейтрализатор (6), представляющий собой 10% раствор едкого натра и фильтр.

Получение предсказуемых и воспроизводимых результатов по равномерности плазмохимического травления от отверстия к отверстию, от платы к плате, от партии к партии является главным при выборе режимов.

При подборе режимов на установке Technics 3067 E были проведены эксперименты по определению зави-

симости глубины травления смолы диэлектрика от положения образцов в камере травления (см. рис. 7).

На каждую позицию, указанную на рисунке 7, помещалось по три типа образцов. В качестве образцов первого (I) типа использовались куски диэлектрика FR-4 размером 80 × 80 × 1,5 мм<sup>3</sup> после предварительно стравленной с них фольги.

В качестве образцов второго (II) типа использовались куски фольгированного диэлектрика FR-4 размером 80 × 80 × 1,5 мм<sup>3</sup> с отверстиями диаметром 1 мм, просверленными по всему полю образца с шагом 1 мм.

В качестве образцов третьего (III) типа применялись кусочки тест-платы размером 50 × 40 × 1,8 мм<sup>3</sup>, которые после химической и гальванической металлизации использовались для изготовления шлифов.

Образцы I и II типов перед проведением эксперимента выдерживали в сушильном шкафу при температуре 100°С в течение 2-х часов для удаления влаги. После охлаждения в эксикаторе образцы взвешивали на аналитических весах марки Sartorius. Операцию повторяли несколько раз до достижения каждым образцом постоянного веса.

После 30-минутной кислородно-фреоновой плазмы (O<sub>2</sub> — 70%; CF<sub>4</sub> — 30%) образцы I и II типов охлаждали в эксикаторе и затем взвешивали на аналитических весах.

Полученные данные использованы для расчета зависимости глубины травления (h) от положения образцов в камере травления (см. рис. 8).

Глубину травления (h) рассчитывали по формуле:

$$h = \frac{\Delta P \cdot 10^4}{dS} \text{ (мкм)},$$

где ΔP — разница в весе образца до и после плазмохимического травле-

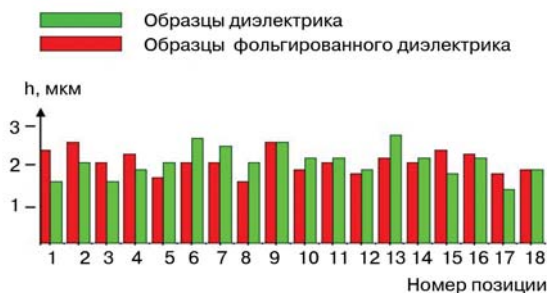


Рис. 8. Зависимость глубины травления смолы (мкм) от положения образцов в камере травления установки Technics 3067 E

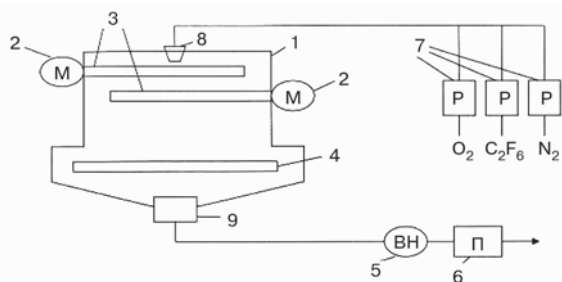


Рис. 9. Схема установки Te Pla 4011

ния;  $d$  — удельный вес смолы, равный  $1,6 \text{ г/см}^3$  [4];  $S$  — площадь обрабатываемой поверхности образца.

Из данных, полученных в результате проведенного эксперимента (см. рис. 8), следует, что травление смолы диэлектрика протекает достаточно равномерно по всему объему камеры. Разброс глубины травления составляет  $\pm 10\%$ .

За 30 минут воздействия плазмы смола диэлектрика FR-4 травится на расчетную глубину  $2,1 \pm 0,19 \text{ мкм}$ , что соответствует расчетной скорости травления  $0,07 \pm 0,01 \text{ мкм/мин}$ .

Шлифы, изготовленные из образцов III типа после прохождения ими стадий химической и гальванической металлизации, подтверждают выводы весового метода.

В установке Te Pla 4011 для возбуждения плазмы применен СВЧ-генератор на магнетронах, который создает электромагнитное поле порядка 7 ГГ.

В этой установке использован метод направленного потока газов. Через сопло, расположенное в верхней части камеры (см. рис. 9), подается смесь газов, а через клапан, расположенный в дне камеры, отработанный газ отсасывается насосом. Оператором задается скорость подачи смеси газов в камеру травления в мл/мин. На ротаметрах каждого газа выставляется такая скорость, чтобы выдерживалось требуемое

соотношение. Например, при скорости подачи смеси газов — 150 мл/мин, для того, чтобы соотношение кислорода и фреона было 80:20, необходимо на ротаметре кислорода выставить скорость — 120 мл/мин, а на ротаметре фреона — 30 мл/мин.

При подборе режимов на установке Te Pla 4011 был проведен эксперимент по определению зависимости глубины травления смолы диэлектрика от положения плат на выдвижной плите камеры травления.

В качестве образцов использовались куски спрессованного препрега FR-4: девять образцов размером  $80 \times 80 \times 0,020 \text{ мм}^3$  и восемь образцов размером  $80 \times 80 \times 0,017 \text{ мм}^3$ . Взвешивание, сушка и охлаждение образцов проводилось описанным выше методом.

Высушенные образцы в количестве 17 штук были помещены в камеру травления так, как это представлено на рисунке 10. После двухминутной плазмы ( $\text{O}_2$  — 80%;  $\text{CF}_4$  — 20%) образцы охлаждались в эксикаторе и снова взвешивались.

Указанный эксперимент был повторен с изменением времени травления. Время выдержки в камере было следующим: 2,5 мин, 3,5 мин и 6,5 мин.

Результаты проведенного эксперимента представлены на рисунке 10. Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

— глубина травления смолы зависит от положения образца на выдвижной плите травильной камеры (см. рис. 10);

— наиболее интенсивно травятся образцы, находящиеся в центре плиты (10, 11, 12, 13, 5, 14, 15, 16, 17) под воздействием направленного потока плазмы. Образцы, находящиеся в углах плиты, на которые поток практически не попадает (1, 3, 7, 9), травятся наиболее слабо. Образцы, находящиеся по периметру плиты (2, 4, 6, 8), занимают промежуточное положение по интенсивности травления;

— наиболее оптимальной областью для расположения заготовок в камере является центральная часть выдвижной плиты;

— из графиков зависимости глубины травления от времени следует, что расчетная скорость травления смолы в оптимальной области составляет  $0,21 \pm 0,05 \text{ мкм/мин}$ ;

Выбор рабочего режима плазмохимического травления проводился на четырех тест-платах. Две из них сверлились на станке «XL», а две другие — на станке «MARK». Программа сверловки в обоих случаях была одинаковой.

Отверстия, которые не должны были подвергаться воздействию плазмы, закрывали кусками фольгированного диэлектрика и плотно прижимали их к испытываемой плате.

Зоны, содержащие отверстия всех просверленных диаметров, последовательно открывали и подвергали воздействию плазмы по следующим временным режимам:

- 2 мин;
- 3 мин;
- 4 мин;
- 6 мин;
- 8 мин;
- 10 мин.

После проведения плазмохимического травления тест-платы обрабатывались на линии химического меднения, включая гальваническую затяжку, по рабочему режиму.

Из каждой зоны вырезали по три тест-купона, по-разному удаленных от центра платы, и изготавливали из них шлифы двух типов: с заливкой отверстий эпоксидной смолой и без заливки. Шлифы, изготовленные без заливки отверстий, дают возможность рассмотреть не только торец отверстия, но и всю его поверхность.

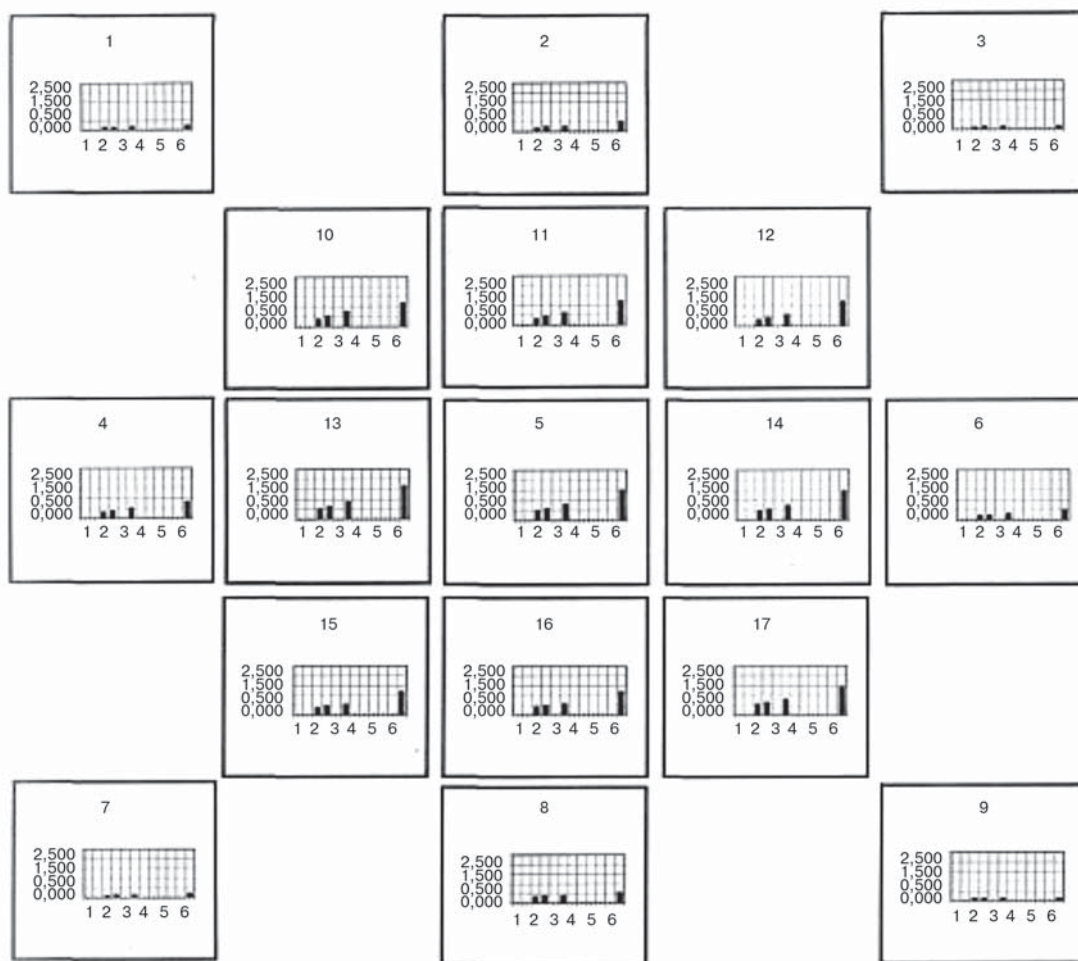


Рис. 10. Зависимость глубины травления смолы (мкм) от положения образцов на выдвижной плите в камере травления установки Te Pla 4011

На рисунке 11 в качестве примеров представлены фотографии шлифов первого (а, б, в, г) и второго (д, е, ж, з) типов, изготовленные из тест-купонов, вырезанных из центральной части тест-платы.

Как видно из фотографий шлифов (см. рис. 11), по мере увеличения времени воздействия плазмы процесс травления проявляется более сильно. Наволакивание смолы удаляется с медных торцов за три минуты обработки. После четырехминутной обработки над смолой на 10...20 мкм начинает выступать стекловолокно. После шестиминутной обработки на 20...30 мкм над диэлектриком начинает выступать медный торец. Прометаллизация по стекловолокну видна уже на образцах с 2-минутным травлением в плазме, а на образцах с 10-минутным травлением доходит до 50 мкм.

На основании анализа шлифов был сделан вывод, что наиболее оптимальное время травления 3 мин. При этом:

- наволакивание смолы на медные торцы удаляется полностью;

- подтрав смолы составляет 5...10 мкм;

- выступающее над смолой стекловолокну зарастает гальванической затяжкой;

- прометаллизация по стекловолокну в пределах 30...50 мкм.

При выборе режимов для установки Te Pla 4011 было проведено также изучение зависимости изменения температуры в реакционной камере от порядкового номера цикла травления.

Рабочие платы и тест-платы обрабатывались в плазме поочередно,

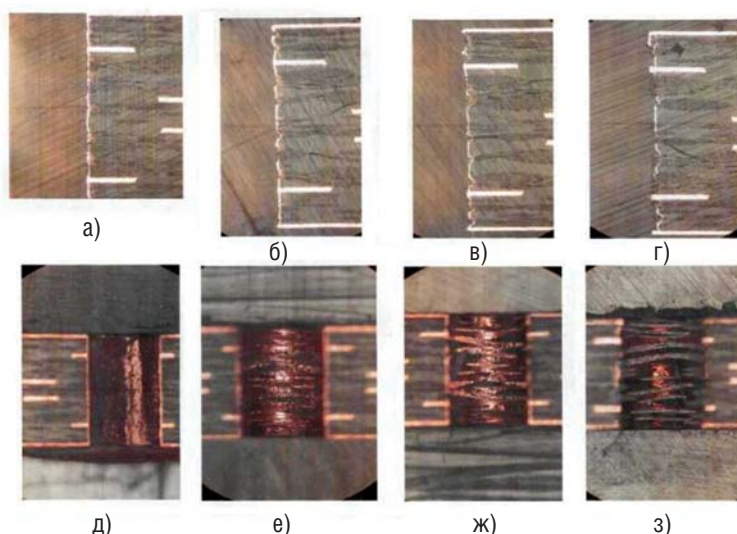
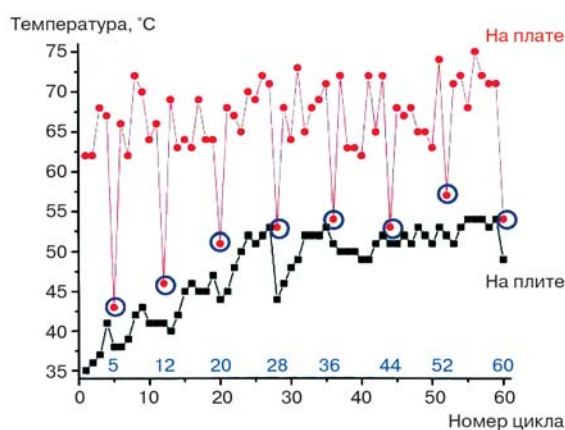


Рис. 11. Фотографии шлифов первого и второго типа с различным временем воздействия плазмы: а, д — 3 мин; б, е — 4 мин; в, ж — 6 мин; г, з — 10 мин



**Рис. 12. Зависимость изменения температуры плат и выдвигной плиты в травильной камере в установке Te Pla 4011 от порядкового номера цикла травления**

по одной плате. Всего в течение дня было обработано 60 плат, из которых №№5, 12, 20, 28, 36, 44, 52 и 60 были тест-платами. Температуру плат и выдвигной плиты измеряли термопарой сразу после завершения цикла травления и открывания камеры. Время травления каждого цикла составляло 3 мин.

Результаты представлены на рисунке 12. Из них видно, что температура плиты, как и тест-плат растет до 28...30 цикла, и далее практически не меняется.

Температура рабочих плат, которые были значительно тоньше и меньше по площади, уже на первом цикле достигла 62°C и далее на протяжении всех циклов менялась мало и составляла  $67 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Чтобы уменьшить воздействие температуры на процесс травления рекомендовано после каждых 5-циклов открывать камеру и оставлять на 10—15 минут для охлаждения.

Более тонкие заготовки рекомендовано обрабатывать на начальных циклах травления, а заготовки толщиной более 3 мм — на последних циклах.

Как упоминалось выше, после плазмохимического травления на поверхности смолы остается зола (пепел), а в результате воздействия атомов фтора плазмы образуются тефлоновые пленки. Без дополнительной обработки эти труднометаллизируемые участки могут приводить к таким дефектам химической металлизации, как отслоения, вздутия, неравномерное покрытие.

Избежать этих дефектов помогают следующие меры:

— для механического удаления золы (пепла) применена обработка

отверстий струями воды высокого давления на установке Combi Brush;

— для устранения фторированных участков на поверхности смолы введена третья — кислородная стадия обработки плат в плазме. Во время этой стадии тефлоновые пленки окисляются кислородосодержащими компонентами плазмы и превращаются в газообразные соединения [5].

### Выводы

1. Плазмохимическое травление эффективно очищает медные торцы в сквозных отверстиях МПП от наволакивания смолы после сверления.

2. Поверхность эпоксидной смолы не приобретает микрошероховатость и остается гладкой.

3. После воздействия плазмы наблюдается прометаллизация по стекловолокну в пределах критерия стандартов IPC-A-600.

4. В результате воздействия плазмы на поверхности смолы могут образовываться труднометаллизируемые участки, что требует дополнительных стадий обработки для их устранения.

5. Воздействие плазмы на смолу диэлектрика в установке Technics 3067E происходит достаточно равномерно по всему объему камеры. Разброс глубины травления составляет  $\pm 10\%$ .

6. Для получения воспроизводимых результатов по скорости травления в установке Technics 3067 E загрузка камеры должна быть постоянной. Недозагрузку камеры травления рабочими заготовкам следует компенсировать имитаторами.

7. Для поддержания постоянства общей площади обрабатываемой поверхности камеру следует заполнять заготовками разной толщины и рав-

номерно распределять их по всему объему камеры травления.

8. В установке Te Pla 4011 глубина травления смолы зависит от положения образца в травильной камере.

9. Оптимальной областью для расположения заготовок в установке Te Pla 4011 является центральная часть выдвигной плиты. Поэтому заготовки размером более чем  $350 \times 450$  мм следует обрабатывать на установке Technics 3067 E.

10. Оптимальное время воздействия плазмы в установке Technics 3067 E — 30 мин, а в установке Te Pla 4011 — 3 мин.

11. Для уменьшения воздействия на скорость травления фактора роста температуры в травильной камере по мере увеличения числа проведенных циклов в установке Te Pla 4011 следует через каждые пять циклов открывать камеру и оставлять на 10—15 мин для охлаждения.

12. Более тонкие заготовки в установке Te Pla 4011 следует обрабатывать на начальных циклах травления, а более толстые — на последних циклах.

13. Для удаления золы (пепла) рекомендуется обработка плат струями воды высокого давления на установке типа Combi Brush.

14. Для устранения тефлоновых пленок с диэлектрических участков поверхности стенок отверстий МПП рекомендуется третья — кислородная стадия обработки плат в плазме.

Авторы выражают благодарность Цыгину Н.В. за участие в работах по подбору режимов на установках Technics 3067 E и Te Pla 4011 и за консультации при написании данной статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Эрих Х.Ю., Крайзель Р. Методика и установки для горизонтальной обработки МПП. Фирма «Шеринг». Гальванотехника. 1990.
2. Permanganate Smear Removal Process for Printed Circuit Boards. Atotech. Проспект фирмы. 2001.
3. Шеринг. Комплексная система для изготовления ПП. Проспект фирмы. 1988.
4. Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Пластические массы, 1985 г., с. 248.
5. Plasma applications in the circuit board industry. Проспект фирмы March Plasma Systems на выставке «Продуктроника 2005», Германия.