

ПРОИЗВОДСТВО ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ. МИФЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

Петр Семенов
ost@ostec-group.ru

В общении с нашими Клиентами приходится развенчивать много неверных мнений, превратившихся уже в мифы. Они мешают в выборе правильных решений при становлении и модернизации производства, приводят к излишним затратам и издержкам. Это послужило поводом для рассмотрения некоторых, наиболее часто встречающихся, мифов в оценке производства печатных плат.

МИФ № 1. СОЗДАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ПРОИЗВОДСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА ОДИНАКОВЫ ПО СЛОЖНОСТИ

На примере мобильных телефонов можно сравнить капитальные затраты на производство многослойных печатных плат и сборочно-монтажное производство, сбалансированные по производительности.

Характеристики сборочно-монтажного производства до модернизации:

- примитивное оборудование для ручной сборки;

Таблица 1 Сопоставление затрат на создание производства печатных плат и сборочно-монтажное производство применительно к производству мобильных телефонов

Показатели проекта	Участок поверхностного монтажа	Цех печатных плат
Производительность	180 тыс. компонентов в час	3 кв. м в час
Комплектность	3 линии по 60 тыс. компонентов в час	50...60 единиц оборудования
Производственные площади	120 кв. м под установку линии	750 кв. м под установку оборудования
Стоимость комплекта оборудования	120 млн. руб./ 3 300 000 \$ US	320 млн. руб./ 9 000 000 \$ US

- низкая производительность;
- нет возможности проводить монтаж новой элементной базы;
- огромная трудоемкость;
- деликатное отношение к компонентам при последовательной пайке;
- низкие требования к геометрии финишных покрытий печатных плат и короблению.

Характеристики сборочно-монтажного производства после модернизации:

- более высокая производительность;
- возможность установки новых компонентов;

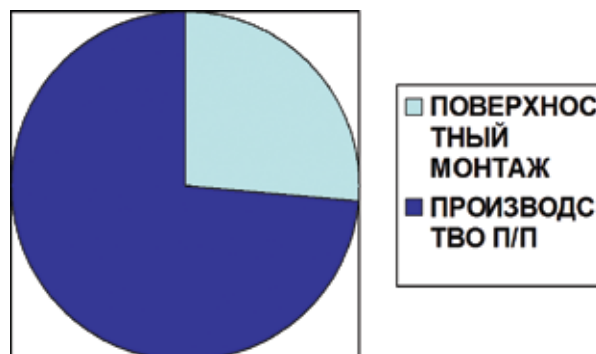


Рис. 1 Сравнение затрат на приобретение оборудования



Рис. 2 Сравнение производственных площадей для установки оборудования

Таблица 2 Сравнение результатов

Параметр	Сборка	Печатные платы
Производительность	Большое увеличение	Незначительное увеличение
Срок окупаемости	6 месяцев	3 года (менее 2 лет при выпуске специальной продукции)
Занимаемая площадь	325 м кв.	750 м кв.
Новые проблемы	Печатные платы	
Надежность (разница КТР)	Расходные и базовые материалы	

- автоматический оптический контроль;
- средний срок окупаемости шесть месяцев;
- возникновение повышенных напряжений в элементной базе из-за разности КТР элементов и подложки печатной платы;
- высокие требования к геометрии финишных покрытий печатных плат и короблению.

Характеристики производства печатных плат до модернизации:

- сложное устаревшее оборудование;
- тяжёлые условия труда;
- автоматизация на большинстве процессов;
- большое количество оснастки;
- проблемы с утилизацией сточных вод и отходов.

Характеристики производства печатных плат после модернизации:

- сокращение производственного цикла;
- улучшение условий труда;
- улучшение качества продукции;
- новые возможности по проектированию плат с высокой плотностью соединений;
- решение проблем с утилизацией сточных вод и отходов;
- срок окупаемости не менее трех лет;
- более высокие требования к качеству базовых материалов, фоторезиста, инструмента.

Вывод. Создание производства печатных плат требует больших усилий, чем сборочно-монтажное производство, и окупаемость затрат наступает гораздо позже.

МИФ № 2. ВЫХОД ГОДНЫХ НЕ ЗАВИСИТ ОТ РАЗМЕРА ПЛАТ

Таблица 3 Кратность размеров плат на заготовке

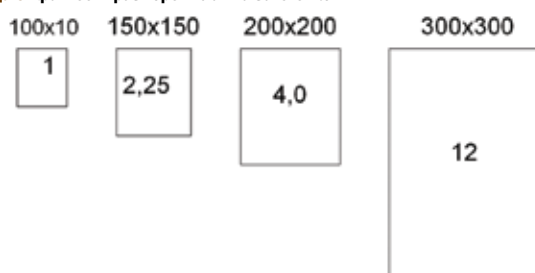


Таблица 4 Выход годных на одной заготовке в зависимости от размера плат

Класс предприятия	100x100 мм	150x150 мм	200x200 мм	300x400 мм
1	80%	65%	50%	0%
2	90%	72%	55%	0%
3	99%	98%	96%	80%

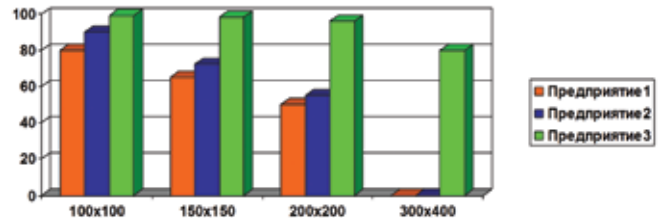


Рис. 3 Выход годных (%) по предприятиям в зависимости от размера плат

Если существует определенная вероятность появления дефектов на заготовке плат, то чем меньше плата, тем меньше вероятность попадания на нее дефекта. Платы меньшего размера могут попадать в поле заготовки без дефектов, и по мере увеличения размера платы вероятность включения в нее дефектов увеличивается, выход годных падает.

Вывод. Оценку выхода годных нужно сопровождать информацией о том, к какому размеру плат она относится.

МИФ №3. ТОЧНОСТЬ ФОТОПЛОТТЕРА КАК ОБОРУДОВАНИЯ, СОЗДАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТ (ФОТОШАБЛОН), ИМЕЕТ ПРИОРИТЕТНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПО СРАВНЕНИЮ С ДРУГИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Таблица 5 Составляющие погрешности совмещения

Обеспечение точности совмещения	Погрешности совмещения	
Изменение размера фотошаблона по диагонали при изменении влажности $\pm 5\%$ и температуры $\pm 1^\circ\text{C}$	$\Delta L_{f\text{tool}}$	± 28 мкм (Вводим ограничения в установку экспонирования)
Усадка слоев при травлении макс.	ΔL_{etch}	± 50 мкм
Изменение размеров пакета МПП при прессовании	ΔL_{press}	± 145 мкм
Точность сверления на сверльном станке с учетом разницы координат входа и выхода сверла из пакета	ΔL_{drill}	± 30 мкм
Точность позиционирования фотоплоттера	ΔL_{plot}	± 5 или ± 25 мкм

На рис. 4 показана прогнозируемая точность совмещения, обеспечиваемая на различных операциях с использованием фотоплоттеров с различной точностью позиционирования - 5 и 25 мкм. Расчеты показывают, что точность фотоплоттеров почти не сказывается на результирующей точности совмещения

Точность совмещения с фотоплоттером 5 мкм:

$$\sum_{i=1}^n \sqrt{(\Delta L_{f\text{tool}}/2)^2 + (\Delta L_{\text{etch}}/2)^2 + (\Delta L_{\text{press}}/2)^2 + (\Delta L_{\text{drill}}/2)^2 + (\Delta L_{\text{plot}})^2} = \sqrt{(28/2)^2 + (50/2)^2 + (145/2)^2 + (30/2)^2 + (5)^2} = \pm 79,43 \text{ мкм}$$

Точность совмещения с фотоплоттером 25 мкм:

$$\sum_{i=1}^n \sqrt{(\Delta L_{f\text{tool}}/2)^2 + (\Delta L_{\text{etch}}/2)^2 + (\Delta L_{\text{press}}/2)^2 + (\Delta L_{\text{drill}}/2)^2 + (\Delta L_{\text{plot}})^2} = \sqrt{(28/2)^2 + (50/2)^2 + (145/2)^2 + (30/2)^2 + (25)^2} = \pm 80,36 \text{ мкм}$$

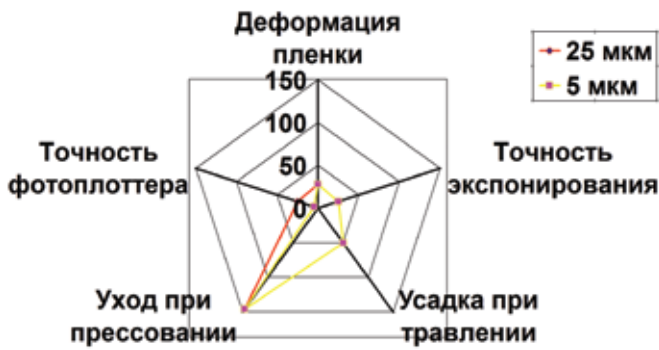


Рис. 4 Диаграмма расчетных погрешностей совмещения

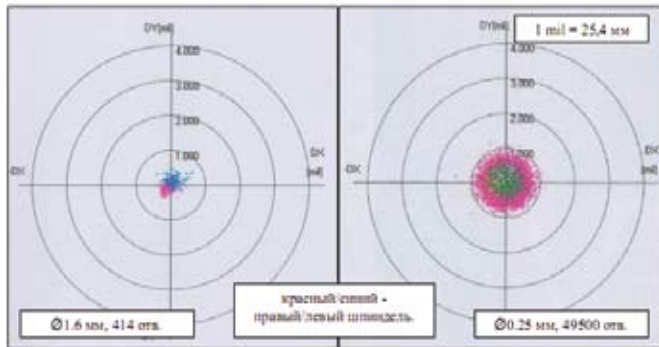


Рис. 5 Рассеивание выхода сверла большого диаметра (слева) и тонкого (справа)

Вывод. На фоне больших линейных деформаций тонких слоев МПП точность позиционирования фотоплоттеров мало сказывается на результатах совмещения.

МИФ № 4. ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СВЕРЛИЛЬНОГО СТАНКА ИМЕЕТ ПРИОРИТЕТНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРИ ПРЕЦИЗИОННОМ СВЕРЛЕНИИ ОТВЕРСТИЙ

На самом деле довлеющее значение имеет выход сверла, зависящий от структуры материала основания платы. Анизотропность структуры материала создает случайность препятствий для заглупления сверла, в результате чего оно может отклоняться и на выходе сверла создавать больший разброс отклонений, чем на входе. На рис. 5 показано рассеивание позиций выхода сверла большого диаметра, на котором не сказывается анизотропия материала, и для тонкого сверла, диаметр которого соизмерим с переплетениями стеклоткани материала основания.

Сравниваем точность позиционирования шпинделя: (ΔX_{in}) - 5 мкм и (ΔX_{in}) - 20 мкм, при биении на установленном сверле макс. (ΔX_{dev}) - 5 мкм, установленной разницы между входом и выходом сверла (ΔX_{dif}) 25 мкм:

- Точность позиционирования сверла на входе - 5 мкм:

$$\sum \Delta X = \sqrt{(\Delta X_{in}/2)^2 + (\Delta X_{dev}/2)^2 + (\Delta X_{dif}/2)^2} = \sqrt{(5/2)^2 + (5/2)^2 + (25/2)^2} = 26 \text{ мкм}$$

- Точность позиционирования сверла на входе - 25 мкм:

$$\sum \Delta X = \sqrt{(\Delta X_{in}/2)^2 + (\Delta X_{dev}/2)^2 + (\Delta X_{dif}/2)^2} = \sqrt{(25/2)^2 + (5/2)^2 + (25/2)^2} = 30 \text{ мкм}$$

Вывод. Более значимым в системе совмещения является отклонение позиции выхода сверла, особенно существенное для тонких сверл и грубых тканей.

МИФ № 5. ХИМИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ СДЕРЖИВАЕТ МЕТАЛЛИЗАЦИЮ ТОНКИХ ОТВЕРСТИЙ ПРИ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

В не меньшей степени на возможности формирования тонких отверстий сказывается конфигурация сверла: длина рабочей части,

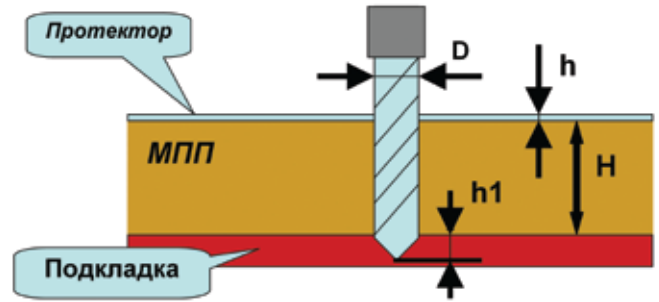


Рис. 7 Схема расчета выбора сверла

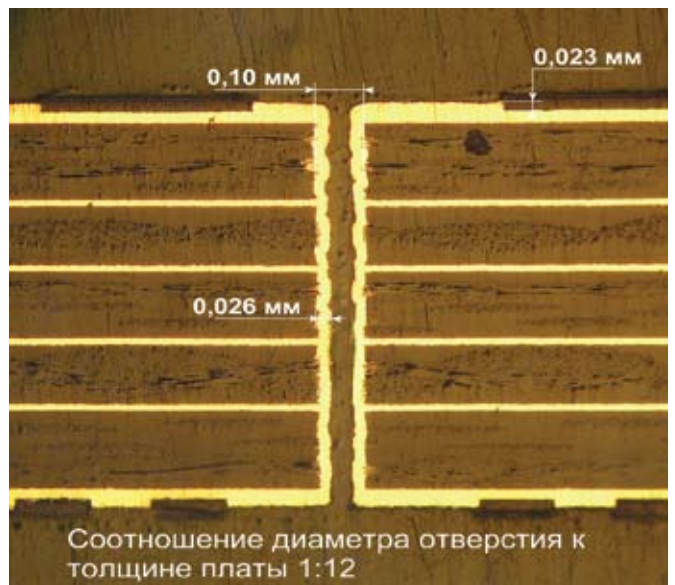


Рис. 8 Тонкое отверстие в толстой плате. Всего на плате 15625 таких отверстий

возможность выхода стружки, перегрев режущей кромки по мере изношенности сверла.

Максимальная толщина платы, которая может быть просверлена, может быть рассчитана с учетом параметров, показанных на рис. 6:
 $H = kL - h - h_1$,
 где H - максимально возможная толщина платы для сверла длиной L;
 k - коэффициент использования рабочей части сверла, равный 0,7;
 h - толщина протектора (накладки);
 h1 - глубина входа сверла в подкладку.

На рис. 8 показан реальный результат металлизации тонких отверстий, полученный на ПТК ПП ФГУП ГРПЗ (г. Рязань). В процессе использовался импульсно-реверсивный процесс электрохимической металлизации. Обращает на себя внимание толщина металлизации: внутри отверстия она большая, чем на поверхности.

Вывод. Помимо химических и гальванических процессов на формировании тонких металлизированных отверстий в «толстых» платах сказывается весь предыдущий технологический процесс, начиная с выбора материала.

МИФ № 6. МАТЕРИАЛ FR4 (КВАЛИТЕТ 104) ПОДХОДИТ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРЕЦИЗИОННЫХ МПП

Давайте посмотрим, удовлетворяет ли этот материал стандартным требованиям хотя бы по сопротивлению электрической изоляции. На рис. 9 показаны требования ГОСТ 23752 для сопротивления изоляции. Оценка результатов сопоставительного расчета говорит не в пользу использования материала FR-4: сопротивление изоляции между двумя проводниками длиной 100 мм и зазором 0,1 мм: $R_{из} = M\Omega \times 0,1/10 = 1,3 \times 1000 = 1300 \text{ м}\Omega$, при том, что ГОСТ требует минимальное сопротивление изоляции в нормальных условиях 10

Таблица 6 Нормативы на электрическую изоляцию

Свойства	Ед. измер.	Спецификация для ≤0,78 мм	Значения ISOLA для ≤0,78 мм
2 Удельное объемное сопротивление:			
А. В условиях повышенной влажности С 96/35/90	МОм • см	1,0 • 10 ⁶	6,0 • 10 ⁶
В. При повышенной температуре Е-24/125	МОм • см	1,0 • 10 ³	7,2 • 10 ⁶
3 Поверхностное сопротивление			
А. В условиях повышенной влажности С 96/35/90	МОм	1,0 • 10 ⁴	1,3 • 10 ⁶
В. При повышенной температуре Е-24/125	МОм	1,0 • 10 ³	3,7 • 10 ⁷

Таблица 3

Сопротивление изоляции
МОм

Материал основания	Нормальные условия	Относительная влажность (93±3)%					Повышенная температура		
		при температуре (25±10)°С		при температуре (40±2)°С			(85±3)°С	(100±3)°С	(120±5)°С
		1 ч	2 сут	4 сут	10 сут	21 сут и более	2 ч	2 ч	2 ч
Гетинакс	5000	300	1	0,5	—	—	20	—	—
Стеклотекстолит	10000	700	30	20	5	1	300	200	100
Лавсан, полиимид	10000	700	—	20	5	1	—	200	—

Рис. 9 Требования ГОСТ 23752

000 МОм. Прежде чем выбрать материал и вписать его в конструкторскую документацию, конструктор должен внимательно изучить нормативную документацию и ТУ на материал (таблицы 8, 9).

МИФ № 7. ИЗГОТОВИМ МПП «5» КЛАССА ТОЧНОСТИ ИЗ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МАТЕРИАЛА

Согласно требованиям ГОСТ 23751-86 «ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНСТРУКЦИИ», п.2.3.3, таблица № 5, значение позиционного допуска расположения центров контактных площадок в диаметральном выражении составляет для «3», «4» и «5» классов точности соответственно 0,3 мм, 0,25 мм и 0,20 мм, что будет соответствовать отклонению от среднего значения позиции ±0,150 мм, ±0,125 мм и ±0,1 мм соответственно. Сопоставим это требование с усадкой материалов, сказывающейся на точности позиционирования, установленной отечественной нормативной документацией. С одной стороны, ГОСТ 23752-79 «Платы печатные. Общие технические условия» требует применения отечественного ламината, соответствующего ГОСТ 26246.11-89 «Материал электроизоляционный, фольгированный, тонкий, нормированной горючести для многослойных печатных плат на основе стеклоткани, пропитанной эпоксидным связующим». С другой стороны, ГОСТ 26246.11-89, п.3.6. устанавливает «Стабильность линейных размеров» не хуже ±0,8 мкм/мм для материала толщиной от 0,05 до 0,3 мм. Это означает, что ГОСТ 26246.11-89 допускает деформацию заготовки слоя на дистанции 420 мм (межбазовое расстояние) $420 \cdot (\pm 0,8) = \pm 336$

мкм (± 0,336 мм). Результаты сопоставления показаны в таблице 7. **Вывод.** Предусмотренные ГОСТ 23751 требования к совмещению не согласуются с реальной размерной стабильностью тонких материалов для внутренних слоев МПП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практика реализации многочисленных проектов высокотехнологичных производств многослойных печатных плат привела к осмыслению существа многих процессов и развенчанию неверных представлений о направленности усилий по становлению и модернизации сложившихся производств.

Таблица 7 Сопоставление требований по позиционной точности с нормативной деформацией материалов тонких слоев МПП

Требования стандартов	Значение позиционного допуска по ГОСТ 23752-79	ГОСТ 26246.11-89, п.3.6. «Стабильность линейных размеров»,
Класс «3»	0,3	0,336
Класс «4»	0,25	0,336
Класс «5»	0,2	0,336

Таблица 8 Сравнительные характеристики материалов разных производителей, продаваемых в РФ

Параметр	Единица измерения	Hitachi			Isola			
		MCL-BE-67G	MCL-E-679W	MCL-E-679F(J)	DE-104	IS-400	IS-410	IS-420
		Нагревостойкий ламинат FR-4 для толщин <0.5mm	Нагревостойкий ламинат FR-4 для толщин <0.5mm	Нагревостойкий ламинат FR-4 для толщин <0.5mm	Стандартный ламинат FR-4 для толщин <0.5mm	Нагревостойкий ламинат FR-4 для толщин <0.5mm	Нагревостойкий ламинат FR-4 для толщин <0.5mm	Нагревостойкий ламинат FR-4 для толщин <0.5mm
Физические свойства материалов								
Температура стеклования	T _g TMA / DSC	150°C /	183°C / 183°C	175°C / 175°C	DSC 135°C	DSC 150°C	DSC 180°C	DSC 170°C
Коэффициент термического расширения CTE ppm/°C	X ppm/°K	15~19	12~15	12~15	-	-	-	-
	Y ppm/°K	17~21	14~17	14~17	-	-	-	-
	Z (<T _g) ppm/°K	40~55	50~60	35~45	70	35~40	-	45
	Z (>T _g) ppm/°K	150~220	200~300	180~240	280	250	250	230
	Z 40-260°C (%)	2.7-3.0	-	2,8	-	3	3,5	2.8
Устойчивость к термоудару	T-260°C без медной фольги	>60 мин	>60 мин	>60 мин	-	~ 60 мин	> 60 мин	> 60 мин
	T-288°C без медной фольги	>30 мин	>30 мин	>30 мин	≥20 с	~ 10 мин	~ 30 мин	~ 30 мин
	T-260°C с медной фольгой	>10~20 мин						
	T-288°C с медной фольгой	≥10 с						
Температура декомпозиции	при потере веса 5%	340-350°C	340-360°C	340-360°C	310-315°C	330°C	350°C	340°C
Водопоглощение	%	0.02~0.04	0.05~0.07	0.04~0.06	0.16	0.10 для толщин > 0,5mm	0.20 для толщин > 0,5mm	<0.15
Адгезия медной фольги к диэлектрику	18мкм (Н/мм)	1.2~1.4	1.2~1.4	1.1~1.4	-	-	-	-
	35мкм (Н/мм)	1.4~1.5	1.5~1.7	1.4~1.6	-	> 1.3	1.225	1.0
Диэлектрическая константа ε	f = 1 MHz	4.8~5.0	4.7~4.8	4.6~4.8	4.6~4.9	4.8~5.1	4.5~4.9	4.5
	f = 1 GHz	4.3~4.5	4.2~4.3	4.2~4.4	-	-	-	4.17
Тангенс угла диэлектрических потерь	f = 1 MHz	0.007	0.0130~0.0150	0.0110~0.0130	0.019	0.013-0.015	0.020	0.014
	f = 1 GHz	0.011	0.0210~0.0220	0.0170~0.0190	-	-	0,0189	0.0161
Сопротивление изоляции	МОм	1*E8 ~ 1*E9	1*E8 ~ 1*E10	1*E8 ~ 1*E10	-	-	-	-
Поверхностное электрическое сопротивление C-96/35/90	МОм	1*E8 ~ 1*E9	1*E7~1*E8	1*E8 ~ 1*E9	-	3*E6	8*E6	3*E8
Объемное электрическое сопротивление C-96/35/90	МОм*см	1*E9~1*E10	1*E9~1*E10	1*E9 ~ 1*E10	6.0*E6	4*E8	1.8*E7	2.6*E8
Устойчивость к миграции ион. Cu	CAF (часов)	>1000	>2000	>2000	нет	>1000	>500	>2000
Горючесть	UL-94	V0	V0	V0	V0	V0	V1	V2
Соответствие стандарту IPC 4101B		92, 93	24,26,124,129	98, 99, 126	21	97	24	98
Пригодность к бессвинцовой технологии		да	да	да	нет	да	да	да
Отвердитель смолы		фенол	фенол	фенол	амин	фенол	фенол	фенол
Наполнитель	Не органический	да	да	да	нет	да	нет	да

Таблица 9 Перечень выпускаемых базовых материалов для производства ЭВА

MCL-67G(H) MCL-67G(J) MCL-E-73	Нагревостойкие ламинаты FR-4 для производства ДПП и МПП
MCL-679(W) MCL-679F(J) MCL-679FG MCL-679GT	Ламинаты FR-4,5 с высокой температурой стеклования ДПП, МПП и для микроэлектроники.
MCL-LX-67Y MCL-LX-67F MCL-LZ-71G MCL-HE-679G MCL-FX-2	Материалы для ВЧ и СВЧ применения, ДПП и МПП.
MCL-5000I серия	Сверхтонкие ламинаты и адгезивы (плёнки) на основе стеклотекстолита для производства МПП, плоских кабелей, шлейфов, ЖГПП.
MCL-I-671	Полиимидные материалы для ДПП и МПП
AS-Z2	Диэлектрические пленки и адгезивы для полупроводниковой технологии
AS-3000 AS-2600 AS-2600W	Адгезивные пленки на основе эпоксидных смол