

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Сегодня на предприятиях России более половины технологического оборудования по производству печатных плат (ПП) – все еще оборудование 80-х годов, которое устарело как морально, так и физически. Поэтому возникший перед предприятиями вопрос о необходимости организации нового производства ПП или модернизации действующего приобретает все большую остроту. С чего начинать эту работу? Как правильно поставить задачу на этапе технологической подготовки производства? На какие технические и организационные проблемы обратить внимание в первую очередь? На эти и другие вопросы отвечают специалисты ООО "Петрокоммерц".

Первый вопрос, естественно, состоит в том, **какие ПП будет выпускать данное производство**. В условиях рыночных отношений всегда можно найти поставщика любого типа ПП в России или за рубежом, ориентированного на экспресс-производство прототипов или на крупные серии. Поэтому задачей реконструкции должен стать выпуск плат более дешевых или более качественных, или в более короткие сроки, чем у конкурента, или же таких, которых еще нет на рынке. При этом независимо от выбираемого сегмента рынка – односторонние, двухсторонние ПП, МПП – производство должно быть рентабельным, срок окупаемости составлять от четырех до восьми лет, выход годной продукции – не менее 95%. Это означает, что встает вопрос специализации производства, а следовательно, выбора оборудования, технологии, материалов, соответствующих данной специализации.

Конечно, на производстве ПП высокой плотности, оснащенном чистыми зонами, высокоточными установками совмещения и экспонирования, механической обработки, можно изготавливать и простые двухсторонние платы, но сколько они будут стоить? Можно и на простом оборудовании пытаться наносить рисунок 5-го класса плотности, но с каким выходом годных и, опять-таки, какой стоимости? Поэтому в первую очередь необходимо решить задачи стабильного выпуска плат нужного объема и качества, минимизации расходов на подготовку производства, в том числе на закупку оборудования, инженерную подготовку и строительные-монтажные работы, оптимизации производственных расходов, максимальной загрузки оборудования при поддержании выхода годных ПП на уровне не менее 95%.

Поэтому в первую очередь необходимо решить задачи стабильного выпуска плат нужного объема и качества, минимизации расходов на подготовку производства, в том числе на закупку оборудования, инженерную подготовку и строительные-монтажные работы, оптимизации производственных расходов, максимальной загрузки оборудования при поддержании выхода годных ПП на уровне не менее 95%.



М.Будневич

Для того чтобы определить, в каком сегменте рынка следует работать, надо знать тенденции развития этого рынка. Данные, приведенные в таблице, взяты из отчета, выпущенного EIPC совместно с Ассоциацией немецких инженеров. Анализ этих данных показывает постоянный рост требований, предъявляемых к ПП.

Требования, предъявляемые к технологии и оборудованию для производства ПП, сильно зависят от степени интеграции используемых ИС и, соответственно, от размера элементов ПП (рис. 1).

Уже на самом первом этапе планирования нового производства необходимо определить уровень интеграции ПП, намечаемых к производству. Исходя из этого, можно предположить класс плат, число слоев, размер элементов, а на основании этих параметров – уровень технологии, класс оборудования. Естественно, чем выше

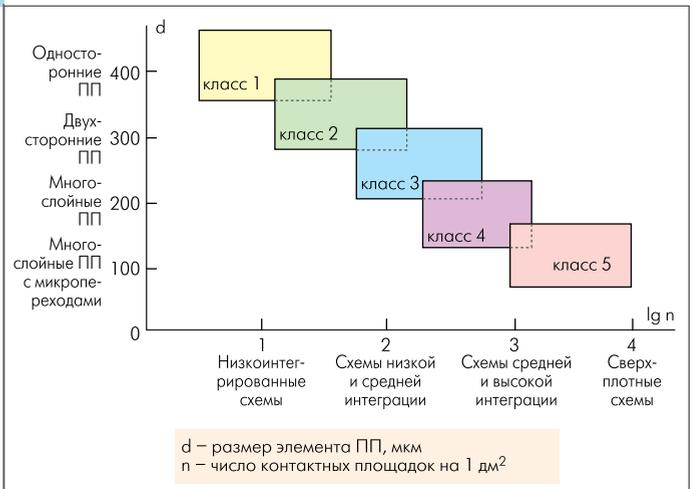


Рис. 1. Зависимость класса ПП от уровня используемых ИС

пределный уровень плотности ПП, тем выше капитальные и эксплуатационные затраты. Если на этом же производстве возникнет желание выпускать платы и более низких классов, то накладные

Параметры ПП за 2000/2003/2006 годы

Параметр	Вид техники			
	Автомобилестроение	Телекоммуникации	Вычислительная техника	Бытовая электроника
Базовый материал	FR4/FR4/FR4 арамид	FR4/FR4/FR4 арамид/арамид	FR4/FR4/FR4 арамид	FR4/FR4/FR4 –
Число слоев	6/6/4	8/8/4	8/10/10	2/2-4/2-4
Минимальное значение проводник/зазор, мкм	150/125/100	150/100/75	100/75/50	250/200/150
Минимальный диаметр сквозного отверстия, мм	0,4/0,4/0,3	0,3/0,25/0,25	0,25/0,25/0,2	0,6/0,6/0,4
Минимальные глухие и запечатанные отверстия, мм	0,15/0,15/0,15	0,15/0,1/0,075	0,15/0,1/0,1	–
Максимальное число отверстий на ПП	5,000/7,000/1,0000	3,000/4,000/5,000	10,000/11,000/12,000	250/350/450
Среднее число выводов на 1 дм ²	1,600/2,700/5,400	4,800/5,200/5,400	2,100/3,600/7,500	–
Максимальное число выводов элементов	196/364/480	144/256/308	364/480/1200	–

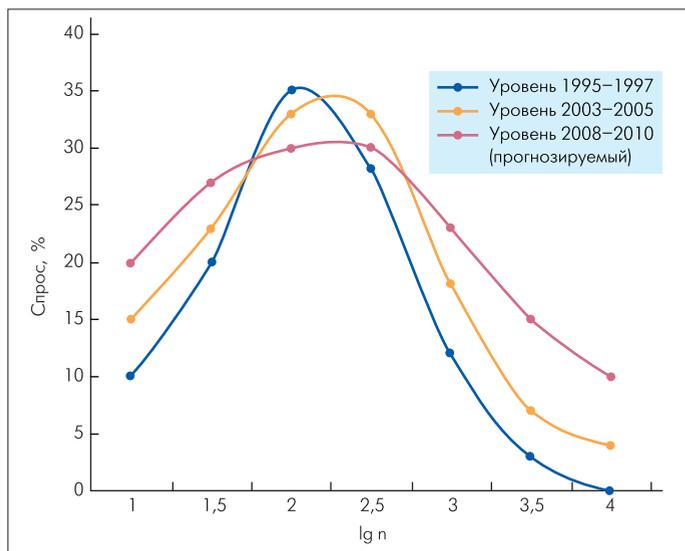


Рис.2. Зависимость спроса на ПП от плотности их компоновки

расходы, приходящиеся на простые ПП, окажутся столь велики, что себестоимость простых и сложных плат станет почти одинаковой, но простые платы будут неконкурентоспособны. Отсюда вывод — при планировании производства необходимо предусмотреть максимально возможную его специализацию.

Следующий вопрос — в том, **специализация по какому классу ПП перспективна** для рынка России сегодня и в ближайшие годы. Для ответа можно проанализировать имеющуюся статистику изменения рынка за восемь лет на примере потребления базовых материалов в России. Анализ показывает постоянное увеличение потребления тонких материалов и препрега, что свидетельствует об увеличении спроса на МПП, т.е. о росте заказов на сложные ПП. Одновременно в последние 2–3 года резко возрос спрос на дешевые материалы для двухсторонних и односторонних ПП, т.е. становится целесообразной специализация по крупносерийному выпуску плат низкой и средней интеграции. Потребление качественных базовых материалов в небольших объемах (по 10–20 м² в год) за последнее время мало изменилось. Это говорит о том, что для мелкосерийных производств ПП средней и высокой степени интеграции рынок остается стабильным, особенно для заказов, связанных с оборонным комплексом.

Принимая во внимание общую для всех сегментов рынка ПП тенденцию к повышению плотности компоновки, при планировании производства нужно учитывать, что спрос за время его подготовки — 2–3 года — сместится в сторону повышения плотности ПП (рис.2) и увеличения объемов производства. Это означает, что планируемая технология должна хотя бы на полшага опережать сегодняшние потребности, а объем производства иметь запас в 10–20 %.

Предприятие должно реально оценивать свои финансовые возможности и поставленные задачи. Стоимость оборудования, технологии и химикатов при переходе от одного класса ПП к следующему может увеличиться в 3–5 раз. Например, если принимается решение о производстве ПП с проводящими линиями менее 150 мкм, нужно уделить особое внимание созданию окружающей среды. Это чистые помещения или зоны класса 100 000, а, возможно, и 10 000, термостатированные помещения для работы прецизионного оборудования, энергоносители, очищенная и охлажденная вода, технологические газы, очищенный сжатый воздух и т. д. Необходимо учитывать, что стоимость инженерного обеспечения в производстве плотных и сверхплотных плат может составлять до 40% общих затрат. Как уже отмечалось, производство рентабельно только при

выходе годных 95%, а без необходимого инженерного обеспечения добиться этого невозможно.

Следующий ключевой вопрос — **взаимоувязка всего технологического оборудования и процессов**. Рассмотрим несколько важных операций технологического процесса и на их примере убедимся в необходимости индивидуального подхода при выборе технологии.

Первый пример — *подготовка поверхности перед нанесением фоторезиста или защитной паяльной маски*. Если принята задача — изготовление ПП 2–3 класса, то вполне подходит механическая обработка абразивными щетками, которые обеспечивают необходимую структуру медной поверхности и имеют длительный срок службы. Поэтому лучшим вариантом для подготовки простых ПП будет приобретение зачистной машины.

Если поставлена задача изготовления МПП, то для наружных слоев также может использоваться механическая подготовка. Для внутренних же слоев необходимо предусмотреть химическую подготовку поверхности, не подвергающую слою стрессу и мало влияющую на стабильность размеров.

Для изготовления сложных плат (тонкие проводники с небольшим расстоянием между ними, отверстия малого диаметра и микропереходы) механическая подготовка поверхности полностью исключается. Казалось бы, почему? Ведь и механическая подготовка, и химическая обеспечивают одну и ту же степень шероховатости поверхности. Однако из рис.3 четко видно, что при разных углах наклона пиков участок А имеет значительно большую контактную поверхность, обеспечивающую надежность сцепления. Таким образом, в технологическом процессе производства плат 4–5 класса нужно использовать только химическую подготовку поверхности.

Рассмотрим другой пример — *металлизация отверстий и рисунка*. В случае производства ПП до 3-го класса для очистки отверстий под металлизацию достаточно удалить из них пыль и стружку промывкой водой под давлением. Если речь идет об изготовлении МПП, то уже необходимо удалить смолу с торцов контактных площадок после сверления. В данном случае надо ввести дополнительную операцию подготовки отверстий, например химическую подготовку Desmeag. Причем для сквозных отверстий диаметром порядка 0,3 мм этот процесс может осуществляться в вертикальных установках, а для обработки отверстий диаметром 0,15–0,3 мм потребуется уже горизонтальная струйная установка. Если же планируется производство плат 5-го класса, то для обработки отверстий диаметром менее 0,15 мм необходимо использовать сухую очистку плазмой.

Для металлизации отверстий двухсторонних ПП и МПП с числом слоев до 6 и диаметром отверстий до 0,3 мм можно использовать как традиционный процесс химической металлизации, например Circuposit 3000, так и процессы так называемой прямой металлизации, например Crimson 5000, Black Hole и другие, использующие в качестве проводящего слоя сульфид палладия, углерод и т.д. При этом стоит отметить, что по мере увеличения числа слоев возрастает

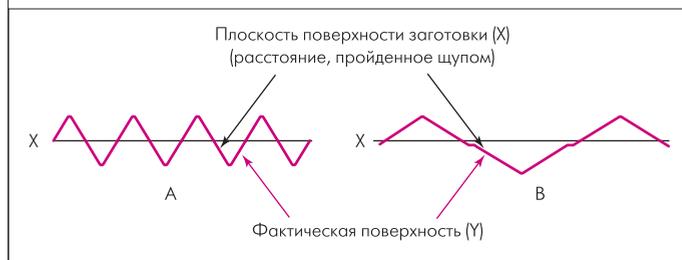


Рис.3. Условное изображение поверхностей, подготовленных химическим (А) и механическим (В) способами

тает опасность проникновения рабочих составов прямой металлизации, например суспензии углерода, между слоями, что может снизить процент выхода годных плат. Для плат с большим числом слоев, высокой плотностью рисунка и с диаметром переходных отверстий менее 0,3 мм по-прежнему актуальным остается процесс химической металлизации отверстий Circuposit 4000, осуществляемый в автоматических горизонтальных струйных установках с жестким контролем всех параметров процесса.

Класс плат, которые необходимо изготовить, определит и *выбор защитной паяльной маски*. Для ПП 1–2 класса, а также при больших сериях экономически оправдано использование трафаретных масок, наносимых на том же сеткографическом оборудовании, что и маркировочные краски. Для плат средней степени интеграции целесообразно использование сухой пленочной фотопроявляемой защитной паяльной маски, но применение ее потребует дополнительных капиталовложений на приобретение оборудования для ее нанесения. По мере усложнения ПП при значениях проводник/зазор от 0,1/0,1 мм и менее можно использовать только жидкую фотомаску, а при работе с отверстиями менее 100 мкм необходимо оборудование "мокрого занавеса" и прецизионные печи. Здесь следует помнить, что каждый шаг на пути усложнения ПП влечет значительное удорожание используемых материалов и химикатов.

Теперь **о выборе оборудования** – его уровня и класса, которые требуются для планируемого производства. Точность машин необходимо оптимизировать исходя из поставленной задачи. При этом надо быть уверенными, что во всей технологической цепочке нет ни одного слабого звена, а наличие избыточной прецизионности на 1–2 операциях приведет только к усложнению обслуживания и удорожанию всего комплекса.

В качестве примера рассмотрим ключевой момент производства ПП – *систему экспонирования и совмещения*. На что нужно обратить внимание при выборе этого оборудования? Основные фак-

торы, определяющие результат комплекса операций экспонирования/совмещения, это:

- качество экспонирования (разрешение) и точность совмещения при экспонировании;
- окружающая среда (температура, влажность, наличие частиц пыли);
- стабильность геометрических размеров фотошаблона;
- совмещение рисунка при последующих операциях (прессование, сверление).

Для серийного производства ПП с разрешением до 200 мкм вполне достаточно установок экспонирования, построенных по принципу источника рассеянного света, основная функция отражателя которых – увеличение удельной освещенности в плоскости фотошаблона (фоторезиста). Отличительная черта таких установок – простота устройства и эксплуатации, достаточная удельная энергия экспонирования и неравномерность потока света по полю до 50%. Из-за присущих таким установкам боковых пучков света размыв края рисунка может достигать половины толщины фоторезиста (до 20–30 мкм). Однако здесь есть и преимущество – в таких установках пылевые частицы, попадающие в зону экспонирования, не причиняют значительного вреда именно благодаря боковым пучкам, поскольку их отпечаток размывается (рис.4а). Конечно, речь идет о частицах разумного размера – не более 30 мкм.

Производство ПП такого уровня не требует организации специальных чистых комнат. Вполне достаточно климатизированных помещений с колебанием температуры до 5°C и влажности до 20%. Перегрев фотошаблона в зоне экспонирования в таких установках может достигать 10°C, что приводит к изменению диагонали фотошаблона в 500 мм на 90 мкм. Еще одна из особенностей таких установок экспонирования – устройство совмещения рисунка в них не является составной частью установки. Это, по своей сути, некоторое дополнительное приспособление, которым установку оснащает сам пользователь.

В более простых случаях совмещение выполняется с помощью различных "конвертов", пистонов, кнопок, а в более сложных применяются специальные рамки экспонирования со встроенными штифтами. Однако для устойчивого серийного производства ПП перешагнуть порог разрешения 0,20/0,20–0,17/0,17 мм не позволяют даже лучшие установки этого класса.

Выпуск ПП с разрешением зазор/проводник 0,15/0,15 мм предъявляет особые требования к окружающей среде, системе экспонирования и системе совмещения. Установки экспонирования для таких ПП представляют собой оптические машины со специализированными источниками света. Очень важная особенность этих современных установок заключается в том, что система совмещения фотошаблонов и заготовки, а также система охлаждения установок и термостабилизации фотошаблона – неотъемлемые элементы их конструкции.

Установки экспонирования, предназначенные для производства ПП высокой степени интеграции, могут иметь угол расхождения световых пучков до 9–10° и оптический размыв края рисунка до 3–5 мкм (чем тоньше фоторезист, тем меньше размыв). Эти установки оснащаются точечным источником света, и в таких машинах пылевые частицы в зоне экспонирования уже могут повлиять на качество отпечатка из-за относительно малого угла расхождения светового потока (рис.4б). Отсюда и вытекают требования к чистоте производственного помещения. Это обязательно должны быть чистые комнаты класса 10 000–100 000.

При экспонировании ПП уже не применяется пробивка базовых отверстий в фотошаблонах и совмещение фотошаблонов между со-

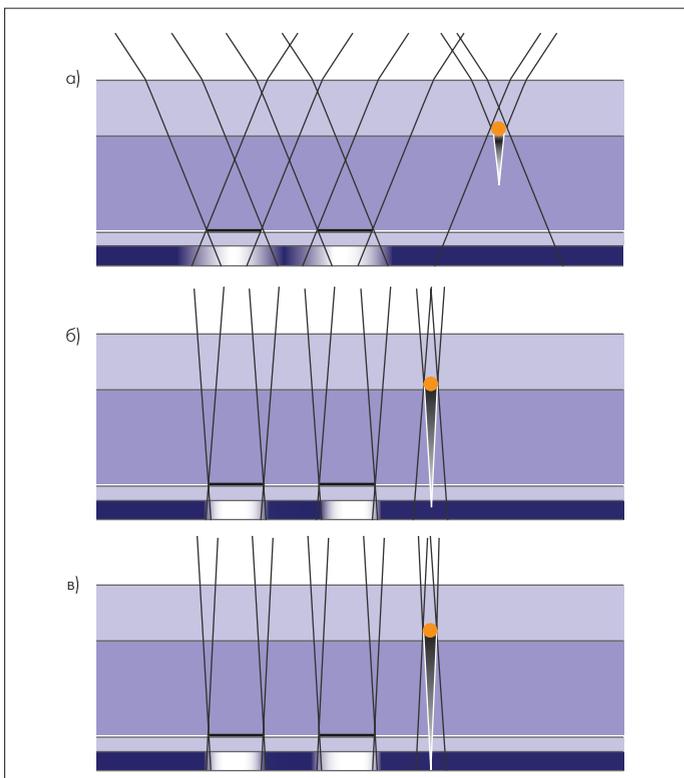


Рис.4. Влияние загрязнения фотошаблона на результат экспонирования фоторезиста: а) в лучах рассеянного источника света; б) в лучах точечного источника света; в) в лучах РОК источника света



бой и с заготовками с помощью различных штифтов. Такой метод не дает нужной точности совмещения. Совмещение в таких установках выполняется с помощью специальной системы перемещения фотошаблонов и заготовки на основе автоматического или полуавтоматического анализа изображения расположения реперов, внесенных в технологическое поле фотошаблона.

Следующий уровень – это установки экспонирования с источником света типа РОК – "практически оптимизированный коллимированный". Угол расхождения их световых пучков составляет 5–6°, оптический размыв края – 1,7–2,6 мкм (рис. 4в). Такие установки ориентированы на производство ПП с размерами элемента до 50 мкм. Соответственно возрастают и требования к условиям производства (класс чистых комнат не ниже 10 000). Естественно, совмещение в таких установках также выполняется с помощью специальной системы перемещения фотошаблонов и заготовки на основе анализа изображения реперов.

В том гипотетическом случае, когда требуется создать производство, ориентированное на суперплаты с шириной линий менее 50 мкм, необходимы установки экспонирования с источником света типа "коллимированный источник", имеющие угол расхождения световых пучков порядка 1–1,5° и дающие оптический размыв края 0,3–1 мкм. Переход от одного класса машины к следующему – это повышение цены машины на 100 тысяч евро, и не только... Это и обязательное повышение класса чистой комнаты, что составляет еще десятки тысяч евро. Если приобретается более совершенная машина, но не повышается класс чистоты, это идет только во вред производству.

Оптическое разрешение нельзя рассматривать в отрыве от системы *термостабилизации фотошаблона* и систем совмещения, встроенных в установку. Необходимо остановиться на самом носителе информации – фотошаблоне. Как было сказано выше, в ходе экспонирования на фотошаблон не должны оказываться воздействия, способные привести к недопустимому искажению геометрии исходного изображения. Речь идет об изменении температуры фотошаблона в результате нагрева. Пленки, применяемые для фотошаблонов, имеют значение теплового расширения порядка 18 мкм/°С·м. Это означает, что если в процессе экспонирования фотошаблон размерами 500х500 мм нагреется на 10°С, то его диагональ увеличится примерно на 127 мкм, что недопустимо при производстве высокоточных ПП.

Нагрев фотошаблона может происходить по двум основным причинам. Первая – ИК-излучение, присутствующее в спектре УФ-лампы и попадающее на заготовку и фотошаблон. Вторая причина – в тепло переходит та часть потока УФ-излучения, которая задерживается черной, непрозрачной частью фотошаблона. При удельной мощности экспонирования 20 мВт/см² эта часть составляет около 2 кВт/м². А это очень много. При выборе установки экспонирования для ПП высокой степени интеграции нужно быть уверенными, что перегрев фотошаблона не превышает 3°С.

Пример экспонирования говорит о том, что при выборе технологического оборудования следует оптимизировать требования как к отдельным его единицам, так и ко всему комплексу в целом. Высокий уровень точности отдельных установок, не согласованный со всем технологическим комплексом, чаще всего приносит только вред создаваемому производству.

Следующий вопрос, над которым необходимо задуматься, – это **уровень автоматизации технологического процесса**. Сегодня рабочая сила в России достаточно дешевая, особенно в провинции, однако при планировании крупносерийного производства надеяться на такую экономию нельзя. Во-первых, уровень оплаты

труда постоянно растет, а, во-вторых, при больших сериях для достижения 95%-ного выхода годной продукции необходим тот автоматизм, который человек обеспечить не может. Есть и технологические особенности автоматизации. При производстве, например, сверхплотных плат после операции химподготовки до проявления рисунка схемы человек не должен прикасаться к заготовке опять-таки для обеспечения 95%-ного выхода годных.

Обучение технического и сервисного персонала – важная задача. При покупке отдельных позиций оборудования или внедрении технологических операций важно не только включить в условия контракта обучение своего персонала, но и быть уверенными, что фирма-продавец имеет в России надежную сервисную службу. Вызов наладчика из Японии, Швейцарии или Китая – это десятки дней простоя оборудования.

Два слова о заготовках. При выборе количества типоразмеров заготовок необходимо помнить, что каждый дополнительный типоразмер – это дополнительная оснастка оборудования и, наверняка, снижение степени автоматизации. Например, в 1998 году во время командировки на завод Siemens в г. Карлсруе, выпускавшем широкую номенклатуру плат разных размеров, наши специалисты были свидетелями перехода с двух типоразмеров заготовок на один. Почему? Так оказалось выгоднее. Несмотря на снижение коэффициента использования материала, отпала необходимость в закупке новых машин и оснастки и появилась возможность дополнительной автоматизации производства. При выборе стандартной заготовки лист должен делиться на 4, 6 или 9 частей, планировать меньшие размеры стандартных заготовок нецелесообразно. Края заготовок должны быть полированными.

Таким образом, при планировании производства следует определить, кто готовит ТТ, кто готовит ТЗ, разрабатывает технологическую схему процесса, подбирает комплект технологического оборудования, определяет необходимые климатические условия, разрабатывает и заказывает оснастку, выбирает поставщиков материалов и химикатов, кто будет внедрять отдельные операции технологического процесса и весь процесс в комплексе, кто будет работать с проектировщиками и строителями, осуществлять гарантийное и постгарантийное обслуживание. Надо помнить, что в случае какого-либо отказа оборудование должно быть восстановлено в кратчайший срок и не может в течение 2–3 недель ожидать наладчика из-за рубежа. Но самое главное – определить, кто будет отвечать за весь комплекс работ и, в конечном счете, за выпуск готовой продукции. ○
