Как проектировать стек многослойной печатной платы

Милан ЙОГЕНДРАППА
(Milan Yogendrappa)
Перевод: Сергей Шихов

При проектировании стека многослойной печатной платы (МПП) инженер-конструктор должен определить последовательность слоев, выбрать подходящие материалы и расположить слои питания, заземления и сигнальных цепей, принимая во внимание такие электрические характеристики и технологические требования, как плотность трассировки, волновое сопротивление, надежность распределения питания на плате и т.д.
В статье рассматриваются понятие стека, состав МПП, технология ее изготовления, приводятся рекомендации по разработке надежных плат с учетом экономической эффективности их изготовления.

Введение

В этой публикации освещаются следующие вопросы.

1. Определение оптимальной структуры слоев для реализации сложной трассировки и обеспечения целостности сигналов.
2. Выбор подходящих материалов, толщины медных слоев и характеристик диэлектриков.
3. Использование слоев питания и заземления для обеспечения стабильного распределения напряжения и снижения электромагнитных помех.
4. Соблюдение технологических требований к изготовлению для обеспечения качества платы и ее соответствия эксплуатационным характеристикам.

Что такое стек печатной платы

Стек (stack-up), или структура слоев,– это описание конструкции многослойной печатной платы с указанием последовательности расположения ее слоев. В нем приводятся важные для производства сведения, в том числе значения толщины материалов и медных слоев (рис. 1).

В стеке также указываются параметры проводников для цепей с контролируемым волновым сопротивлением, например, 50 Ом для одиночной линии или 100 Ом для дифференциальной пары.

Из каких слоев состоит печатная плата

В состав многослойной печатной платы входят медная фольга, препрег и фольгированный диэлектрик – ядро (рис. 2).

- ***Медная фольга***. В качестве проводящего материала при изготовлении печатных плат чаще всего используется медь.
- ***Препрег***. Это стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой, которая находится в частично отвержденном состоянии (рис. 3). При последующем прессовании смола обеспечивает склеивание слоев.
- ***Фольгированный диэлектрик***. Диэлектрическая основа из одного или нескольких слоев стеклоткани с отвержденной смолой, облицованная медной фольгой с одной или обеих сторон.



Рис. 1. Структура шестислойной печатной платы. Толщина слоев указана в дюймах

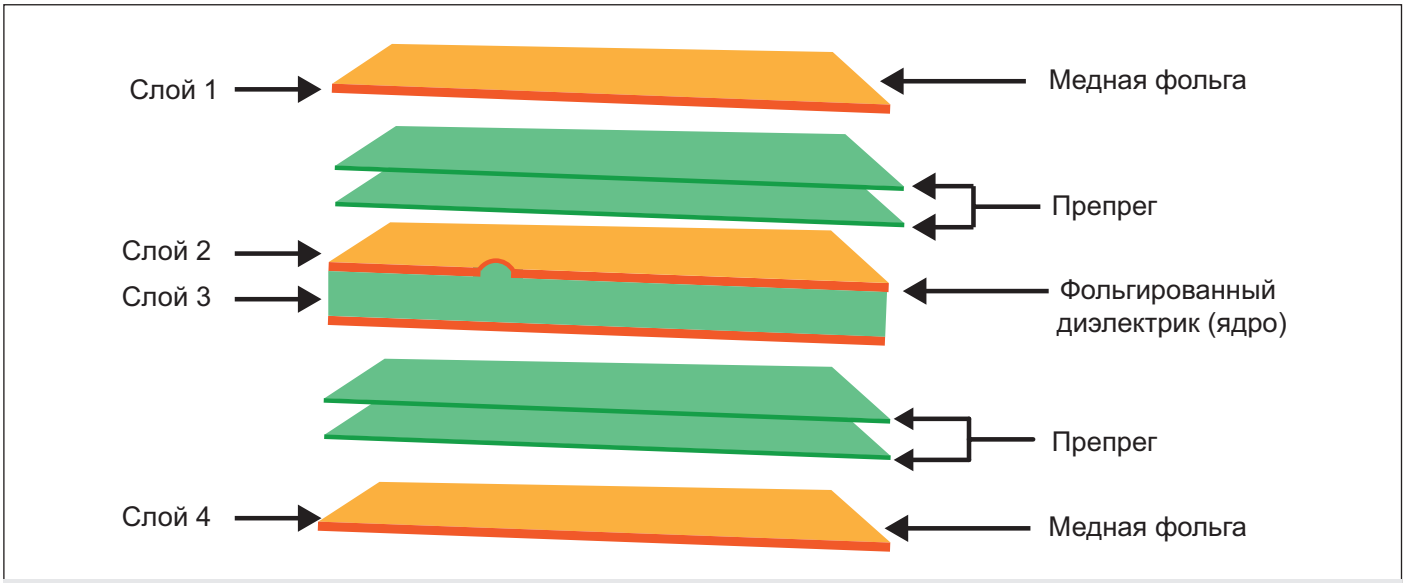


Рис. 2. Основные слои многослойной печатной платы

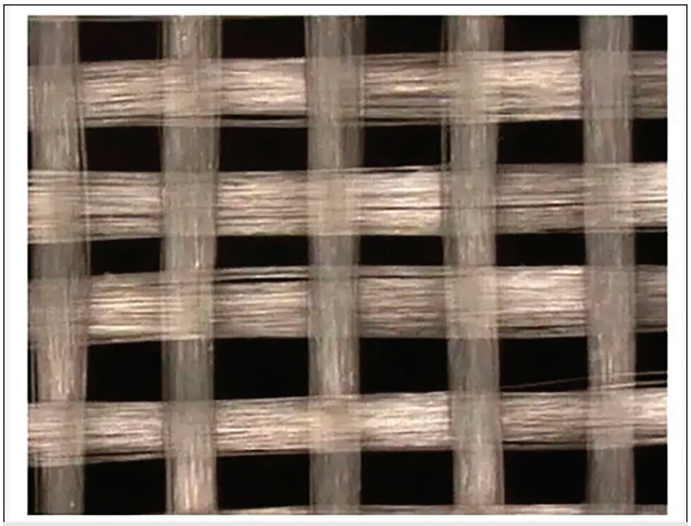


Рис. 3. Переплетение стеклянных нитей в стеклоткани препрега

Слои питания и заземления в печатной плате

Слой питания – это слой меди, электрически соединенный с цепью питания платы. Слой общей земли (заземления) – медный слой, соединенный с общей цепью возврата тока.

Основное назначение слоя питания – обеспечить подачу напряжения на электрические цепи платы. В многослойной конструкции вывод питания компонента может быть соединен с соответствующим слоем через переходное отверстие.

Применение слоев питания и заземления в стеке печатной платы позволяет:

1) упростить подключение выводов питания и земли электронных компонентов;
2) обеспечить более точный путь возвратного тока, что особенно важно для высокоскоростных сигналов, так как помогает снизить уровень электромагнитных помех (ЭМП);
3) уменьшить потери мощности и локальный нагрев. Слои питания, имеющие большую ширину проводящего участка, обладают лучшей токонесущей способностью, чем отдельные узкие про-

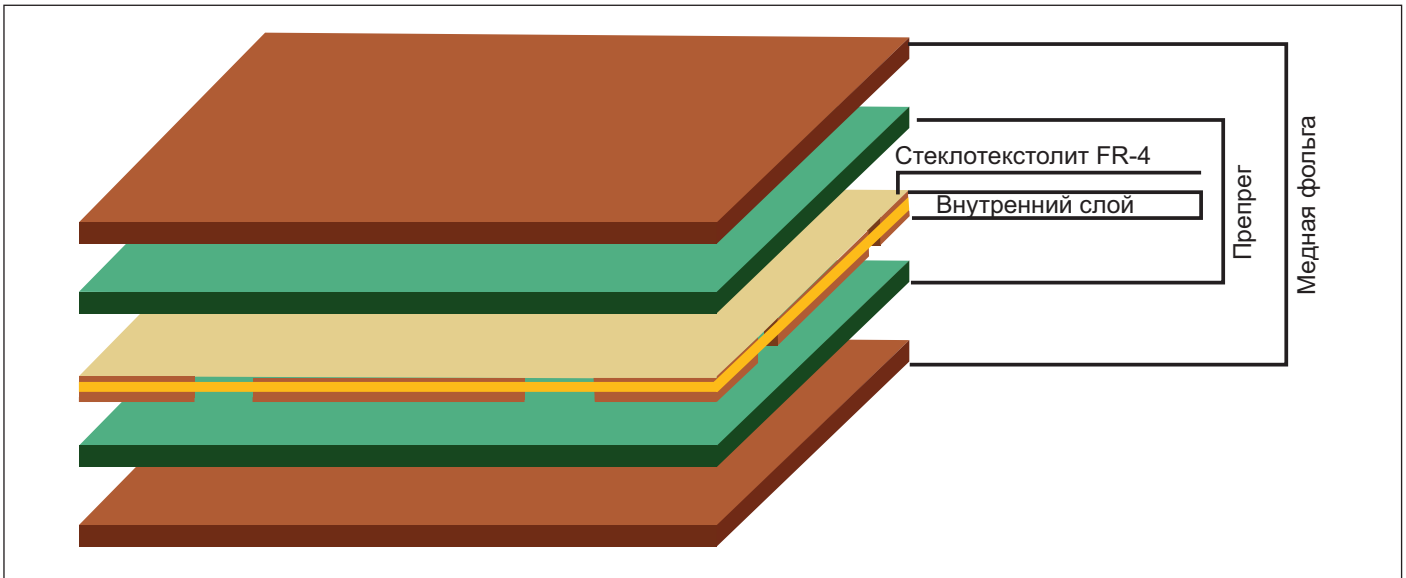


Рис. 4. Ламинирование многослойной печатной платы

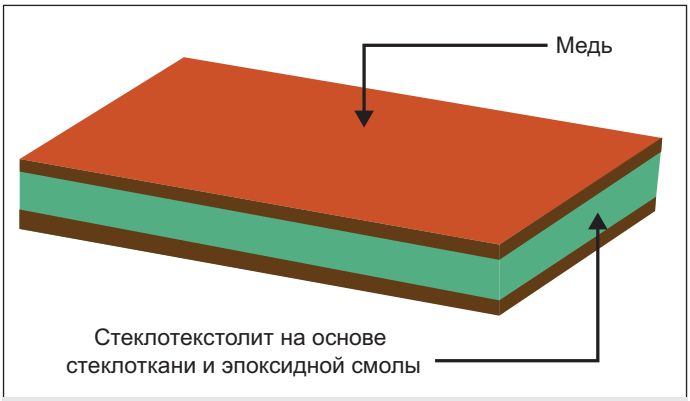


Рис. 5. Материал сердцевины печатной платы

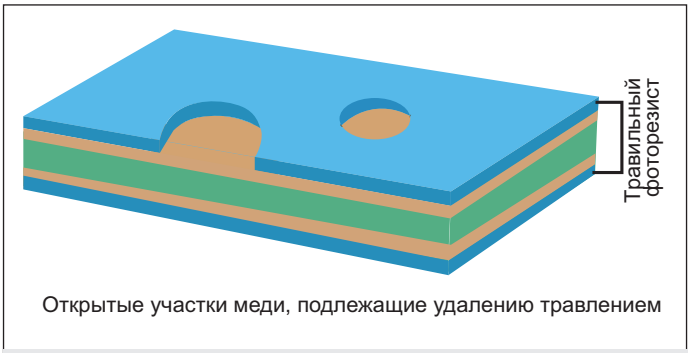


Рис. 6. Формирование изображения рисунка внутреннего слоя

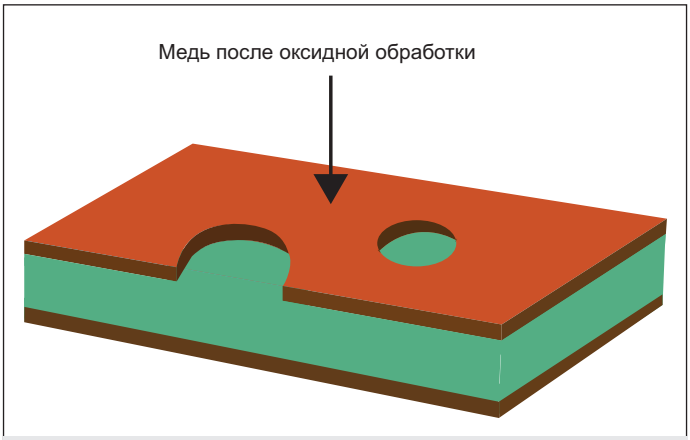


Рис. 7. Оксидная обработка печатной платы

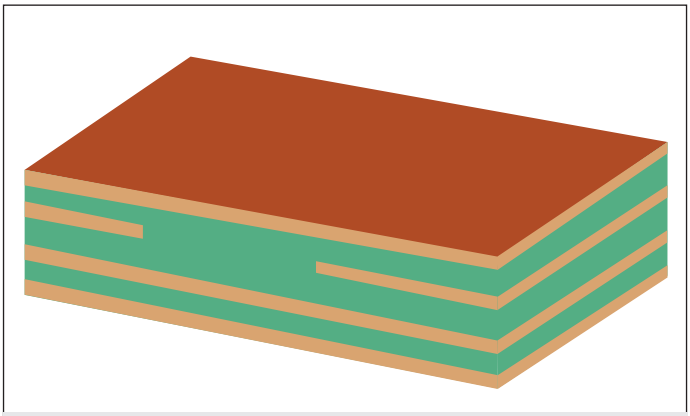


Рис. 8. Ламинирование стека слоев многослойной печатной платы

водники. При правильном проектировании это обстоятельство позволяет снизить локальный нагрев платы.

Ламинирование печатной платы

Ламинирование – это технологический процесс соединения слоев конструкции под воздействием температуры и давления.

При изготовлении МПП препрег и медную фольгу объединяют с внутренними слоями, формируя единую структуру. Значения температуры и давления определяются характеристиками выбранных материалов и технологическим процессом производителя.

Стандартная толщина печатной платы

Типовая толщина обычной печатной платы составляет около 1,57 мм (62 мил). Фактическая толщина зависит от конструкции платы, количества слоев, толщины меди и характеристик применяемых материалов.

Толщина отдельных конструкций, в том числе плат с повышенными требованиями к механическим и электрическим характеристикам, может принимать и другие значения. В качестве примеров в отраслевой практике встречаются значения 2,36 мм (93 мил) и 3,175 мм (125 мил), которые составляют приблизительно 150 и 200% от 1,57 мм, соответственно.

Технические преимущества многослойных печатных плат

Современные электронные устройства содержат множество компонентов, соединенных между собой электрическими цепями. При высокой плотности соединений разместить все необходимые проводники на одной стороне печатной платы зачастую сложно или невозможно. Многослойная структура позволяет распределять проводники по нескольким слоям, упростить трассировку сложных схем, выделить отдельные слои питания и земли, а также улучшить условия передачи сигналов. Это помогает эффективнее использовать площадь платы и создавать сложные электронные устройства.

Перечислим основные преимущества многослойных печатных плат.

1. *Реализация сложных электрических схем.* Дополнительные проводящие слои позволяют размещать больше соединений на ограниченной площади и упрощают трассировку плат с высокой плотностью монтажа.
2. *Оптимизация электрических характеристик.* Отдельные слои питания и земли помогают организовать распределение питания и пути возвратных токов. При правильном проектировании структуры слоев это также дает возможность улучшить целостность сигналов и контролировать электромагнитные помехи.
3. *Рациональное использование пространства.* Размещение проводников на нескольких слоях уменьшает площадь платы по сравнению с некоторыми однослойными или двусторонними решениями. При этом многослойная конструкция не обязательно делает плату тоньше или легче, так как итоговые габариты и масса зависят от конструкции устройства, числа слоев, материалов и требований к механической прочности.

Процесс изготовления многослойных печатных плат

Изготовление многослойных печатных плат включает в себя последовательную подготовку внутренних слоев с рисунком проводников, точную укладку слоев с изоляционными материалами и их соединение под воздействием температуры и давления. В результате формируется единая конструкция с электрическими соединениями между слоями.

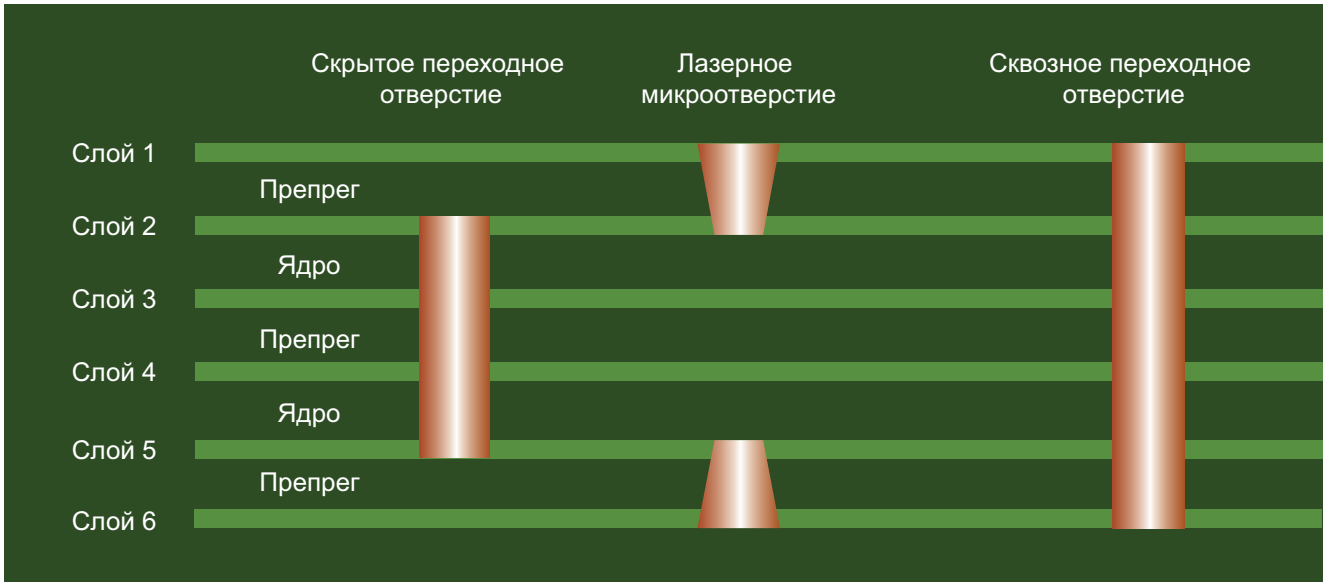


Рис. 9. Химическое осаждение меди в просверленных отверстиях многослойной печатной платы

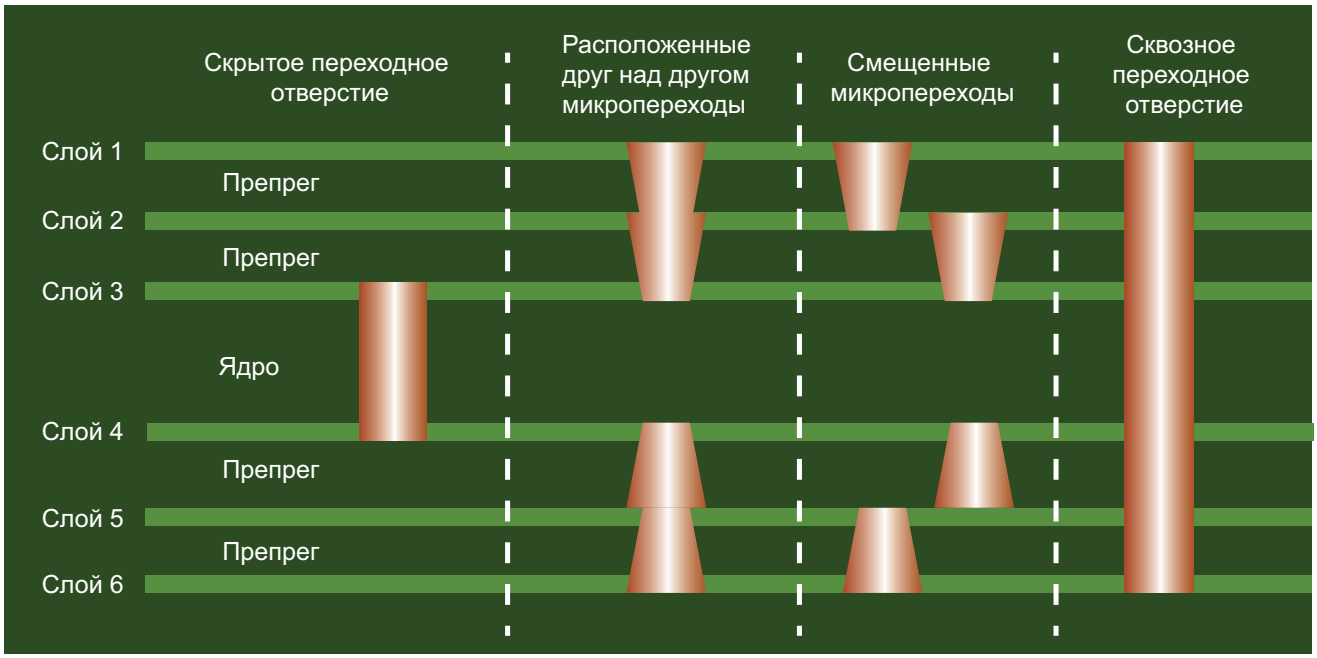


Рис. 10. Структура шестислойной печатной платы с микроотверстиями

Этап 1. Выбор материала для внутренних слоев

Материалы, используемые для изготовления платы, выбирает разработчик на стадии проектирования исходя из особенностей конструкции, которая, в свою очередь, зависит от назначения изделия (рис. 5). В производственной документации обычно указывают:

- толщину меди;
- тип стеклотекстолита, используемого в качестве диэлектрика;
- размеры заготовки (технологической панели).

Этап 2. Очистка

Внутренние слои очищают химическим, механическим или комбинированным способом, чтобы удалить загрязнения с поверхности меди.

Этап 3. Формирование изображения рисунка внутренних слоев

На поверхность меди наносится светочувствительный материал – фоторезист (рис. 6), который защищает участки меди, которые должны остаться в составе рисунка проводников, и оставляет открытыми участки, подлежащие удалению.

Этап 4. Травление и удаление фоторезиста

Внутренние слои подвергают химическому травлению, удаляя ненужную медь. Затем фоторезист удаляют, открывая сформированный рисунок проводников.

Этап 5. Автоматический оптический контроль

Автоматический оптический контроль (АОИ) применяется для выявления дефектов рисунка проводников внутренних слоев, в том

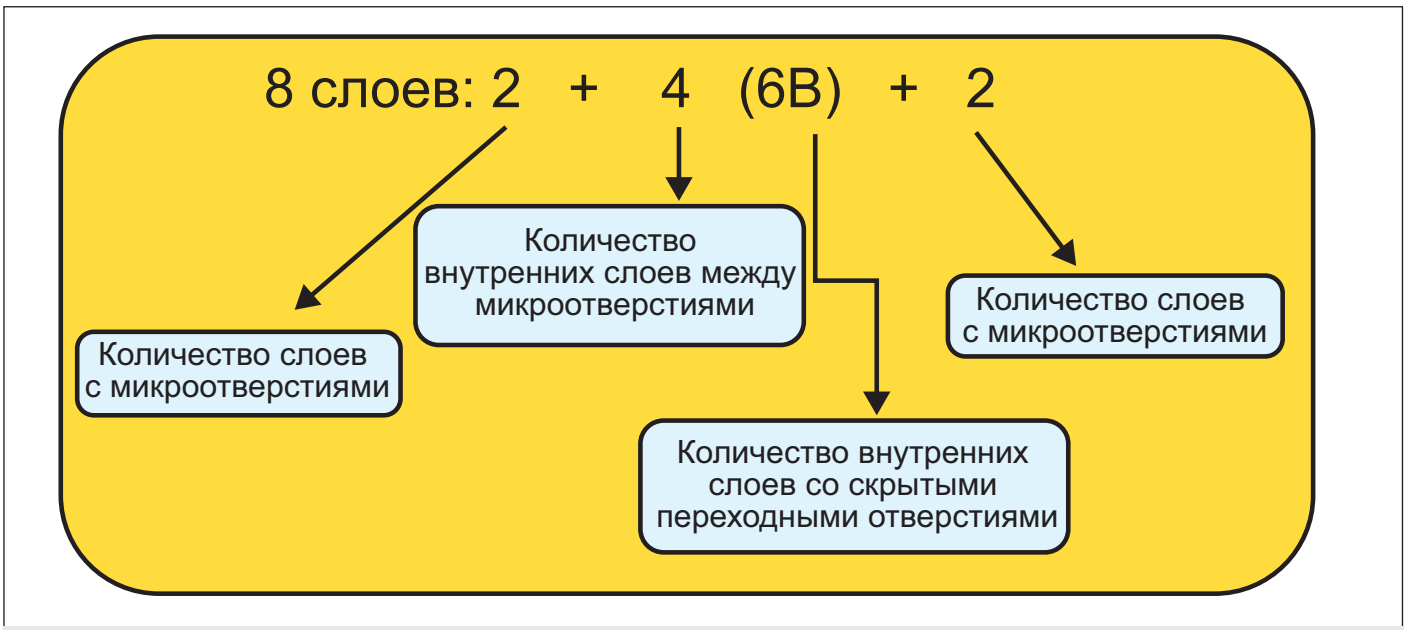


Рис. 11. Шестислойная структура с расположенными друг над другом и смещенными микроотверстиями

числе коротких замыканий и обрывов, которые могут остаться незамеченными при визуальном осмотре.

Этап 6. Оксидная обработка

Перед ламинированием открытые участки меди на внутренних слоях подвергают специальной обработке, повышающей адгезию между слоями (рис. 7). Улучшение сцепления придает бóльшую механическую прочность конструкции, что имеет значение для обеспечения надежности печатной платы.

Этап 7. Сборка стека слоев

Операции с первого по шестой этап повторяют для всех внутренних слоев. Например, при изготовлении шестислойной печатной платы их выполняют для слоев L2, L3, L4 и L5.

Этап 8. Ламинирование

На этом этапе стек слоев помещают в вакуумную камеру, где его нагревают и прессуют (рис. 8). Сначала создают вакуум, чтобы удалить захваченный воздух и газы, а затем под воздействием давления стек подвергают тепловой обработке. В результате размягченная смола препрега обеспечивает соединение слоев в цельную конструкцию.

Этап 9. Сверление

После ламинирования заготовку платы устанавливают на подкладной материал на рабочем столе сверлильного станка, где при помощи сверловки формируют переходные и сквозные монтажные отверстия.

Подкладной материал уменьшает образование заусенцев – выступов меди, возникающих при выходе сверла из платы.

Этап 10. Удаление заусенцев и смолы из отверстий

На этом этапе удаляют загрязнения с поверхности меди и медные заусенцы, появившиеся при сверлении, а также убирают смоляной налет – размягченные и размазанные по стенкам отверстий остатки эпоксидной смолы, образовавшиеся вследствие нагрева при сверлении.

Удаление смолы выполняют при помощи химических растворов (например, раствора перманганата калия или концентрированной серной кислоты) или же посредством плазменной обработки.

Этап 11. Нанесение меди на стенки отверстий

После удаления заусенцев и остатков смолы на стенки просверленных отверстий наносят медь методом химического осаждения (рис. 9). Полученный проводящий слой служит основой для дальней-

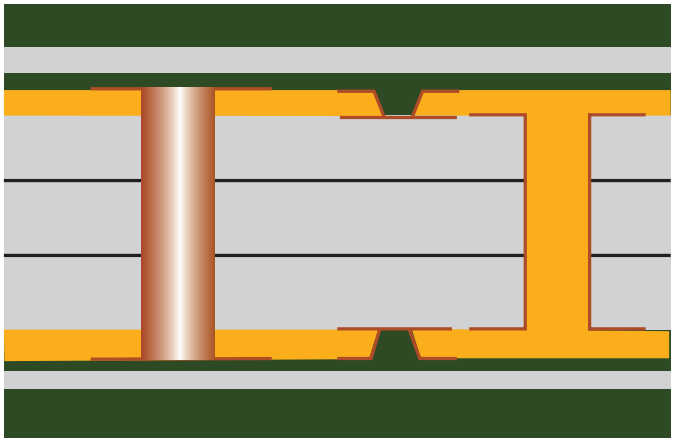


Рис. 12. Шестислойная печатная плата HDI со структурой 1+4+1

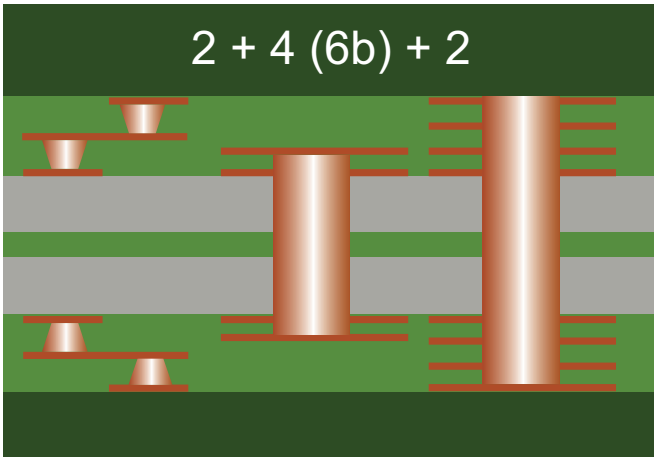


Рис. 13. Структура HDI 2+4(6b)+2

шего формирования медного покрытия, обеспечивающего электрическое соединение между слоями платы.

Особенности стека HDI-платы

HDI (High-Density Interconnect) – технология изготовления печатных плат с высокой плотностью межсоединений. В таких платах применяют микроотверстия (рис. 10), глухие и скрытые переходные отверстия, а также последовательное ламинирование. Эти конструктивные решения позволяют увеличить плотность трассировки, повысить эффективность использования площади платы и обеспечить соединение компонентов, размещенных с высокой плотностью.

Последовательное ламинирование HDI-платы

Последовательное ламинирование – технологический процесс, при котором слои печатной платы формируют и соединяют в несколько этапов, последовательно добавляя диэлектрические и проводящие слои к уже сформированной части конструкции.

Благодаря использованию последовательного ламинирования в HDI-платах можно формировать скрытые переходные отверстия. Технологический процесс происходит следующим образом.

Сначала изготавливают внутреннюю часть платы – в рассматриваемом примере (рис. 10) слои L2, L3, L4 и L5, соединенные скрытым переходным отверстием.

1. Затем ламинируют наружные слои L1 и L6 и выполняют сверление микроотверстий.
2. Если в такой конструкции требуется обеспечить соединения между слоями L1 и L3, а также между L6 и L4, используются смещенные или ступенчатые микропереходы либо расположенные друг над другом микроотверстия (рис. 11).

При расположении микроотверстий друг над другом конструкция становится компактнее, но менее надежной и более дорогостоящей по сравнению со структурой с обычными переходными отверстиями.

В свою очередь, технология смещения микропереходов позволяет упростить некоторые производственные процессы. В частности, в такой конструкции не требуется заполнять медью первое отверстие перед лазерным сверлением следующего, поскольку второе отверстие не формируется непосредственно над первым. Заполнение микропереходов медью или их полное закрытие гальваническим покрытием выполняют в специальных установках с использованием соответствующих электролитов. При гальваническом заполнении медь осаждается от дна лазерного отверстия к его верхней части, пока не заполнится полностью. Однако такой подход увеличивает сроки и стоимость производства.

Обозначения HDI-структур

Структуры слоев HDI-печатных плат обозначают по схеме X–N–X, где X – число слоев с микроотверстиями с каждой стороны платы, а N – число внутренних слоев ядра между ними. Такая запись позволяет описать конструкцию платы с высокой плотностью межсоединений и последовательность формирования дополнительных слоев.

Примеры HDI-структур

Структура 1+4+1

На рис. 12 показана шестислойная печатная плата со структурой 1+4+1: по одному дополнительному слою с микроотверстиями с каждой стороны четырехслойной сердцевины.

Структура 2+4 (6b)+2

На рис. 13 показана восьмислойная структура с двумя слоями и микропереходами с каждой стороны и шестью слоями, соединенными скрытыми переходными отверстиями.

Рекомендации по проектированию стека печатной платы

При разработке конструкции печатной платы необходимо стремиться не только к повышению ее технологичности, но и к снижению стоимости изготовления. Для этого следует учитывать следующие рекомендации.

1. По возможности ограничивать число циклов последовательного ламинирования тремя. Каждый дополнительный цикл увеличивает продолжительность и стоимость изготовления.
2. По возможности избегать расположения микроотверстий друг над другом. Такая конструкция предполагает заполнение отверстий на промежуточных этапах, что требует дополнительных технологических операций, а значит, ведет к повышению стоимости. В качестве альтернативы применяются смещенные микропереходы.
3. Подробно указывать требования к конструкции стека в документации для изготовителя. Необходимо обозначить слои, между которыми выполняются скрытые переходные отверстия, а также указать, должны ли микроотверстия располагаться друг над другом или со смещением.
4. Согласовать выбор материалов с изготовителем. Необходимо убедиться, что выбранные материалы подходят для последовательного ламинирования и соответствуют требованиям к конструкции платы.

Выводы

При разработке стека печатной платы следует заранее согласовать с производителем требования к материалам, толщине платы и конструкции переходных отверстий. В отношении цепей с контролируемым волновым сопротивлением необходимо учитывать геометрию проводников и параметры диэлектрика.

Чтобы избежать лишних затрат, стоит ограничивать число циклов последовательного ламинирования и не применять расположенные друг над другом микроотверстия без необходимости. Сложные конструкции следует выбирать с учетом технологических возможностей производителя и требований к надежности межслойных соединений.

Перед утверждением стека необходимо удостовериться, что полученная конструкция соответствует электрическим требованиям проекта, доступна для производства и не содержит неоправданно дорогих технологических решений.

Литература

1. Milan Yogendrappa. How to Build a Multilayer PCB Stack-Up // https://www.protoexpress.com/blog/build-multilayer-pcb-stack-up.

КОММЕНТАРИЙ ЭКСПЕРТА



Сергей Шихов, директор по управлению проектами, А-КОНТРАКТ

Проектирование стека печатной платы – одна из самых творческих задач при разработке электронного устройства. Инженеру необходимо соблюдать разумный компромисс, чтобы выполнить часто противоречивые требования:

- механические – габаритные размеры блока и спецификация устанавливаемых компонентов;
- электрические – целостность сигналов, земли и питания, волновые сопротивления, токовая нагрузка;
- технологические – доступность материалов, ограничения производства, симметричность структуры слоев, количество типов межслойных переходов;
- тепловые и экономические – стоимость и сроки изготовления.

На этапе проектирования структуры слоев рекомендуется консультироваться с изготовителем печатной платы во избежание ошибок.