

# Проектирование стека печатных плат для современной электроники

**Стек, или стекирование, печатной платы (PCB Stackup) — это организация расположения различных слоев в процессе создания печатной платы, что включает также и определение количества слоев, их порядка и материалов, используемых для каждого слоя. Проектирование стека играет важную роль в конструкции печатной платы, поскольку он напрямую влияет на производительность, целостность сигнала, долговечность, снижение электромагнитных излучений и общую функциональность электронного устройства.**

Йаясекар Мичеал  
(Jayasekar Micheal)

Перевод: Сергей Шихов

sergey@aconf.ru

## Введение

Стек — это базовый элемент проектирования, связывающий материал печатной платы и процесс ламинирования, основанный на количестве слоев, материале препрега/ядра, толщине диэлектрических и медных слоев, типах переходных отверстий, типе сверления, порядке слоев и требованиях к высокоскоростному контролю импеданса.

Поскольку современные электронные устройства AI/AR (*Artificial Intelligence/Augmented Reality*) становятся все более компактными и сложными, правильная конструкция стека печатной платы приобретает большую важность. В статье рассмотрим ключевые факторы и стратегии оптимизации стека печатных плат для улучшения таких параметров, как целостность сигнала и производительность.

Проектирование стека печатной платы требует тщательного изучения того, является ли она низко- или высокоскоростной или же основой источника питания. Низкоскоростные устройства или источники постоянного тока общего назначения могут не требовать использования в стеке материалов с контролируемым импедансом и высокоскоростных ламинатов. Скорее всего, в этом случае FR4 — наиболее подходящий недорогой материал, который будет доступен на рынке, что позволит сэкономить время при закупках.

Конструирование стека печатной платы играет ключевую роль в определении общей производительности, целостности сигнала и надежности электронных устройств. Контролируемый импеданс и учет высокой скорости еще на этапе проектирования стека является важнейшей частью высокоскоростной печатной платы.

Этот процесс включает определение области применения, типа схемы, толщины печатной платы, требований к количеству слоев, выбор материала ламината, определение типов переходных отверстий и сверловки, возможности изготовления, а также конструкции сигнальных и силовых слоев.

Материалы ламинатов влияют на общую диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь, которые, в свою очередь, напрямую оказывают воздействие на распространение сигнала и его целостность. Высокочастотные проекты могут выиграть в случае использования материалов с низкими потерями. Для повышения механической стабильности и снижения риска деформации требуется симметричное расположение слоев в структуре стека. Разнесенные сигнальные слои помогут минимизировать взаимопроникновение сигналов и перекрестные помехи между соседними слоями.

Важно отметить, что проектирование стека печатной платы будет зависеть от конкретных требований к конструкции самого устройства.

Для того чтобы учесть наличие в доступе предлагаемых к использованию материалов, которые соответствуют нормам и стандартам производства печатных плат, следует проконсультироваться с их изготовителем. Инструменты моделирования и разработки печатных плат — это лучший способ обеспечить оптимальный стек для проектируемого устройства. Управление импедансом с помощью расчета технологичности размещения силовых и сигнальных слоев является важным фактором при создании стека.

## Слои в стеке печатной платы

Стеки печатных плат можно разделить на различные типы в зависимости от количества слоев и их порядка в стеке. Определение необходимого количества слоев — первое, что нужно сделать при построении стека. При этом следует учитывать требования к применению, скорости сигнала, питанию, заземлению.

### Однослойный стек

Односторонние печатные платы состоят из одного проводящего слоя и подложки. Структура стека начинается со слоя паяльной маски, далее идет проводящий слой и толстый слой материала препрега (ядра), чаще всего это FR4 толщиной 1,6 мм (рис. 1).

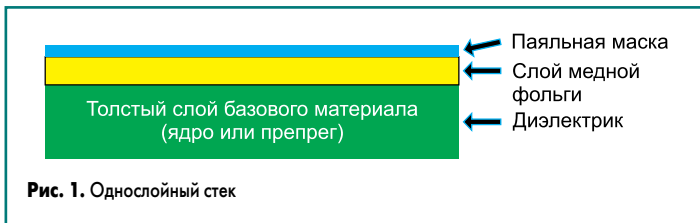


Рис. 1. Однослойный стек

Он оптимален для простых и недорогих устройств с минимальной сложностью, таких как блоки питания, переключатели и датчики. Это недорогой и легко изготавливаемый вариант с односторонней сборкой. Сборка и установка компонентов осуществляется на основе SMT и монтажа в отверстия (ТНТ), который на однослойной печатной плате может выполняться с помощью сквозных отверстий.

**Двухслойный стек**

Двухсторонние печатные платы состоят из проводящих слоев с обеих сторон печатной платы (сверху и снизу), разделенных материалом подложки (обычно FR4). Структура стека образуется из верхнего и нижнего слоев паяльной маски, проводящих слоев (обычно медь или алюминий) и толстого слоя FR4 толщиной 0,5–1,6 мм (рис. 2). Оптимален для большинства промышленных устройств, таких как источники питания, промышленные контроллеры, переключатели, преобразователи мощности и датчики. Этот тип печатных плат прост в изготовлении и допускает установку компонентов как сверху, так и снизу. Сборку SMT и компонентов ТНТ можно выполнить на двухслойной печатной плате с помощью сквозных отверстий.



Рис. 2. Стек двухслойной печатной платы

**Стек многослойной печатной платы**

Стек многослойной печатной платы образуется верхним и нижним слоями и неограниченным количеством внутренних. На рынке доступен стандартный стек печатных плат с 2–24 слоями (в некоторых случаях до 32 слоев) в зависимости от сложности и требований проекта. Благодаря передовым технологиям, в частности лазерному экспонированию, количество слоев может достигать 64, но требует более высоких затрат. Стек многослойной печатной платы состоит из двух внешних проводящих слоев (обычно медных) с обеих сторон печатной платы (сверху и снизу). Внутренние слои также будут медными, разделенными материалом подложки (слой препрега или ядро в зависимости от требований проекта).

В таблице 1 показан типичный многослойный (10-слойный) стек с использованием ламината Isola Tachyon 100G, оптимальный для производства печатных плат с контролируемым импедансом, достигаемым комбинацией ядер и препрега. Для создания такого типа многослойных печатных плат рекомендуется сбалансированное размещение слоев. Переходные отверстия на платах могут быть обычными сквозными, микропереходами, глухими и скрытыми. Толщина печатной платы для этого типа стека может варьироваться в зависимости от количества слоев и требований проекта и обычно находится в пределах 0,5–3 мм.

Если требуется сложная трассировка проводников и целостность сигнала, многослойный стек отвечает этим требованиям наилучшим образом.

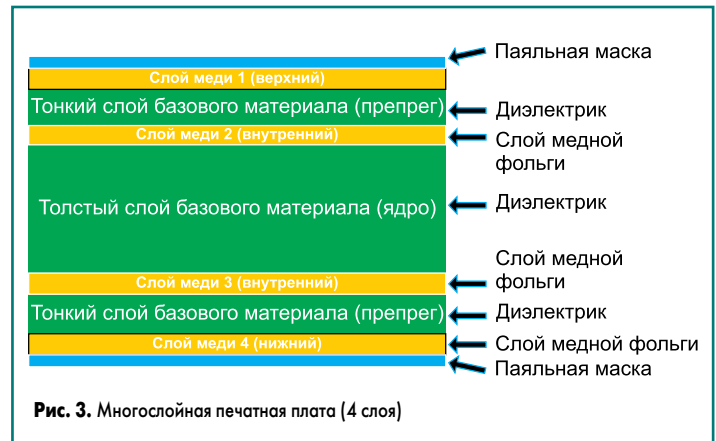
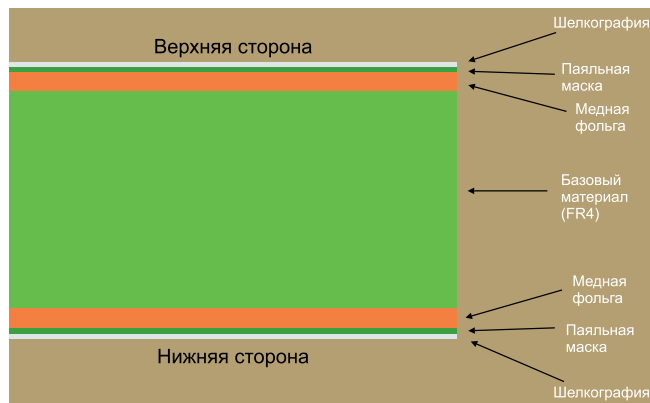


Рис. 3. Многослойная печатная плата (4 слоя)

Таблица 1. Стек многослойной платы (10 слоев)

Слой	Толщина меди, мил/мкм	Масса фольги, унции/мкм	Стек	Диэлектрическая постоянная	Толщина ламината, мил/мкм	Материал
1	2,05/52	0,375/13,1				Фольга 0,375 унц. 13,1 мкм
				2,97	4,01/102	Препрег Tachyon 100G 1078(75)
2	0,65/17	0,375/13,1				Фольга 0,375 унц. 13,1 мкм
				2,97	3,84/98	Препрег Tachyon 100G 1078(75)
3	0,65/17	0,375/13,1				Фольга 0,375 унц. 13,1 мкм
				2,97	3,81/97	
4	1,15/29	0,375/13,1				Фольга 0,375 унц. 13,1 мкм
				2,97	3,95/100	Препрег Tachyon 100G 1078(75)
5	0,6/15	0,5/17,5				Фольга 0,375 унц. 13,1 мкм
				3,15	14/356	Базовый материал Tachyon 100G 14 мил 3×3313
			3,04	10,2/259	Препрег Tachyon 100G 1078(70.5)	
			3,15	14/356	Базовый материал Tachyon 100G 14 мил 3×3313	
6	0,6/15	0,5/17,5			Фольга 0,375 унц. 13,1 мкм	
			2,97	3,95/100	Препрег Tachyon 100G 1078(75)	
7	1,15/29	0,375/13,1			Фольга 0,375 унц. 13,1 мкм	
			2,97	3,81/97	Препрег Tachyon 100G 1078(75)	
8	0,65/17	0,375/13,1			Фольга 0,375 унц. 13,1 мкм	
			2,97	3,84/98	Препрег Tachyon 100G 1078(75)	
9	0,65/17	0,375/13,1			Фольга 0,375 унц. 13,1 мкм	
			2,97	4,01/102	Препрег Tachyon 100G 1078(75)	
10	2,05/52	0,375/13,1			Фольга 0,375 унц. 13,1 мкм	


**Рис. 4.** Внешние слои печатной платы

Многослойный стек имеет несколько проводящих и изолирующих слоев для создания сложных разветвленных соединений.

На рис. 3 показан типичный 4-слойный стек, известный как стек начального уровня, оптимальный для любого промышленного устройства, толщина такой печатной платы варьируется в пределах 0,5–1,6 мм в зависимости от области применения. Переходные отверстия широко используются в этом типе стека.

### Типы стеков печатных плат

Выбор стека печатной платы зависит от сложности конструкции, требований к производительности и отведению тепла, скорости сигнала и финансовых возможностей. Проектировщики должны тщательно оценить характеристики разрабатываемого устройства, чтобы выбрать наиболее подходящий стек для обеспечения технологичности и надежности изделия. Рассмотрим наиболее распространенные типы стеков печатных плат.

#### Жесткая печатная плата

Структура жесткой печатной платы определяется расположением и составом ее слоев, не обладающих гибкостью или способностью к изгибу. Жесткие печатные платы обычно применяются в широком спектре электронных устройств, где электронная сборка не подвергается значительному сгибанию или механическому напряжению. Они состоят из нескольких слоев, каждый из которых выполняет определенные функции и содержит различные компоненты и дорожки.

В структуре стека жесткой платы есть несколько элементов.

#### Внешние слои (верхний и нижний)

На рис. 4 показана типичная конструкция внешних слоев с шелкографией, паяльной маской и медной фольгой.

- **Сигнальные слои**

Внешние сигнальные слои, будь то верхний или нижний, представляют собой проводящий материал, обычно медь весом 0,5–2,5 унции (примерно 17–85 мкм) в зависимости от области применения.


**Рис. 5.** Внешний медный слой

На рис. 5 показан внешний проводящий медный слой печатной платы без паяльной маски.

- **Слой паяльной маски**

Слой паяльной маски (паяльный резист) наносится на верхний и нижний слои, чтобы закрыть голые медные дорожки и площадки для защиты от окисления и предотвращения образования перемычек припоя между соседними площадками или дорожками.


**Рис. 6.** Паяльная маска на печатных платах

На рис. 6 показана паяльная маска в различных цветовых вариантах (красный, синий, белый, черный и зеленый) и в среднем после нанесения имеет толщину 18–25 мкм.

- **Финишное покрытие**

Финишные покрытия — это покрытия, наносимые на открытые медные участки для предотвращения окисления и улучшения паяемости.

Обычные виды финишной обработки включают HASL (выравнивание припоя горячим воздухом), ENIG (иммерсионное золочение по подслою никеля) и иммерсионное олово. В некоторых случаях, например, для краевых разъемов, рекомендуется гальваническое золочение.

- **Слой маркировки (шелкографии)**

В этом слое используются белые чернила для обозначения контуров компонентов, номеров выводов, контрольных точек, логотипов, маркировки и позиционных обозначений (REFDES).


**Рис. 7.** Шелкография на печатной плате

На рис. 7 показана маркировка шелкографией для компонентов. Существует несколько методов печати шелкографии на плате: трафаретная печать, струйная печать и лазерная печать.

#### Внутренние слои

Внутренние слои могут представлять собой комбинацию сигнальных, силовых и изолирующих диэлектрических слоев.

- **Сигнальные слои**

Внутренние сигнальные слои состоят из проводящего материала — чаще меди весом 0,5–1 унции (18–35 мкм) в зависимости от требований к сопротивлению и мощности для маршрутизации электрических сигналов.

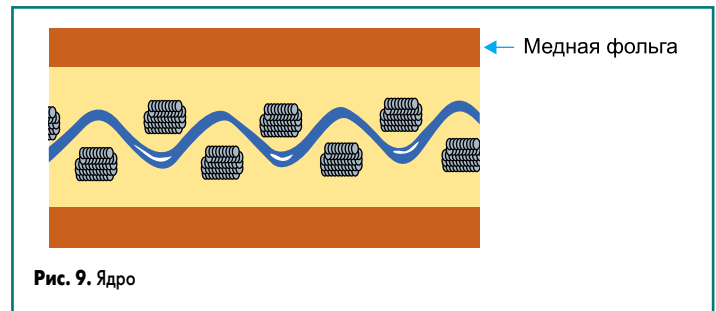
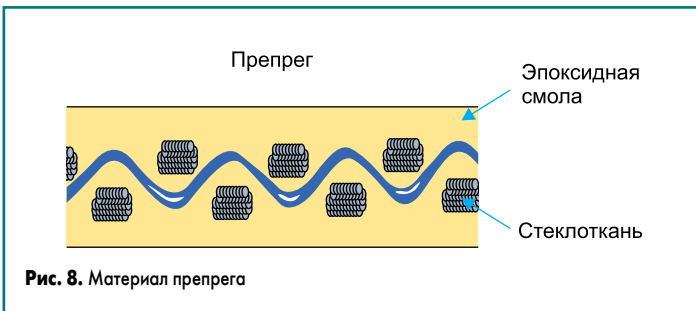
- **Слой электропитания**

Внутренние силовые слои питания и заземления состоят из проводящего материала, чаще всего это медь, вес меди 0,5–2 унции (18–70 мкм) в зависимости от требований к питанию для источника и электрических характеристик заземления.

- **Слой препрега**

Препрег (pre-impregnated — «предварительно пропитанный») представляет собой слой стеклоткани, пропитанной не отвержденной эпоксидной смолой, но не ламинированной медной фольгой. Препреги разделяют сигнальные слои и слои питания, обеспечивая электрическую изоляцию и помогая получить требуемую общую толщину платы для достижения нужного импеданса. Слои препрега располагаются между ядром и сигнальными или питающими слоями, также препрег работает в стеке платы как изолятор и адгезив.

На рис. 8 показан материал препрега из стеклоткани и эпоксидной смолы. При высоких температурах в процессе ламинирования эпоксидная смола в препреге растека-



ется по прилегающим слоям и отверждается, склеивая их, в результате получается прочная и жесткая монолитная плата.

**• Ядро**

Слой ядра, или сердечник, обычно является центральным слоем печатной платы, обеспечивающим механическую поддержку компонентов и общую жесткость. Это основной слой печатной платы, он состоит из толстого, жесткого слоя базового материала (подложки) с тонкой медью с обеих сторон. Он обеспечивает структурную целостность печатной платы и служит основой для сигнальных или заземляющих слоев. Основной слой может также включать дополнительные сигнальные дорожки. Кроме того, при помощи ядра проектировщик может увеличить или уменьшить толщину всей печатной платы для достижения проектной механической стабильности.

На рис. 9 показан типичный ламинат ядра печатной платы, изготовленный из тонкого слоя медной фольги, прикрепленной к жесткому материалу подложки. Медная фольга ядра может служить нескольким целям, например, обеспечивать заземление или быть сигнальным слоем. В многослойных печатных платах может быть несколько ядер, объединенных между собой слоями препрега.

**Стек гибкой печатной платы**

Гибкая печатная плата предназначена для электронных изделий, требующих гибкости (например, носимые устройства), или для использования на изогнутых поверхностях.

Для достижения гибкости применяются гибкие материалы подложки, например, как полиимид. Такая печатная плата может иметь один или несколько гибких слоев. Изолирующая подложка соединяется с проводящими слоями с помощью различных адгезивов.

На рис. 10 показана фундаментальная структура стека гибкой платы. Как и при монтаже жесткой печатной платы, при сборке гибкой печатной платы требуются внешние проводящие сигнальные слои, финишное покрытие, слой шелкографии и паяльная маска. Но несколько элементов отличаются от жесткого стека, они перечислены ниже.

**• Защитное покрытие**

Для схемы гибкой печатной платы требуется паяльная маска с большой гибкостью. Покрытие из защитной пленки (Coverlay) служит паяльной маской на гибкой печатной плате, выполняя функцию защиты внешнего проводящего слоя.

**• Подложка (базовый материал)**

Основным базовым материалом, используемым в большинстве гибких печатных плат, является полиимид. Этот материал очень прочный, гибкий и обладает высокой термостойкостью.

**• Клей (адгезив)**

Это акриловый или эпоксидный материал, при помощи которого под воздействием давления и тепла выполняется соединение изоляционного материала подложки гибкой печатной платы и проводящего слоя.

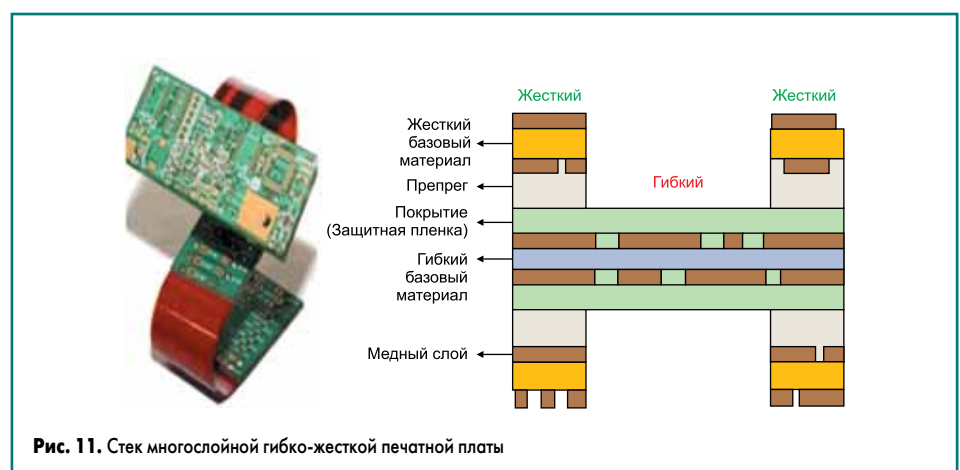
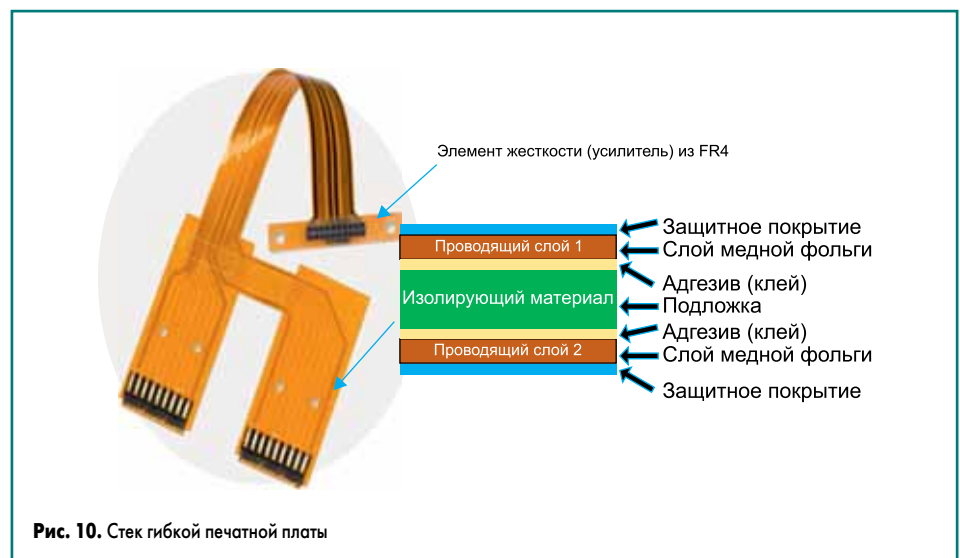
**• Элемент жесткости**

Гибкая печатная плата в силу своих физических свойств не может удерживать компоненты, поэтому к ней необходимо добавить усилитель — элемент жесткости обычно из FR4 или полиимида. Это позволяет обе-

спечить жесткость определенной области для установки и механической поддержки компонентов в составе сборки на основе гибкой печатной платы. Элемент жесткости добавляется к гибкой печатной плате только в конце процесса изготовления и крепится с использованием клея.

**Стек гибко-жесткой печатной платы**

Разработанная для применений, требующих жесткости, и гибкости, гибко-жесткая печатная плата представляет собой гибрид, объединяющий элементы как гибких, так и жестких плат. Свойства такой платы схожи с пружиной: если ее растянуть или сжать, она снова вернется в исходное состояние после снятия напряжения. Это многослойная стекловая структура с комбинацией трех или более слоев жестких и двух или более слоев гибких областей, которые соединены вместе (рис. 11: конфигурация



2-слойной гибкой и четырехслойной жесткой платы). К стеку гибко-жесткой платы применяются те же правила, что и для проектирования стеков жесткой и гибкой печатных плат.

Гибко-жесткие печатные платы используются в устройствах, где электронная сборка должна поддерживать электрические соединения и при этом быть способной сгибаться или изгибаться, чтобы вписаться в нестандартное или ограниченное пространство. Стек гибко-жесткой платы сложнее, чем у чисто жесткой или гибкой печатных плат из-за сочетания гибких и жестких материалов. Расположение и состав слоев как в жестких, так и в гибких секциях будут разными, паяльная маска будет находиться в жесткой области, гибкая область будет покрыта пленкой Coverlay и клеем, а в некоторых случаях потребуется усилитель.

### Обзор типовых стеков печатных плат (сборок)

В соответствии с требованиями, которые предъявляются к промышленным, коммерческим, аэрокосмическим, оборонным и медицинским электронным устройствам, формируются и различные требования к печатным платам в их составе. Ниже представлен обзор стеков плат на основе их типового применения в изделиях электроники.

#### Стандартный стек

Это наиболее распространенный тип стека печатных плат, основанный на стандартном диэлектрическом материале FR-4 (Flame Retardant 4). Обычно используется для конструкций низкой и средней сложности и обеспечивает хорошие электрические и механические свойства.

Состоит из сигнальных слоев и слоев питания/заземления, чаще всего встречается с конфигурацией из 2–8 слоев.

#### Высокоскоростной стек

Это широко используемый стек печатных плат для современных электронных устройств. Разработан для высокочастотных устройств, таких как высокоскоростные цифровые или радиочастотные схемы.

В таких сборках используются специализированные диэлектрические материалы с низкими потерями, с более низкой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon_r$ ) и низким тангенсом угла потерь ( $\delta$ ) для минимизации затухания сигнала. Также могут быть включены дополнительные заземляющие слои и определенный порядок слоев для улучшения целостности сигнала и снижения электромагнитных помех.

#### Стек объединительной платы

Стек объединительной печатной платы (Backplane PCB) применяется для высокопроизводительных вычислений и сетевых устройств. Объединительные платы служат центральным узлом межсоединений, обеспечивая высокоскоростную путь для передачи данных между различными подключаемыми модулями или дочерними платами в системе. Стек печатных объединительных плат предназначен для обработки высокоскоростных сигналов, управления распределением питания и поддержания целостности сигнала на нескольких взаимосвязанных платах.

На рис. 12 представлен внешний вид объединительной платы, обусловленный требованиями сборки.

Для компоновки объединительной платы необходима большая толщина, чтобы выдержать вес дочерней платы и компонентов. Число слоев в таком стеке в среднем составляет 6–32. Также требуется сбалансированная укладка слоев с контролем импеданса. Для минимизации затухания сигнала и обеспечения высокоскоростного распространения сигнала используются высокоскоростные материалы с хорошими показателями производительности, низкой диэлектрической постоянной и низким тангенсом угла потерь.

#### Сборка печатной платы на металлическом основании или с металлическим сердечником (MCPCB)

Включает металлическое основание или сердечник из таких металлов, как алюминий, медь или нержавеющая сталь, что обеспечивает эффективное рассеивание тепла в электронных устройствах высокой мощности, для которых



**Рис. 12.** Объединительная плата с установленной дочерней платой

управление температурой является критически важным фактором.

Металлический сердечник (ядро) или основание в таких сборках действует как радиатор, эффективно проводя и рассеивая тепло, выделяемое компонентами печатной платы.

К недостаткам печатных плат на металлическом основании (рис. 13) относятся их высокая стоимость и большой вес (по сравнению со стандартными платами), поэтому MCPCB применяются в конкретных устройствах, где необходимы их специфические свойства: в мобильных телефонах/аксессуарах, носимой электронике, медицинских и автомобильных приборах, устройствах дополненной реальности (AR).

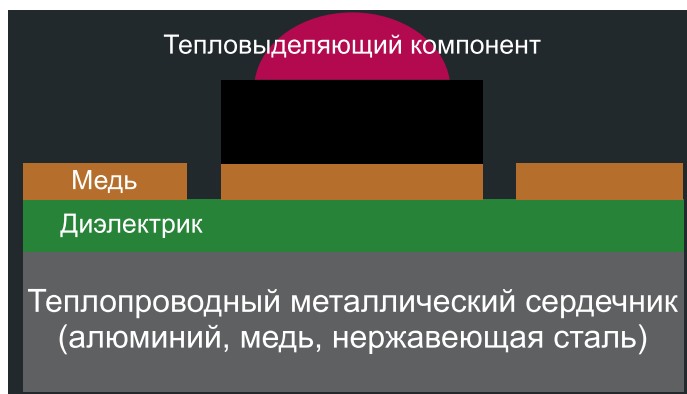
#### Стек СВЧ печатной платы

Специально разработанный для устройств микроволнового и миллиметрового диапазона и известный как высокочастотный, этот стек используется для электроники, работающей на микроволновых частотах (обычно 1 ГГц и выше) или радиочастотах (РЧ). При проектировании таких сборок разработчик в первую очередь ориентируется на поддержание целостности сигнала, минимизацию потерь сигнала и контроль электромагнитных помех (ЭМП) на высоких частотах.

При изготовлении СВЧ печатных плат применяются специализированные материалы, предназначенные для работы в условиях сверхвысоких частот. Они обладают низкой диэлектрической проницаемостью ( $D_k$ ) и низким коэффициентом рассеяния ( $D_f$ ). Поскольку длина волны сигнала в воздухе меньше при распространении в печатной плате из-за диэлектрических свойств материала, прокладка линии передачи таких сигналов на плате и выбор материалов стека требуют особенно тщательного и внимательного подхода.

#### Стек HDI плат (высокой плотности)

Печатные платы высокой плотности (HDI, High-density interconnect) характеризуются существенно более высокой плотностью разводки на единицу площади. Тогда как в стандартных стеках для соединения слоев применяются сквозные переходные отверстия, стек HDI использует микропереходные отверстия, глухие переходные отверстия и скрытые переходные отверстия для достижения более высокой



**Рис. 13.** Стек платы на металлическом основании

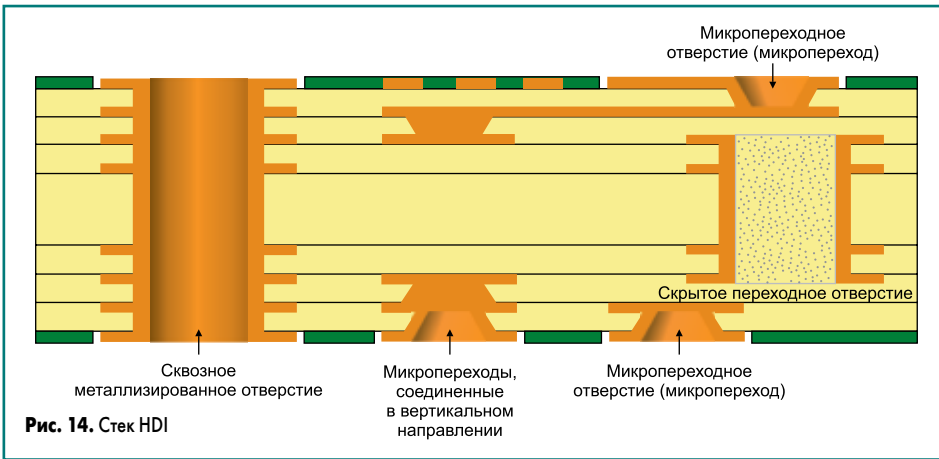


Рис. 14. Стек HDI

плотности разводки, лучшей электрической производительности и целостности сигнала.

На рис. 14 показана структура X-N-X. Это распространенный способ описания конфигурации стека HDI. X представляет собой количество слоев HDI с микропереходами, а N — количество основных слоев, расположенных между HDI слоями. При современных технологиях стоимость изготовления печатной платы HDI аналогична стоимости стандартной печатной платы, имеющей более 8 слоев. Также при использовании стека HDI размер платы уменьшается, что помогает поддерживать миниатюризацию устройств.

**Последовательное ламинирование**

Последовательное ламинирование является наиболее целесообразным решением для фор-

мирования стеков с применением продвинутых межслойных переходных отверстий.

При таком подходе для финальной сборки используют два или более стека, созданных индивидуально, которые соединяются вместе в конечную сборку. Это позволяет выполнять сложную внутреннюю трассировку слоев с глухими и скрытыми переходами, задействуя два, три или более циклов ламинирования в зависимости от комбинации материалов подложки печатной платы.

К тому же это отличное решение для достижения постоянного соотношения глубина/диаметр отверстия на всех этапах сверления отверстий и обеспечения точного контроля импеданса для критических сигналов. В таблице 2 показан процесс ламинирования в четыре стадии с использованием высокоскоростных без-

галогенных базовых материалов EM-526 Core 20 ГГц и EM-89BK. Рекомендуется проектировать плату так, чтобы было не более двух или трех циклов ламинирования. Большое количество циклов склейки увеличит стоимость и время изготовления печатной платы.

Кроме того, необходимо учитывать, что ламинирование является прессованием при высокой температуре. Это значит, что с учетом КТР (коэффициент теплового расширения) при высокой температуре увеличивается риск образования пустот из-за расширения меди по оси Z непосредственно во время склеивания материалов. В некоторых случаях при повышении температуры диэлектрический материал расширяется быстрее, чем медь.

**Для справки:** КТР стекловолкна составляет около 6 ppm/°C, КТР меди — около 17 ppm/°C, а КТР смолы — около 100 ppm/°C.

**Гибридный стек печатных плат**

Гибридная компоновка печатных плат представляет собой комбинацию нескольких материалов подложки. Такая структура позволяет повысить производительность, многофункциональность и гибкость применения электронной сборки. Скомбинированы могут быть низкоскоростной и высокоскоростной материалы или различные материалы, обычно используемые для разных условий применения, — такие как FR4+алюминий, FR4+металлическое ядро и FR4+керамические материалы.

Гибридный стек печатных плат дает возможность лучше управлять температурой, уменьшать расход площади платы для распре-

Таблица. 2. Четырехэтапный процесс ламинирования

	мил	мкм	Dk @ 20 ГГц	Df @ 206 ГГц	Диэлектрик	Материал	Ширина дорожки	Отступ дорожки	Отверстие/Площадка		Тип отверстия	
SMT	0,98	25	3,0 @ 20 ГГц	0,016 @ 20 ГГц		SR-1	100	100	125/225			Четвертая склейка
Слой 1	1,18	30									Микропереход 1-2 Заполнение медью	
D12	4,65	118	2,97	0,0026	Препрег	EM-89BK	100	100	125/225			Третья склейка
Слой 2	1,18	30									Микропереход 2-3 Заполнение медью	
D23	4,65	118	2,97	0,0026	Препрег	EM-89BK	100	100	125/225			Вторая склейка
Слой 3	1,18	30									Микропереход 3-4 Заполнение медью	
D34	4,65	118	2,97	0,0026	Препрег	EM-89BK	100	100	250/400			Первая склейка
Слой 4	1,18	30										
D45	4,65	118	2,97	0,0026	Препрег	EM-89BK	100	100				
Слой 5	1,30	33										
Core	11,81	300	3,79	0,007	Core	EM-526					Переходное отверстие 4-7 Органическое заполнение	
Слой 6	1,30	33										
D76	4,65	118	2,97	0,0026	Препрег	EM-89BK	100	100				
Слой 7	11,81	30										
D87	4,65	118	2,97	0,0026	Препрег	EM-89BK	100	100	250/400			Первая склейка
Слой 8	1,18	30									Микропереход 8-7 Заполнение медью	
D98	4,65	118	2,97	0,0026	Препрег	EM-89BK	100	100	125/225			Вторая склейка
Слой 9	1,18	30									Микропереход 9-8 Заполнение медью	
D109	4,65	118	2,97	0,0026	Препрег	EM-89BK	100	100	125/225			Третья склейка
Слой 10	1,18	30									Микропереход 10-9 Заполнение медью	
SMB	0,98	25	3,0 @ 20 ГГц	0,016 @ 20 ГГц	SM	SR-1	100	100	125/225			Четвертая склейка
SUM	62,99											

SIG				0,689
GND		Roqers 4835 4mil coreH/1 Low Pro	Roqers 4835	4,000
				1,260
		Iteq IT 180A Prepreg 1080	Dielectric	4,195
		Iteq IT 180A Prepreg 1080	Dielectric	4,195
PWR				1,260
SIG		Iteq IT 180A 28 mil core 1/1	FR4	28,000
				1,260
		Iteq IT 180A Prepreg 1080	Dielectric	4,195
		Iteq IT 180A Prepreg 1080	Dielectric	4,195
GND				1,260
SIG		Iteq IT 180A 4 mil core 1/H	FR4	4,000
				0,689

**Рис. 15.** Гибридный стек

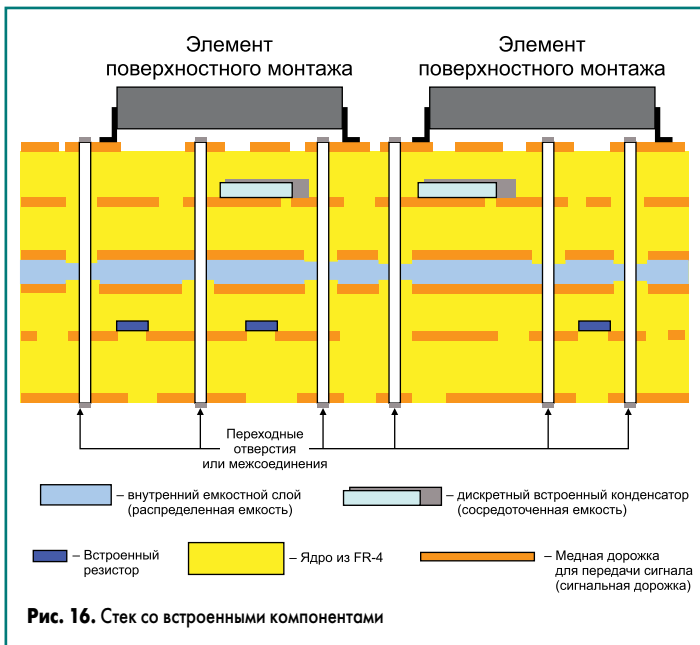
деления питания и повышения надежности всей сборки. Он обеспечивает более высокую эффективность и производительность именно вследствие высокой степени вариативности материалов, используемых в конструкции, например, сочетание металлического слоя для экранирования ЭМС и керамического материала для высоких частот на одной плате.

На рис. 15 представлен простой гибридный стек печатной платы. Гибридные сборки в большинстве случаев дороги в изготовлении и в зависимости от комбинации материалов применяются в устройствах сетей связи, в медицине, аэрокосмической промышленности и обороне. Выбор базовых материалов для сборки гибридной печатной платы требует особого внимания к таким характеристикам, как диэлектрическая проницаемость, шероховатость поверхности и толщина. Исходя из этих параметров достигается согласование импеданса, уменьшение перекрестных помех и улучшение целостности сигнала.

**Стек печатной платы со встроенными компонентами**

Обычный процесс установки пассивных компонентов на печатную плату — это SMD-, или сквозной монтаж. Стек печатной платы со встроенными компонентами относится к интеграции пассивных электронных компонентов, таких как резисторы, конденсаторы и индуктивности, непосредственно во внутренние слои печатной платы. Пассивные компоненты встраиваются в процессе изготовления платы для экономии места, уменьшения длины межсоединений, повышения целостности сигнала и улучшения ее общей производительности.

Встроенные компоненты располагаются в толщине диэлектрических слоев (рис. 16), а резистивные элементы выполнены в виде тонкой пленки, которая становится частью вытравленной печатной схемы



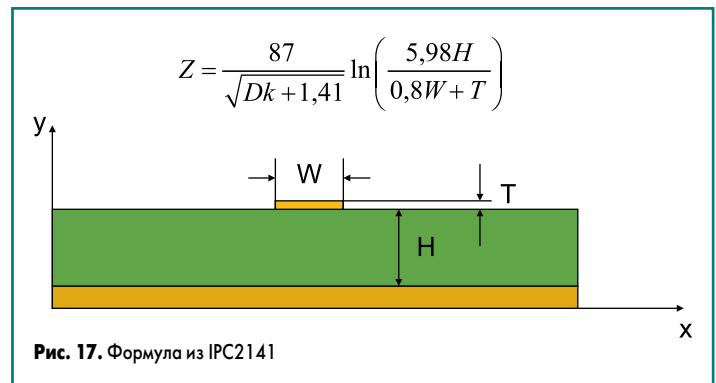
на слоях платы. Технология применения встроенных компонентов имеет огромное преимущество перед поверхностным монтажом: она уменьшает размер платы, увеличивает площадь разводки и улучшает электрические характеристики и функциональность. Прямая интеграция пассивных компонентов в подложку снижает паразитную емкость и индуктивность, а также позволяет разместить пассивные компоненты ближе к активным. Благодаря передовым технологиям не только пассивные, но и активные компоненты могут встраиваться во внутренний слой печатной платы.

**Расчет импеданса стека**

Сегодня существует несколько онлайн-калькуляторов для расчета толщины диэлектрика и толщины меди проводящего слоя на основе требований к скорости сигнала и мощности. При проектировании стека необходимо учитывать доступность на рынке материалов с нужными свойствами и технические возможности производителя плат. Это позволит избежать временных затрат на закупку расходников или переделку проекта.

Один из популярных наборов инструментов для разработки печатных плат — комплект Saturn and Polar Instruments.

Существует несколько методов расчета импеданса и характеристик стека слоев печатной платы. Расчет по стандарту IPC-2141 является одним из проверенных вариантов. Известен простой способ автоматизации таких расчетов — использовать таблицы Excel с формулами. Аналогичные данным из IPC2141 (рис. 17) сведения можно найти и в IPC-D-317A.



Стандартный расчет импеданса включает учет свойств диэлектрического материала и ширины трасс линий передачи и соседних опорных слоев питания/«земли»:

$$Z = \frac{60}{\sqrt{2Dk + 2}} \ln \left[ 1 + \frac{4H}{W'} \left[ \left( \frac{14Dk + 8}{11Dk} \right) \left( \frac{4H}{W'} \right) + \sqrt{\left( \frac{14Dk + 8}{11Dk} \right)^2 \left( \frac{4H}{W'} \right)^2 + \pi^2 \left( \frac{Dk + 1}{2Dk} \right)} \right] \right]$$

$$W' = W + \left( \frac{Dk + 1}{2Dk} \right) \left( \frac{T}{\pi} \right) \ln \left[ \frac{4e}{\left( \frac{T}{H} \right)^2 + \left( \frac{T}{W\pi + T1,1\pi} \right)^2} \right]$$

$$Dk_{eff} = \begin{cases} \frac{Dk + 1}{2} + \frac{Dk - 1}{2} \left[ \left( 1 + \frac{12H}{W} \right)^{-0.5} + 0,04 \left( 1 - \frac{W}{H} \right)^2 \right] & \text{если } W < H \\ \frac{Dk + 1}{2} + \frac{Dk - 1}{2} \left( 1 + \frac{12H}{W} \right)^{-0.5} & \text{если } W > H \end{cases}$$

где Z — характеристическое сопротивление (целевое сопротивление, например, 50 Ом);  $Dk_{eff} \epsilon_{eff}$  — эффективная диэлектрическая проницаемость материала печатной платы; h — высота диэлектрической подложки (расстояние от дорожки до плоскости заземления); w — ширина дорожки.

Управление импедансом

Импеданс — это сопротивление протеканию тока в электрической цепи, и оно может быть активным, реактивным или тем и другим. Управление импедансом в стеке печатной платы является критически важным аспектом обеспечения целостности сигнала и эффективного распределения мощности в высокочастотных и высокоскоростных цифровых схемах. Импеданс линии передачи на печатной плате относится к сопротивлению, с которым сталкивается сигнал переменного тока при прохождении через дорожку, и обычно интересует проектировщика применительно к тем линиям на печатной плате, по которым передаются высокоскоростные сигналы.

Для достижения желаемого импеданса разработчик должен выбрать подходящие материалы печатной платы, ширину и расстояние между проводящими дорожками, а также толщины диэлектрических слоев и расположить их в стеке печатной платы.

Более широкие дорожки уменьшают импеданс, в то время как более узкие дорожки увеличивают его; более высокие диэлектрические постоянные приводят к более высокому импедансу, и наоборот. При проектировании печатных плат используются два типа импеданса: один — несимметричный импеданс, а другой — импеданс дифференциальной пары, в которой сигналы маршрутизированы параллельно, эта величина демонстрирует сопротивление обеих линий в целом и обычно составляет 50–120 Ом.

Существует несколько инструментов для расчета импеданса дорожек высокоскоростных сигналов, одним из популярных является Polar Instruments.

**Импеданс одиночной линии**

В односторонней линии передачи измеряется уровень сигнала относительно общей «земли». Характеристический импеданс рассчитывается на основе ширины сигнальной дорожки, расстояния от дорожки до плоскости заземления и диэлектрических свойств материала печатной платы.

Устройства с сопротивлением 8–32 Ом считаются низкоомными; 50 Ом — хорошее значение для получения большой мощности с наименьшими потерями. Яркий пример для линии 50 Ом — коаксиальный сигнал.

Формула для расчета несимметричного импеданса ( $Z_{single}$ ) одиночной линии передачи приведена ниже:

$$Z_{single} = \frac{87\Omega}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \times \log\left(\frac{5,98h}{0,8w} + 1,4\right)},$$

где  $\epsilon_{eff}$  — эффективная диэлектрическая проницаемость материала печатной платы;  $h$  — расстояние между сигнальной дорожкой и опорной плоскостью (например, плоскостью заземления);  $w$  — ширина дорожки.

• **Импеданс 50 Ом для микрополосковой линии**

Микрополосковая линия — это электрическая линия передачи во внешнем слое печатной платы, покрытая паяльной маской. Такая линия передачи либо имеет опорный слой только с одной стороны и отделена от него диэлектрическим слоем, либо взаимодействует со смежными контурами заземления или питания.

На рис. 18 показаны параметры и пример расчета для микрополосковой линии сопротивлением 50 Ом (значения указаны в микронах).

• **Сопротивление 50 Ом для полосковой линии**

Полосковая линия — это электрическая линия передачи во внутреннем слое печатной платы, где проводник расположен между двумя идентичными диэлектрическими материалами с опорными плоскостями по обеим сторонам.

На рис. 19 представлены параметры и примеры расчетов для полосковой линии сопротивлением 50 Ом (значения указаны в микронах).

**Импеданс (дифференциальный)**

Расчеты импеданса для дифференциальной двойной линии передачи определяются параметрами сигнала, такими как ширина линии, расстояние от линий до «земли» и питания, толщина меди, опорная плоскость

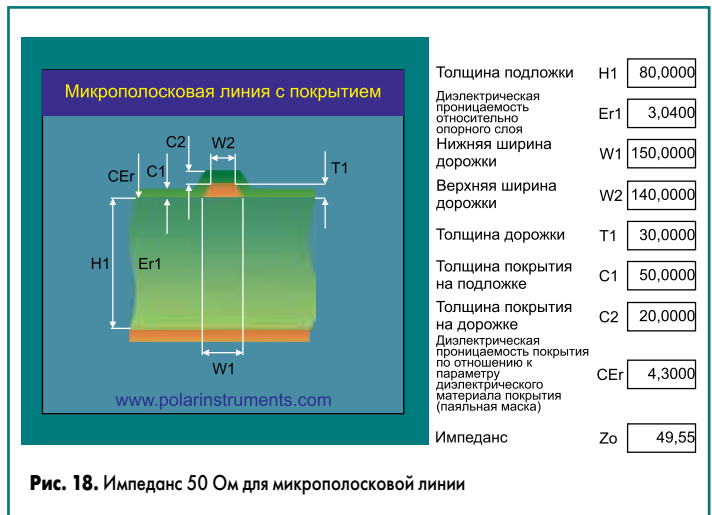


Рис. 18. Импеданс 50 Ом для микрополосковой линии

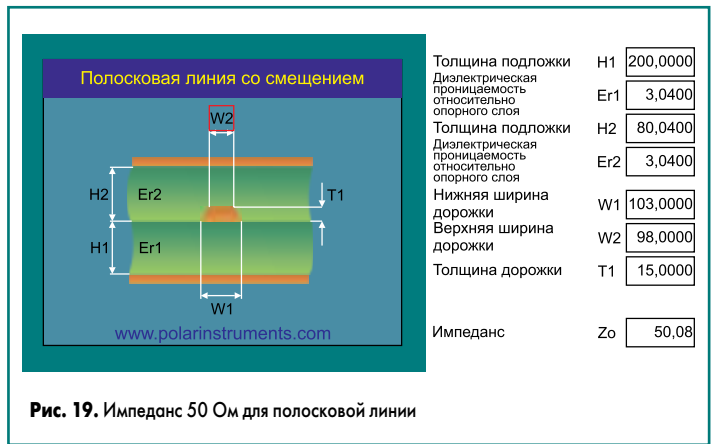


Рис. 19. Импеданс 50 Ом для полосковой линии

и толщина диэлектрика на печатной плате. Дифференциальный импеданс — это мгновенный импеданс пары линий передачи, когда два комплементарных сигнала передаются с противоположной полярностью.

Характеристическое сопротивление в дифференциальной паре ( $Z_{diff}$ ) рассчитывается на основе ширины дорожки, расстояния между дорожками и диэлектрических свойств материала печатной платы. Формула для расчета импеданса дифференциальной пары:

$$Z_{diff} = \frac{2 \times Z_{single}}{\sqrt{1 - \left(\frac{s}{w}\right)^2}},$$

где  $s$  — расстояние между двумя дорожками в дифференциальной паре;  $w$  — ширина дорожки.

Сопротивление дифференциальной пары обычно выше, чем сопротивление одинарной линии при той же ширине дорожки и диэлектрических свойствах из-за более широкой эффективной дорожки, созданной двумя линиями. Сопротивление дифференциальной пары имеет решающее значение для высокоскоростных цифровых схем, т. к. дифпары предлагают лучшую помехоустойчивость и целостность сигнала. Дифференциальный импеданс обычно составляет от 90 до 120 Ом.

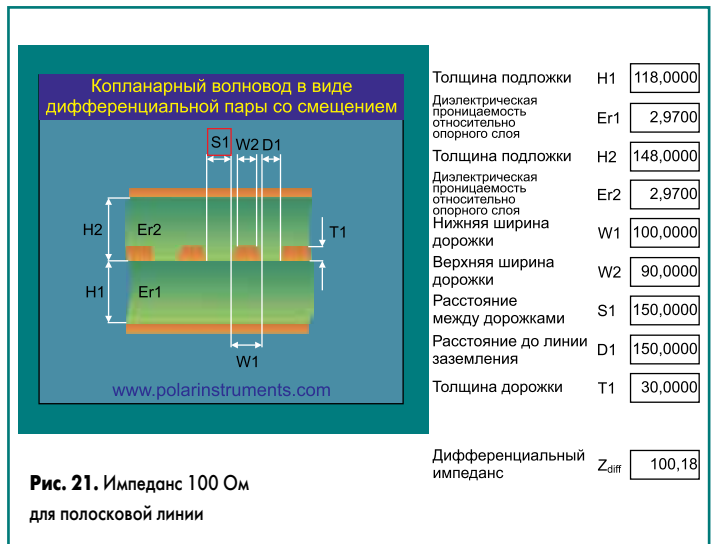
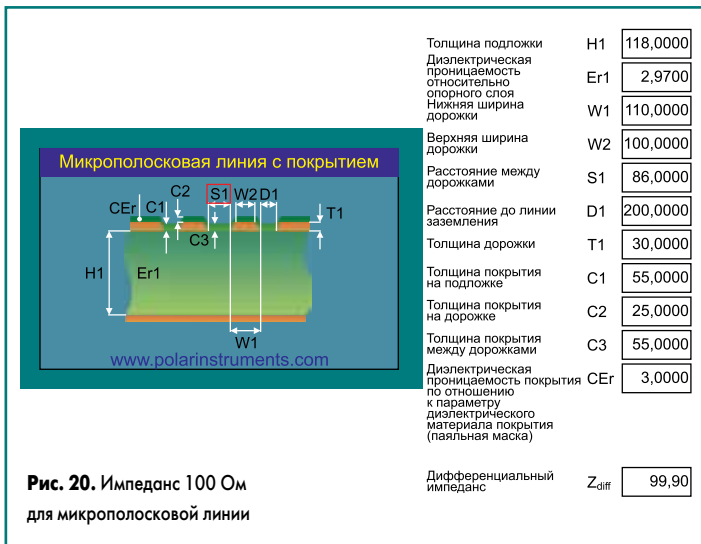
• **Импеданс 100 Ом для микрополосковой линии**

На рис. 20 изображен пример исполнения дифференциальной микрополосковой линии (импеданс 100–120 Ом) с копланарным волноводом, расположенной на внешнем слое, покрытом паяльной маской.

Это линия передачи с опорным слоем только с одной стороны и контурами заземления/питания на сигнальном слое.

• **100-Ом сопротивление для полосковой линии**

100-Ом дифференциальная полосковая линия с копланарным волноводом — это линия, в которой две проводящие линии параллельны соседним контурам заземления, а дорожки располагаются между двумя опорными плоскостями.



На рис. 21 показаны параметры и примеры расчетов для полосковой линии (значения указаны в микронах).

- Ниже приведены пояснения для расчетов.
- **H1/H2.** Высота подложки — с увеличением толщины подложки импеданс увеличивается.
  - **Er1/Er2.** Диэлектрическая проницаемость относительно опорного слоя — значение DK увеличивается, а импеданс уменьшается.
  - **W1-W2.** Нижняя/верхняя ширина дорожки — ширина дорожки к основанию увеличивается и увеличивается импеданс.
  - **S1.** Расстояние между дорожками — Расстояние между дорожками, при увеличении импеданс увеличивается.
  - **D1.** Расстояние до заземления — Расстояние от дорожек до заземления на том же слое со сшивающими переходными отверстиями (используется для СВЧ/РЧ-приложений).
  - **T1.** Толщина дорожки (вес меди) — толщина дорожки увеличивается, а импеданс уменьшается.
  - **CEr.** Диэлектрическая проницаемость покрытия относительно параметра диэлектрического материала покрытия (паяльного покрытия).
  - **C1/C2.** Толщина паяльной маски — Толщина покрытия увеличивается, а импеданс уменьшается.
  - **Zo.** Расчетный импеданс.

**Вес меди**

Вес меди больше известен как толщина проводящего слоя меди на печатной плате. В таблице 3 показано соответствие веса и тол-

щины меди, которая обычно используется при производстве печатных плат.

**Опорная плоскость**

Опорная, или базовая, плоскость на печатной плате относится к проводящему слою (обычно заземлению или питанию), который служит стабильным и постоянным электрическим эталоном для сигналов на плате. Этот слой обеспечивает установленный электрический потенциал, относительно которого измеряются напряжение и ток сигналов. Правильное использование опорных плоскостей имеет решающее значение для обеспечения контроля импеданса и целостности сигнала, а также для снижения электромагнитных помех (ЭМП, EMI) в высокоскоростных цифровых и высокочастотных аналоговых схемах.

На рис. 22 показана конфигурация опорной плоскости, в которой структура этих плоскостей задает контролируемый импеданс. Управление путями наименьшего сопротивления является критической частью стека, оказывающей влияние на выбор материала диэлектрика. Тип и толщина матери-

**Таблица 3.** Стандартные толщины меди

Вес меди, унция	Толщина, мкм	Толщина, мил
0,5	17,5	0,7
1	35	1,4
2	70	2,8
3	105	4,2

ала могут заставить ток протекать в плоскость питания печатной платы до того, как он будет связан с заземляющим слоем.

Для сигнала, проходящего по линии передачи, обратный путь определяется емкостью между линией и ее опорной плоскостью. Более высокая емкость, более высокая частота или и то и другое означает, что обратный ток может легко проходить в заземляющий слой как ток смещения.

**Разделение плоскости (сигнал/питание/земля)**

Разделение различных плоскостей на печатной плате используется для размещения разных сигналов питания в отдельных слоях, в некоторых случаях это могут быть смешанные сигналы, в частности, аналоговые и цифровые в одном слое. Необходимо иметь в виду, что при разделении питания, заземления и сигнала по слоям могут возникнуть проблемы с целостностью сигнала при его маршрутизации в соседний слой через разделенную область из-за потери обратного пути для прохождения сигнала. Следует избегать параллельной трассировки, проходящей через разделенные области, а также трассировок через пустоты, чтобы предотвратить разрыв плоскости, через которую осуществляется возврат.

Лучший пример разделения плоскостей по слоям — проектирование четырехслойного стека, когда внешние слои делают «землей», а внутренние слои используют для питания и сигнала, что обеспечивает наилучший обратный путь в схеме.

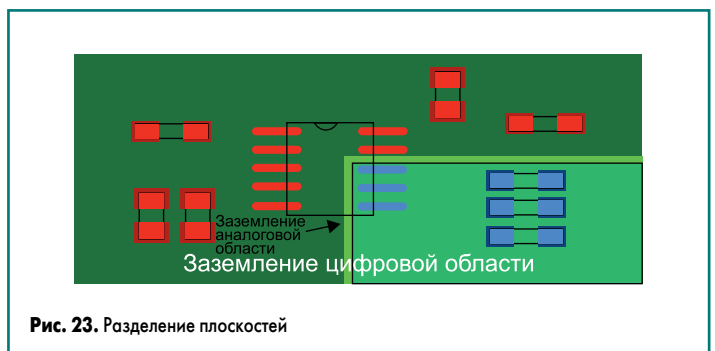
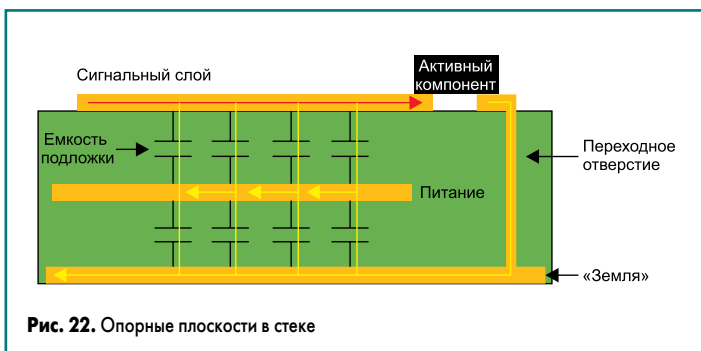


Таблица 4. Симметричный стек

Слой	Толщина меди, мил/мкм	Вес фольги, унций/мкм	DK	DF	Толщина, мил/мкм	Материал
1	1,9/48	0,5/17,5	2,98	0,0014	5/127	Ядро Tachyon 100G 5,00 мил
2	0,6/15	0,5/17,5	3,04	0,0016	6,35/161	Препрег Tachyon 100G 1078
3	0,6/15	0,5/17,5	3,11	0,0018	10/254	Ядро Tachyon 100G 10,00 мил
4	0,6/15	0,5/17,5	2,97	0,0014	4,1/104	Препрег Tachyon 100G 1078
5	0,6/15	0,5/17,5	3,11	0,0018	10/254	Ядро Tachyon 100G 10,00 мил
6	1,9/48	0,5/17,5	3,04	0,0016	6,35/161	Препрег Tachyon 100G 1078
			2,98	0,0014	5/127	Ядро Tachyon 100G 5,00 мил

На рис. 23 представлена простая аналоговая и цифровая заземляющая разделенная плоскость в одном слое. Важно точно совместить разделенную плоскость с конструкцией стека слоев, чтобы обеспечить единообразие и правильное выравнивание проводящего и диэлектрического слоев.

**Толщина диэлектрика**

Это толщина базового материала между проводящими слоями печатной платы.

Характеристическое сопротивление линий передачи, производительность, термическая и механическая стабильность определяются толщиной диэлектрического слоя и свойствами материала. Выбор правильного базового материала на основе рабочей частоты, механических и электрических свойств, термических свойств (СТЕ), диэлектрической проницаемости (Dk) и коэффициента рассеяния (Df, тангенс угла потерь) является ключевым фактором.

В таблице 4 представлен типичный 6-слойный симметричный стек с контролируемым импедансом, сочетающий комбинацию тонких слоев препрега со слоями ядер.

**Структура материала (однослойная против многослойной)**

Материал печатной платы производится с использованием стеклоткани, скрепленной смоляным эпоксидным материалом. Существует несколько широко распространенных вариаций стеклоткани на основе распределения волокон, таких как 106, 1080, 1078, 2116, 3313 и т. д. Они обладают специфическими свойствами — к примеру, низким DK, который изменяется в большую или меньшую сторону. Базовый материал с двухслойной основой дает, по сравнению с однослойной, разные Dk и Df из-за различного остаточного процента смолы, что напрямую влияет на изолирующие свойства ядра и разделение проводящих слоев.

На рис. 24 дано сравнение одно- и двухслойного материала с размещенной на основном материале полосковой линией. Однослойный хорош для недорогих печатных плат, имеющих минимальную сложность. Многослойный обеспечивает лучшую изоляцию, но стоит дороже и используется для сложных печатных плат с высокочастотными или высокоскоростными схемами с лучшей ЭМС, меньшими перекрестными помехами и лучшей целостностью сигнала.

Толщина базового материала влияет на стиль плетения стеклоткани. Разное количество слоев в материале, будь то препрег или сердечник, даже если они имеют одинаковый вид плетения стекловолоконной ткани и пористость, дает в сумме разные диэлектрические постоянные. При определении структуры стека важно выбрать правильное распределение стекла на основе проектной скорости линий и требуемой мощности.

**Соблюдение требований EMI/EMC**

Учет электромагнитных помех (ЭМП) и электромагнитной совместимости (ЭМС) имеет решающее значение при проектировании стека печатных плат для минимизации нежелательных электромагнитных

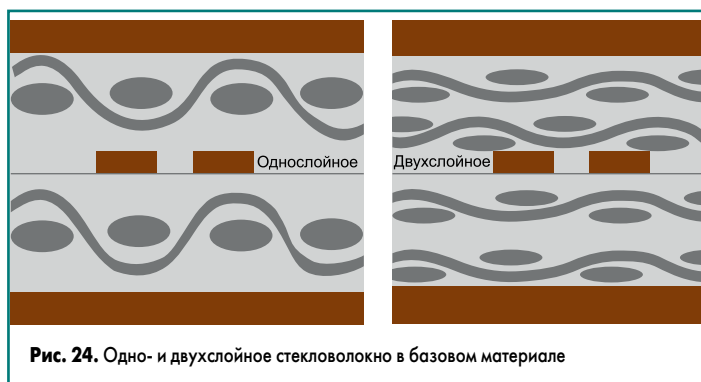


Рис. 24. Одно- и двухслойное стекловолно в базовом материале

излучений. Правильно сконструированный заземляющий слой в составе многослойного стека важен для снижения ЭМП/ЭМС, особенно в случае высокочастотных, высокоскоростных цифровых и высоко-мощных устройств.

Стек, в котором импеданс контролируется с помощью ширины дорожек и расстояния между ними, с использованием копланарного заземления со сшиванием переходных отверстий может снизить излучение

Таблица 5. Симметричный стек

#	Имя	Слой	Функция слоя	Значение, мил /мкм	Материал	Dk
*	*	*	*	*	*	*
		Поверхность				1
		Диэлектрик	Диэлектрик	0,71/18	FR-4	3,9
1	BEPX	Проводник	Проводник	1,18/30	Медь	3,9
		Диэлектрик	Диэлектрик	3,7/94	EM_5288K	3,19
2	L2_GND1	Плоскость	Плоскость	0,98/25	Медь	3,41
		Диэлектрик	Диэлектрик	3,7/94	EM_5288K	3,19
3	L3_SIG1	Проводник	Проводник	0,98/25	Медь	4,1
		Диэлектрик	Диэлектрик	3,7/94	EM_5288K	3,19
4	L4_GND-PWR1	Проводник	Проводник	1,18/30	Медь	4,1
		Диэлектрик	Диэлектрик	1,5/38	EM_5268	3,17
5	L5_PWR1	Плоскость	Плоскость	0,98/25	Медь	4,5
		Диэлектрик	Диэлектрик	2,36/60	EM_526	3,29
6	L6_PWR2	Плоскость	Плоскость	0,98/25	Медь	4,5
		Диэлектрик	Диэлектрик	1,5/38	EM_5268	3,17
7	L7_GND_PWR2	Проводник	Проводник	1,18/30	Медь	4,1
		Диэлектрик	Диэлектрик	3,7/94	EM_5288K	3,19
8	L8_SIG2	Проводник	Проводник	0,98/25	Медь	4,1
		Диэлектрик	Диэлектрик	3,7/94	EM_5288K	3,19
9	L9_GND2	Плоскость	Плоскость	0,98/25	Медь	3,411
		Диэлектрик	Диэлектрик	3,7/94	EM_5288K	3,19
10	НИЗ	Проводник	Проводник	1,18/30	Медь	3,9
		Диэлектрик	Диэлектрик	0,71/18	FR-4	3,9
		Поверхность				1



**Комментирует Сергей ШИХОВ,  
директор по управлению проектами,  
«А-КОНТРАКТ»:**

*Разработка стека печатной платы — очень значимый процесс в проектировании электронного устройства. Необходимо найти разумный компромисс, учитывая схемотехнические требования, требования ЭМС, тепловые характеристики, геометрические ограничения, возможности производства, а также экономические факторы. Важно не ошибиться на этом этапе, ведь исправлять подобную ошибку будет очень сложно, долго и дорого.*

ЭМП. Технологии глухих и скрытых отверстий с обратным сверлением и последовательным ламинированием могут сократить длину паразитных антенн и уменьшить нежелательные излучения. Правильное расположение сигнальных слоев в стеке также может снизить ЭМП и улучшить ЭМС. Размещение плоскостей в слое с соседствующими заземляющими, защитными или шунтирующими дорожками и экранирование силовых плоскостей обеспечивают обратное прохождение тока с низким импедансом и минимизируют шум.

В таблице 5 показан симметричный 10-слойный стек с плоскостью жесткой связи (верхняя часть/земля/сигнал/питание/земля/питание), которая помогает уменьшить падение напряжения, минимизировать шум и повысить характеристики ЭМС.

### Заключение

Миниатюризация электронных устройств привела к необходимости создавать более компактные и эффективные конструкции стека печатных плат. В эпоху искусственного интеллекта (ИИ), дополненной реальности (AR) и сетевых решений 5G все инженеры-конструкторы печатных плат должны быть осведомлены о современных технологиях передового дизайна стека для электронных устройств.

Проект стека является критически важным аспектом разработки печатной платы, который напрямую влияет на ее производительность, надежность и технологичность. Количество слоев, их толщина

и требования к импедансу зависят от сложности и функциональности схемы. Использование материалов с низким КТР, высокой или низкой теплопроводностью и контролируемой при изменении температуры диэлектрической проницаемостью помогает проектировать устройства, предназначенные для эксплуатации при экстремальных температурах.

Используя многослойную конструкцию, имеющую в составе несколько слоев с глухими и скрытыми переходными отверстиями, разработчики могут создавать высококачественные платы, эффективно функционирующие в различных условиях.

Стоимость и надежность играют ключевую роль в проектировании стека. Плохой проект стека отрицательно скажется на времени выхода конечного изделия на рынок и на стоимости производства. Разработка платы — это трудоемкая работа, а ее производство — довольно длительный процесс, который может увеличиться на несколько недель, если требуется изготовить многослойную печатную плату на основе цикла ламинирования, для чего предварительно понадобится закупить все необходимые материалы.

Существуют быстрые высокотехнологичные методы изготовления печатных плат, но они дороже. И если проект платы содержит ошибки, на их выявление и устранение и уйдут те самые несколько недель, которые могли бы быть выиграны за счет использования современных технологий производства. Вот почему безошибочное проектирование и предварительное моделирование проекта стека с правильно выбранными базовым материалом и типами слоев, с оптимальным количеством циклов ламинирования поможет сделать печатную сборку экономически эффективной и послужит дополнительным конкурентным преимуществом на рынке для конечного изделия.

Разработчик должен знать об инструментах моделирования и изменять их для проверки конструкции стека и анализа целостности сигнала, согласования импеданса и теплового поведения перед изготовлением печатной платы. Кроме того, важно четко документировать детали стека, включая порядок слоев, используемые материалы и рекомендации по проектированию, чтобы облегчить и ускорить изготовление и сборку печатной платы.

Выбор правильного стека при проектировании печатной платы — важнейший аспект сложности конечного продукта, его размера, надежности и стоимости. Использование современных технологий, таких как гибкие и гибко-жесткие платы, встроенные компоненты, платы на металлическом основании и другие элементы, обеспечивает создание компактного и надежного электронного устройства.