

# ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И МНОГОСЛОЙНОСТЬ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Арнольд Вимерс (Arnold Wiemers)  
© ILFA GmbH (Germany)

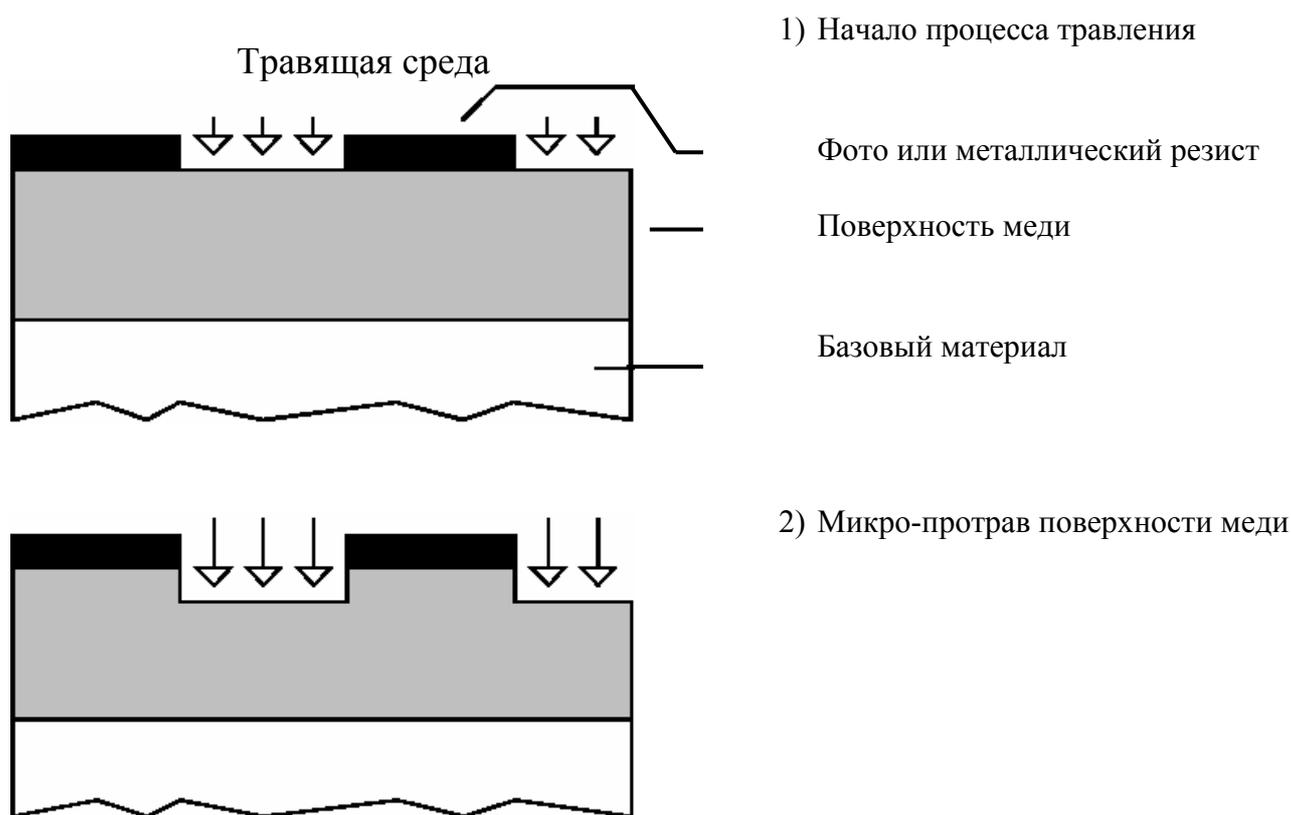
©Перевод ELLWEST KG (Austria)  
Переводчики:  
М.И. Василенко,  
Я. В. Василенко

Окончание. Часть 4.

## Травление

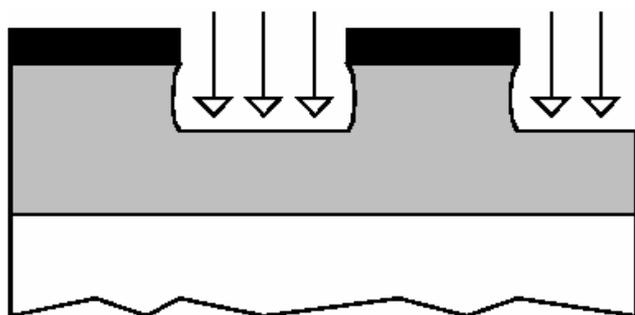
В этом разделе мы рассмотрим еще раз эффекты травления, которые оказывают те или иные воздействия на волновое сопротивление печатного проводника. На рисунке 27 показана взаимосвязь между отдельными этапами процесса травления.

Рисунок 27.1. Отдельные стадии (1,2) процесса травления печатных плат/причины бокового подтравки печатных проводников

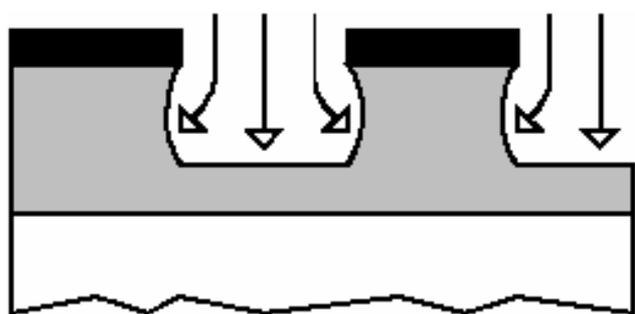


В исходной ситуации 1) «Начало процесса травления» поверхность меди уже покрыта предварительно скомпонованным фоторезистом, содержащим информацию о будущем проводящем рисунке печатной платы. Здесь травящая среда орошает и удаляет те участки меди, на которые не нанесено резистивное покрытие. Этапы 2) и 3) показывают дальнейший ход этого процесса.

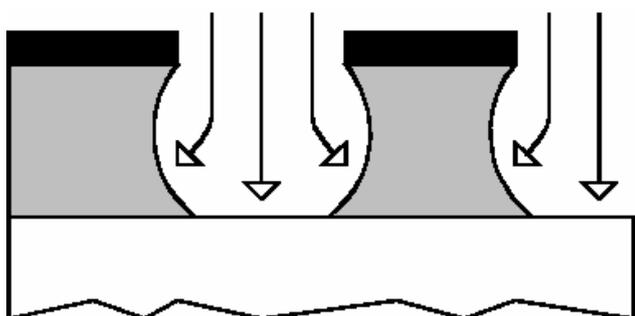
Рисунок 27.2. Отдельные стадии (3,4,5) процесса травления печатных плат/причины бокового подтравки печатных проводников



3) Травление поверхности меди. Микро-протрав боковых сторон печатного проводника под фоторезистом

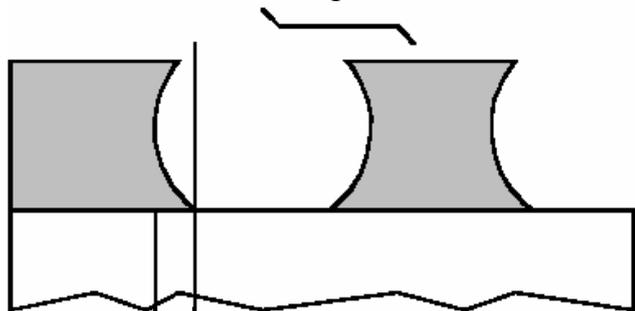


4) Микро-протрав поверхности меди. Травление боковых сторон (ребер) печатного проводника



5) Сквозное протравливание поверхности меди. Боковой подтрав торцов (ребер) печатного проводника

Печатный проводник



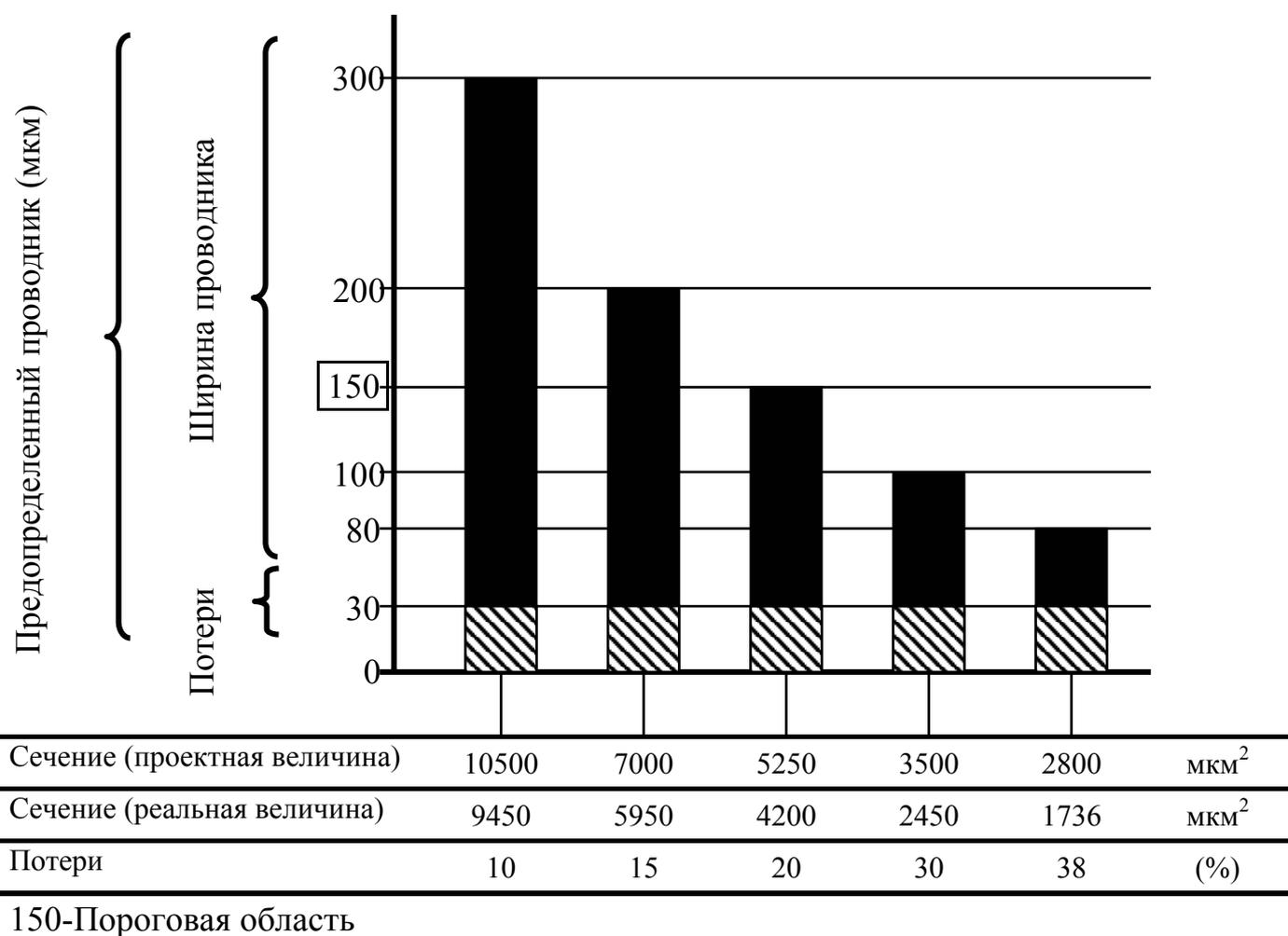
6) Завершение процесса травления. Удаление резиста

→ ← Потери из-за бокового подтравки

На этапе 4) травящая среда уже настолько глубоко проникла в медь, что медь на боковых сторонах печатного проводника под резистом также удалена. Это обстоятельство проявляется еще в большей степени на этапе 5). Медь здесь уже полностью удалена до FR-4 носителя, но для того, чтобы уверенно гарантировать

разделение смежных печатных проводников (перекрестные наводки сигналов, пробой) , а также, чтобы исключить ситуации, когда остатки меди локально уменьшают расстояние между печатными проводниками, процесс травления продолжается дальше. На этапе б) медь удаляется, главным образом, из-под резиста и здесь в наибольшей степени проявляется эффект бокового подтрав, характерный слегка вогнутым внутрь, трапецевидным поперечным сечением печатного проводника. Ниже приведен анализ потерь при травлении, а также, показаны результаты бокового подтрав и вытекающие из них последствия для вариантов выбора технологии производства печатных плат. График на рисунке 28 показывает, что боковой подтрав является постоянным процессом, то есть полностью независим от ширины печатного проводника и зависит исключительно от толщины меди.

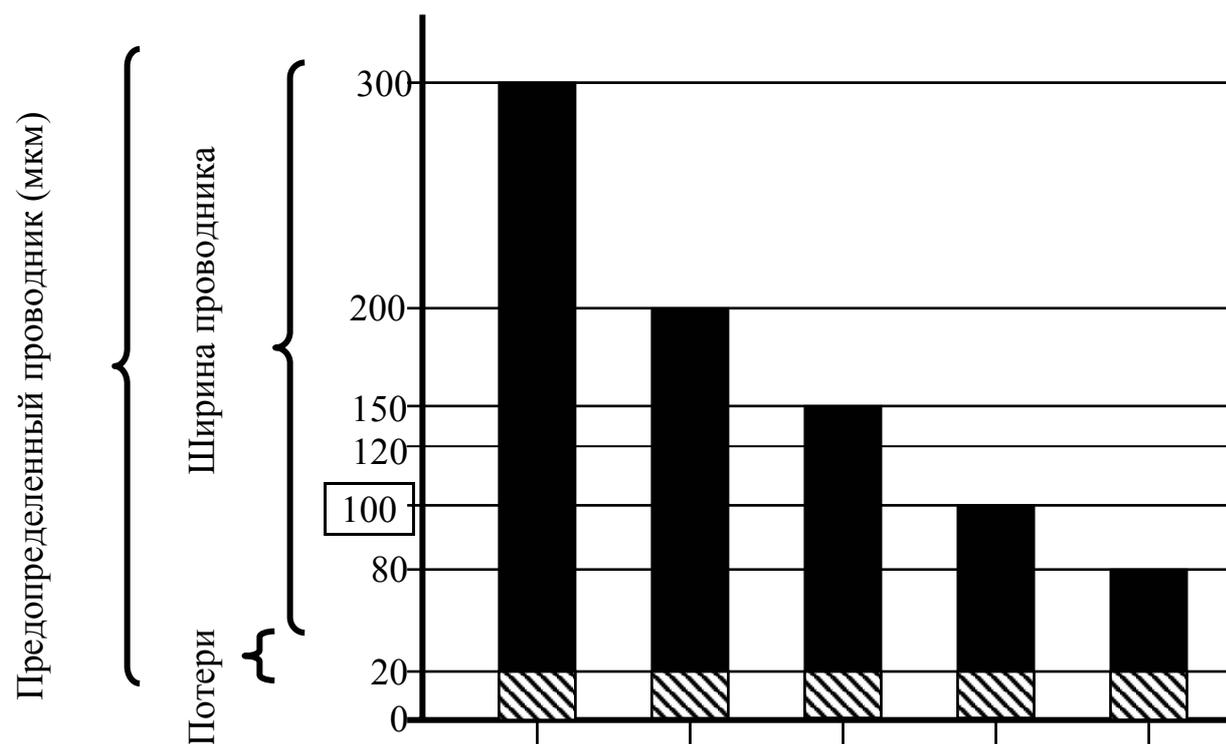
Рисунок 28. Боковой подтрав, составляющий около 30мкм у меди толщиной в 35мкм (обусловлено технологией производства)



Убыль в ширине печатного проводника (при 35мкм толщине меди) принимается в среднем в 30мкм, но может несколько изменяться в зависимости от производителя и технологии травления (кислотная или щелочная). Эту убыль можно компенсировать путем оставления припуска при экспонировании структуры проводящего рисунка. Разумеется, компенсация может быть только в пределах определенных границ, так

как при слишком неблагоприятном соотношении между шириной и высотой печатного проводника не может быть обеспечена чисто механическая стабильность печатного проводника. Если проводник станет слишком узким при довольно большой высоте, то обусловленная подтравом вогнутость боковых сторон печатного проводника приведет к разрыву его верхней части. Для печатных проводников с заданным волновым сопротивлением этот эффект является фатальным, так как вследствие этого возникают абсолютно неконтролируемые результаты. Граница для медного покрытия толщиной в 35мкм соответствует ширине печатного проводника в 150мкм (рисунок 28). Для топологии проводящего рисунка на шаблоне, получаемом в САПР, если не проводить коррекции, то следует считаться с уменьшением проводника по ширине в этом диапазоне на 20%. Если же ширина проводников находится ниже границы в 150мкм, то, в силу нестабильной воспроизводимости стадий технологического процесса во время производства печатных плат, получение заданного волнового сопротивления является вообще весьма проблематичным. Те же самые соображения имеют силу для меди толщиной в 17мкм (рисунок 29), только граница, как и следовало ожидать, отодвигается вниз в область 100мкм.

*Рисунок 29. Боковой подтрав около 17мкм у меди толщиной в 35мкм (обусловлено технологией производства)*



Сечение (проектная величина)	5100	3400	2550	1700	1360	мкм <sup>2</sup>
Сечение (реальная величина)	4743	3060	2218	1360	1020	мкм <sup>2</sup>
Потери	6.7	10	13	20	25	(%)

100-Пороговая область

## Отверстия

Классическое применение печатных плат - быть несущей основой для компонентов и осуществлять соединения между ними. Сегодня задачи, решаемые с помощью печатных плат, значительно расширились и состоят также в том, чтобы обеспечивать реализацию функциональных решений. В число таких решений входят широкополосная развязка через ультратонкие внутренние слои ламината, обеспечение заданного волнового сопротивления сигнальных печатных проводников и реализация современных стратегий межслойных соединений посредством металлизации.

От САПР-дизайнеров будет требоваться в будущем комплексное системное мышление, так как комбинация электротехнической теории, современных требований к схемотехническим решениям, а также, современных требований технологии производства печатных плат порождает очень широкий спектр задач, решение которых может быть обеспечено только путем приложения более высокой квалификации и более глубоких знаний специалистов, чем имеется в настоящее время. Им будут необходимы базисные знания, дающие возможность находить и различать эти взаимосвязи.

Одним из актуальных новшеств в области производства печатных плат является интеграция, так называемых, «внутренних переходных отверстий» и «слепых переходных отверстий» в технику проектирования топологии печатных плат, что создает предпосылки разводки высокосложных плат. Мы уже затрагивали тот момент, что «внутренних переходные отверстия» при проектировании многослойных печатных плат могут приводить к известным ограничениям. К сказанному добавим, что выбираемые варианты металлизации (внутренние и скрытые переходные отверстия) в дальнейшем вызывают к жизни производственно-технологические требования, которые ведут к ограничениям при вычислении волнового сопротивления.

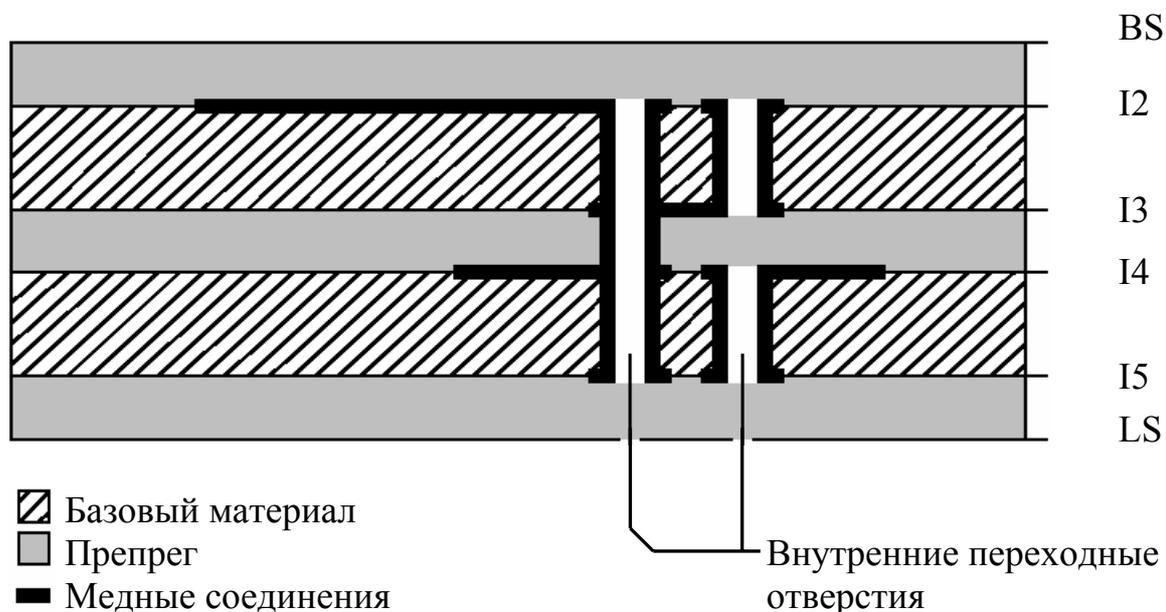
Так же как и при сквозной металлизации (= DK's - сокращение от немецкого *«durchgehende Kontaktierungen»*, применено в смысле ярусной или стрингерной металлизации, - прим.перев.), цель выборочной металлизации состоит в том, чтобы электрически соединить друг с другом определенные слои в послойной структуре многослойной печатной платы таким образом, чтобы стала возможной задуманная функциональность электрической схемы. Для создания такой металлизации в производстве печатных плат используются гальванические технологии. Эти технологии подчиняются элементарным физическим условиям, из которых, прежде всего, назовем поверхностное натяжение жидкостей и капиллярный эффект в тонкой трубке (=отверстии).

Принцип гальванотехники состоит в том, что химически активные жидкости, в которых растворены необходимые химические вещества, применяются к сторонам отверстия на протяжении точно установленных промежутков времени. После этого,

желательно немедленно и полностью удалить их воздействие. С этой целью, необходимо точное заполнение отверстий водным раствором. Такое заполнение будет затруднено, если нарушить определенное соотношение между диаметром отверстия и длиной пиноли сверлильного шпинделя (глубиной сверления). Если последовательно сокращать диаметр отверстия то, как только будет достигнута некоторая его предельная величина, первоначальное наполнение отверстия приведет к скоплению там жидкости, которая больше не сможет полностью промываться (циркулировать) из-за воздействия сил поверхностного натяжения в последующих технологических операциях. Достижение требуемых параметров металлизации станет ненадежным, что приведет к возможной забраковке печатной платы по этой причине.

Тенденция к использованию микропереходных отверстий означает, что упомянутая предельная величина соотношения глубины и диаметра сверления уже достигнута. Из информации на рисунке 30 видно, начиная с какой толщины ламината металлизация отверстия дискретного диаметра становится невозможной при имеющихся в распоряжении в настоящее время технологиях. Так, в нижней части таблицы показано, что для диаметра отверстия в 0.10мм (=определенном трассировкой в САПР) максимальная толщина ламината составляет 1.10мм. Такая конструкция вполне допустима для 6-слойной многослойной печатной платы.

Рисунок 30. Внутренние переходные отверстия (металлизация между несколькими внутренними слоями без контакта с внешним слоем)/ соотношение между диаметром и глубиной переходного отверстия (соотношение геометрических размеров)

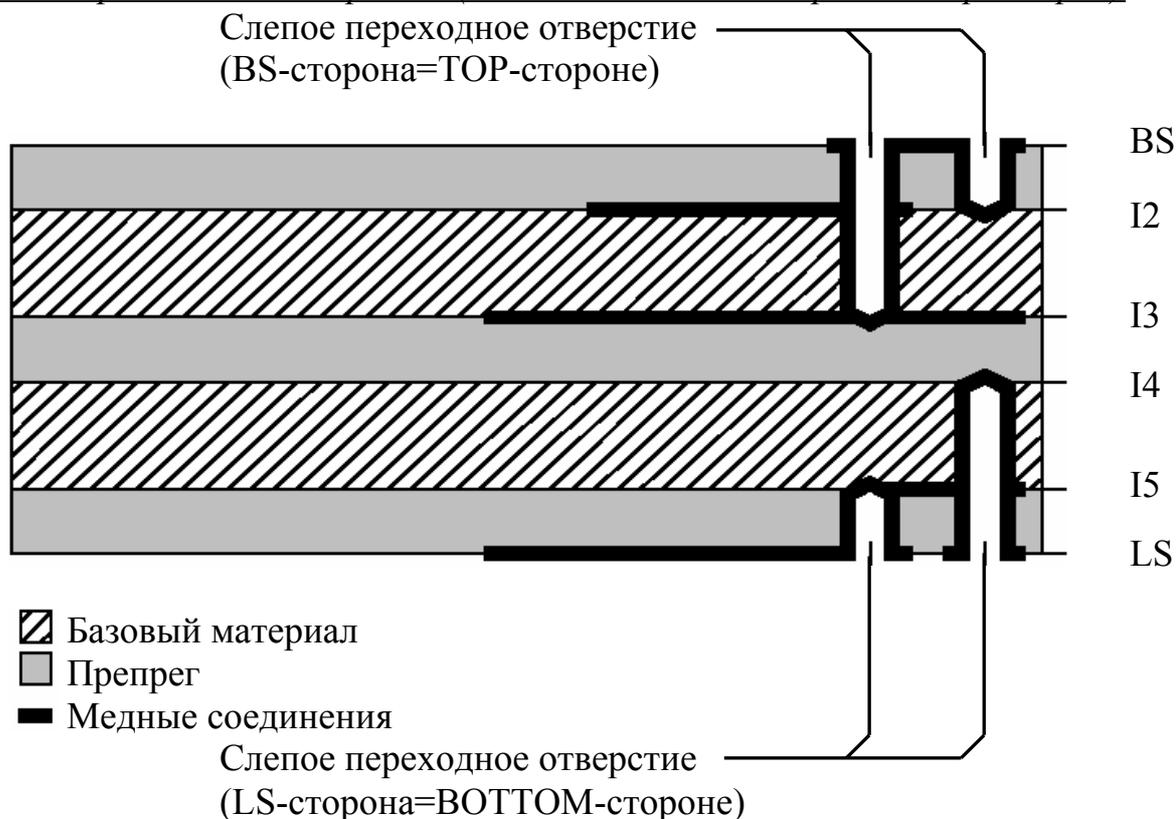


Наименьшее отверстие, определяющее глубину сверловки (I... → I...)

Отверстие (мм)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
Максимальная глубина	1.10	1.40	1.65	1.90	2.20	2.50	2.75

Для схемы с волновым сопротивлением решающим является то, что, при такой толщине печатной платы, может оказаться, к примеру, невозможным получить большой зазор между слоями. Если вычисление волнового сопротивления требует большего, чем 1.10мм расстояния между слоями, тогда изготовление печатной платы было бы невозможно, так как соответствующее переходное отверстие в 0.10мм не могло бы быть гальванически металлизировано и таким образом, заданная в САПР концепция не могла бы быть выполнена. В настоящее время внутренние переходные отверстия еще «не в моде» и зазор в 1.10мм между смежными слоями многослойной печатной платы при обычной их толщине в 1.5мм, конечно, довольно редок (за исключением, пожалуй, кросс-плат). Принцип гальванотехнической металлизации используется, также, без изъятий в слепых переходных отверстиях (Рис.31). Здесь, однако, отношение глубины сверления отверстия к его диаметру (=соотношение геометрических размеров) существенно меняется в сравнении с внутренними переходными отверстиями. Уже при заданной величине переходного отверстия в 0.30мм (из проекта в САПР) использующего этот вариант металлизации, производителем печатных плат выполняема максимальная глубина отверстия только около 0.40мм.

Рисунок 31. Слепое переходное отверстие (металлизация между наружным слоем и одним или несколькими внутренними слоями)/ соотношение между диаметром и глубиной переходного отверстия (соотношение геометрических размеров)



Наименьшее отверстие, определяющее глубину сверловки.

(BS... → I...) или (LS... → I...)

Отверстие (мм)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
Максимальная глубина	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45

Подоплекой такого значительного ограничения в глубине сверления отверстия является механический режим циркуляции жидкости во время металлизации. В отличие от внутренних переходных отверстий, слепые переходные отверстия на глубину более 0.40 мм ( при диаметре отверстия 0.30 мм) больше не будут заполняться. Даже использование, к примеру, гальванических ванн с ультразвуком не вносит существенных изменений в результаты. Это связано с тем, что химически активные жидкости в слепом переходном отверстии должны многократно вводиться в гильзу отверстия и затем снова вымываться. Поверхностное натяжение делает этот процесс возможным только при значительно уменьшенной глубине отверстия.

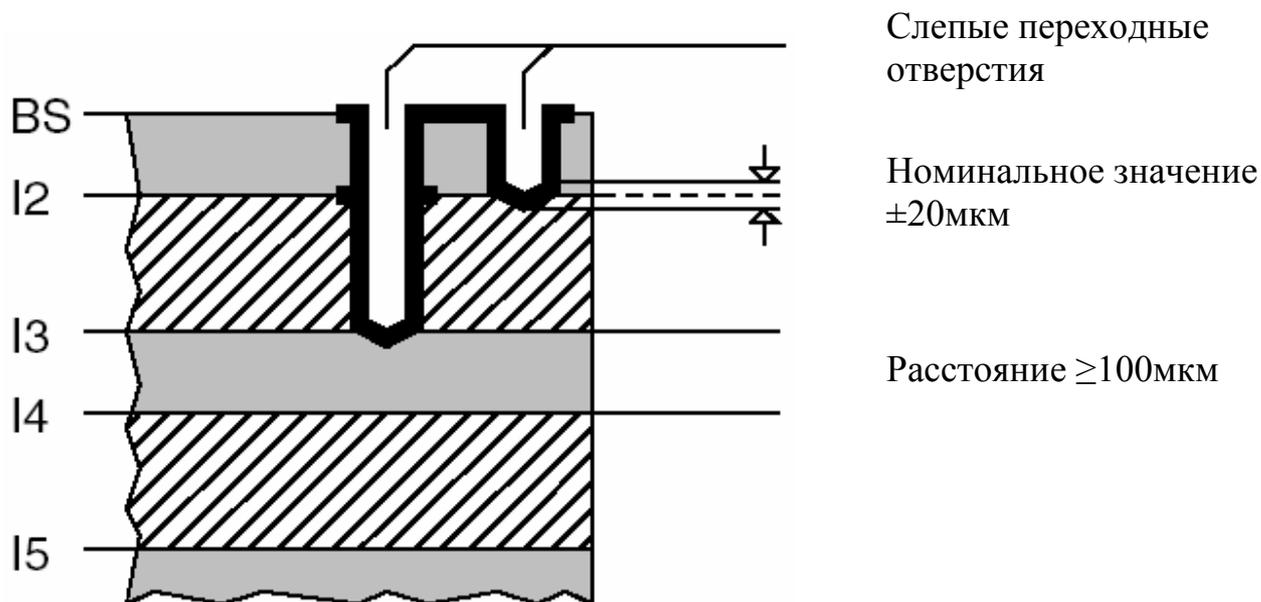
При «нормальной» конфигурации послойной структуры многослойной печатной платы не составляет большого труда адаптироваться к вышеназванным условиям, выбирая ламинаты и препреги внутренних слоев таким образом, чтобы возможная общая толщина платы и зазоры между слоями не превышали норму.

Проблемы начинают появляться тогда, когда сигнальные слои должны иметь металлизированные слепые переходные отверстия, а проводники должны быть выполнены с обеспечением заданного волнового сопротивления. Так как строгое соблюдение необходимых зазоров между слоями ламината является элементарным требованием для получения правильного волнового сопротивления, то это налагает определенные ограничения на регулировку диаметра слепых переходных отверстий при максимально допустимой глубине сверловки, что может, в свою очередь, вследствие ненадежной металлизации, привести к непоправимо ошибочной конструкции платы в целом.

Другое ограничение состоит в том, что послойная компоновка печатной платы должна также решать еще и другие задачи наряду с обеспечением необходимого волнового сопротивления в тех или иных слоях, что обычно и имеет место на практике. К примеру, необходимо контролировать защищенность электрической схемы от помех, как часть различных мероприятий по электромагнитной совместимости или для достижения улучшенной широкополосной развязки. Одной из возможностей достижения этих целей является размещение вплотную друг к другу смежных плоскостей питания с минимально возможным зазором в 50мкм. Однако, из-за допусков, а также особенностей технологии механического сверления (Z-осевое сверление) является необходимым, исходя из соображений безопасности, соблюдение зазора в 100мкм от целевой плоскости до следующего смежного слоя с внутренними переходными отверстиями (лазерное сверление имеет здесь очевидные преимущества).

Обратимся к диаграмме на рисунке 32. Если бы в приведенном здесь примере слой «I3» является землей, а слой «I4» - VCC, то тогда бы реализуемый минимальный зазор составил 100мкм, вместо желаемых 50мкм. Эффективный вариант более плотного расположения друг к другу смежных плоскостей питания оказался бы невозможным. Вместе с этим, была бы, также, преждевременно ограничена максимально достижимая емкость развязки электрической схемы.

Рисунок 32. Допуски при механическом Z-осевом сверлении и нормы зазоров между соседними слоями



### Металлизация

Посредством металлизации (=металлизация + дополнительное армирование) на поверхности ламината или на сторонах отверстия осаждается медь толщиной от 25мкм до 42мкм. Этот разброс получается вследствие различий в технологии предприятий, используемых методов (стеллажной или корзинчатой технологии, горизонтального или вертикального прохождения), степени концентрации активных веществ в гальванических ваннах и электрической системы управления процессами (качество контакта, выпрямитель тока).

Практическая терминология в части осаждения меди на печатные платы сформировались на основе опыта повседневной работы на местах у производителя, равно как и в головах САПР-проектировщиков. Если требуются печатные платы с конечной толщиной меди в «35мкм», то производитель запускает в производство ламинат, имеющий толщину медной фольги в 17мкм. Как показано на рисунке 33, в результате этого конечная толщина меди получается от 42мкм (=17мкм стандартная медь + 25мкм нижний предел металлизации) до 59мкм (=17мкм стандартная медь + 42мкм верхний предел металлизации). При вычислении волновых сопротивлений подобная «вольность» приводит к принципиальной неразберихе, так как разработчиком в качестве исходного параметра для вычислений сопротивления принимается толщина меди в «35мкм», конечно же, в её разговорном понимании. К сожалению, использование в расчетах толщины медного слоя в 42мкм или усредненного ожидаемого значения в 50мкм, также, не приблизит к желаемой цели, так как толщина осажденной меди изменяется не только от производителя к производителю, но и в пределах одного предприятия в зависимости от состояния гальванических ванн и используемого технологического процесса.

Рисунок 33. Отчет по металлизации исходя из стандартных толщин меди (Возможны отклонения, обусловленные технологическим процессом у производителя)

Стандартная медь	Металлизация	Медь (полная [мкм])	
		Гильза	Финишная поверхность
5	25–42	25–42	30–47
9	25–42	25–42	34–51
17	25–42	25–42	42–59
35	25–42	25–42	60–77
70	25–42	25–42	95–112
105	25–42	25–42	130–147

Корни таких колебаний в толщинах меди находятся в первоначальном требовании (по крайней мере -в Германии), что безусловно необходимо получить толщину осажденной меди в 25 мкм на стенках просверленного отверстия. Это, так называемый, «нижний предел» и чтобы гарантировать его, технологические процессы производителя должны быть отлажены таким образом, чтобы этот предел никогда не был бы нарушен, то есть результирующая толщина металлизации медью гарантированно должна находиться выше этой границы.

Таким образом, если мы имеем дело с ламинатом внутренних слоев, покрытых медной фольгой толщиной в 17 мкм, то на практике всегда появляется в итоге обусловленное технологическим процессом отклонение относительно ожидаемой толщины меди в 35мкм в пределах от +8мкм до +15мкм.

Иными словами, если внутренний ламинат должен быть металлизирован, потому что конструкция печатной платы потребовала применения внутренних переходных отверстий, то может быть оценена ожидаемая погрешность волнового сопротивления. Если в производстве используется ламинат для внутреннего слоя с толщиной меди в 17мкм, то (исходя из таблицы на рисунке 9) можно было бы ожидать значение волнового сопротивления равным 45.2 Ома для одиночной несимметричной полосковой линии с шириной печатного проводника в 200мкм и толщиной меди в 35мкм. В действительности после металлизации толщина меди будет между 42мкм (волновое сопротивление =44.2 Ом) и 50мкм (волновое сопротивление=43.2 Ом). Следовательно, еще на этапе первоначального вычисления волнового сопротивления допуски процесса металлизации приводят к отклонению фактического значения волнового сопротивления у готовой печатной платы. У металлизированных слоев в печатной плате реальный размер погрешности

отклонения от нормы, указанной в технических требованиях на волновое сопротивление, может быть принят в 2 Ома.

Такой результат вовсе не обязательно приводит к непригодной печатной плате. Разве что, случилось такое, что другие допуски кумулятивно уже отодвинули значение волнового сопротивления к нижнему пределу. В любом случае, металлизация не должна и не может быть полностью исключена из расчетов при комбинированной задаче - волновое сопротивление плюс внутренние переходные отверстия. Вариант металлизации внутренних переходных отверстий всегда требует металлизации затронутых внутренних слоев. С точки зрения технологии производства, эти внутренние слои можно с определенным приближением рассматривать как «внешние слои» в процессе металлизации, при которой, конечно, металлизуются и внутренние переходные отверстия. Одновременно на этих слоях (которые позже станут в готовой многослойной печатной плате «внутренними слоями») также формируется плоскостное медное покрытие. Таким образом, если при вычислении волнового сопротивления брать в расчет только стандартную медь, например, толщиной в 17мкм (=48.1 Ом), а после металлизации фактическая толщина меди повысится до 45мкм или 50мкм (=43.2 Ом), то из этой ярко выраженной разницы в толщинах меди вырисовывается отклонение сопротивления приблизительно в -5 Ом. Это отклонение является вполне достаточным, чтобы вывести готовую печатную плату за допустимые пределы функционирования, так как, одно только это отклонение выводит системы с 50-омным волновым сопротивлением из «игры».

Данное обстоятельство существенно осложняет реализацию концепции компоновки многослойных конструкций, особенно, если рассматривать комплексные технические требования, которые нужно учитывать для многослойных печатных плат с контролируемым волновым сопротивлением. Наиболее простым решением этой проблемы, был бы принципиальный отказ от размещения сигналов, обладающих волновым сопротивлением, в слоях, которые должны металлизироваться. Это касается внутренних переходных отверстий соответствующих внутренних слоев для многослойной печатной платы в целом, и конечно, внешних слоев «BS» и «LS», так как эти слои всегда покрываются осажденной медью из-за необходимости металлизации отверстий. Поэтому такие варианты волнового сопротивления как «поверхностная микрополосковая линия», уже изначально не должны использоваться, если задан сжатый диапазон допусков на волновое сопротивление.

В заключение следует упомянуть, что приведенные здесь толщины меди, которые наращиваются посредством металлизации, общеприняты в Германии, однако, не вовсе не являются обязательными параметрами у международных производителей. В странах, ориентируемых на американские стандарты IPC, печатные платы часто изготавливаются по классам 1, 2 или 3 этих стандартов. Для класса 1 с наименьшими требованиями (что необязательно исключает контроль волнового сопротивления) металлизацию в гильзе отверстия в 15мкм считают достаточной, что является на 10мкм меньше, чем минимальный стандарт в Европе.

Для того, чтобы избежать недоразумений, в случае необходимости контроля волнового сопротивления металлизированных слоёв, применяемая толщина меди, должна быть непременно специфицирована в сопровождающих заказ «Технических требованиях».

## **Расчеты**

Расчеты были выполнены, с использованием программы «CITS25 Версия 2.0.3.0» , разработанной компанией «Polar Instruments».

## **Благодарности**

Господин Райшер (фирма «Райшер Промышленная Электроника/Полар», Вена, Австрия) и господин Расмуссен (DDE, Копенгаген, Дания) в рамках нашего совместного цикла FED-лекций «Волновое сопротивление» дали многочисленные полезные указания по тематике настоящей статьи.

Профессор Тюрингер (FH, Гессен, Германия) сделал исправление ошибок нашей работы для IPC «Волновое сопротивление».

Всем Вам сердечное спасибо за Вашу поддержку.

## **Перейти к:**

### **Часть 1**

*Предисловие.*

*Волновое сопротивление: термины и геометрия.*

*Волновое сопротивление: одиночная несимметричная полосковая линия.*

### **Часть 2**

*Волновое сопротивление: тестовый образец для испытаний.*

*Волновое сопротивление: расчет погрешностей.*

*Классификация многослойных конструкций.*

### **Часть 3**

*Послойная структура многослойных плат: внутренние слои.*

*Базовые материалы (жесткие).*

*Внутренние слои: ламинаты.*

*Внутренние слои: травление.*