

# ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И МНОГОСЛОЙНОСТЬ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

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

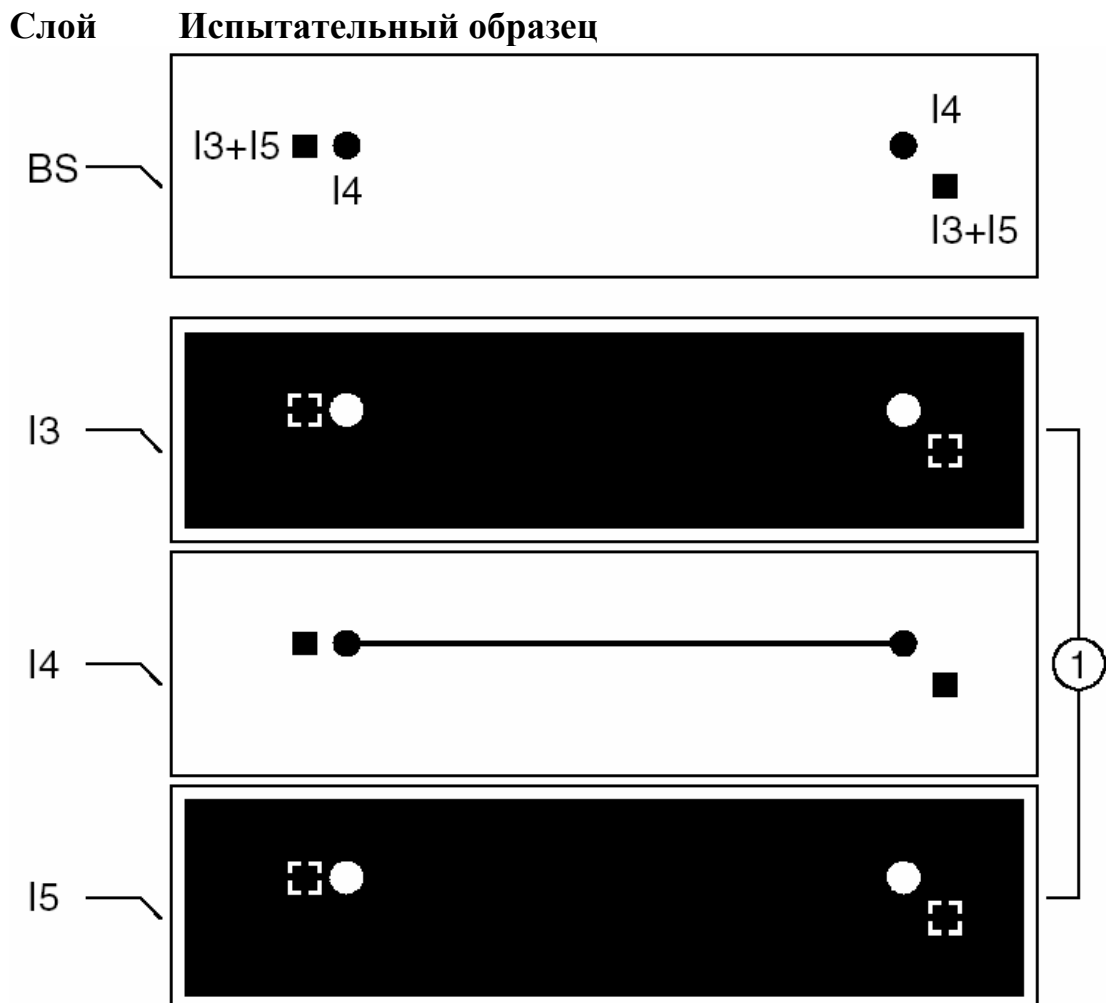
©Перевод ELLWEST KG (Austria)  
Переводчики:  
М.И. Василенко,  
Я. В. Василенко

Продолжение. Часть 2.

## Волновое сопротивление: тестовый образец для испытаний

Для проведения проверки волнового сопротивления, тестовый образец для испытаний (тестовый купон) должен располагаться вне печатной платы на производственной заготовке (панели). Конструкция такого образца для испытаний показана на рисунке 11.

*Рис.11. Структура тестового образца для измерения волнового сопротивления у многослойной печатной платы с рисунка 10*



Соответствие групп слоев:

1	I3	Относительный (опорный) потенциал
	I4	Сигнал
	I5	Относительный (опорный) потенциал

Оптимальные механические размеры тестового образца составляют приблизительно 20мм на 170мм. Для проверяемого печатного проводника рекомендуется длина от 150мм (в зависимости от применяемой производителем технологии проверки сопротивления).

Зачастую требуется контроль (измерение) волнового сопротивления в нескольких слоях многослойной конструкции. В таких случаях тестовый образец для испытаний должен соответственно увеличиваться в размерах. Следует обращать внимание на то, чтобы образец для испытаний адекватно имитировал плоскости питания и проводники с волновым сопротивлением

В приведенном выше примере первостепенное значение имеет сигнальный проводник, расположенный в слое «I4». Соответственно, проводник испытательного образца в слое «I4» должен иметь такую же ширину (=такой же D-код в наборе GERBER-данных) как и тестируемый печатный проводник в реальной схеме. В слоях «I3» и «I5» плоскости питания смоделированы на участке образца для испытаний с нанесенным полным покрытием.

При сравнении групп контактов, соединенных с плоскостями питания, можно увидеть, что слои «I3» и «I5» короткозамкнуты. В приведенном примере довольно очевидно, что обе плоскости являются землей (GND). Однако, подобное «**короткое замыкание**» должно быть повторено и в том случае, если в плоскостях имеются оба питания GND и VCC. Иными словами, подводка питания на испытательном образце должна быть также выполнена короткозамкнутой. Тот факт, что это действительно необходимо, вытекает из электрофизической теории гласящей, что в работающем модуле высокочастотные сигналы «видят» короткозамкнутое состояние между VCC и GND.

Само собой разумеется, учитывая, что имеет место короткое замыкание в моделируемых плоскостях питания испытательного образца, испытательный образец должен быть изолирован от печатной платы на производственной заготовке посредством круговой изоляции. Если этого не сделать, то окажется невозможным выполнить электрическое тестирование печатной платы, являющееся частью производственного цикла и выполняемое перед проверкой волнового сопротивления, поскольку первоначальный тест был бы невыполнимым из-за короткозамкнутых плоскостей питания.

Структуры на внешнем слое испытательного образца, именуемом «BS» , служат для вывода тестовых сигналов. В тех случаях, когда несколько различных испытаний волнового сопротивления выполнены на одной и той же печатной плате, используются текстовые надписи, поясняющие назначение испытания. Различный геометрический дизайн соединительных площадок облегчает распознавание сигнальной структуры. Например, если обозначить квадратными площадками соединение слоёв GND/VCC, то круглые площадки могут служить для обозначения носителей сигналов с волновым сопротивлением.

В площадках просверлены отверстия диаметром 1.0мм; зазор штырькового вывода составляет 2.54мм по оси X (слева) или 2.54мм справа и 2.54мм внизу (справа). Эти технические требования ориентированы на расстояние между измерительными иглами тестовой головки измерительного оборудования, используемого производителем печатных плат.

### **Волновое сопротивление: расчет погрешностей**

Не стоит ожидать, что фактическое волновое сопротивление печатной платы будет в точности соответствовать вашим теоретическим расчетам. В настоящее время отклонение в пределах  $\pm 10\%$  к расчетному значению является вполне приемлемым результатом. Разумеется, в практике могут встречаться и более высокие отклонения, ведущие к непригодности для использования печатной платы. С какой бы «точностью» вы не исчисляли предварительно значение волнового сопротивления , всегда будут иметь место отклонения от запланированных параметров на стадии изготовления печатной платы.

Производственные допуски должны быть всегда известны заранее, что позволяет сузить поле поиска возможных ошибок. Ожидаемые при изготовлении печатных плат производственные допуски представляют интерес также для САПР-разработчиков, так как разработчик может, в случае неправильного функционирования модуля, проанализировать происходит ли отклонение в работе модуля за счет допусков на печатную плату, либо в проверке нуждаются схемотехнический дизайн или сборка изделия.

При оценке погрешностей следует принимать во внимание механические допуски и характеристики материала. Для иллюстрации этого обратимся к тестовому модулю на рисунке 12. Идеальное волновое сопротивление в этом примере должно было составить 54.65 Ом. Эта величина показана в таблице на рисунке 9 при значении  $\epsilon_r$  равном 4.5, что неудивительно, так как именно это значение использовалось при расчете.

Рисунок 12. Исходные данные для исчисления погрешностей за счет допусков на материал и технологический процесс

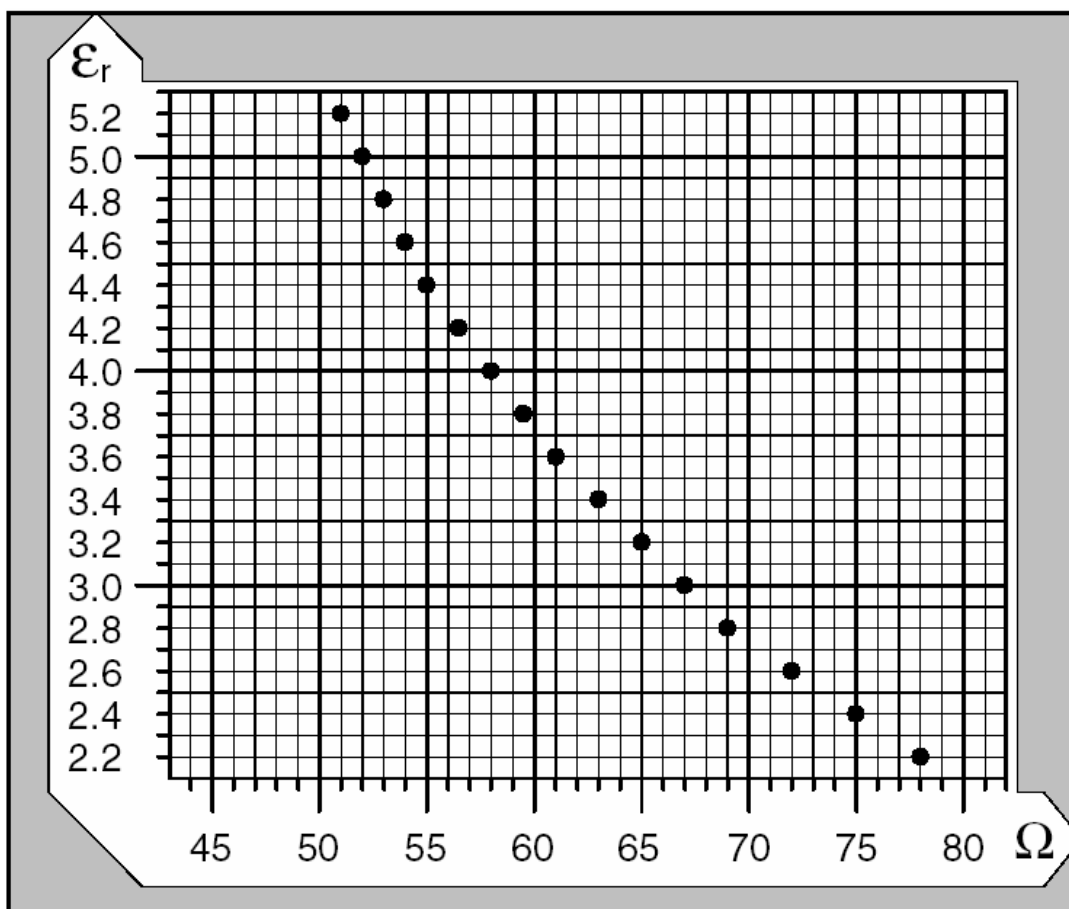
Сборка	Параметр
	Ширина дорожки : 150мкм
	Толщина меди : 17мкм
	Идеальное сопротивление : 54.65 Ω
	$\epsilon_r$ (для FR4) : 4.5
	(смотри таблицу 2.3) :

Но диэлектрическая проницаемость 4.5 для FR4 необязательно постоянная величина. Значение  $\epsilon_r$  зависит от производителя базового материала (потому что, например, используются слегка различающиеся композиции смол). Она зависит от тактовой частоты (величина  $\epsilon_r$  для FR4 на частоте 100МГц составляет около 4.6 и на частоте 1ГГц около 4.4). Величина  $\epsilon_r$  для ламината составляет 4.6 и является выше чем 4.3 у препрега. В отличие от препрега смола в ламинате, в основном, затвердевшая. В препреге же смола служит связующим между слоями в многослойной конструкции в процессе прессования. Соотношение смолы и стекловолокна здесь также отличается от соотношения долей этих компонентов в ламинате. Следует, также, принимать во внимание тип волнового сопротивления. В то время как полосковые линии полностью впрессованы в базовый материал, микрополосковые линии в наружных слоях покрыты только паяльной маской (эффективное  $\epsilon_r=3.5$ ), или, если паяльная маска не используется, верхний слой платы контактирует непосредственно с воздушной средой (эффективное  $\epsilon_r=2.8$ ).

Между тем, для волнового сопротивления типа полосковая линия, усредненная величина  $\epsilon_r$ , вычисленная по таблице равна 4.5. Поэтому необходимо проверить какие ожидаются отклонения, если изменится поставщик материала или частота передаваемых сигналов существенно возрастет.

Ожидаемое отклонение величины  $\epsilon_r$  лежит в диапазоне  $\pm 0.2$  и из таблицы на рисунке 13 видно, что это приведет к изменению волнового сопротивления от 53.5 Ом (для  $\epsilon_r=4.7$ ) до 55.5 Ом (для  $\epsilon_r=4.3$ ), то есть допуск составляет около  $\pm 1$  Ом относительно предварительно вычисленной величины в 54.65 Ом.

*Рисунок 13. Изменение волнового сопротивления относительно величины  $\epsilon_r$*



Обобщив сказанное, можно отметить, что стандартный допуск на  $\epsilon_r$  для различных типов материала FR4 и/или частоты передачи сигналов не оказывают существенного влияния на функционирование модуля.

На стадии производственного процесса в качестве первого фактора, влияющего на величину волнового сопротивления, будет прессование отдельных компонентов материалов в многослойную конструкцию. При изготовлении печатных плат особое внимание следует обратить на то, являются ли усилие прессования и температура контролируемыми (воспроизводимыми) параметрами.

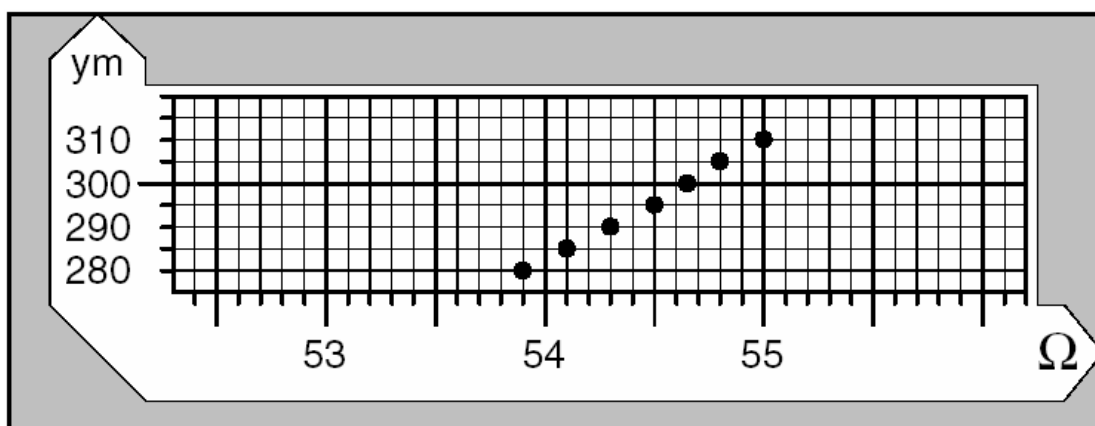
В процессе прессования смола препрега переходит в жидкое состояние и выдавливается по краям из пресса. Как правило, из-за незначительных потерь смолы изменяется весовое соотношение смолы и стеклоткани, а с этим и меняется незначительно и величина  $\epsilon_r$ . Изменение волнового сопротивления следует ожидать также при уменьшении зазора между смежными слоями.

Так же следует принимать во внимание структуру топологии печатной платы. Если планарные плоскости не впрессовываются в поверхность ламината или препрега (если не брать во внимание ошибки), то в сигнальных

слоях, наиболее вероятно, что мы столкнемся с подобными явлениями. Так как электрическое поле зависит от фактического расстояния между слоями после прессования, то ожидаемое снижение зазоров должно рассматриваться как источник возможной погрешности и, соответственно, приниматься в расчет.

Результаты расчетов показаны в таблице на рисунке 14. Идеальное волновое сопротивление в 54.65 Ом будет достигнуто при зазоре в 300мкм между слоями I3 и I4. Отклонение при прессовании в большую сторону в 10мкм дает волновое сопротивление в 55.0 Ом или 53.9 Ом при отклонении в 20мкм в меньшую сторону.

Рисунок 14. Изменение волнового сопротивления в зависимости от толщины препрега и допуска на прессование



Как показывает практика, печатный проводник впрессовывается в поверхность смолы препрега от -10мкм до -15мкм, если толщина меди лежит в пределах от 17мкм до 35мкм. Если рассчитанное здесь отклонение достигает -20мкм, то причина кроется, в первую очередь, в допусках на толщину применяющегося препрега, которые колеблются в зависимости от производителя материала. У препрега типа 2125 номинальная толщина 100мкм, но реально толщина лежит в пределах между 95мкм и 105мкм. Другая возможная причина, примененная топологическая структура задействованных слоев. Сплошные плоскости питания теряют меньше в высоту, чем сигнальные слои.

Во внимание следует принимать верхнюю границу допуска препрега +10 мкм и соответственно, максимально допустимую толщину исходного материала, так как препрег не может становиться толще в процессе прессования.

Из вышесказанного ясно, что допуск толщины материала даст результирующее отклонение волнового сопротивления около  $\pm 0.5$  Ом и что, следовательно, этап прессования многослойной печатной платы не является

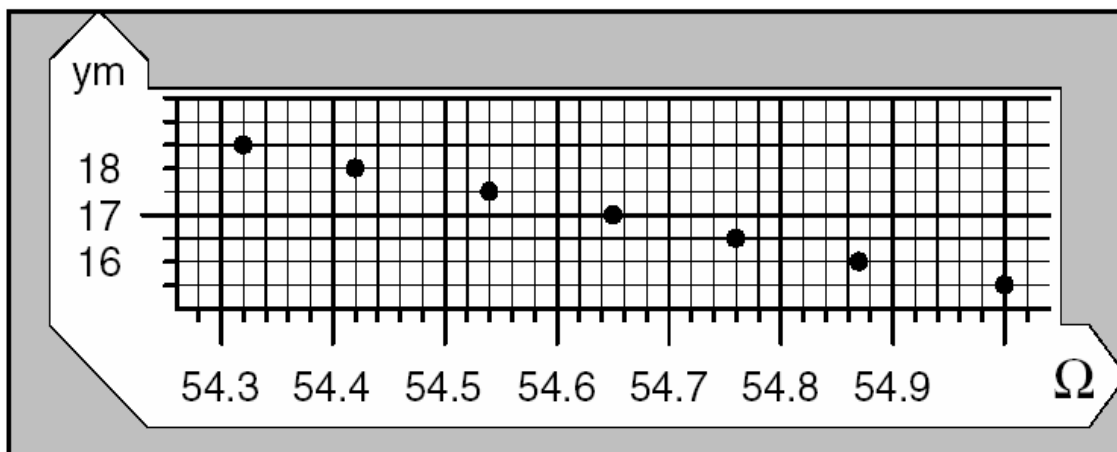
решающим участком с точки зрения контроля в части влияния на величину волнового сопротивления.

Другим потенциальным источником погрешностей является покрытие ламината медью. Стандартная толщина медного покрытия составляет 17 или 35мкм (5мкм для РВП, как уже упоминалось выше). В настоящее время наиболее употребляемой является медь толщиной в 17мкм.

Значение толщины меди в 17мкм некорректно априори, так как реальная толщина составляет 17.5мкм (=1/2oz.). Но, по-видимому, в последние годы мы уже свыклись с употреблением такого обозначения в нашей технической речи.

Кроме того, следует ожидать, что толщина меди у производителей ламината может колебаться в пределах  $\pm 1.0$ мкм. Очистка внутренних слоев в процессе производства печатной платы является дополнительным фактором изменения толщины медной фольги. Она осуществляется химически (травление) и/или механически (щетки) и может служить причиной отклонения толщины меди на величину -0.5мкм. Таблица на рисунке 15 показывает, какие последствия могут иметь эти допуски.

*Рисунок 15. Изменение волнового сопротивления в зависимости от толщины меди*



Идеальная величина в 54.65 Ома изменяется минимально до 54.42 Ом (при толщине меди в 18мкм) или 54.88 Ом (при толщине меди в 16мкм).

Разбросом около  $\pm 0.2$  Ом, зависящим от толщины меди, бесспорно можно пренебречь для типа сопротивления асимметричная одиночная полосковая линия.






Предваряя дальнейший разговор отметим, что ситуация существенно изменится, если задействованные слои будут металлизированы в процессе

производства печатной платы, как это имеет место в случае внутренних переходных отверстий. Медное покрытие, на внешних сигнальных проводниках наносимое методом металлизации, также приносит большие отклонения в значение волнового сопротивления типа микрополосковая линия.

Последним в числе возможных источников погрешностей волнового сопротивления, возникающих в производственном процессе, является травление. Особо отметим эффект бокового подтравки (обратного травления).

Волновое сопротивление изменяется в зависимости от поперечного сечения проводников и области их распределения, создающей электромагнитное поле. Наиболее вероятные конфигурации поперечного сечения, являющиеся результатом травления показаны на рисунке 16.

Рисунок 16. Отклонение волнового сопротивления в зависимости от геометрии печатного проводника (поперечного сечения) и бокового подтравки.

Поперечное сечение	Ширина (мкм)	Волновое сопротивление ( $\Omega$ )
	_____ 150 _____ 150 _____ 150	54.64
	_____ 145 _____ 150 _____ 155	54.54
	_____ 140 _____ 145 _____ 150	55.31
	_____ 135 _____ 140 _____ 145	56.11
	_____ 140 _____ 150 _____ 160	54.27



При анализе технология производства печатных плат следует обратить внимание на два аспекта травления. Первый состоит в том, боковой подтрав, в большей или меньшей степени, обусловлен используемым технологическим процессом и не может быть предотвращен. Формирование бокового подтрав происходит на торцах и сильно зависит от соотношения между шириной печатного проводника и его высотой. Приблизительное соотношение может быть принято как 1: 4.5, то есть при толщине меди в 35мкм печатный проводник должен иметь минимальные размеры  $35 \times 4.5 = 157.5$  мкм (приблизительно); для 17мкм меди это соотношение становится таким :  $17 \times 4.5 = 76.5$  мкм (приблизительно).

Второй аспект заключается в качестве самого травления. Боковой подтрав формирует не только трапециидальное поперечное сечение печатного проводника, он уменьшает ширину проводника относительно оригинального его значения на фотошаблоне. Потери относительно оригинальной ширины, заданной исходными файлами, составляют 30мкм, при толщине меди 35мкм и 20мкм, если медь имеет толщину 17мкм (это изменение зависит, также, от производителя и технологического процесса травления). Иными словами, печатный проводник, первоначально заданный шириной в 200мкм, уменьшится в ширине до 170мкм после травления (при толщине меди в 35мкм), если производитель ничего не предпримет для компенсации этой ошибки.

Из ранее приведенных таблиц на рисунках 8 и 9 видно, что заметное уменьшение ширины проводника приводит к столь же заметному увеличению волнового сопротивления. Следовательно, в практике производства печатных плат технологический процесс должен позволять предупреждать боковой подтрав, путем упреждающей компенсации, добавляющей ширину к оригинальной разводке выполненной в САПР. Например, проводник с заданной шириной в 200мкм и 17мкм толщиной меди, таким образом, экспонируется с шириной в 220мкм. При травлении теряется ширина около 20мкм и таким образом у законченной печатной платы имеется фактическая ширина точно требуемой величины.

Это фактическое уширение объясняет тот факт, почему в таблицу на рисунке 16 включен также расчет для расширенных проводников. Первая диаграмма показывает идеальный случай с волновым сопротивлением в 54.65 Ома с точно прямоугольным поперечным сечением проводника и его шириной в 150мкм. Следующая диаграмма показывает поперечное сечение с основанием в 155мкм и вершиной в 145мкм, с результатом в 54.54 Ома, то есть практически без отклонения от желаемой величины волнового сопротивления. Этот геометрический результат с немного уменьшенной шириной проводника сверху и немного увеличенной шириной проводника у основания отражает реальные процессы практического изготовления

печатных плат и является отражением надлежащей компенсации в процессе структурирования проводника в процессе его производства.

На диаграммах 3 и 5 (сверху – вниз - *прим. перев.*) мы видим уже некоторые отклонения от параметров диаграммы 2. Здесь волновое сопротивление изменяется от 55.31 Ом до 54.27 Ом. Таким образом, если ширины печатного проводника отклоняются от желательных значений на +5мкм, то параметры волнового сопротивления являются еще вполне приемлемыми. Когда же отклонение ширины проводника достигает -10мкм (диаграмма 4), то волновое сопротивление принимает значение в 56.11 Ом. Это указывает на то, что ненадлежащим образом контролируемый технологический процесс травления может стать главным источником погрешностей волнового сопротивления.

### **Классификация многослойных конструкций**

Варианты конструкции многослойных печатных плат определяют для топологического дизайна, для конструктивных вариаций в схемах с контролируемым волновым сопротивлением, для технических требований при производстве печатных плат и, наконец, но не в последнюю очередь, для экономической жизнеспособности модуля.

В настоящее время применяются разнообразные технологии для производства многослойных печатных плат. Имеется богатый выбор фольги, жестких и полужестких материалов. Технологии монтажа соединений в слоях используют, прежде всего, традиционное механическое сверление, а также лазерное сверление, фото-переходные отверстия и плазменное травление до металлизации.

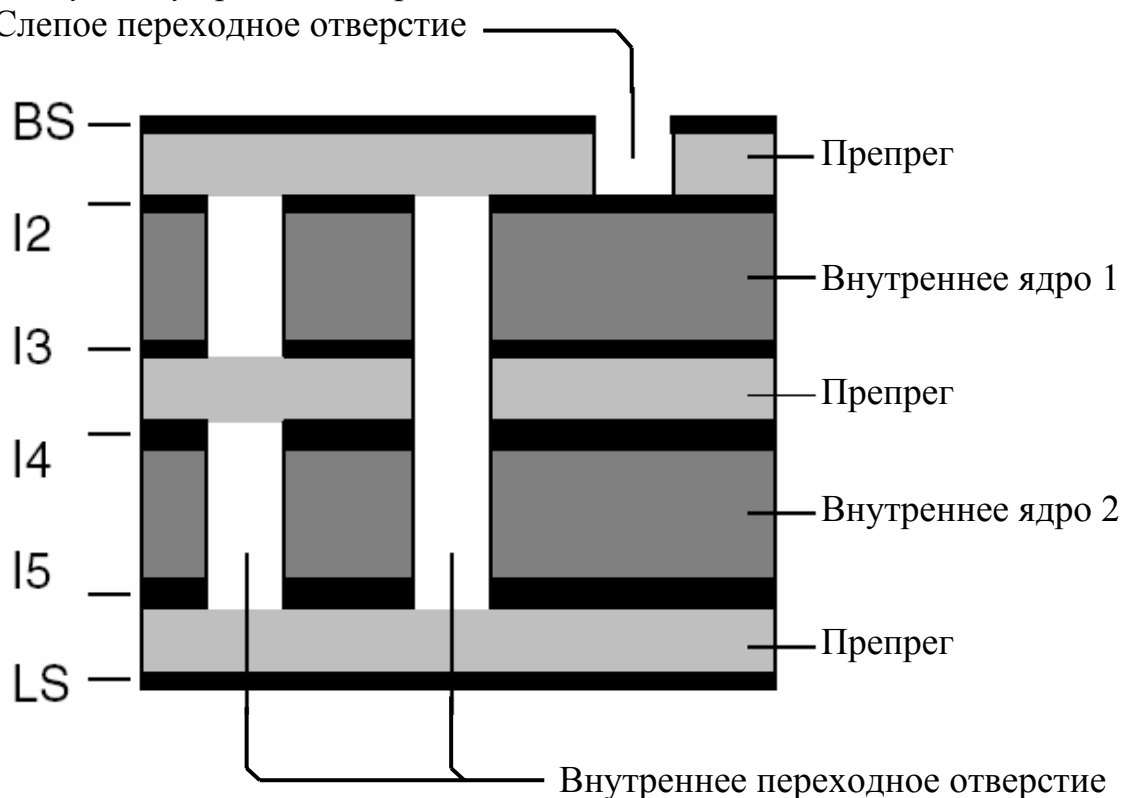
Если не затрагивать массовое производство, то основные классические материалы и производственные технологии останутся непревзойденными в течение следующих нескольких лет, поскольку они допускают многочисленные комбинации материалов и зазоров между слоями. «Классически» при этом означает, также, «современно», «новаторски» и «прогрессивно».

Термин РВП стал сейчас общеупотребительным. Ключевым словом в 2002 и 2003 годах (*статья написана в октябре 2001г.- прим. ред.*) будет «50 микронная технология». Этот термин обобщает ширину проводника в 50 мкм и такую же величину зазора между ними, толщину внутренних слоев в 50 мкм, равно как и диаметр отверстия в 50мкм, получаемого механическим инструментом, и, само собой разумеется, технологии получения внутренних и слепых переходных отверстий.

Комбинация стандартных материалов (ламината, препрега, медной фольги) для стандартных многослойных конструкций и последовательность сборки этих материалов в процессе изготовления приводит к трем основным классам послойной компоновки многослойной печатной платы:

а) многослойная печатная плата с внутренним ядром (сердцевиной) (под ядром понимается ламинат) (рисунок 17):

Рисунок 17. Стандартная конструкция 6-слойной многослойной печатной платы с двумя внутренними ядрами



б) многослойная печатная плата с внешним ядром (рисунок 18);

в) многослойная печатная плата с последовательной послойной структурой (рисунок 19).

Классификация многослойной конструкции должна быть проведена перед началом автоматизированного проектирования, поскольку это определяет варианты и ограничения в топологии слоев (как делается выбор типа конструкции в следующем шаге).

Для классификации конструкции должны быть, также, согласованы:

- 1) Размещение слепых переходных отверстий и внутренних переходных отверстий.
- 2) Выбор материала.
- 3) Размещение функциональных слоев (питающие, земляные, сигнальные).

Рисунок 18. Стандартная конструкция 6-слойной многослойной печатной платы с внешними ядрами

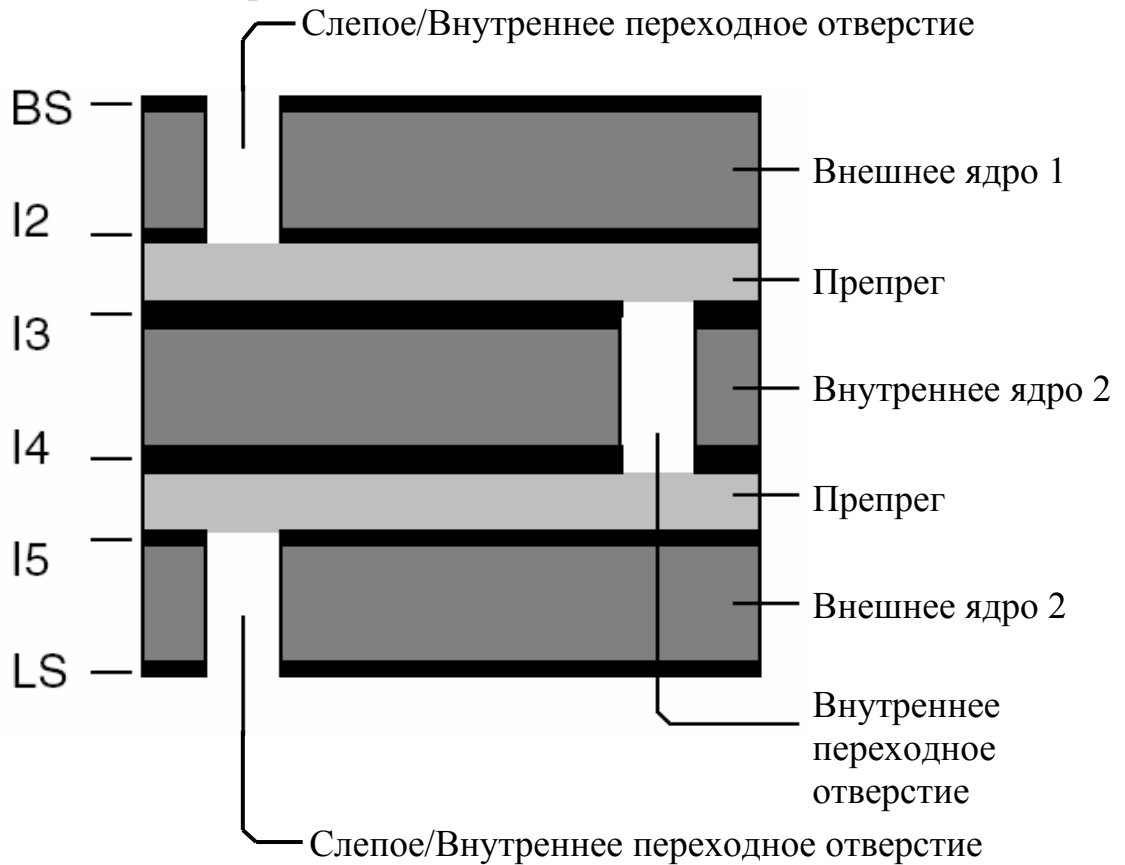
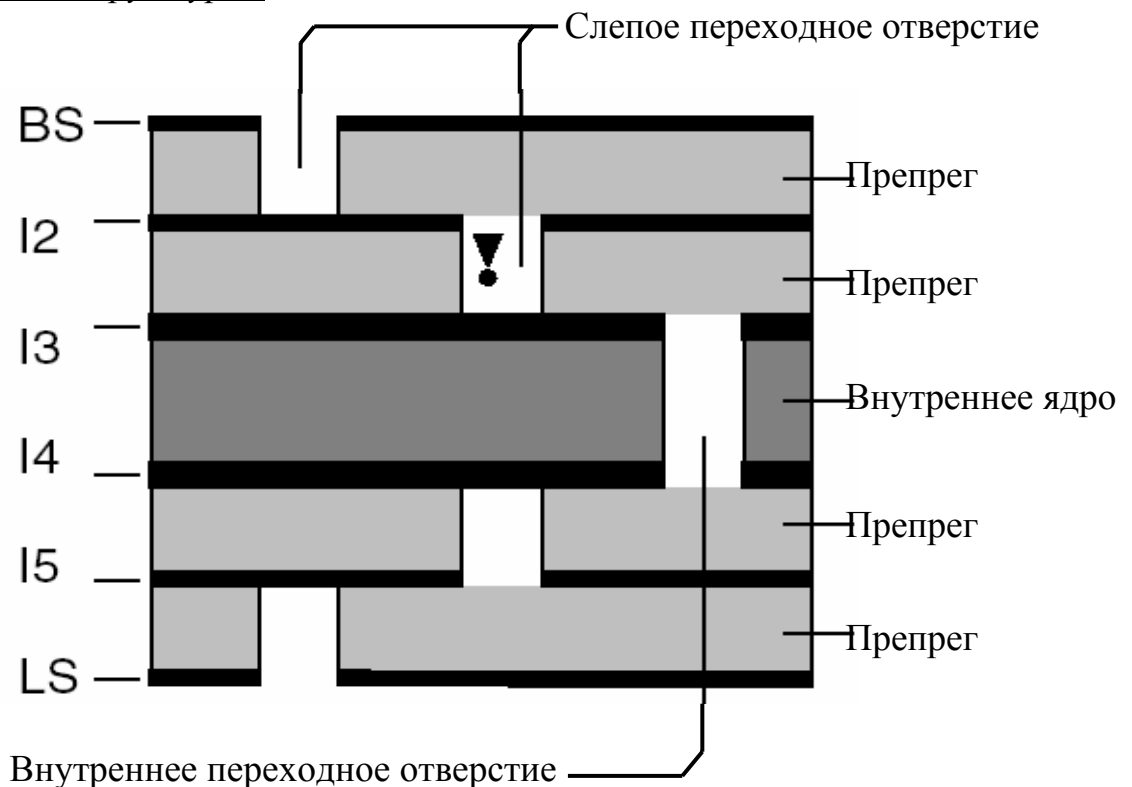


Рисунок 19. Стандартная конструкция 6-слойной многослойной печатной платы с одним внутренним ядром и последовательной (симметричной) послойной структурой



После того, как выполнены вышеперечисленные этапы классификации, следует, также, определиться со следующими моментами:

- 1) Распределение толщины меди в зависимости от гальванической металлизации.
- 2) Технические требования для сверловки слепых переходных отверстий и/или скрытых переходных отверстий.
- 3) Послойная структура многослойной печатной платы должна быть согласована с производителем.

*(продолжение следует)*