

УДК 621.3.049.75

DOI 10.53403/9785951505170\_2021\_26\_2\_292

# Влияние межслойных переходов многослойных печатных плат на передачу высокоскоростных сигналов

Т. П. Любимова\*, Л. Н. Сучкова\*,  
Г. Д. Суханова\*

*Исследования направлены на снижение потерь в устройствах, использующих дифференциальную передачу сигналов и отличающихся высокими показателями по быстродействию, параметрам электромагнитной совместимости и целостности сигнала. Приводятся результаты исследований влияния вида переходных металлизированных отверстий, входящих в линии передачи высокоскоростных сигналов, на значение волнового сопротивления и скорость передачи. Предложены рекомендации по применению результатов исследований в сверхбыстродействующей электронной технике: новых перспективных телеметрических приборах и спецвычислителях, системах автоматики, адаптерных и коммутаторных блоках суперЭВМ, электронных устройствах ВЧ- и СВЧ-диапазонов.*

## Введение

Повышение быстродействия – одно из основных требований, предъявляемых к современной цифровой технике. В системах телекоммуникаций, суперкомпьютерах, где требования к быстродействию особенно высоки, цифровые системы должны работать с сигналами, частоты которых соответствуют частотам в тысячи мегагерц, а фронты составляют доли наносекунд. Для систем, работающих на таких скоростях, характеристики линий передачи должны обеспечивать минимальные потери и искажения сигналов. Линии связи должны обладать специальными высокочастотными свойствами и обеспечивать заданное волновое сопротивление. Основным конструкционным носителем и средством соединения электронных компонентов при разработке современных цифровых электронных устройств является печатная плата, именно она во многом определяет быстродействие электронной аппаратуры.

В качестве основных видов линий передач высокоскоростных сигналов в платах применяются дифференциальные пары. Это две линии передачи с определенной электромагнитной связью между ними. Чем больше электромагнитная связь между линиями, тем выше качество передачи сигнала. Дифференциальная передача сигналов позволяет передавать информацию со скоростью

\* Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Н. Новгород.

до десятков Гбит/с. Конструктивно дифференциальные пары могут быть выполнены в виде компланарных, микрополосковых, полосковых. Построение цифровой обработки информации на основе специально сформированных дифференциальных сигналов является наиболее перспективным направлением в развитии цифровой техники [1]. А основные требования, предъявляемые к печатным платам для обеспечения быстродействия, следующие:

1. Применяемые диэлектрики должны иметь:

– низкое значение диэлектрической проницаемости, стабильное в широком диапазоне частот и с регламентированным допуском (на уровне 0,05 и ниже); очень низкое значение потерь в диэлектрике (0,005 и менее);

– медную фольгу с низким или очень низким профилем (от 5 до 2 мкм соответственно).

2. Предельно допустимые отклонения ширины проводников микрополосковых и полосковых линий передачи, дифференциальных пар в пределах  $\pm 10\%$ .

3. Волновое сопротивление дифференциальных пар в пределах  $\pm 10\%$ .

Если первые два требования можно обеспечить корректным выбором материалов после предварительного расчета стека слоев и точным воспроизведением параметров технологического процесса изготовления многослойных печатных плат (МПП), то для получения расчетного значения волнового сопротивления нужно еще получить межслойные переходы, исключающие потери или обеспечивающие минимальные с учетом частотной зависимости диэлектрической постоянной. Результатом данной зависимости является частотная зависимость волнового сопротивления, которая может привести к рассогласованию линий передачи, вызвать увеличение потерь сигнала и привести к неработоспособности схемы.

Главными элементами проводящего рисунка, влияющими на получение заданного волнового сопротивления, являются линии передачи, образованные микрополосковыми, полосковыми и т. п. линиями и межслойными переходами. Роль межслойных переходов выполняют металлизированные отверстия. Они могут быть сквозными, скрытыми, глухими. Так как воспроизведение проводников и зазоров с заданной точностью возможно обеспечить технологически, то выбор вида межслойных переходов и их изготовление являются основной задачей наших исследований.

### ***Межслойные переходы в структуре многослойных печатных плат***

В наших исследованиях при проектировании и изготовлении тестовых МПП использованы микрополосковые и полосковые линии передачи сигналов в виде связанных дифференциальных пар. Так как полосковые дифференциальные пары расположены на внутренних сигнальных слоях, то с другими слоями они могут быть связаны только металлизированными отверстиями. При этом емкость металлизированного межслойного переходного отверстия создает неоднородность в линии передачи и дополнительную распределенную емкостную нагрузку, потому что при создании связи используется только часть металлизации отверстия до определенного слоя. Оставшийся незадействованный участок цилиндра металлизации работает как антенна, создавая неоднородность. Емкость отверстия прямо пропорциональна диаметру отверстия и его длине (длине цилиндра металлизации). Поэтому для сквозных металлизированных отверстий длина цилиндра равна толщине МПП. Если выполнить металлизированное отверстие только до определенного слоя, то тем самым можно уменьшить длину цилиндра и, соответственно, минимизировать отрицательное воздействие емкости отверстия, приводящее к уменьшению полосы пропускания линии передачи [1].

Известны несколько способов получения металлизированных межслойных переходов для создания связи с нужным слоем и не имеющих выхода на другую сторону платы, так называемых глухих отверстий:

- лазерное сверление;
- механическое сверление;
- удаление части металлизации отверстия, незадействованной в связи, сверлением с обратной стороны платы (технология BackDrill).

Лазерное сверление в России не получило широкого распространения из-за дороговизны оборудования, ограничения в использовании только определенных диэлектриков и фольг, ограничения возможности сверления на глубину не более диаметра отверстия. А вот другие два способа мы успешно применили в своих работах. Рассмотрим каждый из них более подробно.

В общем понимании глухое отверстие – это отверстие, выполненное сверлением с внешнего слоя на заданную глубину. При механическом сверлении на заданную глубину основными проблемами являются получение оптимальной глубины сверления, с сохранением гарантированного диэлектрического зазора до следующего проводящего слоя, и металлизация с заполнением глухих отверстий. Металлизация глухих отверстий малого диаметра требует специально оснащенных линий металлизации, электролитов с высокой рассеивающей способностью и возможностью заполнения глухих отверстий медью или пастами. Гарантию электрической изоляции дает диэлектрический зазор между дном глухого отверстия и следующим токопроводящим слоем [2], и зазор этот должен быть не менее 0,1 мм. Поэтому для фольгированных диэлектриков толщиной 0,1 мм и менее получение глухих отверстий сверлением на заданную глубину невозможно. В своих исследованиях мы использовали материалы толщиной менее 0,1 мм и разработали другую технологию получения глухих отверстий механическим сверлением, пригодную для материалов любой толщины – технологию поэтапного прессования. Она заключается в следующем: внешние слои



Рис. 1. Межслойные переходы по технологии поэтапного прессования

последовательно прессуются с внутренними сигнальными слоями в полупакеты. С помощью сквозных металлизированных отверстий в полупакетах (для обеих сторон платы) создаются межслойные переходы (например, с первого слоя на третий). Затем к полупакету прессуется следующий сигнальный слой и создаются следующие межслойные переходы (с первого слоя на пятый). При прессовании сквозные отверстия заполняются смолой и становятся по функциональности глухими (рис. 1).

Существует интересное решение по созданию межслойных переходов

с помощью сквозных отверстий с последующим удалением ненужной для связи части металлизации (технология Back Drill). Функционально такое отверстие будет выполнять роль глухого отверстия. Технология Back Drill (обратное сверление) заключается в следующем. Сначала МПП изготавливается по традиционной технологии с металлируемыми сквозными отверстиями, затем излишняя длина цилиндра металлизированного отверстия удаляется путем высверливания на заданную глубину до нужного топологического слоя, диаметр сверла при этом больше диаметра металлизированного отверстия и равен диаметру контактной площадки

отверстия (рис. 2). При этом невозможно удалить ненужную металлизацию полностью, остаются недосверленные участки, способные вносить некоторую неоднородность.

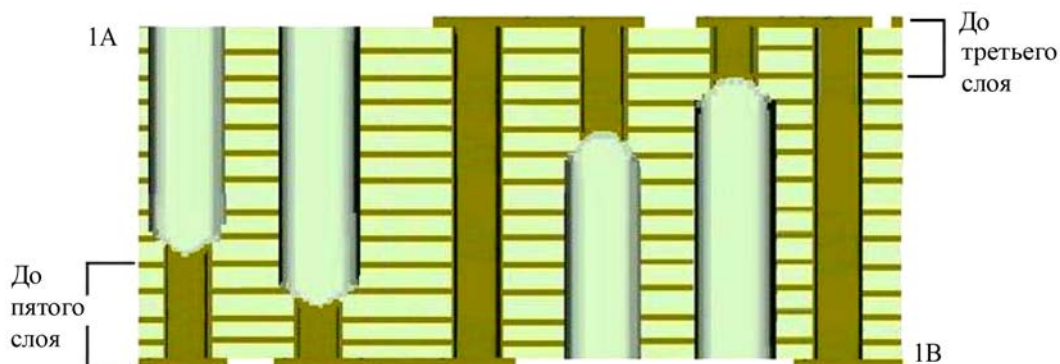


Рис. 2. Межслойные переходы по технологии Back Drill

В своих работах мы применили и технологию обратного сверления. Использование глухих переходных отверстий позволяет максимально уменьшить емкость металлизированных отверстий и обеспечивает наибольшую свободу в выборе месторасположения внутренних соединений и путей трассировки печатных проводников для получения максимальной плотности межсоединений.

Если сравнить эти два способа изготовления глухих отверстий, то у каждого есть свои достоинства и недостатки. Разработчик должен выбирать по своим приоритетам (таблица).

#### Сравнение технологий изготовления глухих отверстий

Технология	Преимущества	Недостатки
Позатупное прессование	<p>Малая толщина полупакета (уменьшение диаметра металлизированных отверстий, уменьшение емкости).</p> <p>Максимальное уменьшение емкости (металлизированные глухие отверстия).</p> <p>Отсутствие остаточного столбика металлизации (уменьшение емкости и помех).</p> <p>Увеличение ресурсов для трассировки</p>	<p>Продолжительный цикл изготовления (несколько этапов прессования, металлизации, планаризации).</p> <p>Несколько циклов термических воздействий (не менее трех).</p> <p>Контроль толщины слоя меди на наружном слое (проблемы при выборе режимов травления).</p> <p>Дополнительные операции (планаризация)</p>
Обратное сверление (Back Drill)	<p>Короткий цикл изготовления глухих отверстий в МПП.</p> <p>Один цикл прессования и термических воздействий.</p> <p>Уменьшение емкости (металлизированные глухие отверстия с остаточной металлизацией после высверливания)</p>	<p>Нарушение экранных слоев, используемых для прохождения обратного тока.</p> <p>Всегда остается в металлизированном отверстии часть металлизации сквозного отверстия (паразитной емкости).</p> <p>Ресурсы для трассировки не увеличиваются.</p> <p>Требуется защита оголившихся стенок отверстий от внешних воздействий</p>

### *Исследование влияния межслойных переходов на скорость передачи сигнала*

Основным методом исследования высокоскоростных линий передачи, отличающихся друг от друга только типами межслойных переходных отверстий, выбран метод глазковых диаграмм. Он позволяет провести качественное сравнение различных видов отверстий с точки зрения влияния на целостность сигнала. Глазковая диаграмма строится путем наложения большого числа бит, передаваемых через канал, друг на друга в рамках одного битового интервала. Чем больше число наложенных друг на друга бит, тем более точный результат измерения.

Для проведения исследований была спроектирована тестовая МПП, которая должна обеспечивать передачу высокоскоростных сигналов до 10 Гбит/с. При расчетах и изготовлении учтены все требования к материалам, точности воспроизведения проводящего рисунка и волнового сопротивления, изложенные выше. В качестве линий передачи сигналов в плате использованы дифференциальные пары с заданным волновым сопротивлением 100 Ом. Плата была изготовлена из материала MCL-FX-2 фирмы «Hitachi Chemical», имеющего стабильные значения по диэлектрической проницаемости (3,5) и низкие потери (0,002) в диапазоне частот до 10 ГГц [3]. Топология платы включает три одинаковых фрагмента. На каждом имитируется рисунок для прохождения сигнала от специального разъема QSFP к одному из выводов кристалла (переходное металлизированное отверстие) и обратно. На каждом фрагменте используется определенный вид межслойных переходов: сквозные, глухие методом поэтапного прессования и обратного сверления.

Практика снятия глазковых диаграмм осциллографом Le Croy SDA 820Zi-A показала, что значения параметров устанавливаются после прохождения порядка 2 млн бит. Для повышения точности измеряемых значений при исследовании тестовых плат глазковые диаграммы строились по 5 млн бит. Для каждой из линий передачи были сняты глазковые диаграммы в диапазоне скоростей от 5 до 13 Гбит/с с шагом 1 Гбит/с. На рис. 3 приведены глазковые диаграммы на скоростях 5, 10 и 13 Гбит/с для разных типов межслойных переходных отверстий.

На скорости 5 Гбит/с переходные отверстия всех трех видов ведут себя одинаково. Однако, с ростом скорости параметры линии со сквозными переходными отверстиями деградируют быстрее, чем у линий с глухими отверстиями. Линия связи со сквозными переходами на скоростях 10 и 13 Гбит/с имеет практически полностью закрытую глазковую диаграмму, т. е. сквозные отверстия для передачи данных на скоростях выше 5 Гбит/с непригодны. Глазковые диаграммы для линий связи с глухими межсоединениями обратного сверления и поэтапного прессования имеют практически идентичное раскрытие на всех скоростях 5, 10 и 13 Гбит/с.

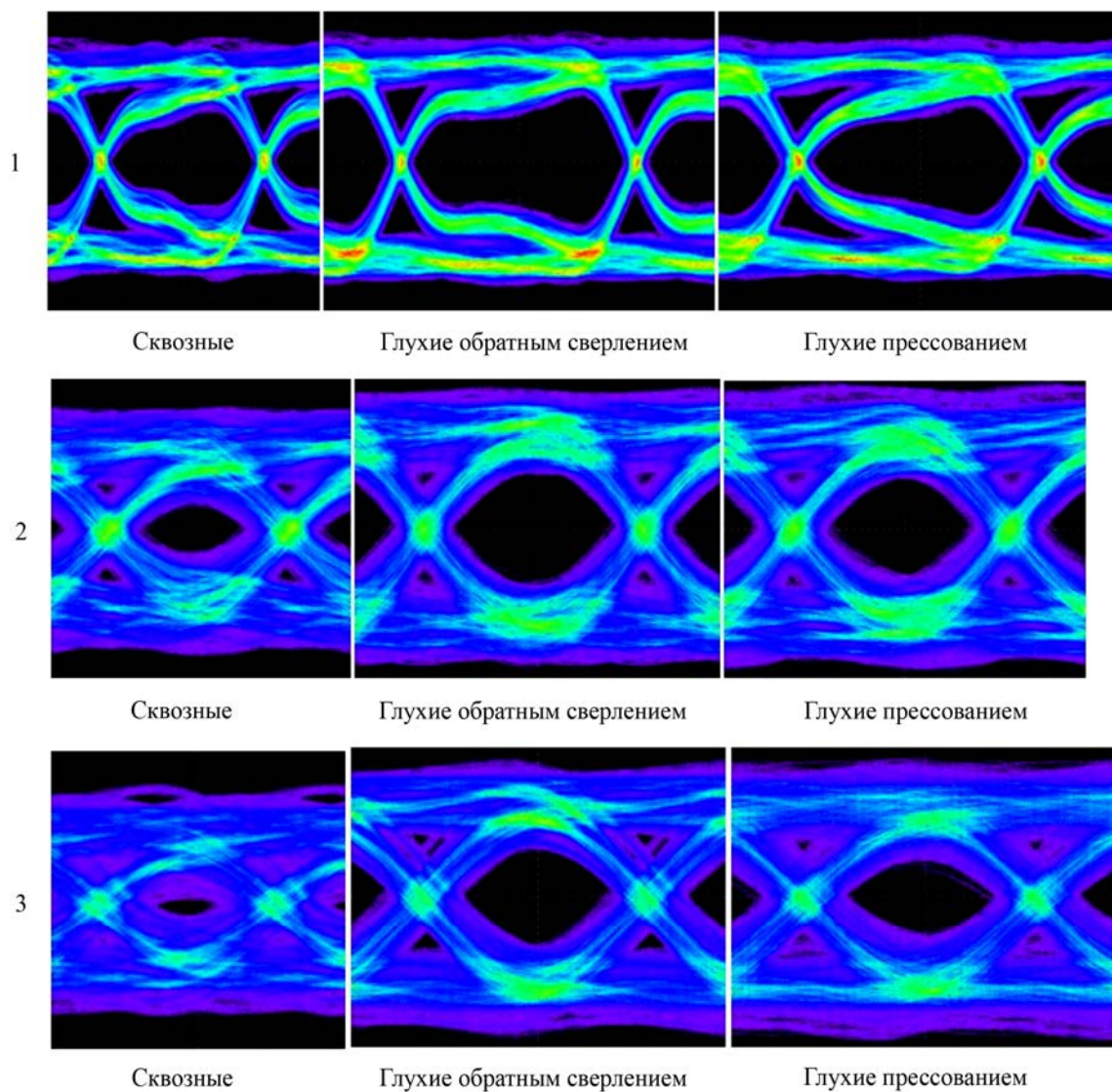


Рис. 3. Глазковые диаграммы тестовой платы на скоростях: 1 – 5 Гбит/с, 2 – 10 Гбит/с, 3 – 13 Гбит/с

### ***Заключение***

Анализ глазковых диаграмм высокоскоростных линий связи МПП с различными видами межслойных переходов показал, что при повышении скорости передачи применение некоторых видов переходов становится невозможным. При выборе межслойных переходов в высокоскоростных МПП следует руководствоваться принципами экономической и технологической целесообразности:

1) для плат, обеспечивающих скорость передачи не более 5 Гбит/с, должны применяться МПП с металлизированными сквозными отверстиями. Это наиболее дешевая и простая в исполнении технология;

2) для плат, обеспечивающих скорость передачи от 5 до 10 Гбит/с и выше:

– применять технологию обратного сверления, если не требуется высокая плотность компоновки электронных компонентов;

– при высокой плотности путей трассировки печатных проводников и наличии большого количества электронных компонентов с малым шагом выводов применять глухие отверстия и поэтапное прессование.

### Список литературы

1. Кечиев Л. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007.

2. Петров Л. Особенности получения глухих металлизированных отверстий МПП с использованием типовых технологических процессов // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 4. С. 23–27.

3. Каталог по базовым материалам компании Hitachi Chemical. ООО «Остек-Сервис-Технология», 2017.

## **Influence of Interlaminar Transitions of Multilayered Printed-Circuit Boardson Transfer of High-Speed Signals**

**T. P. Lyubimova, L. N. Suchkova, G. D. Sukhanova**

*Results of researches of influence of an aspect of the transitive plated holes entering into transmission lines of high-speed signals, on value of a wave impedance and speed of transfer are resulted. Recommendations about application of results of researches in ultrafast electronics are offered.*