

Анализ влияния подтравов печатных проводников на волновое сопротивление линии передачи в печатных платах

Смирнов А.М.

В статье приводится результат проведенного исследования по изучению влияния подтравов печатных проводников на волновое сопротивление линии передачи в печатных платах на примере микрополосковой линии.

В настоящее время тенденции к миниатюризации радиоэлектронных изделий приводят к необходимости создания все более малогабаритных электронных схем. В соответствии с законами развития электроники, выдвинутыми Гордоном Муром, каждые 1.5 – 2 года число транзисторов на кристалле микросхем удваивается. Это приводит к увеличению скоростей передачи и обработки информации, новым возможностям радиоэлектронных изделий. Соответственно, изменяется конфигурация радиоэлементов: увеличивается число выводов микросхем, уменьшается шаг между ними, уменьшаются размеры микросхем. Реалии сегодняшнего дня – микросхемы с шагом выводов 0,3 мм и менее, микросхемы в корпусах CSP (Chip Scale Package), BGA (Ball Grid Array), Flip Chip с выводами, расположенными под корпусами микросхем. Появляется необходимость в создании все большего числа межсоединений на одной печатной плате, сохраняя и даже уменьшая при этом ее размеры. Одним из способов уменьшения размеров печатных плат является более плотное расположение ее токопроводящих частей. Основной токопроводящий элемент конструкции печатной платы – проводник. С возникновением необходимости в уменьшении размеров печатных плат естественным образом возникает необходимость в уменьшении размеров проводников. Это, в свою очередь, сказывается на всей конструкции изделия, поскольку изменение геометрических размеров одних частей электрического контура приводит к необходимости изменения размеров других частей для того, чтобы пропорции между ними остались неизменными. В противном случае, это может сказаться на электрических характеристиках линий передачи.

Как известно, печатная плата является основным элементом радиоэлектронных изделий, выполняя функции несущей конструкции и коммутационного устройства. В связи с тем, что на сегодняшний день к большинству радиоэлектронных изделий предъявляются требования многофункциональности и малогабаритности, в них используют многослойные печатные платы (МПП) с достаточно близким расположением проводников. В сложившейся ситуации особые требования предъявляются к технологиям производства печатных плат. Технологии должны обеспечивать необходимую точность воспроизведения токопроводящего рисунка плат – проводников и зазоров.

Современные технологии позволяют создавать печатные платы с воспроизводимостью рисунка проводник/зазор (П/З) менее, чем 0,02/0,02 мм при использовании дифференциального травления меди и 0,01/0,008 мм при использовании технологии впрессовывания рисунка в диэлектрическое основание [1]. Однако, при этом остается нерешенным вопрос о сохранении на необходимом уровне основных электрических характеристик линий связи в печатных платах – электрической емкости и волнового сопротивления, которые непосредственно связаны с геометрическими размерами проводников. Для изделий, работающих на частотах выше 25 МГц, потери сигналов и искажения в линиях связи должны быть минимальными. А это в достаточной степени достигается технологическими возможностями производства по созданию необходимых межсоединений в печатных платах.

На сегодняшний день одним из основных официальных документов, регламентирующих размеры и характеристики печатных плат является стандарт ГОСТ 23751-86 «Платы печатные. Основные параметры и конструкции» [2]. В этом документе приводятся наименьшие номинальные значения основных элементов конструкции печатных плат в зависимости от их класса точности.

Для использования в высокочастотных радиоэлектронных изделиях необходимо применять печатные платы, изготовленные с максимальной точностью. В соответствии со стандартом ГОСТ 23751-86, это печатные платы 5-го класса точности. Минимальная ширина печатного проводника плат 5-го класса точности – 0,10 мм.

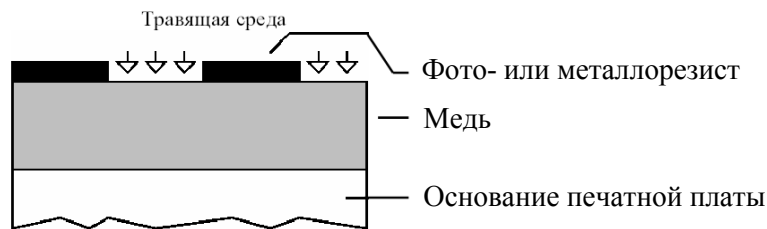
Печатные платы 5-го класса точности на жестком фольгированном основании на сегодняшний день можно изготовить с применением нескольких методов:

- электрохимический (полуаддитивный);

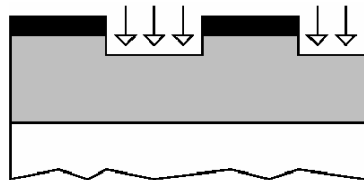
- тентинг-метод;
- метод фрезерования;
- комбинированный позитивный метод.

В настоящее время для формирования токопроводящего рисунка на внешних слоях многослойных печатных плат наиболее широко используется полуаддитивная технология. С помощью этой технологии можно получить тонкие проводники шириной 20 мкм. В полуаддитивной технологии используется дифференциальное травление металла. Это накладывает определенные ограничения на ее применение.

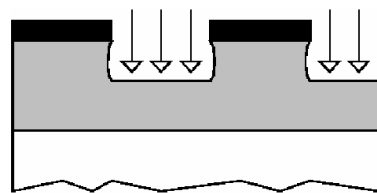
Принципиальный недостаток абсолютно всех технологий травления заключается в том, что травление идет не только в желаемом направлении (по направлению к поверхности диэлектрика), но и в поперечном направлении. На рис. 1 показаны отдельные стадии процесса травления.



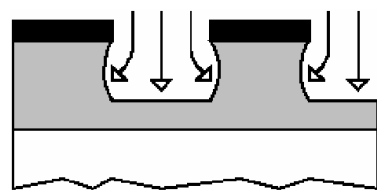
1) Начало процесса травления



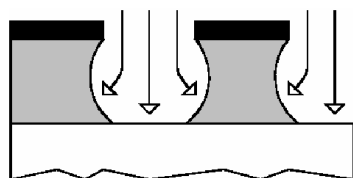
2) Микро-протрав поверхности меди



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



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



5) Сквозное протравливание меди. Подтрав боковых сторон печатного проводника.

Рис. 1. Стадии процесса травления меди с пробельных мест печатной платы

На рис.2 видно, что ширина проводника после травления отличается от ширины проводника до травления. Причиной данного явления является боковой подтрав проводников.

Величина бокового подтрав оценивается фактором травления, который представляет собой отношение толщины проводника к значению подтрав проводника.

В те времена, когда ширина печатных проводников была порядка миллиметра, величину бокового подтрав не учитывали. Сейчас, когда ширина проводников становится соизмеримой с их высотой или даже меньше ее, боковой подтрав оказывает влияние не только на геометрические размеры проводников, но и на электрические параметры линии связи. Это необходимо учитывать разработчикам электронной аппаратуры и технологам на производстве.

В международном стандарте IPC-A-600-G «Критерии качества печатных плат» [3] рассматриваются 4 различных вида форм печатных проводников рис.3.

В зависимости от технологии производства печатных плат, способа осуществления процесса травления, печатный проводник имеет различную форму. В различных ситуациях имеет место уменьшение верхней поверхности и нижней поверхности печатного проводника.

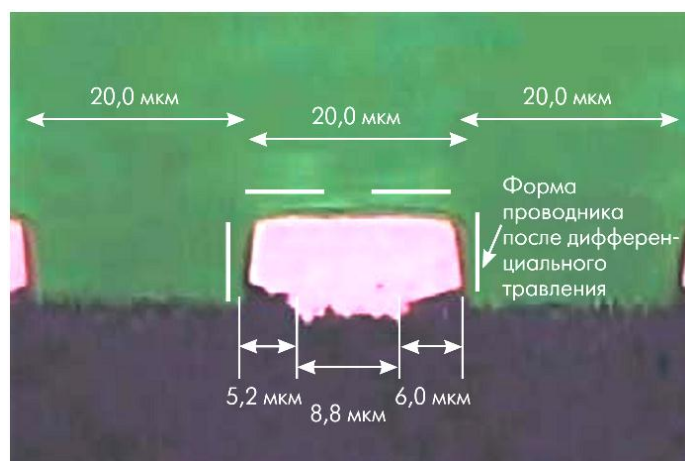


Рис. 2. Подтрав проводника при дифференциальном травлении в полуаддитивном процессе. Источник – [1].

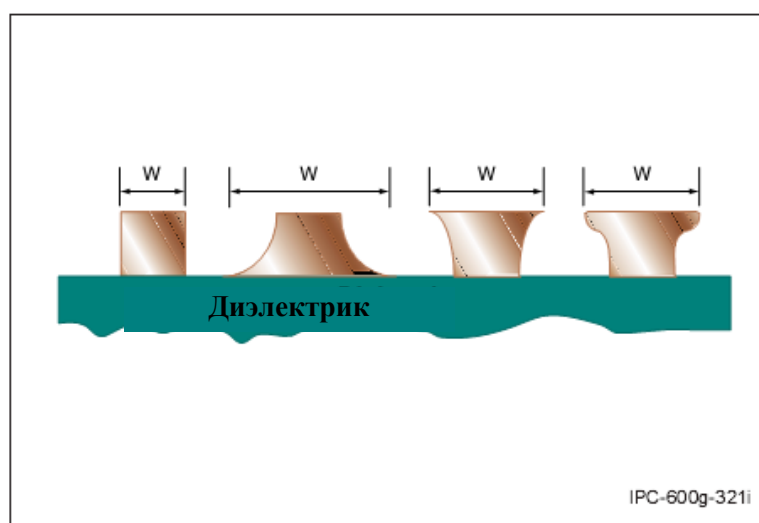


Рис. 3. Виды подтравов печатных проводников в соответствии с международным стандартом IPC-A-600G.

О явлении подтрав печатных проводников говорится в ряде печатных и электронных книг и статей, посвященных вопросам проектирования и технологии радиоэлектронных изделий.

В книге [4] величина подтрав (ВП) оценивается с помощью соотношения $ВП = \frac{2}{3} Н$, где Н – величина вытравливаемого металла. В то же время, отношение глубины бокового подтрав (а) к толщине проводника (h) оценивается как $a/h \leq 0,75$.

По результатам дисперсионного анализа реального производства делается заключение, что при соблюдении норм контроля за технологическим процессом обеспечивается погрешность воспроизведения волнового сопротивления линий связи в МПП в пределах $\pm 15\%$, при управлении процессом воспроизводства ширины проводников 8-10% [1].

Анализ имеющейся современной технической литературы выявил необходимость в углубленном изучении влияния подтравов печатных проводников на полное дифференциальное сопротивление линии передачи.

Были проведены исследования, в результате которых рассматривалось влияние изменения ширины верхней и нижней поверхности печатного проводника на полное дифференциальное сопротивление линии передачи.

В ходе исследований в качестве рассматриваемого объекта выступала частично заглубленная микрополосковая линия передачи (рис.4.) с размерами и характеристиками конструктивных элементов, приведенными в Таблице 1.

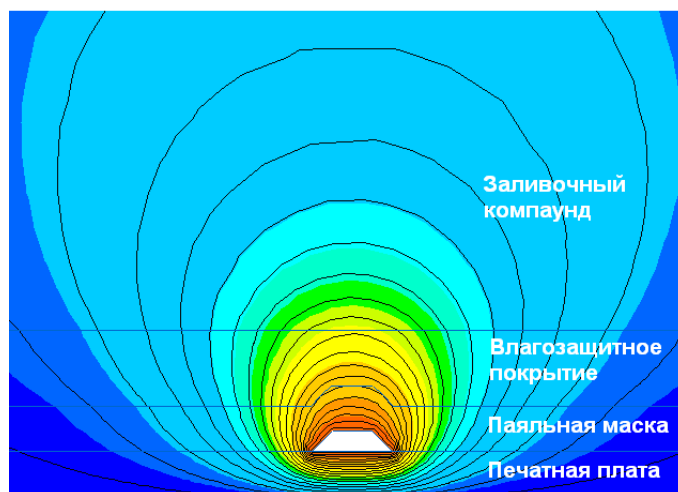


Рис. 4. Сечение исследуемой микрополосковой линии передачи.

Таблица 1. Характеристики конструктивных элементов микрополосковой линии.

Условное обозначение параметра	Название параметра	Значение параметра
w_1	Ширина верхней поверхности печатного проводника, мкм	60
w_2	Ширина нижней поверхности печатного проводника, мкм	60
$\epsilon_{\text{подл}}$	диэлектрическая проницаемость подложки	4,5
$h_{\text{подл}}$	толщина подложки, мкм	100
$h_{\text{пров}}$	толщина печатного проводника, мкм	30
$\epsilon_{\text{вл}}$	диэлектрическая проницаемость влаговоздушного покрытия	4,5
$h_{\text{вл}}$	толщина влаговоздушного покрытия, мкм	50
$h_{\text{п.м.}}$	толщина паяльной маски, мкм	35
$\epsilon_{\text{п.м.}}$	диэлектрическая проницаемость паяльной маски	4,5
$\epsilon_{\text{з.к.}}$	Диэлектрическая проницаемость заливочного компаунда	4,5
$h_{\text{з.к.}}$	Толщина слоя заливочного компаунда, мкм	3000

Поскольку среда, образуемая основанием печатной платы, паяльной маской, влаговоздушным покрытием, заливочным компаундом, воздухом является кусочно-однородной, точное определение электрических параметров линии передачи в такой среде возможно только численным методом. Для этих целей был использован программный комплекс ELCUT [5], в основе принципа расчетов которого лежит применение метода конечных элементов. С помощью

применения данного комплекса удалось провести моделирование линии передачи и рассчитать значение ее полного дифференциального сопротивления в каждом из экспериментов.

Модель линии передачи в программном комплексе ELCUT представляет собой подложку из диэлектрического материала с металлическим слоем заземления на нижней стороне, и токоведущим проводником на верхней стороне. Дополнительно на верхней стороне имеются слои паяльной маски, влагозащитного покрытия и заливочного компаунда, ограниченные экраном (рис.5.)

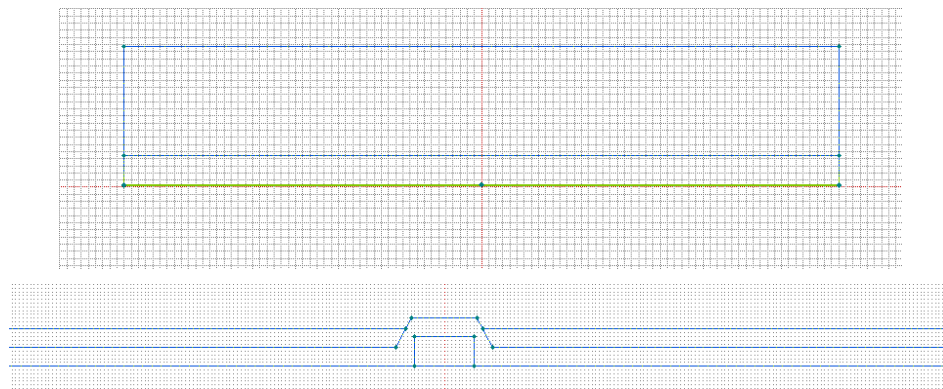


Рис. 5. Модель линии передачи в программном комплексе ELCUT.

Подтравы печатного проводника были смоделированы путем изменения ширины верхней и нижней его поверхностей на 20 мкм. Таким образом, в эксперименте рассматривались 5 различных конфигураций микрополосковой линии передачи. Результаты экспериментальных данных, полученных с помощью расчетов в программном комплексе ELCUT приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты проведенных экспериментов.

№	1	2	3	4	5
Ширина верхней поверхности печатного проводника, мкм	40	60	80	60	60
Ширина нижней поверхности печатного проводника, мкм	60	60	60	40	80
Волновое сопротивление, Ом	64,79	62,027	58,81	65,34	58,61

На основании полученных данных можно говорить о существенном влиянии подтравов печатных проводников на полное дифференциальное сопротивление линии передачи. Так, в 3-х их 4-х случаев изменение ширины поверхностей печатного проводника на 20 мкм приводит к изменению значения полного дифференциального сопротивления более чем на 3,2 Ом, что составляет более 5% от значения сопротивления 62,027 Ом при рассмотрении прямоугольной модели проводника.

В проведенных исследованиях модель частично заглубленной микрополосковой линии передачи рассматривалась как модель реального конденсатора. Как известно, для обеспечения эффективности реальный конденсатор должен удерживать полное дифференциальное сопротивление между слоями для высокочастотных составляющих спектра сигнала на уровне, меньшем 5% от заявленного дифференциального сопротивления [6].

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о необходимости учета влияния подтравов печатных проводников на электрофизические параметры линии передачи в печатных платах, работающих на частотах в несколько десятков МГц и выше. Для этого необходимо учитывать факторы влияния подтравов проводников при расчете волнового сопротивления линии передачи в соответствующих формулах.

Литература.

1. Ватанабе Риочи. Замечательная идея от фирмы Samsung. Компоненты и технологии. Приложение: Технологии в электронной промышленности, 2005, № 5.
2. ГОСТ 23751-86 «Платы печатные. Основные параметры и конструкции».

3. Международный стандарт IPC-A-600G «Критерии качества печатных плат» (Acceptability of Printed Boards).
4. Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. «РИЦ «Техносфера», Москва, 2005.
5. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.2. ПК «ТОР», Санкт-Петербург, 2005
6. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. ООО «Группа ИДТ», Москва, 2007.