

# Проектирование и изготовление высокоскоростных многослойных плат с тонкими внутренними слоями

Михаил СОКОЛОВ,  
инженер

В этой статье обсуждаются вопросы изготовления и проектирования многослойных печатных плат с использованием тонких внутренних несущих слоев, препрегов и материалов медной фольги.

## Введение

Переход на использование более высоких частот в РЧ- и высокоскоростных цифровых приложениях меняет требования к внутренним несущим слоям (core layers) ламината многослойных печатных плат (МПП). Поскольку размещение планарных элементов платы на более высоких частотах становится плотнее при заданных импедансах, возникает потребность в реализации более тонких внутренних слоев ламинатов МПП, которые характеризуются хорошей долгосрочной работоспособностью на частотах выше 60 ГГц. Кроме того, у современных МПП возрастает количество слоев. Таким образом, появляется больше требований, которые следует учитывать при проектировании МПП, в частности, касающихся материалов препрега, размеров медных элементов и медной фольги.

## Переход на структуры с более тонкими несущими слоями ламината

На многие планарные конфигурации влияет толщина внутреннего слоя подложки и ламината. Например, полосковые линии передачи очень часто используются в качестве внутренних сигнальных соединений между слоями в РЧ-приложениях и в платах с высокоскоростными цифровыми сигналами. Более тонкие внутренние слои в полосковых конфигурациях позволяют уменьшить ширину линий передачи для реализации более плотного размещения элементов и функционирования на более высоких частотах.

Расстояние между верхней и нижней заземляющими плоскостями полосковой линии (над и под металлическими слоями в центральной части платы) и центральным проводником непосредственно влияют на импеданс линии. Более того, обычно рекомендуется заключать полосковую линию в экран с помощью переходных отверстий для предотвращения помех; при этом боковая заземляющая плоскость должна отделяться от центрального проводника зазором, величина которого зависит от длины волны сигнала, который распространяется по полосковой линии. Технологические параметры ограничивают размеры и интервалы между проводниками и переходными отверстиями, а из-за абсолютных допусков на процессы производства плат может ухудшиться выход годных при уменьшении размеров элементов, связанном с увеличением рабочей частоты.

В определенных случаях на очень высоких частотах желательно минимизировать размеры полосковых линий передачи, сократив зазор между центральным проводником и верхней и нижней заземляю-

щими плоскостями путем использования слоев меньшей толщины. В результате увеличивается плотность размещения сигнальных трактов, и уменьшается площадь основания полосковой линии.

Попытка минимизировать размеры полосковой линии может столкнуться с технологическими ограничениями, из-за которых допустимые размеры экрана не позволяют предотвратить резонансы и паразитные моды на очень высоких частотах при определенной толщине внутренних слоев ламината. Из схожих соображений, например, задается максимальная частота коаксиальной линии передачи во избежание возникновения поперечных электромагнитных волн. Использование частотного содержимого вне частоты среза поперечных электромагнитных волн способствует работе линии передачи в качестве волновода, а помехи с требуемым частотным содержимым могут привести к появлению паразитных режимов или превращению структуры на достаточно высоких частотах в нежелательный резонатор.

К другим конструкциям, на которые влияет толщина внутреннего несущего слоя ламината, относятся конструкции планарных резонаторов, микрополосковых волноводов, копланарных волноводов – по сути, любые планарные структуры, которые зависят от расстояния между вертикальными проводящими слоями МПП.

Толщина слоев типичных высокочастотных ламинатов, например RO4835 или RO4350B, часто не превышает десятков тысячных дюйма. Например, стандартная толщина RO4835 составляет 0,168, 0,254, 0,508, 0,762 и 1,524 мм. Поскольку толщина 0,168 мм для некоторых приложений может оказаться слишком большой, был разработан ламинат RO4835T с теми же свойствами, что и у RO4835, но с меньшей толщиной (до 0,051 мм). При использовании материалов такой толщины необходимо учитывать влияние их конструктивных особенностей на свойства ламината.

## Влияние параметров медной фольги на конструкцию МПП

При уменьшении толщины ламинатов, используемых в качестве внутренних слоев, следует исходить из того, что в планарных линиях передачи или волноводах придется уменьшить ширину проводников, чтобы сохранить то же значение импеданса 50 или 100 Ом. Из-за использования ламинатов меньшей толщины возрастают потери на проводимость и вносимые потери на единицу длины. С ростом частоты потери медных и углеводородных материалов в ламинатах увеличиваются в еще большей мере.

На более высоких частотах ламинаты меньшей толщины способны увеличению потерь планарных конфигураций в сравнении с более толстыми ламинатами на меньших частотах.

Связь электромагнитного поля со структурой из тонких ламинатов возрастает, и его влияние на электрические свойства ламината с фольгированным диэлектриком увеличивается. Потери в структурах с тонкими слоями ламината больше, чем с толстыми слоями, при одинаковых покрытиях поверхности.

Фольгированное покрытие также оказывает большее влияние на расчет диэлектрической проницаемости  $D_k$  ламината. Поскольку при использовании более толстых ламинатов проводящие слои разнесены дальше друг от друга, на них меньше влияет состояние поверхности платы. При более тонких ламинатах связь электрического поля с неровной поверхностью проводника замедляет фазовую скорость в сравнении с более гладкой проводящей поверхностью [1]. Следовательно, на поверхность тонких ламинатов рекомендуется наносить слои проводящего материала и защитное покрытие с менее шероховатой поверхностью, чтобы уменьшить  $D_k$  и обеспечить заданные расчетные значения. Наибольшую проблему для характеристик высокоскоростных плат представляют собой медные поверхности, граничащие с подложкой, у которой медная поверхность имеет шероховатости большого размера (рис. 1).

В этих внутренних поверхностях часто возникает сильная связь электрического поля с планарными линиями передачи и, например микрорезонаторными волноводами (рис. 2).

Поверхность катаной отожженной меди (КОМ) глаже поверхности электроосажденной меди (ЭОМ). У КОМ- и ЭОМ-фольги – разные зернистые структуры и КОМ-фольга, как правило, гибче. Известны и некоторые виды медной ЭОМ-фольги с особой структурой зерна, которая обладает хорошей способностью к изгибу.

Контролируемое по глубине травление, которое применяется для уменьшения толщины медной фольги, в большей мере предназначено для ЭОМ-, чем КОМ-фольги. У фольги из электроосажденной меди – лучше связь с подложкой, чем у фольги из катаной отожженной меди, вероятно потому, что площадь поверхности более грубого слоя ЭОМ-фольги больше и лучше обеспечивает механическое соединение. При очень быстром термоциклировании ЭОМ-фольга чаще растрескивается под действием тепловой нагрузки, чем КОМ-фольга. Однако ЭОМ-фольга обеспечивает более устойчивое соединение с проводами некоторых типов, чем фольга из КОМ.

Кроме того, КОМ-фольге иногда требуются другие условия процесса травления, чем ЭОМ-фольге, из-за различий в структуре зерен. В случаях использования очень тонких слоев ламината естественная структура поверхности катаной отожженной меди может оказывать некоторое влияние на работоспособность платы в зависимости от рабочей частоты.

Известно немало методик изготовления ЭОМ-фольги, которые позволяют уменьшить шероховатость поверхности типовых ЭОМ-структур. В результате создаются образцы низкопрофильной медной фольги и медной фольги с обратной обработкой. Если среднеквадратичное значение (СКЗ) шероховатостей катаной отожженной меди составляет 0,35 мкм, этот же показатель стандартной ЭОМ равен 2,2 мкм; у обратно обработанной ЭОМ-фольги он равен 0,8 мкм, а у ЭОМ-фольги с очень низким профилем СКЗ шероховатостей достигает 0,5 мкм.

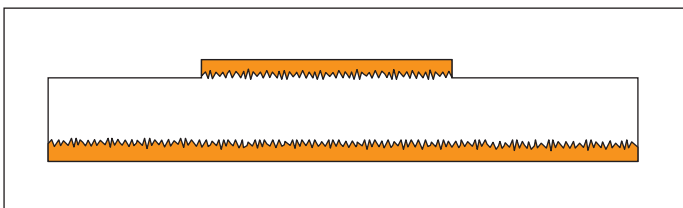


Рис. 1. Поперечное сечение двухслойного ламината печатной платы с шероховатыми электролитически осажденными медными слоями (масштаб увеличен)

Размеры шероховатостей варьируются также от листа к листу и от партии к партии, что следует учитывать при изготовлении МПП с большим количеством слоев из фольги разных партий. Более того, если на поверхность фольги наносятся дополнительные проводящие слои или для дальнейшей обработки добавляются другие покрытия, следует понимать, что это сказывается на состоянии поверхности, величине диэлектрической проницаемости платы и вносимых потерях.

### Влияние стекловолокна и неоднородностей подложки на плату с тонким ламинатом

На характеристики МПП влияют не только проводники, но и степень однородности подложки ламината, причем это влияние возрастает с уменьшением толщины слоев. В качестве примера можно привести ламинатную матрицу с ориентированными стеклянными волокнами [2]. Диэлектрическая проницаемость стеклянных волокон в этих материалах гораздо выше, чем у смоляных матриц или связующих веществ. Ориентация стеклянных волокон относительно положения планарной конфигурации влияет на диэлектрическую проницаемость и, следовательно, на распределение линий электрического поля между проводниками платы. Прохождение сигналов по проводникам через элементы ламината с ненадлежащими показателями  $D_k$  может привести к нежелательным различиям между характеристиками планарных линий передачи или волноводов и резонаторных цепей.

Влияние стекловолокон и других диэлектрических неоднородностей усиливается при повышении рабочей частоты (в диапазоне миллиметровых волн, где размеры неоднородных элементов составляют значительную часть длины волны сигналов) и переходе на использование тонких слоев ламината. Влияние стекловолокон сказывается на сокращении выхода годных изделий на несколько процентов в зависимости от геометрии их элементов.

Стекловолоконные материалы изготавливаются таким образом, чтобы минимизировать влияние неоднородностей, например, с помощью распределенного переплетения, при котором уменьшаются промежутки между отдельными волокнами и слой с ними становится однороднее. В приложениях миллиметрового диапазона тонкие ламинаты только с одним стекловолоконным слоем в большей мере восприимчивы к наличию неоднородностей, чем ламинаты с несколькими слоями волокна, за счет, видимо, эффекта усреднения. Наполнители, а также стекловолокно сглаживают эффект изменения диэлектрической проницаемости внутри ламината.

### Материалы препрега для многослойных печатных плат

Использование материалов препрега в многослойной плате с тонкими слоями ламината требует намного большего внимания, чем в ламинатах с толстыми слоями. Препреги также применяются для создания внешних слоев МПП. Толщина препрега, как правило, подбирается в соответствии с характеристиками слоев ламината в многослойной плате. Например, при необходимости изготовить полосковую линию с верхним и нижним диэлектрическими слоями одинаковой толщины толщина препрега должна в точности соответствовать толщине ламината. Следовательно, слои препрега с тонкими ламинатами могут быть тоньше, но при этом обеспечивать хорошее соедине-

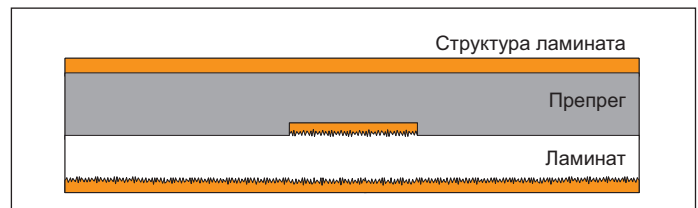


Рис. 2. Конфигурация полосковой линии передачи с медным ламинатом

ние и электрические характеристики, совместимые с определенными слоями ламината и медной фольгой в конструкции МПП.

Материалы препрега, используемые для склеивания тонких ламинатов, также могут потребоваться для размещения, например, проводящих слоев с элементами, высота которых больше толщины препрега. В таких случаях может возникнуть проблема, если слои препрега не имеют определенной текучести для заполнения всех склеиваемых областей. Недостаточная текучесть становится причиной появления воздушных карманов и скачков диэлектрической проницаемости, а также ухудшает стабильность геометрических размеров и ненадлежащий КТР по оси Z. В свою очередь, эти факторы снижают выход годной продукции и надежность. Таким образом, выбор препрега в определенных случаях осуществляется с учетом технологического процесса; при этом требуется компромисс для соответствия между диэлектрическими проницаемостями препрега и слоев ламината.

### Анализ характеристик тонкого ламината, медной фольги и препрега

Далее мы проанализируем характеристики  $D_k$  структуры и вносимых потерь с помощью нескольких комбинаций из тонких ламинатов, препрегов и медной фольги.

Данные о  $D_k$  и вносимых потерях были получены методами дифференциальной фазовой длины и дифференциальной длины. Для исследований слоев препрега был изготовлен специальный ламинат, поскольку эти препреги не выпускаются с медным покрытием.

### Сравнение слоев препрега разной толщины с двумя разными образцами медной фольги

В этом исследовании использовались три препрега RO4450T Bondply разной толщины (3, 4 и 5 мил, 1 мил = 0,0254 мм) и усиленный стекловолокном связующий материал с керамическим наполни-

телем, совместимый с препрегом RO4835T. Оба материала покрыты медной фольгой CU4000 и фольгой CU4000 LoPro толщиной 1/2 унции (рис. 3). В каждом из двух испытаний у препрегов – одинаковая толщина. Поскольку в состав фольги CU4000 LoPro входит усиливающий слой толщиной 0,35 мил, ламинаты с верхним и нижним слоями фольги CU4000 LoPro на 0,7 мил толще типовых медных ламинатов.

Из рис. 3а–г видно, что вносимые потери на единицу длины слоя RO4450T с более шероховатой медной фольгой (размеры шероховатостей фольги CU4000 толщиной 1/2 унции составляет 7–10 мкм, у CU4000 LoPro – 2–3 мкм; измерения проводились в соответствии с IPC-TM-650, 2.2.17), значительно выше, чем в испытаниях с использованием менее шероховатой медной фольги. Из этого следует, что для снижения вносимых потерь на единицу длины можно использовать слои ламината большей толщины и менее шероховатой фольгой. Кроме того, из этих графиков видно, что более толстые слои ламината также менее восприимчивы к вносимым потерям благодаря менее шероховатой поверхности. Тестирование ламинатов с менее шероховатыми медными поверхностями показало меньший разброс значений вносимых потерь в зависимости от толщины ламинатов. Таким образом, вариации вносимых потерь в функции толщины подложки меньше у ламинатов с менее шероховатой медной фольгой.

Кроме того, из графиков на рис. 3в–г видно, как на величину  $D_k$  платы влияет толщина слоев и шероховатости медной поверхности: при использовании более толстых слоев с менее шероховатой медной поверхностью диэлектрическая проницаемость цепи гораздо меньше и ниже чувствительность этого показателя к толщине материала, чем в случае с тонкими слоями и более грубой медной поверхностью.

### Влияние подбора препрега на тонкие слои ламината

Посмотрим, как выбор препрега влияет на характеристики планарных линий передачи или волноводов. В этом исследовании ана-

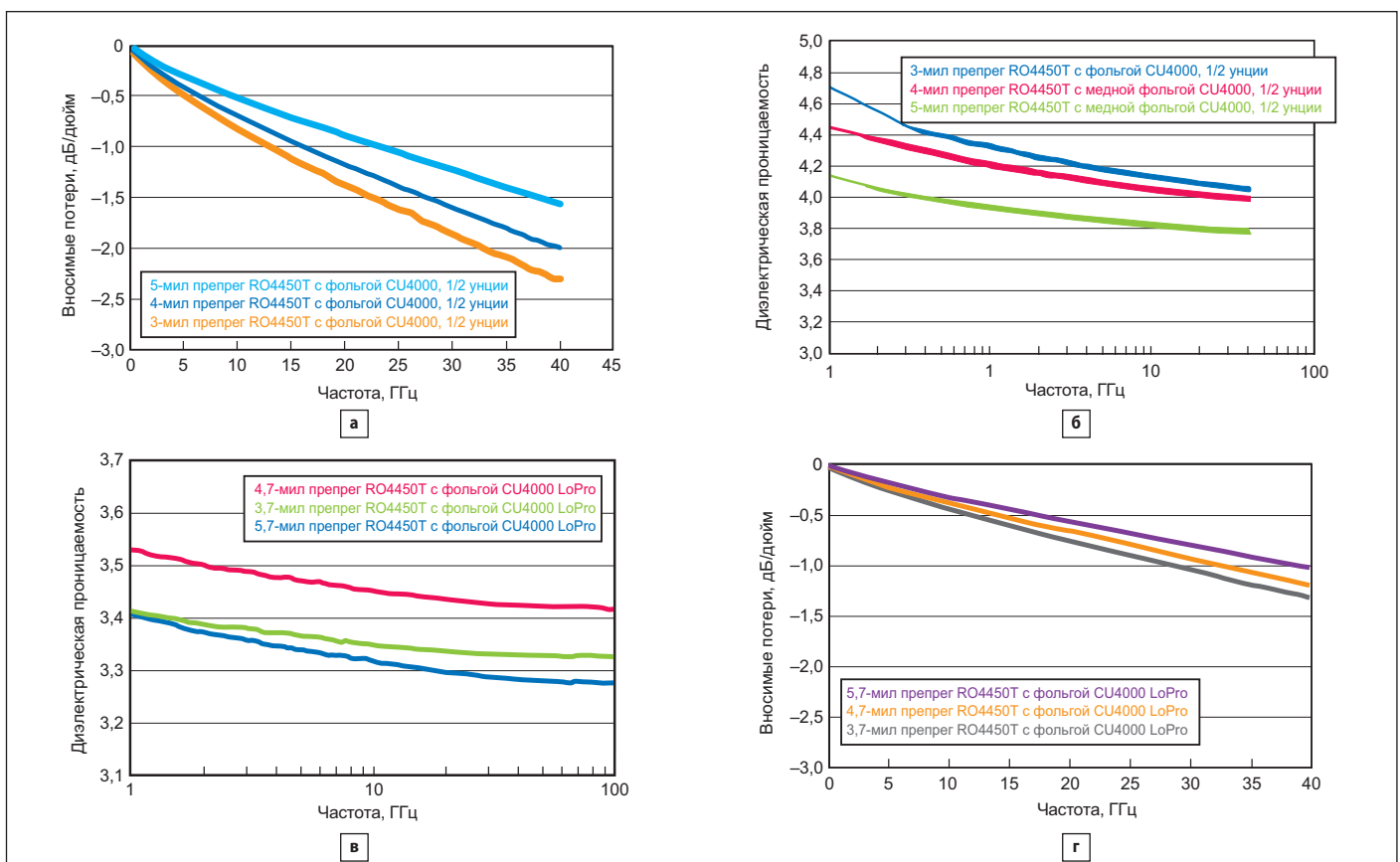


Рис. 3. Частотные зависимости  $D_k$  и вносимых потерь препрегов RO4450T разной толщины с медной фольгой с двумя степенями шероховатости

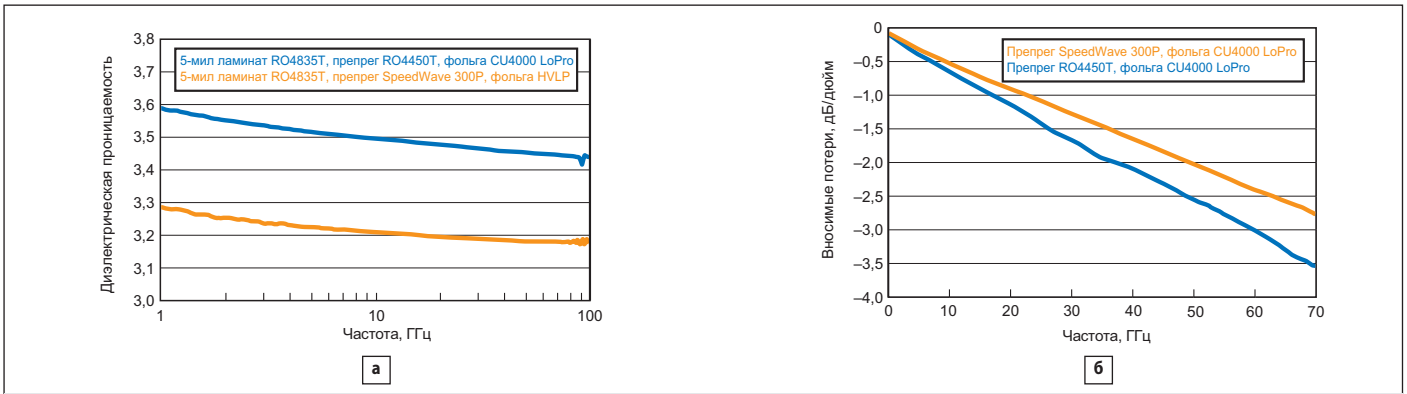


Рис. 4. Результаты измерения а)  $D_k$  и б) вносимых потерь на единицу длины полосковой линии с использованием разных препрегов одинаковой толщины и медной фольги с одинаковой низкой шероховатостью поверхностей

лизуется полосковая линия, изготовленная из ламината RO4835T толщиной 5 мил и препрегов RO4450T толщиной 5 мил, а также SpeedWave 300P толщиной 5 мил, покрытых слоями медной фольги CU4000 LoPro толщиной в 1/2 унции.

Для измерения вносимых потерь на единицу длины применялся метод дифференциальной длины. Исследование показало, что коэффициент рассеяния материала и диэлектрическая проницаемость препрега SpeedWave 300P ( $D_k = 3,16$ ,  $D_f = 0,0021$  при 10 ГГц) меньше, чем у RO4450T ( $D_k = 3,33$ ,  $D_f = 0,003$  при 10 ГГц) (рис. 4).

В силу меньших значений  $D_k$  и  $D_f$  препрега SpeedWave 300P оказались меньше  $D_k$  и вносимые потери на единицу длины полосковой линии передачи по сравнению с полосковой линией, изготовленной с использованием препрега RO4450T. Значение диэлектрической проницаемости полосковой линии с препрегом RO4450T ближе к значению  $D_k$  ламината RO4835T, что упрощает проектирование слоев препрега и ламината с заданным импедансом планарной конфигурации. Если потребуется уменьшить вносимые потери на единицу длины или повысить текучесть, можно использовать препрег SpeedWave 300P. Поскольку  $D_k$  этого материала отличается от диэлектрической проницаемости ламината в большей мере, чем в первом случае, данное обстоятельство необходимо учесть при проектировании плат, чувствительных к разбросу  $D_k$ .

Заметим также, что совместимость некоторых препрегов лучше с медной фольгой определенных типов. Например, препрег RO4450T в той или иной мере совместим с медной фольгой большинства типов. В целом, препрег SpeedWave 300P совместим с медной фольгой всех типов и потому не является причиной беспокойства о надежности платы.

### Влияние вариаций конструкции на $D_k$ и вносимые потери

В этом исследовании оценивалось влияние, которое оказывают разные методы построения конструкции на значения  $D_k$  и  $D_f$ . Как

правило, эти значения образцов ламината с одинаковой конструкцией, но разной толщины обратно пропорциональны ей, что связано с несколькими уже обсуждавшимися эффектами, включая состояние медной поверхности, которое в большей мере значимо в случае использования тонких слоев.

Из рис. 5а–б видно, что у ламинатов толщиной 2,5, 3 и 4 мил значения  $D_k$  и вносимых потерь на единицу длины согласуются с предположениями о том, что  $D_k$  и  $D_f$  слоя ламината зависят от его толщины. Однако у ламината толщиной 5 мил  $D_k$  немного выше, чем у ламината толщиной 2,5 мил, а значения вносимых потерь на единицу длины гораздо ближе к потерям в ламинате толщиной 4 мил, чем можно было бы предположить. Это связано с тем, что в 5-мил ламинате RO4835T имеется дополнительный стекловолоконный слой с распределенным переплетением (два слоя), тогда как в ламинатах толщиной 2,5, 3 и 4 мил – один стекловолоконный слой с распределенным переплетением. Этот дополнительный слой позволяет уменьшить влияние неоднородностей, но повышает величину  $D_k$  и вносимые потери. Повышение значений  $D_k$  материала и  $D_f$  дополнительного стекловолоконного слоя в конструкции ламината толщиной 5 мил приводит к большему росту  $D_k$  платы и вносимых потерь на единицу длины, чем предполагалось.

### Выводы

Переход на использование более тонких внутренних слоев ламината в высокоскоростных многослойных печатных платах усиливает в определенных случаях влияние препрега, медной фольги и конструкции ламината. Без надлежащего учета этих факторов и понимания нюансов сборки МПП можно с большей вероятностью столкнуться с уменьшением выхода годных и ухудшением характеристик приложения, чем можно было бы ожидать в внутренних слоях ламината на меньших рабочих частотах.

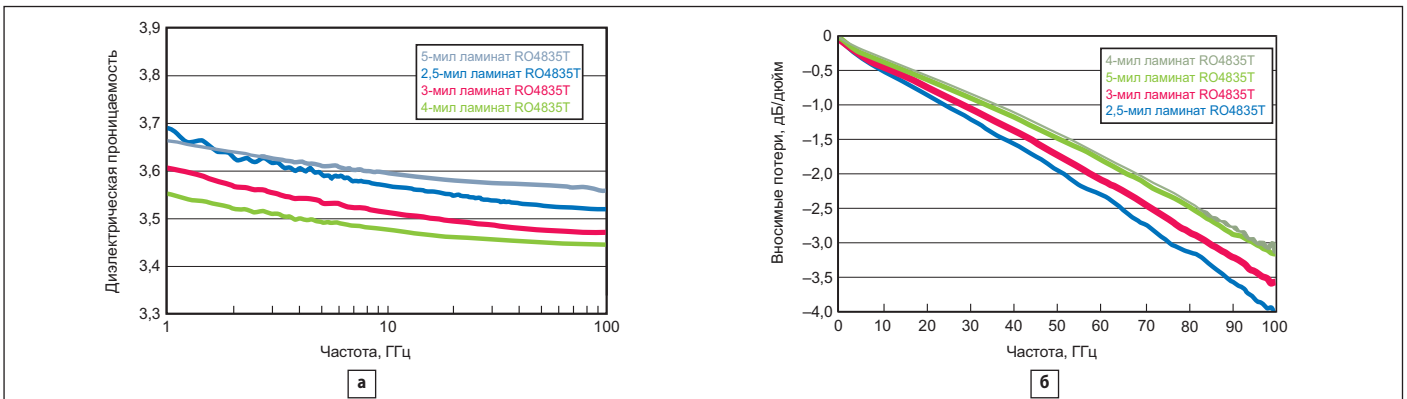


Рис. 5. Результаты измерения а)  $D_k$  и б) вносимых потерь на единицу длины ламината RO4835T толщиной 2,5, 3, 4 и 5 мил микрополосковой конфигурации методами дифференциальной фазовой длины и дифференциальной длины