

# МАТЕРИАЛЫ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПЛАТ ДЛЯ СВЧ-ПРИЛОЖЕНИЙ

В статье рассмотрены вопросы производства печатных плат для СВЧ-приложений. Основное внимание уделено двум аспектам: материалам печатных плат и особенностям производственных процессов их изготовления.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие произошла эволюция в решениях миллиметрового диапазона (а именно переход с частоты 24 на 100 ГГц) для коммерческих и промышленных применений, устройств «Интернета вещей» (IoT), средств беспроводной коммуникации и в различных автомобильных радарх, что, в свою очередь, увеличило потребность в производстве печатных плат с линиями передачи миллиметрового диапазона. При проектировании и изготовлении таких плат следует учитывать множество особенностей, касающихся преимущественно геометрических параметров проводников и материалов.

Далее мы кратко поясним причину особых требований к материалам печатных плат для СВЧ-приложений и конкретизируем не только эти регламенты, но и те, что относятся к производственным процессам изготовления самих плат.

## ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Общеизвестно, что высокочастотные печатные платы (ПП) должны обладать низкой диэлектрической проницаемостью (DK) и малым тангенсом угла диэлектрических потерь (Df).

DK — аббревиатура от dielectric constant (диэлектрическая постоянная), обычно обозначается как  $\epsilon$  и  $\epsilon_r$ . По определению, DK — отношение емкости конденсатора, содержащего измеряемый диэлектрик, к емкости конденсатора такого же объема, с вакуумом в качестве диэлектрика. Формула расчета:

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} = \frac{Q}{Q_0}$$

DK представляет собой свойство диэлектрика запасать электрическую энергию и препятствовать передаче сигнала. Высокочастотные/высокоскоростные пе-

чатные платы работают как передающие и принимающие антенны, задержки сигналов на этих платах не приветствуются. Таким образом, материалы для высокочастотных печатных плат должны обладать низкой DK.

Df — аббревиатура от dielectric loss factor (фактор диэлектрических потерь или тангенс угла диэлектрических потерь), обычно обозначается как  $\tan \delta$ . *Определение Df таково:* в переменном электрическом поле из-за эффекта гистерезиса проводимости и поляризации диэлектрика появляется разность фаз между вектором (комплексной амплитудой) тока, протекающего в диэлектрике, и вектором приложенного напряжения, что характеризуется углом разности фаз. Df представляет собой значение тангенса этого угла. Исходя из определения Df понятно, что для диэлектрика с высоким значением Df величина эффекта гистерезиса проводимости и поляризации является значительной, в результате велики и потери сигнала.

Значения DK и Df для высокочастотных/высокоскоростных печатных плат не являются фиксированными, поскольку на них оказывает влияние изменение частоты, температуры и влажности. Для повторяемости характеристик сигнала предполагаются стабильные значения DK и Df.

В общем случае значение DK для диэлектриков уменьшается в небольшом диапазоне при увеличении частоты сигнала. Например, при нормальной температуре значение DK стандартного FR4 составляет 4,7 на 1 МГц, 4,19 на 1 ГГц и 4,15 на 10 ГГц. При этом величина Df для диэлектриков увеличивается с ростом частоты сигнала [1].

При повышении температуры DK и Df для диэлектриков увеличиваются, причем Df растет более заметно. Также значения DK и Df увеличиваются по мере того, как диэлектрик поглощает влагу.

Как известно, значение DK для воды — 70, и накопление влаги способствует росту DK диэлектрика. Повышение влажности вызывает эффект поляризации, что ведет к увеличению Df.

DK влияет на ширину линии передачи (с заданным импедансом), а Df — на затухание сигнала в различных частотных диапазонах. Для производства высокочастотных/высокоскоростных печатных плат требуются материалы со стабильными и низкими значениями DK и Df.

Базовые материалы для высокочастотных/высокоскоростных печатных плат в основном изготавливаются из эпоксидных компаундов и стекловолокон (FR4 и PTFE), некоторые материалы — на основе керамики или по смешанной технологии.

Эпоксидные компаунды обладают меньшим значением DK (3,6 на 1 МГц), чем стекловолокно (на 1 МГц, стекловолокно E-типа 6,6; NE-типа 4,6; D-типа 4,7; Q-типа 3,9), при этом значение Df для эпоксидных компаундов (0,025 на 1 МГц) больше, чем у стекловолокон. Соотношение количества эпоксидного компаунда и стекловолокон в материале влияет на результирующие значения DK и Df. При выборе типа материала для высокочастотных печатных плат следует помнить об этом и соблюдать необходимый компромисс между значениями DK и Df.

Для различных областей применения ПП требования к DK и Df различаются. Если плата предназначена для передачи высокочастотных сигналов, приоритетом являются низкие DK и TCDK. Для высокочастотных ПП требуются материалы с низким значением DK, поскольку скорость распространения высокочастотных сигналов обратно пропорциональна квадратному корню DK.

Для задач СВЧ-техники высокочастотные печатные платы должны обладать низким Df и DK в диапазоне от 2–4 при

частоте 1 МГц. Для примера: значение DK у RO3003 составляет 3, а Df — 0,0013, у RO4350B DK составляет 3,66, Df — 0,0031.

Раньше значения частот сигналов для большинства применений не превышали 1 ГГц, и традиционный FR4 с высокими значениями DK и Df удовлетворял техническим требованиям. С развитием технологий частоты используемых сигналов растут, и на сегодня диапазон частот выше 2 ГГц является преобладающим. Таким образом, высокочастотные/высокоскоростные материалы с низкими значениями DK и Df играют ключевую роль при проектировании печатных плат.

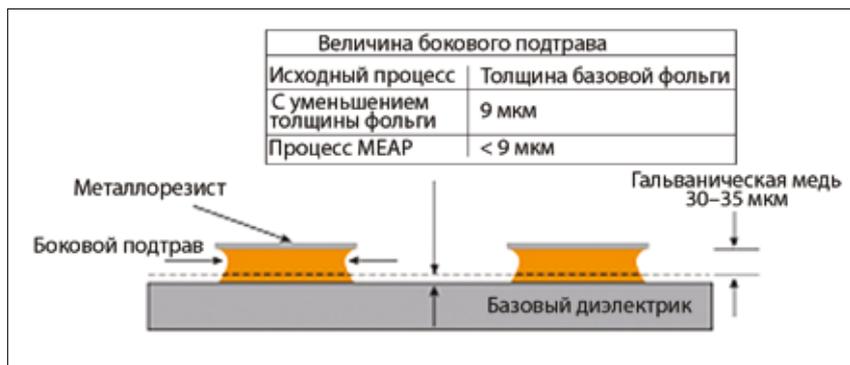
Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что материалы для высокочастотных/высокоскоростных печатных плат должны обладать как низким значением DK, так и низким значением Df. Если же это невозможно, то для высокоскоростных применений приоритетом является низкий Df, а для высокочастотных — низкие значения DK и TCDK. Однако для высокочастотных/высокоскоростных применений нет единственно верного решения, поэтому разработчику необходимо проконсультироваться с производителем высокочастотных/высокоскоростных плат до начала работы над проектом.

### ТРЕБОВАНИЯ К ПРОИЗВОДСТВУ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

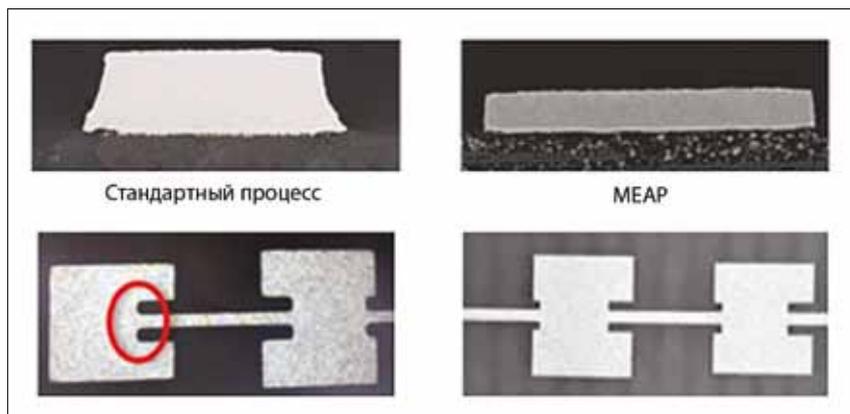
#### Производственный процесс

В миллиметровом диапазоне длины волны сигнала имеет тот же порядок величины, что и геометрические характеристики печатной платы, а это ужесточает требования по значениям допусков при производстве печатных плат. Многие изделия миллиметрового диапазона относятся к потребительской электронике, где объем производства печатных плат составляет десятки тысяч и даже миллионы. В такой ситуации стоимость — очень важный фактор, который повышает сложность проектирования.

Метод селективной металлизации проводящего рисунка (pattern plate), используемый большинством современных производителей печатных плат, лишен недостатков технологии сплошной металлизации и присущих ей процессов фотолитографии и химического травления [2]. Вместо сплошной гальванической металлизации фоторезист наносится на поверхность базовой медной фольги. Далее, при помощи фотошаблона или прямого экспонирования производится перенос изображения проводящего рисунка на фоторезист. После экспонирования и проявления гальванической металли-



▲ Рис. 1. Величина бокового подтрав при различных технологиях селективной металлизации

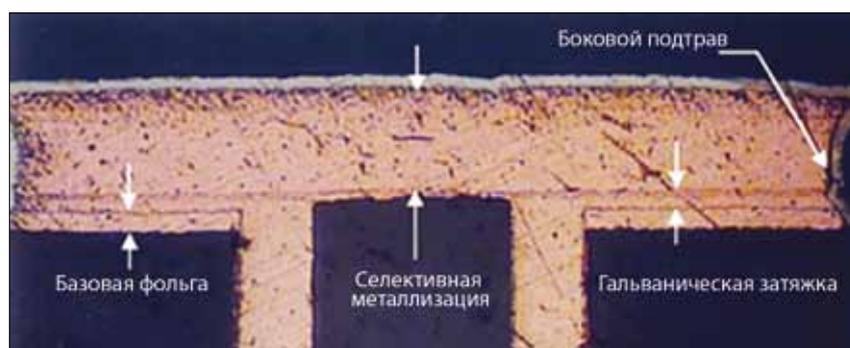


▲ Рис. 2. Сравнение стандартного процесса селективной металлизации и MEAP

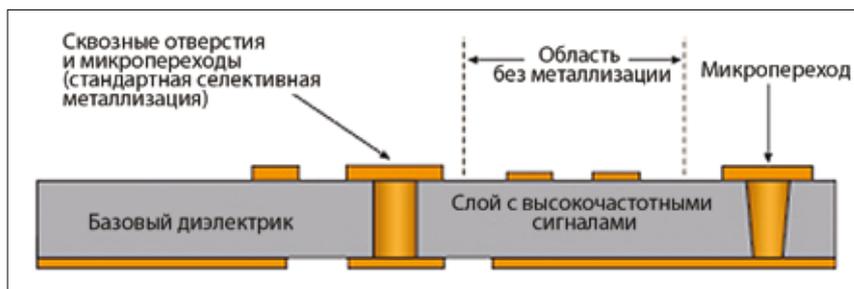
зации подвергаются только открытые участки базовой фольги, таким образом формируется проводящий рисунок, кроме того, происходит нанесение меди на стенки отверстий. Для защиты проводящего рисунка и металлизации в отверстиях перед финальным травлением на поверхность наносится слой металлорезиста. На следующем этапе выполняется удаление фоторезиста и травление базовой меди на пробельных местах, затем удаляется металлорезист. Формирование проводящего рисунка завершено. Селективная металлизация по сравнению со сплошной обеспечивает лучшие геометрические параметры и допуски проводников, так как требуется стравить только слой базовой фольги. Это минимизирует величину бокового подтрав, искажающего форму боковых поверхностей проводника (рис. 1).

Для миллиметрового диапазона характерны частоты 60–100 ГГц, что требует жестких допусков размеров проводников и радиусов скругления углов, особенно для антенн и встроенных линий передачи. В целях улучшения характеристик процесса травления было разработано несколько различных технологий.

1. Первая технология заключается в применении предварительного химического травления базовой фольги. Толщина фольги уменьшается до значений менее 9 мкм, что сокращает время травления, улучшает геометрию проводника, минимизирует значение бокового подтрав, требует меньшего значения компенсации для процесса травления.
2. Второй подход — модифицированный процесс травления (MEAP) — был разработан специально для микроволновых применений. Он обе-



▲ Рис. 3. VPPPO и гальваническая затяжка



▲ Рис. 4. С<sup>2</sup>ЕТ

спечивает жесткие допуски, меньший подтрав и лучшее разрешение. Этот процесс схож с предыдущим и обладает всеми преимуществами, которые дает уменьшение толщины базовой фольги, а кроме того, применяемые специализированные методики травления обеспечивают достижение превосходных геометрических параметров проводников после травления (рис. 2).

Зачастую разработчики упускают из виду, что при использовании сложных типов переходных отверстий толщина меди на поверхности увеличивается. Большинство сложных печатных плат содержит не только сквозные отверстия, но и слепые и погребенные переходные отверстия, микропереходы, переходные в контактных площадках с вторичной металлизацией сверху (via in pad plated over — VIPPO), при этом процесс металлизации становится более сложным. Для обеспечения надежности переходного отверстия медь должна быть нанесена непрерывно от верхнего проводящего слоя по стенкам отверстия до нижнего слоя. При использовании метода, известного как гальваническая затяжка, слой меди наносится равномерно, без образования зерен, границы которых могут привести к разрыву соединения при сборке или при термоциклировании. Данная технология подходит только для сквозных отверстий, так как в процессе гальванической затяжки металлизуются все три поверхности (верхний и нижний слой, стенка отверстия). Для слепых переходных отверстий и VIPPO такой метод неприменим. Согласно спецификации IPC-6012, минимальная толщина гальванической затяжки составляет

5 мкм на каждый цикл металлизации (рис. 3).

При разработке печатных плат для миллиметрового диапазона практически всегда требуется использовать VIPPO и слепые переходные отверстия различной глубины.

Для построения экспериментальной модели примем, что толщина базовой фольги увеличивается на 5 мкм при каждом цикле гальванической затяжки. Дополнительная толщина меди оказывает влияние на минимальные размеры выполнения проводников и допуски изготовления. К примеру, наличие VIPPO означает добавление одного цикла гальванической затяжки, два типа слепых переходных отверстий добавляют еще два цикла и т. д. Это нужно учитывать на самом раннем этапе проектирования.

3. Третий технологический процесс был разработан для достижения жестких допусков по размерам и во избежание влияния вариативности толщины меди. Это гибридная технология, предусматривающая селективную металлизацию и традиционный процесс фотолитографии/травления. Идея проста: для критических эле-

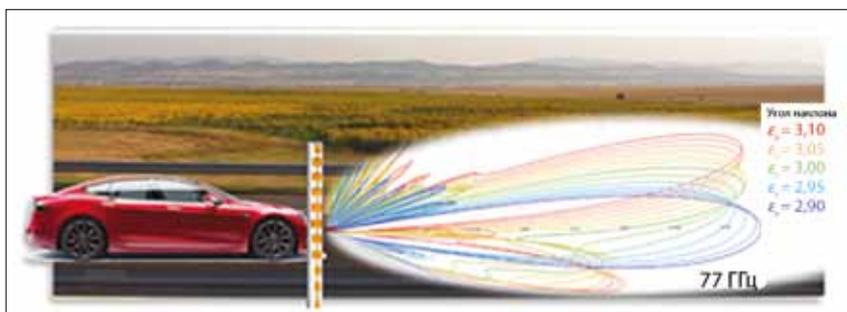
ментов топологии, таких как антенны, фильтры, планарные трансформаторы, изображение наносится фотолитографическим методом на базовую фольгу (обычно толщиной менее 9 мкм) и травится. Эти элементы не подвергаются металлизации, приобретая преимущества травления исключительно фольги, при этом допуск толщины определяется только допуском толщины базовой фольги. Некритичные элементы топологии и места пайки подвергаются стандартной селективной металлизации (рис. 4). Несмотря на сравнительно высокую стоимость из-за дополнительных производственных процессов, такая технология (известная как С<sup>2</sup>ЕТ) обеспечивает достижение неплохих электрических характеристик.

В таблице приведено сравнение технологических операций, описанных выше.

В процессе разработки печатной платы очень важным инструментом является моделирование. На этапе моделирования определяется приемлемый уровень допусков, что дает возможность выбрать необходимую технологию изготовления, тип диэлектрика и медной фольги. Моделирование позволяет снизить стоимость, провести анализ возможных причин отказа, а благодаря использованию виртуальной среды, готовые результаты получаются значительно быстрее, чем при изготовлении прототипов.

### Допуски базовых материалов

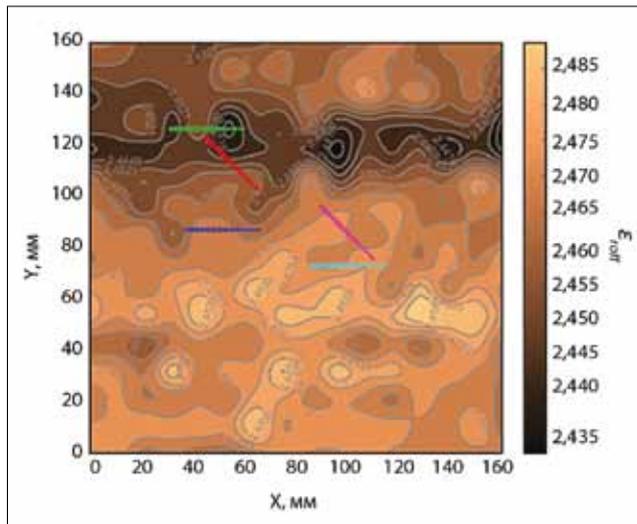
Вне зависимости от выбранного технологического процесса необходимо учитывать производственные допуски



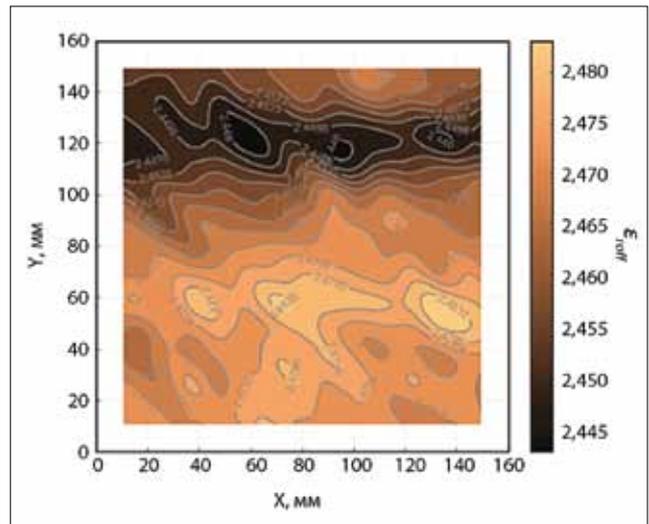
▲ Рис. 5. Модель зависимости угла наклона от диэлектрической постоянной для антенной решетки на частоте 77 ГГц

Таблица. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

	Сплошная металлизация + VIPPO	Сплошная металлизация	Сплошная металлизация с уменьшением толщины фольги	С <sup>2</sup> ЕТ	МЕАР
Допуск ширины проводника, мкм	±25	±20	±18	±18	±15
Индекс воспроизводимости геометрических параметров (Срк)	> 1,33	> 1,33	> 1,33	> 1,33	> 1,33
Подтрав (толщина фольги)	≤ 35 мкм (25 мкм мин.)	≤ 35 мкм (25 мкм мин.)	≤ 16,5 мкм (25 мкм мин.)	≤ 17,8 мкм (18 ± 5 мкм)	≤ 10 мкм (35 ± 10 мкм)
Радиус скругления углов, мкм	≤ 25	≤ 25	≤ 15	≤ 15	≤ 10



▲ **Рис. 6.** Эффективная диэлектрическая постоянная на основе 16×16 измерений. Размер образца 160×160 мм. Показаны антенные решетки, работающие на частоте 77 ГГц, расположенные на различных участках, под различными направлениями



▲ **Рис. 7.** Усредненная эффективная диэлектрическая проницаемость для антенны 77 ГГц, расположенной под углом 45° в каждой точке тестового поля

как в отношении базовых материалов, таких как диэлектрик и медная фольга, так и в отношении технологических операций при изготовлении печатных плат. Для каждой технологии существуют свои допуски, однако следует принимать в расчет и индивидуальные особенности производства конкретной партии и панели. Поскольку базовый диэлектрик не является однородным (это сложный композиционный материал), эффективная диэлектрическая постоянная (DK) различается в разных точках. Толщина медной фольги также неравномерна. Свое влияние оказывает и топология печатной платы. Например, расположение переходных отверстий обуславливает распределение токов при гальванической металлизации и может вызвать неравномерность в толщине покрытия. Различия в площади меди на разных слоях могут привести к различиям в толщине печатной платы после прессования. Неравномерное распределение технологических растворов по поверхности в процессе травления вызывает локальные отличия в параметрах готового изделия.

Диэлектрическая постоянная (DK) — один из показателей, который следует учитывать при разработке печатной платы. Для примера рассмотрим антенную решетку, применяемую в автомобильных радарх среднего и большого радиуса действия, работающих на частоте 77 ГГц. Угол наклона луча зависит от диэлектрической постоянной (рис. 5). Изменение значения диэлектрической постоянной на 1% приводит к отклонению луча на 0,74°.

Любые параметры изделия, связанные с топологией платы, могут быть оптимизированы по результатам ис-

пытаний опытных образцов. Допуски базовых материалов и технологических процессов известны и должны применяться при моделировании. Однако данные значения могут не полностью соответствовать результату, полученному при изготовлении ВЧ-устройства. Параметры диэлектрика и фольги измеряются отдельно, обычно методом выборочного контроля. В процессе производства необходимо проверять соответствие плат заданным размерам, выполняя измерения в определенных местах. Однако вопрос о том, как будут комбинироваться данные параметры на панели в целом, остается открытым.

Для ответа на этот вопрос были проведены измерения диэлектрической проницаемости при помощи структуры в виде сетки из 16 кольцевых резонаторов, размещенных на типичном ВЧ-диэлектрике (рис. 6).

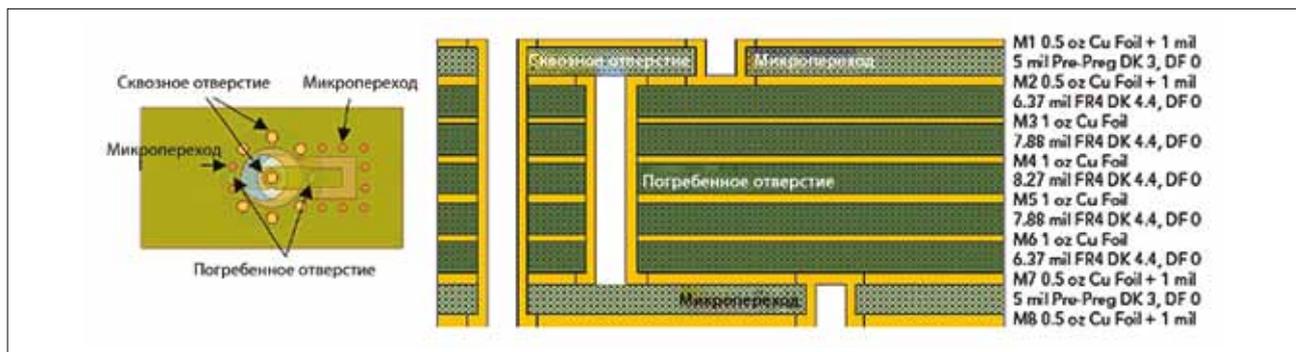
Среднее значение составило 2,47 с отклонениями  $\pm 1,4\%$ . Антенная решетка может быть расположена в любом месте платы и под любым углом, как показано на рисунке. Отдельные элементы значительно меньше, чем антенна целиком, для них значения DK могут сильно различаться, поэтому более показательна величина отклонений DK, усредненная по всей площади антенной решетки. Эти данные можно получить путем размещения антенны во все возможные позиции с вычислением среднего значения DK. В идеале должны быть учтены зоны с самыми высокими отклонениями DK. В результате расчета при расположении антенны под углом 45° среднее значение DK составило 2,47 с отклонением  $\pm 0,9\%$  (рис. 7).

Можно сделать следующий вывод: небольшие объекты, такие как отдельные элементы антенной решетки на 77 ГГц, сильно подвержены отклонениям в DK

( $2,47 \pm 1,4\%$ ). При этом отклонение DK антенны в целом значительно меньше ( $2,47 \pm 0,9\%$ ). Таким же образом общее отклонение DK для всех передающих (Tx) и приемных (Rx) антенн всего комплекса в целом окажется еще меньше. Локальные отклонения могут быть вызваны любыми причинами — характеристиками фольги и диэлектрика, особенностями изготовления, топологией печатной платы. Величины отклонений параметров зависят от типа материала и от производственного процесса, и эти отклонения неизбежны.

Следует принять во внимание, что значения диэлектрической постоянной, полученные путем измерения параметров кольцевых резонаторов, могут не полностью соответствовать значениям DK для антенн или других ВЧ-структур. Также нужно иметь в виду, что любые измерения характеризуются допусками и повторяемостью. Для данного эксперимента повторяемость измерений составила  $\pm 0,3\%$ . Результаты, полученные для микроволновых антенных решеток, могут не совпадать со значениями отклонений в параметрах других микроволновых цепей, однако принцип у них один и тот же.

При разработке ВЧ-устройства необходимо выбирать производственный процесс, исходя из требований конечного продукта. Следует обязательно учитывать допуски материалов и технологических операций, а также возможные отклонения от партии к партии, от панели к панели и внутри одной панели. Кроме того, нельзя игнорировать и другие факторы, влияющие на процесс изготовления и на допуски параметров. Так, ВЧ-компоненты могут располагаться или на стороне антенны, или с противоположной стороны печатной платы.



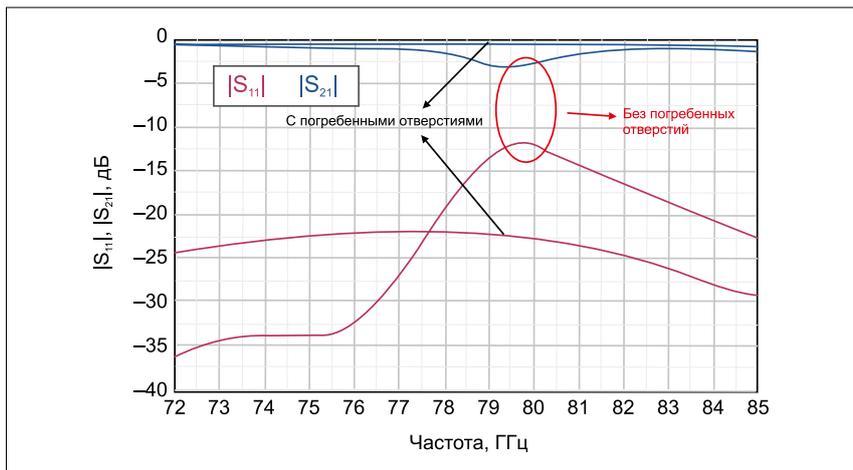
▲ Рис. 8. Конфигурация переходных отверстий и структура слоев для печатной платы с переходом сигнала частотой 76–81 ГГц с нижнего на верхний слой

### Использование дискретного компонента

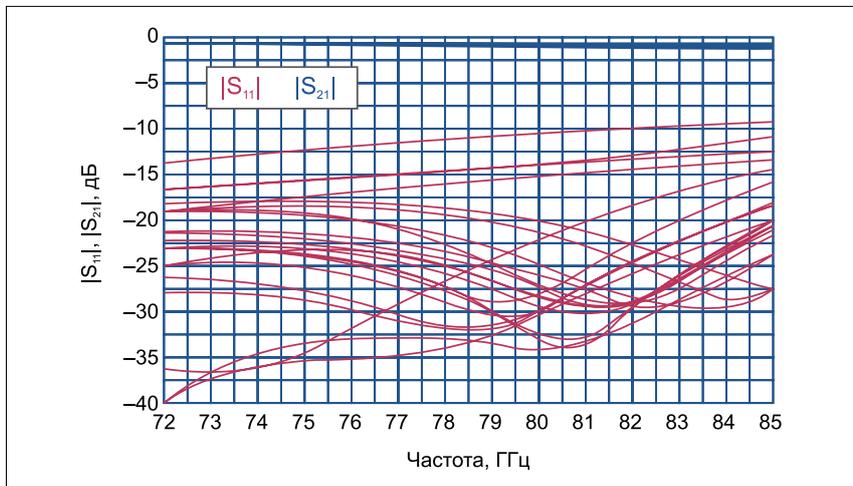
Трассировка сигнальных линий по разным слоям обычно выполняется при помощи переходных отверстий. Проведение электромагнитного моделирования в 3D подтверждает, что в миллиметровом диапазоне становятся существенными отклонения, вносимые высоким импедансом переходных отверстий. Более того, свое влияние оказывает и паразитный эффект неиспользуемых частей переходных отверстий. Неиспользуемые части необходимо удалять (обычно путем обратного сверления) и принимать дополнительные меры по согласованию импедансов для компенсации данного эффекта. Допуски производственного процесса для всех параметров должны быть учтены на самой ранней стадии разработки.

Для большинства радаров миллиметрового диапазона рабочие частоты превышают 60 ГГц, поэтому необходимо минимизировать электромагнитное излучение, генерируемое переходными отверстиями. Обычно для этого используется плотное кольцо переходных отверстий «земли» вокруг сигнального отверстия, что обеспечивает экранирование, запирая электромагнитные поля в квазиаксиальной структуре, и уменьшает потери на излучение. Однако эти переходные отверстия могут привести к замыканиям, а кроме того, они блокируют путь для разводки ВЧ-сигнала. На рис. 8 показана характерная конфигурация переходных отверстий и структура слоев печатной платы автомобильного радара с переходом сигнала частотой 76–81 ГГц с нижнего на верхний слой.

Шесть сквозных металлизированных отверстий, окружающих центральное сигнальное, относятся к «земле». Но данные отверстия не обеспечивают достаточное экранирование на верхних частотах, поэтому требуется два дополнительных погребенных отверстия, чтобы закрыть зазор в экране, не замыкая сигнальные трассы. При удалении по-



▲ Рис. 9. Вносимые и возвратные потери



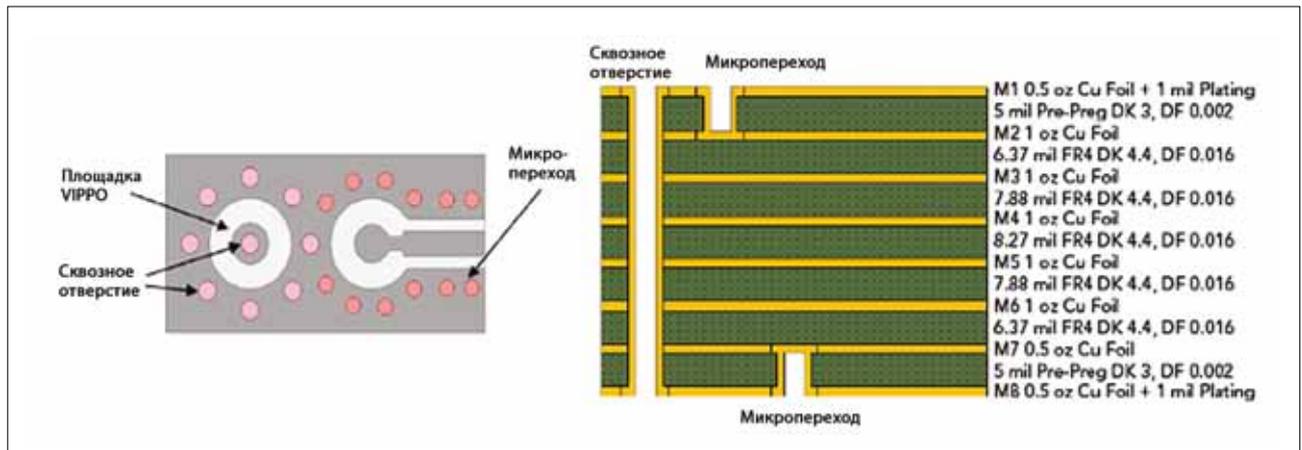
▲ Рис. 10. Отклонения величины потерь

гребенных отверстий существенно возрастают вносимые и возвратные потери (рис. 9). На рис. 10 представлено различие в электрических параметрах для конфигурации, приведенной на рис. 8. Учтены допуски изготовления печатной платы (травление, совмещение слоев, сверление), вариации толщины диэлектрика и диэлектрической постоянной. Подобные графики необходимы для подтверждения соответствия заданным параметрам изделия.

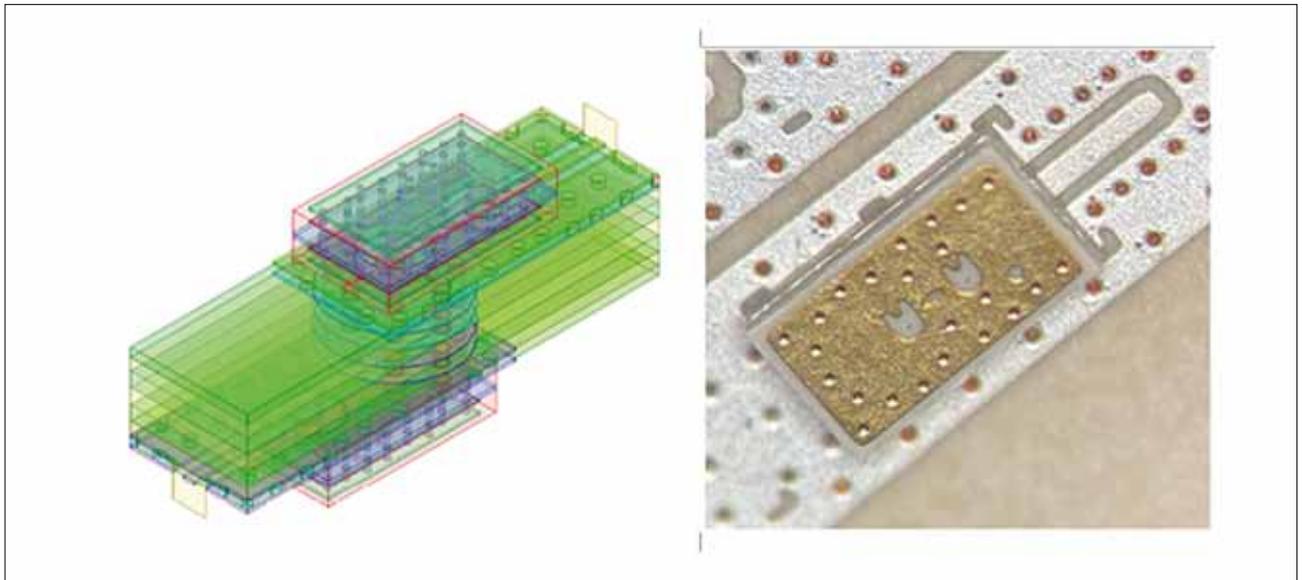
Как сказано выше, формирование погребенных отверстий требует дополнительных производственных операций

(прессование, сверление и металлизация), что существенно увеличивает себестоимость изделия. Альтернативой может служить использование поверхностно-монтируемого (SMT) компонента — «кроссовера», устанавливаемого на более простую плату. Это позволяет достичь схожих результатов, уменьшив сложность производства печатной платы (рис. 11).

В данном проекте автомобильного радара, работающего в диапазоне частот 76–81 ГГц, присутствуют только сквозные отверстия и микропереходы, что позволяет обойтись лишь одним циклом



▲ Рис. 11. Конфигурация переходных отверстий и структура слоев для ПП с использованием «кроссовера»



▲ Рис. 12. Изометрический вид и фотография перехода с использованием «кроссовера»

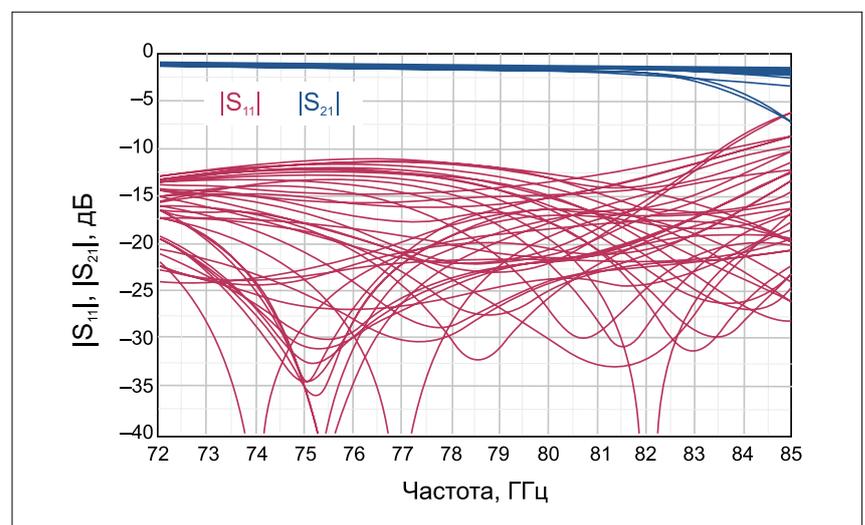
прессования. Центральное сигнальное отверстие и окружающие его экранирующие отверстия — обычные сквозные. Микропереходы окружают сигнальный проводник, формируя заземленную копланарную линию передачи (grounded coplanar waveguide — GCPW). Изолированная контактная площадка сигнального отверстия и окончание сигнальной линии не соединены на печатной плате, они соединяются с использованием поверхностно-монтируемого «кроссовера». «Кроссоверы» устанавливаются на верхней и нижней стороне печатной платы, обеспечивая переход сигнала между слоями (рис. 12).

Размеры компонента 2,0×1,3 мм оптимальны для 50-омных линий шириной 0,25 мм, обычно применяемых в таких ситуациях. Для изготовления компонента необходимы стандартный ВЧ-диэлектрик и традиционный процесс производства многослойной печатной платы. Данный подход позволяет достичь того же результата, что и при использовании погребенных отверстий (сравните рис. 13 и рис. 10).

В случае, когда количество подобных переходов невелико, стоимость изготовления самой платы существенно снижается, и эта разница в цене превышает стоимость дополнительных компонентов, что является финансово выгодным для производителя.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Быстрое развитие технологий изготовления устройств миллиметрового диапазона ведет к росту спроса на высокопроизводительные многослойные печатные платы, используемые для этих применений. Однако существую-



▲ Рис. 13. Отклонения величины потерь при использовании «кроссовера»

щие материалы и технологические процессы производства таких плат не всегда полностью соответствуют предъявляемым требованиям. При этом даже незначительные отклонения в характеристиках базовых материалов и в про-

цессах изготовления могут ухудшить параметры готового изделия. Для достижения нужных характеристик, высокой повторяемости и оптимальной стоимости печатных плат необходимо учитывать возможные отклонения

на всех этапах производства, начиная с проектирования.

Для изготовления качественных высокочастотных/высокоскоростных печатных плат очень важно найти надежного производителя. Выбирая «А-КОНТРАКТ» в качестве производителя высокочастотных ПП, вы можете быть уверенным, что платы будут обладать низкими DK и Df наиболее соответствующими назначению конечного изделия. ●

## КОММЕНТАРИЙ СПЕЦИАЛИСТА



**Сергей Шихов,**  
директор по управлению проектами «А-КОНТРАКТ»

При разработке и производстве устройств, работающих на частотах в десятки ГГц, необходимо принимать в расчёт влияние тех факторов, которые не являются существенными для более низких частот. Также следует учитывать экономические аспекты, особенно для массовых изделий. Разработчик должен обращать внимание на эти важные вопросы на самой ранней стадии проектирования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Why Do High-Frequency/High-Speed PCB Materials Have Low DK/Df Values?* [www.pcbonline.com](http://www.pcbonline.com)
2. *Kirkeby N., Mei C., Buck T. PCB Design Considerations for mmWave.* [www.microwavejournal.com](http://www.microwavejournal.com)