

ФОЛЬГИРОВАННЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ – КАК ВЫБРАТЬ ОПТИМАЛЬНЫЙ ВАРИАНТ ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ВЧ/СВЧ-ДИАПАЗОНОВ

ЧАСТЬ 2

Ю.Богданов, В.Кочемасов, Е.Хасьянова ehasyanova@gmail.com

Продолжаем публикацию материалов о фольгированных диэлектриках для печатных плат. Первая часть статьи – в предыдущем номере журнала "Печатный монтаж".

ЛАМИНАТЫ ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ АНТЕНН

Ведущие производители предлагают ламинаты с применением описанных в первой части статьи материалов, разработанные специально для планарных антенн (табл.4). Поскольку антенны – один из наиболее значимых компонентов систем приемопередачи, к ним предъявляются довольно жесткие требования по уровню потерь и усилению. Обеспечение соответствующего уровня этих параметров будет в значительной степени зависеть от выбора ламината.

Однако в ряде случаев возможно создание антенн с применением и других электроизоляционных материалов (см. табл.2, ч.1). Так, для антенн базовых станций беспроводной связи нужны материалы со следующими параметрами: $\epsilon_r < 3,5$, $\text{tg}\delta < 0,003$,

ПИМ < 153 дБн [16, см. ч.1]. Соответственно, подойдут все ВЧ/СВЧ-ламинаты, удовлетворяющие данным условиям [30,31]. Для GPS и спутниковых антенн марки серий RO3200 и TRF могут обеспечить хорошие электрические характеристики и долговременную механическую стабильность в широком диапазоне частот.

Отметим основные особенности влияния характеристик базовых материалов на работу антенных систем. Необходимо выбирать базовые материалы с наименьшим значением допуска на ϵ_r и $\text{TK}\epsilon_r$ для обеспечения стабильности частотных характеристик антенны. Пусть, например, при проектировании антенны с $f_p = 2,50$ ГГц выбран материал с $\epsilon_r = 3,0$. Изменение значения ϵ_r в плоскости длина-ширина всего на 5% приводит к частотному сдвигу на 60 МГц [32], что составляет 30% от выделенной полосы частот. Изменения значения ϵ_r при изменении температуры полностью избежать все же не удастся. Но путем тщательного выбора армирующего материала и керамических наполнителей

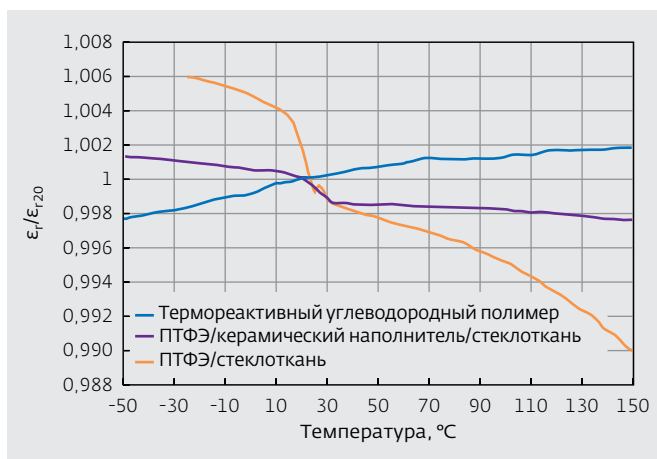


Рис.9. Изменение относительной диэлектрической проницаемости в зависимости от температуры для разных типов антенных ламинатов. $\epsilon_{r20} = 3,2$ – значение ϵ_r при 20°C

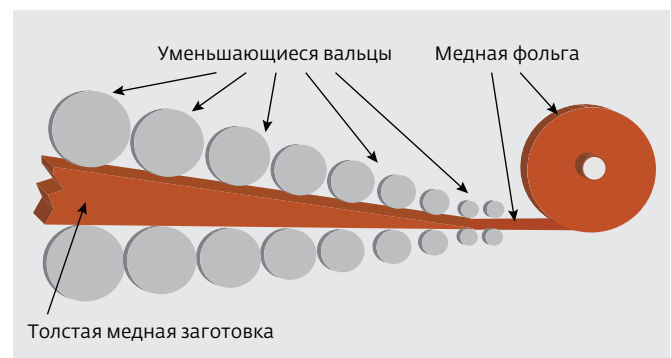


Рис.10. Процесс производства отожженной катаной медной фольги

Таблица 4. Базовые материалы, разработанные специально для применения в антенных системах

Фирма	Марка	ϵ_r	$tg \delta \times 10^{-4}$	ТК ϵ_r , ppm/°C	λ , Вт/(м·К)	КТР, ppm/°C (X/Y/Z)	ПИМ, дБн
		на частоте 10 ГГц					
Фторопласт-4/стеклоткань и/или стекловолокно							
Arlon	DiClad	2,17	9	-160	0,261	25/34/252	–
Arlon	ADPIM XXX	2,5–3,5	18–30	-110	0,235	12/15/95	-155
Taconic	TLA-6	2,62	12	–	0,22	9/12/TBD	–
Фторопласт-4/керамический наполнитель/стеклоткань							
Taconic	RF-301	2,97±0,07	12	–	0,23	17/20/150	–
Rogers	RO3730	3,00±0,06	13	-20	0,45	11/12/65	-162...-169
Taconic	RF-30	3,06±0,1	14	–	0,2	11/21/208	–
Углеродородный термореактивный полимер							
Rogers	RO4730	3,00±0,08	23	22	0,52	19/17/40	-153...-169
Rogers	RO4533	3,30±0,08	20	40	0,6	13/11/37	-153...-163
Rogers	RO4534	3,40±0,08	22	40	0,6	11/14/46	-153...-163

можно стабилизировать ϵ_r при кратковременных изменениях температуры (рис.9) [33].

На изменение уровня потерь при возрастании температуры в значительной степени влияет $tg\delta$. Следовательно, стоит выбирать материал с наименьшим значением этого параметра. Самое низкое значение $tg\delta$ у DiClad, но и диэлектрическая проницаемость у него меньше всех (2,17). А среди ламинатов с ϵ_r около 3,00 оптимальным выбором являются RF-301 и RO3730 (см. табл. 4).

ТИПЫ ФОЛЬГИ ДЛЯ ВЧ/СВЧ-ЛАМИНАТОВ

Использование медной фольги при производстве печатных плат обусловлено ее хорошей проводимостью, пластичностью и тем, что при металлизации сквозных и глухих отверстий также используется медь.

Различают два типа фольги: катаная и электролитически осажденная [33].

Первую получают из толстой медной заготовки путем последовательных холодных прокатов, применяемых для достижения нужной толщины (рис.10) [34]. Гладкость поверхности будет зависеть от характеристик прокатного станка. Зернистая структура, равномерная поверхность и превосходная пластичность такой фольги определили ее применение в гибких печатных платах на протяжении десятилетий. Шероховатость поверхности фольги оказывает значительное влияние на вносимые потери, особенно в СВЧ и мм-диапазонах – чем больше профиль шероховатости (RMS), тем больше их уровень (рис.11) [35]. Поэтому катаную медную

фольгу с гладкой поверхностью в последнее время используют и в устройствах с рабочими частотами свыше 30 ГГц.

С другой стороны, равномерная поверхность уменьшает прочность склеивания со следующим слоем. Кроме того, катаная фольга имеет горизонтальную структуру зернистости, что усложняет

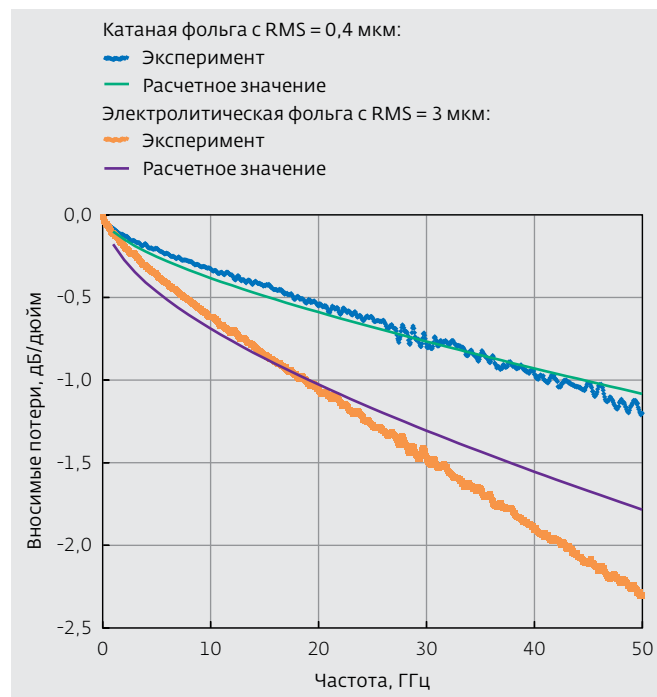


Рис.11. Зависимость вносимых потерь от частоты для различных типов фольги

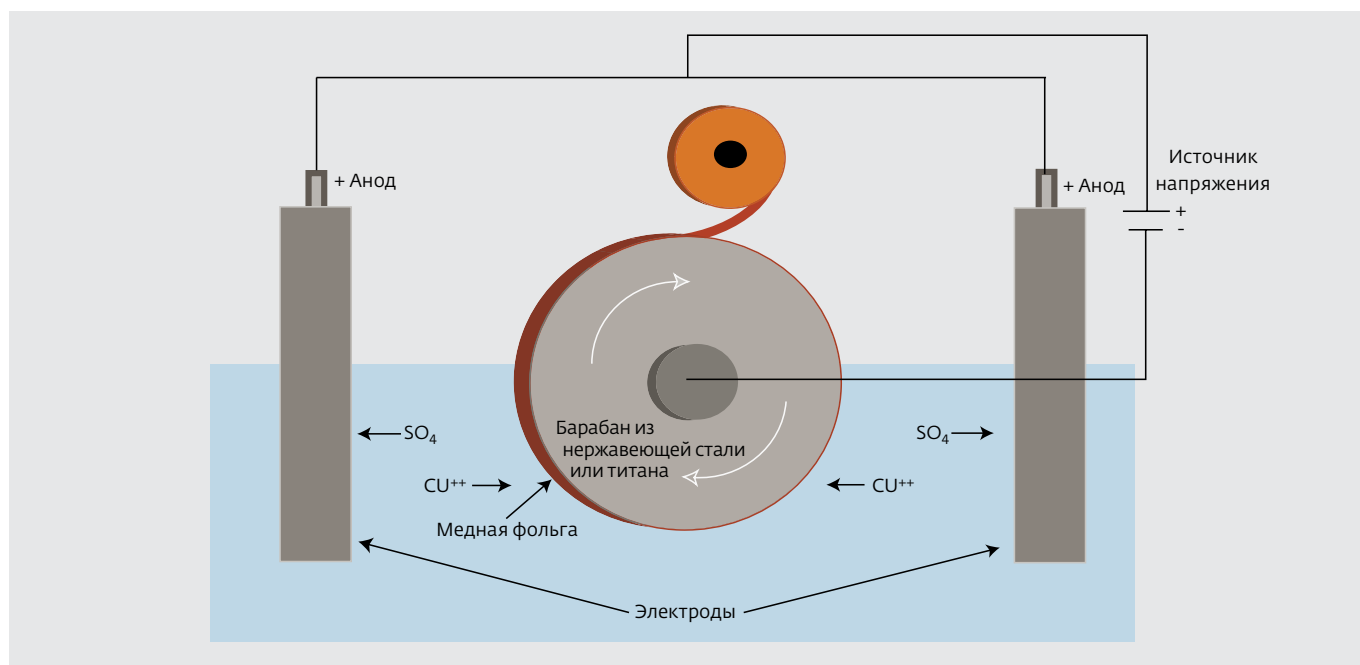


Рис.12. Процесс получения электролитически осажденной фольги

травление в условиях ограниченного пространства проводника и ухудшает адгезию фоторезиста. Это может значительно повлиять на надежность схем с высокой плотностью межсоединений.

Электролитически осажденная фольга – стандартный тип фольги, применяемой в производстве ламинатов. Для ее изготовления используют процесс гальванического осаждения меди (рис.12) [34]. Толщина осажденного слоя меди регулируется скоростью вращения барабана. Со стороны барабана поверхность меди гладкая и блестящая, а со стороны осаждения электролита – матовая и шероховатая. Шероховатой стороной медь клеится к диэлектрику с применением адгезива или препрега в качестве клеевого слоя. Такая фольга, в отличие от катаной, имеет вертикальную структуру зернистости.

Профиль шероховатости стандартной электролитической фольги достаточно высок по сравнению с катаной отожженной, что способствует увеличению прочности сцепления с диэлектриком. Однако при использовании стандартного профиля фольги появляется дополнительное затухание сигнала и увеличение задержки на распространение. Долгое время этот эффект учитывался только при проектировании РЛС или ускорителей заряженных частиц. Но в последнее время рассматривается влияние шероховатости фольги для высокопроизводительных печатных плат и в области СВЧ. Это связано с уменьшением глубины скин-слоя по мере возрастания частоты: на частоте 1 ГГц – 2,5 мкм;

10 ГГц – 0,5 мкм; 100 ГГц – 0,05 мкм. Следовательно, для обеспечения высокой скорости распространения сигналов по печатной плате лучше применять тонкопрофильную электролитическую или катаную отожженную фольгу. Кроме того, использование фольги с таким профилем позволяет уменьшить вносимые потери на 40%.

Существует также электролитически осажденная фольга с обработанной обратной стороной. На гладкую сторону наносится специальное покрытие для получения развитой тонкопрофильной поверхности меди. Минимальная шероховатость фольги не препятствует нанесению проводников, но в то же время улучшается адгезия с диэлектриком в многослойной печатной плате и адгезия фоторезиста [33]. Улучшение адгезии с диэлектриком – главное преимущество такого типа фольги перед стандартной электролитической. Для нанесения резистивного слоя матовая сторона не требует никакой дополнительной механической или химической обработки.

Несмотря на то, что электролитическая фольга имеет больший предел прочности на разрыв по сравнению с отожженной катаной, в некоторых условиях (табл.5) [34] ее использование ведет к возникновению трещин в узких проводниках вследствие механических воздействий. В таком случае необходимо применять отожженную катаную фольгу, имеющую большее упругое удлинение. Если сравнить электролитическую и катаную фольгу толщиной 70 мкм, то упругое удлинение будет иметь

Таблица 5. Рекомендуемые типы фольги для некоторых областей применения и условий окружающей среды

Условия применения базового материала	Тип фольги		
	С электролитическим осаждением		Катаная
	Стандартная	С обработкой с обратной стороны	
ВЧ (низкое значение ПИМ на 20 ГГц)		×	×
Тепловые удары			×
Механические вибрации	×		
Многослойные ПП	×		
Схемы с узкими межсоединениями (<127 мкм)	× (толщина 8,5 мкм)	×	

значение 3 и 27%, соответственно [34]. А предел прочности на разрыв – 40 и 28 kpsi.

Важно помнить, что массу, толщину и другие параметры фольги нужно подбирать для конкретного диэлектрика. Каждый из производителей в спецификации указывает, какой тип фольги подходит к определенной серии или марке ламината.

ТЕСТИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

При выборе базовых материалов стоит обращать внимание не только на значение характеристик, но и на методы их тестирования. Например, зачастую считается, что ϵ_r имеет фиксированное значение. Однако каждый производитель базовых материалов печатных плат вместе со значением этого параметра указывает метод тестирования и частоту, для которой справедливы полученные результаты. Следовательно, при сравнении нескольких методов относительная диэлектрическая проницаемость одного и того же материала может иметь разные значения.

Все методы тестирования ϵ_r регламентированы стандартами NEMA и IPC. Существует два типа методов измерения ϵ_r :

- резонансные – более точные, но ограничены фиксированным значением частоты или несколькими дискретными частотами;
- отражательные – результаты, полученные с их применением, справедливы для целого диапазона частот.

Рассмотрим подробнее методы тестирования, наиболее часто применяемые производителями ВЧ/СВЧ-ламинатов. Они определяются стандартом IPC-TM-650 [1, см. ч. 1].

Первый метод называют "методом зажатого полоскового резонатора для X-диапазона частот" (8,00–12,40 ГГц). Тесты проводятся согласно

IPC-TM-650 2.5.5.5 и служат для определения ϵ_r по оси Z, а также tgδ тестируемого ламината в частотном интервале до 12,4 ГГц с шагом в 0,5л. Резонатор с двух сторон зажимается образцами тестируемого материала, с которого предварительно стравлена медь. Каждый образец базового материала в свою очередь фиксируется заземляющими пластинами (рис.13) [36]. При геометрической длине резонаторного элемента, равной 2л на частоте 10 ГГц, можно получить искомые ϵ_r , tgδ и определить толщину диэлектрика. Вместе с диэлектриком в резонатор может попадать некоторое количество воздуха, поскольку после стравливания меди ламинат имеет шероховатую поверхность. Величина отклонения ϵ_r от идеального значения зависит от профиля меди, которой был покрыт базовый материал.

В методе полного резонанса (IPC-TM-650 2.5.5.6) ламинат тестируется вместе с фольгой (рис.14) [36]. Этим методом можно измерить ϵ_r по оси Z, но нельзя определить tgδ.

Фольгированный диэлектрик при таком способе тестирования образует волновод из двух

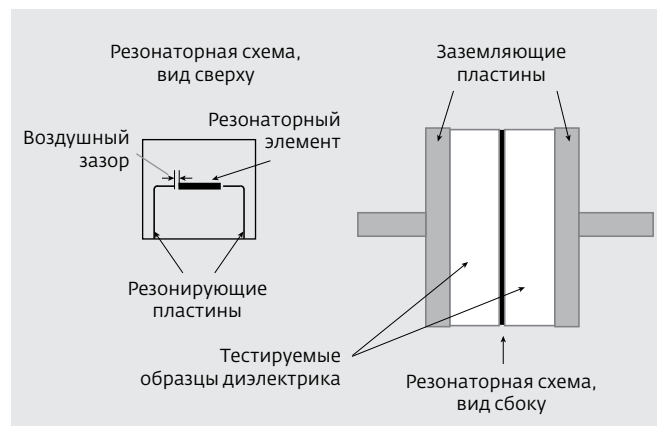


Рис.13. Схема метода зажатого полоскового резонатора

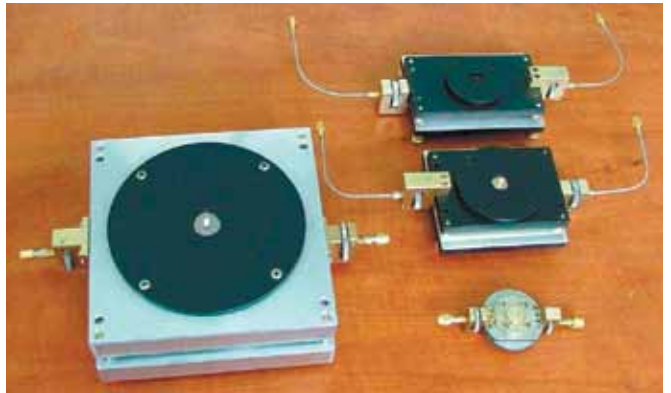
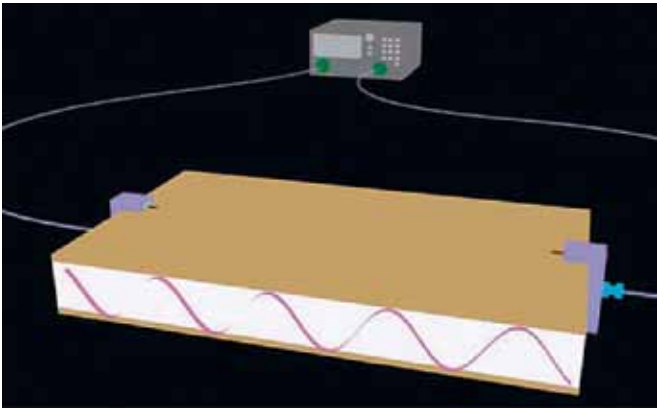


Рис.14. Упрощенная схема метода полного резонанса

Рис.15. Устройства тестирования по методу объемных ДЭ-резонаторов

параллельных пластин, в котором формируется стоячая волна. Значение ϵ_r определяется на резонансной частоте. В этом методе нет сложностей, присущих методу зажатого полоскового резонатора. Однако он является низкочастотным, поскольку самый высокий пик АЧХ будет соответствовать первой резонансной частоте. Например, при размере панели 24×8" (609,6×457,2 мм), первая резонансная частота чаще всего находится в диапазоне 100–300 МГц [36].

составляет 0,3%, разрешающая способность по $\text{tg}\delta - 2 \times 10^{-5}$ [33]. При его использовании оценивается значение ϵ_r только в плоскости X-Y. Точность определения относительной диэлектрической проницаемости зависит от толщины ламината.

Не так давно популярным стал метод с применением объемного диэлектрического (ДЭ) резонатора (рис.15 [37], 16 [38]) (в зарубежной литературе его также называют Split Post Dielectric Resonator – SPDR), подходящий для измерений на частотах от 1 до 20 ГГц [39]. Он прост в применении и не занимает много времени. Правда, пока этот метод не стандартизован.

Для лучшей оценки величины анизотропии предлагается также комбинировать методы IPC-TM-650-2.5.5.5 или IPC-TM-650-2.5.5.6 с методом SPDR.

Суть метода заключается в сравнении пиков частотных резонансов резонатора с образцом ламината и без него (рис.17) [39] и дальнейшего вычисления проницаемости по соответствующим формулам. Неточность этого метода относительно ϵ_r

Компании-производители ВЧ/СВЧ-ламинатов используют различные методы тестирования. Каждый из них лучше, точнее или удобнее для определенного диапазона частот, толщины материала и интервала температур. Методы, применяемые Arlon MED, – IPC-TM-650-2.5.5.5 и метод объемного СВЧ-резонатора (SPDR); компаниями Isola Group и Park Nelco – IPC-TM-650-2.5.5.5. Корпорация Rogers представляет результаты с применением IPC-TM-650-2.5.5.5 и -2.5.5.6, указывая при этом, что первый метод может давать низкую точность для устройств, выполненных на микрополосковых линиях. Данные спецификации Taconic ADD

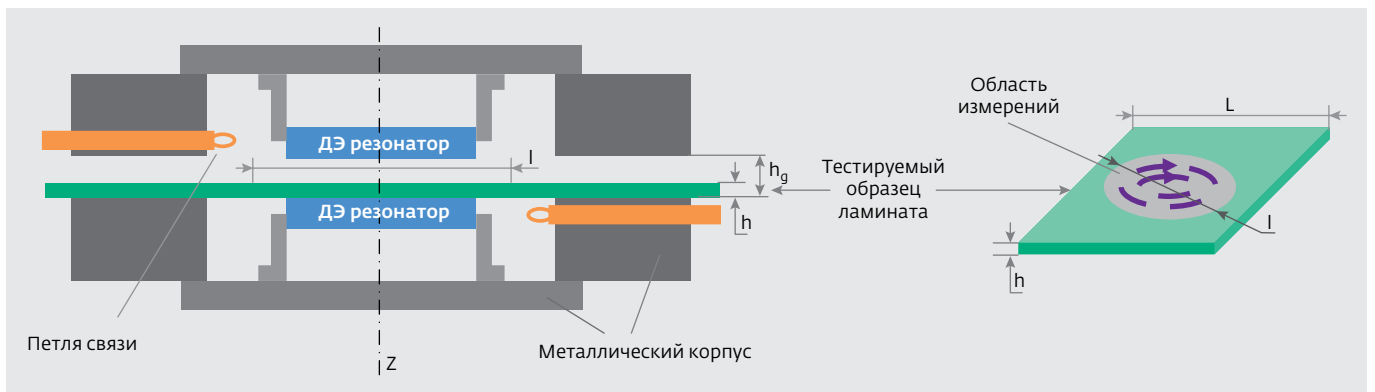


Рис.16. Схематичное изображение методики измерения ϵ_r с помощью объемного резонатора. h_g – ширина воздушного зазора

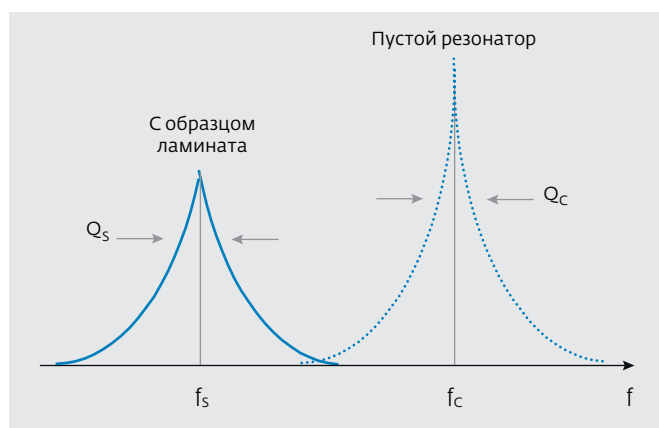


Рис.17. Суть метода тестирования ϵ_r с применением объемного резонатора. Q_s и Q_c – добротности, f_s и f_c – резонансные частоты

получены на основе методов IPC-TM-650-2.5.5.5 или 2.5.5.1 (модифицированный метод полоскового резонатора [40, 41]), IPC-TM-650-2.5.5.6 применен только для RF-41, 43, 45, 60A, CER-10. Для измерения ϵ_r на частоте 40 ГГц компания использует открытый резонатор фирмы Damaskos, применяемый в диапазоне частот до 80 ГГц [42].

В заключение можно сказать, что использование специальных ВЧ/СВЧ-ламинатов позволяет обеспечить более точный контроль импеданса, лучшее терморегулирование, меньшее водопоглощение и более стабильные характеристики печатных плат. Но выбрать "идеальный" для всех случаев ламинат невозможно. Фольгированные диэлектрики, обладающие стабильными характеристиками при высокой температуре, могут быть непригодными для печатных плат с высокой производительностью или для применения в мм-диапазоне волн. Поэтому при выборе ламината нужно определиться с теми параметрами, которые наиболее существенны для проектируемой печатной платы: масса, толщина, потери, значение проницаемости и ее

постоянство и др. При сравнении некоторых ключевых параметров материалов с учетом области применения можно в конечном итоге найти компромисс между ценой, электрическими требованиями и стабильностью.

ЛИТЕРАТУРА

30. **Titz D., Ferrero F. et al.** Antenna-in-Package Using PCB and IPD Technologies for 60 GHz Applications. – IEEE 6 European Conference Antennas and Propagation (EUCAP), 26-30 March 2012, p.2591-2594.
31. **Kasi B., Chakrabarty C.** Ultra-wideband antenna array design for target detection. – Progress In Electromagnetics Research C, 2012, v.25, p.67-79.
32. **Aguayo A.** Analyzing advances in antenna materials. – Antenna Systems & Technology, December/January 2010, p.14-15.
33. **Медведев А.** Печатные платы. Конструкции и материалы. – М: Техносфера, 2005.
34. Copper Foils for High Frequency Materials. – www.rogerscorp.com
35. **Kennedy S., Horn A., Bull G.** An Overview of material options suitable for today's Commercial Millimeter Wave Designs. URL. – www.circuitree.com, May 2009
36. **Conrood J.** Methods for characterizing the dielectric constant of microwave PCB laminates. – Microwave Journal, May 2011, v.54, №5, p.132-144.
37. www.qwed.eu
38. **Resso M., Begley S.** Maximizing Data Rates of PCB Structures by Understanding Dielectric Properties. – www.home.agilent.com
39. **Krupka J.** Split dielectric resonators for measurements of the complex permittivity of laminar dielectric materials at microwave frequencies. – www.ips.gov.au
40. **Rudy D.A., Mendelson J.P. et al.** Measurement of RF Dielectric Properties with Series Res-onant Microstrip Elements. – Microwave Journal, March 1998.
41. **Santhanam N., Aguayo A.** High frequency test methods. – www.taconic-add.com
42. www.damaskosinc.com