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

ЧАСТЬ 1

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

Сегодня широко распространены устройства, функционирующие в ВЧ- и СВЧ-диапазонах. Для них необходимы печатные платы, эффективно и надежно работающие на высоких частотах. Чтобы изготовить такие платы, нужны материалы, обладающие специфическими характеристиками. Причем требования к этим материалам в зависимости от области применения могут существенно отличаться. О том, какие материалы используются в ВЧ/СВЧ-платах, каковы их характеристики и какой материал оптимален для того или иного приложения, рассказывается в статье.

Для изготовления печатных плат применяется ламинат – диэлектрик, покрытый медной фольгой с одной (рис.1а) или с двух сторон (рис.1б). Выпускаются также односторонние фольгированные ламинаты на толстом металлическом основании (рис.1в). Вместо термина "ламинат" используются: "фольгированный диэлектрик", "электроизоляционный фольгированный материал", "базовый материал" и др. Согласно IPC-T-50, под определение "ламинат" попадает "изделие, полученное склеиванием двух или более слоев материала" [1].

В состав базового материала входят полимерное связующее и армирующие наполнители (стекло, бумага, ткани из полиэфирных волокон, стеклошпон, кварцевые ткани) [2–5]. В зависимости от состава полимера (отношения армирующего к связующему), типа армирования, толщины материала, толщины самой фольги меняются свойства материала, его стоимость и область применения. Поскольку диэлектрик составляет большую часть платы, то его свойства и совместимость с современными процессами производства печатных плат определяют возможность изготовления прецизионных устройств и их стоимость.

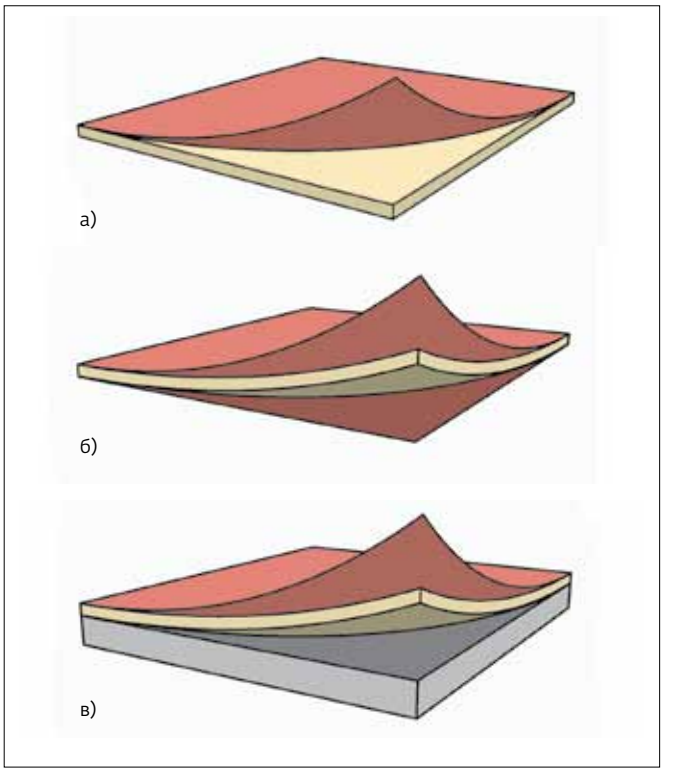

Рис.1. Типы ламинатов, применяемых для изготовления печатных плат

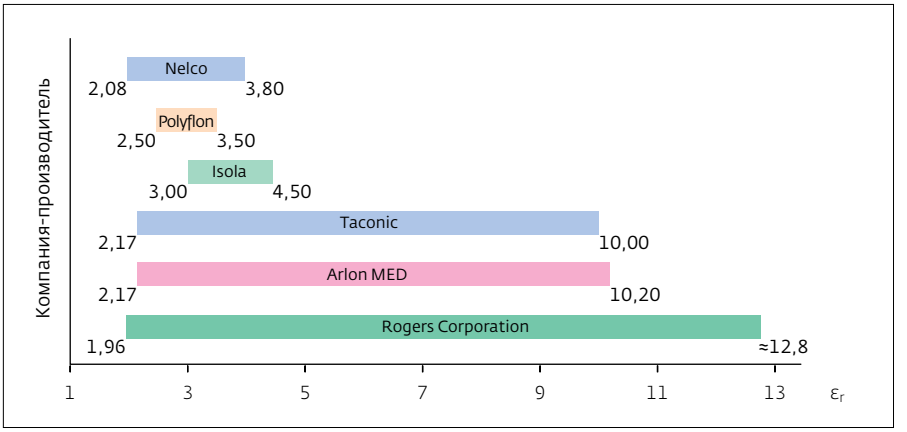

Рис.2. Диапазоны значений ε_r

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАМИНАТОВ

Один из основных параметров любого ламината – *относительная диэлектрическая проницаемость* (ε_r), характеризующая изоляционные свойства диэлектрика. Скорость распространения сигнала в диэлектрике (и, соответственно, длина волны) обратно пропорциональна $\sqrt{\varepsilon_r}$. Поэтому материалы с высокой ε_r позволяют уменьшить размеры печатной платы, используемой в диапазоне высоких частот. Это особенно важно для печатных плат, эксплуатируемых на частотах более 30 ГГц. С другой стороны, материалы с более низкой ε_r обеспечивают лучшую изоляцию и меньший уровень вносимых потерь.

Поскольку ламинаты являются композиционными материалами, ε_r по оси Z (толщина) и по осям X-Y (длина-ширина) будут различаться. Диапазон значений относительной диэлектрической проницаемости ВЧ/СВЧ-ламинатов разных производителей варьируется от 1,96 до 12,78 (рис.2).

При выборе ламината стоит обращать внимание на значение допуска на ε_r, поскольку от него зависит изменение величины импеданса разрабатываемого устройства.

Температурный коэффициент (ТКε_r) характеризует изменение значения ε_r при вариациях температуры (рис.3) [6]. Измеряется в частях на миллион (ppm – parts per million) при изменении температуры на 1°С (ppm/°С). ТКε_r может иметь как отрицательное, так и положительное значение.

Тангенс угла диэлектрических потерь (tgδ) характеризует рассеиваемую мощность устройства, определяемую потерями в диэлектрике. Низкие значения tgδ обеспечивают уменьшение вносимых потерь в пассивных схемах и оптимизацию усиления в активных, уменьшение нагрева диэлектрика в мощных схемах, большую добротность в резонансных устройствах. Обычно для планарных антенн, мощных усилителей и фильтров требуются материалы с tgδ < 0,003 [7].

Коэффициент теплового расширения (КТР) характеризует изменение размеров ламината в зависимости от температуры. При изготовлении печатных плат важно обеспечить близкие значения КТР ламината и металлических проводников на его поверхности и в отверстиях. В противном случае возможно нарушение стабильности размеров ламината (X-КТР и Y-КТР), а также разрыв проводников и образование трещин в сквозных металлизированных отверстиях при пайке и других температурных воздействиях (Z-КТР).

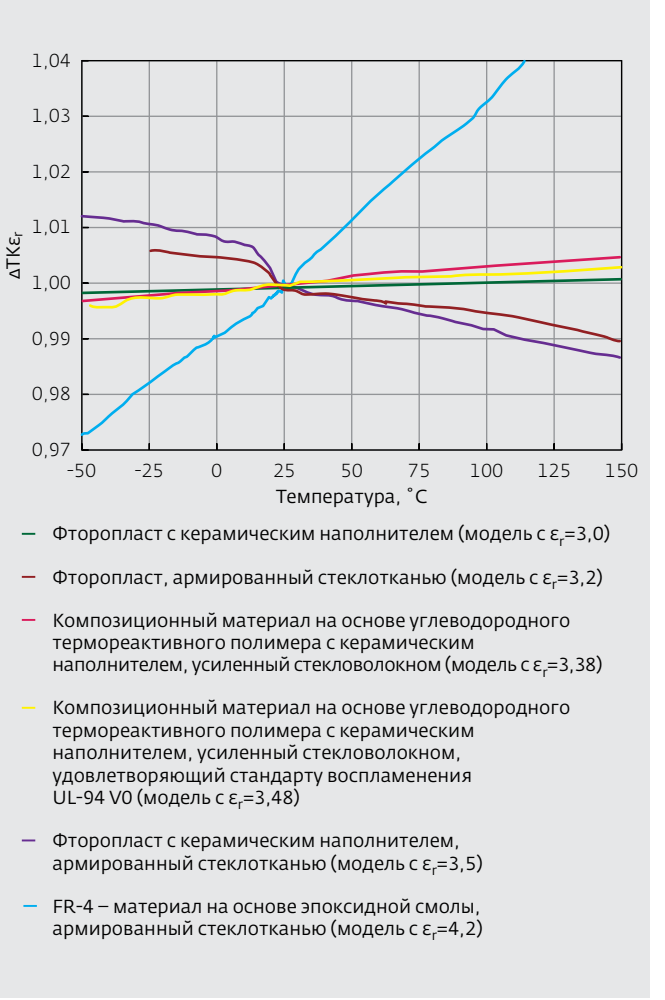

Рис.3. Изменение температурного коэффициента относительно значения при 25°С

Таблица 1. Z-KTP ламинатов при различных значениях T_g и температуры окружающей среды

Марка	T_g, °C	Z-KTP, ppm/°C	Диапазон температур, °C
Mercurywave 9350	≥ 200	48	50–200
		245	200–260
RO4350B	> 280	35	50–260

Температура стеклования (T_g) – температура (или температурный диапазон), при которой термореактивный материал переходит из "стекловидного" состояния (ниже T_g) в эластичное и более податливое (выше T_g). Для измерения этого параметра используются термомеханический анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, динамический механический анализ [2, 8, 9] и др.

Превышение температуры стеклования в процессе производства печатных плат или при их использовании приводит к значительному увеличению Z-KTP (табл. 1 [10, 11], рис. 4 [12]) и, как следствие, к ухудшению адгезионных свойств, появлению пятен и снижению надежности сквозных металлизированных отверстий.

Температура разложения, или деструкции (T_d) – температура, при которой потеря веса составляет 5%. Это свойство говорит о способности материала выдерживать высокие температуры с большим запасом прочности, а повышенное значение T_d – о пригодности к бессвинцовой пайке. Величина T_d колеблется от 350°C у эпоксидных ламинатов и до 500°C – у ламинатов на основе фторопласта-4, поскольку значение данного параметра в значительной степени зависит от композиционного состава материала.

Некоторые производители приводят параметры, обозначаемые T260, T288, T300. Они показывают, какой период времени ламинат с медью может выдерживать температуры 260, 288 и 300°C до начала образования вздутий или отслаивания. Тестирование выполняется методом термомеханического анализа. Эти параметры стали частью минимальных требований стандарта IPC, определяющих пригодность ламината к бессвинцовой пайке. Такие материалы могут выдерживать температуру пайки на 30–50°C выше необходимой для традиционных свинцовооловянных припоев. T_g этих ламинатов более 155°C, T_d > 330°C и общее значение KTP <3,5% [13].

Теплопроводность (λ) – мера уровня тепла, проходящего через единицу ламината, измеряемая по толщине. С увеличением λ улучшается

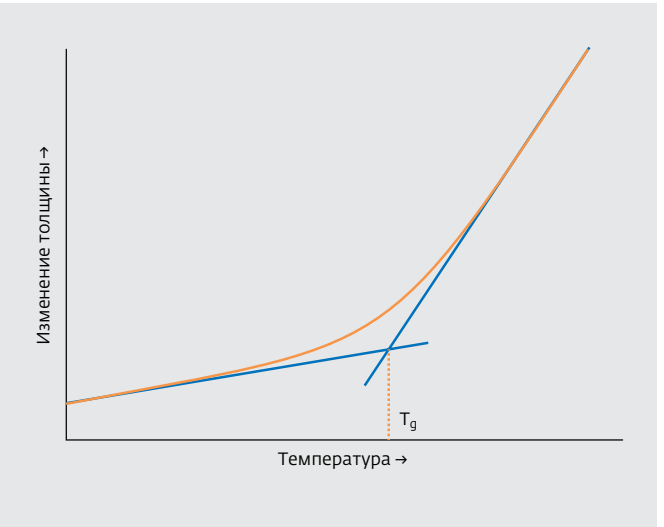

Рис.4. Разница в изменении Z-KTP при температурах выше и ниже температуры стеклования

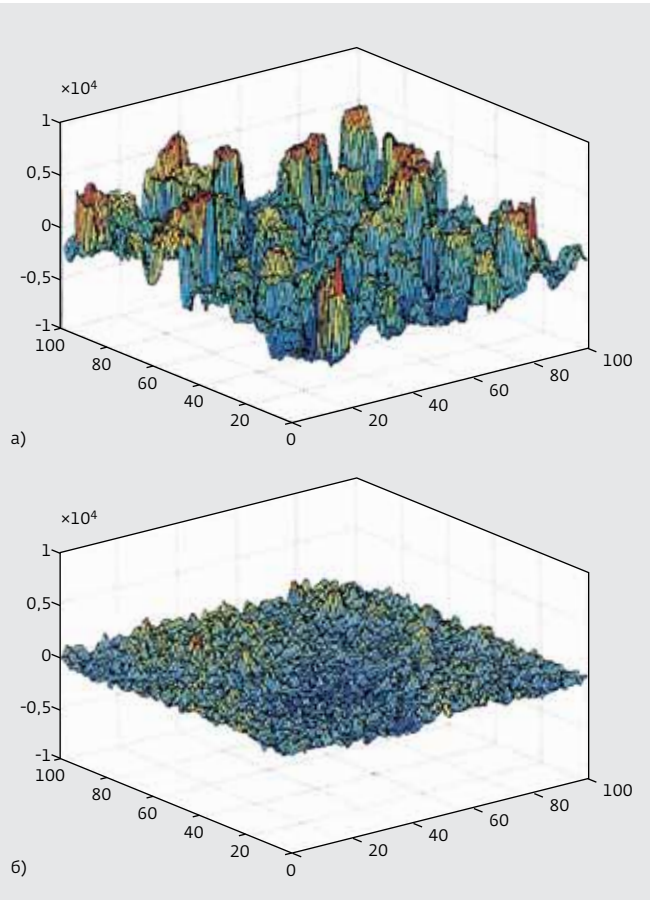

Рис.5. Профиль поверхности 100×100 отсчетов для стандартной (а) и тонкопрофильной (б) электролитически осажденной фольги

Таблица 2. Характеристики ламинатов различных производителей

Фирма	Марка	ε_r	tg δ×10^{-4}	ТКε_r, ppm/°C	λ,[1] Вт/(мК)	КТР, ppm/°C (X/Y/Z)
		на частоте 10 ГГц				
Фторопласт (pure or virgin PTFE)						
Polyflon	CuFlon	2,05±0,05	4,5	–	0,25	129/129/129
Фторопласт, армированный стеклотканью (PTFE / Woven Glass)						
Nelco	NY9000	(2,08–2,33)±0,02	6–11	–	0,272	25/35/260
Arlon	CuClad 217 LX[2]	2,17±0,02	9	-151	0,261	29/28/246
Arlon	DiClad 880	2,17±0,02	9	-160	0,261	25/34/252
Taconic	TLP-XX	(2,17–2,33)±0,03	9	–	0,22	20/20/280
	TLY-XX		9–12			
Arlon	DiClad 870	2,33± 0,02	13	-161	0,257	17/29/217
Arlon	CuClad 233 LX[2]	2,33± 0,04	13	-171	0,258	23/24/194
Nelco	NX9000	(2,40–3,20)±0,04	16–24	–	0,251–0,272	12–25/18–35/150–260
Rogers	Ultralam 2000	(2,40–2,60)±0,04	19	-100	0,24	15/15/200
Arlon	DiClad 522	(2,40–2,60)±0,05	18	-153	0,254	14/21/173
Taconic	TLX-X	(2,45–2,65)± 0,04	15–21	–	0,22	9/12/140
Taconic	TLT-X	(2,45–2,65)±0,05	18	–	0,19	9/12/130–145
Arlon	CuClad 250GT[2]	2,50±0,05	18	-170	0,254	18/19/177
Arlon	AD250, AD255	(2,50; 2,55)±0,05	18	-110	0,235	12/15/95
Arlon	AD270	2,7± 0,05	30	-110	0,235	12/15/95
Taconic	TLC-XX	(2,75–3,20)±0,05	30	–	0,24	9/12/70
Taconic	TLE-95	2,95±0,05	26	–	0,2	9/12/70
Фторопласт, усиленный нетканным стекловолокном (PTFE / Fiber Glass)						
Arlon	IsoClad 917	2,17±0,04	13	-157	0,263	46/47/236
Rogers	RT/Duroid 5880	2,20±0,02	9	-125	0,20	31/48/237
Rogers	RT/Duroid 5870	2,33±0,02	12	-115	0,22	22/28/173
Arlon	IsoClad 933	2,33±0,04	16	-132	0,263	31/35/203
Фторопласт с керамическим наполнителем (PTFE/Ceramic)						
Rogers	RT/duroid 5880LZ	1,96±0,04	19	22	0,33	44/43/41
Taconic	TaclamPlus	2,1	4	–	–	–
Rogers	RO3003	3,00±0,04	13	11	0,50	17/16/25
Rogers	RO6035HTC	3,50±0,05	13	-66	1,40	19/19/39
Rogers	RO3006	6,15±0,15	20	-160	0,79	17/17/24
Rogers	RO3010	10,20 ±0,30	22	-280	0,95	13/11/16
Rogers	RO3035	3,50±0,05	18	-34	0,50	17/17/24
Rogers	RT/Duroid 6002	2,94 ±0,04	12	12	0,60	16/16/24
Rogers	RT/duroid 6010LM	10,20±0,25	23	-425	0,86	24/24/47
Фторопласт с керамическим наполнителем, армированный стеклотканью (PTFE/Ceramic/Woven Glass)						
Arlon	AD255C	2,55±0,04	14	-75	0,30	16/16/50
Arlon	AD255A	2,55± 0,04	15	-138	0,30	16/16/80
Arlon	AD260A	2,60± 0,04	17	-80	0,32	16/16/80
Taconic	TSM-XX[3]	(2,60–3,00)±0,05	14; 13	–	0,27	23/28/78
Taconic	TSM-DS, TSM-DS3	(2,85; 3,00)±0,05	10; 11	–	0,45 0,65	11/18/57 10/16/23
Arlon	CLTE-XT	2,94±0,03	12	-9	0,56	8/8/20

Таблица 2 (продолжение)

Фирма	Марка	ε_r	tg δ×10^{-4}	ТКε_r, ppm/°C	λ,[1] Вт/(мК)	КТР, ppm/°C (X/Y/Z)
		на частоте 10 ГГц				
Nelco	NH9000	(2,94–4,50)±0,07	22–30	–	0,23	9/12/71
Rogers	RT/Duroid 6202	2,94±0,04	15	-50	0,68	15/15/30
Arlon	AD300C	2,97±0,05	20	-25	0,50	9/15/54
Arlon	CLTE-AT	3,00±0,04	13	-10	0,64	8/8/20
Rogers	RO3203	3,02±0,04	16	-75	0,48	13/13/34
Arlon	AD320A	3,20±0,04	32	-125	0,45	14/14/128
Arlon	AD320	3,20±0,10	38	-110	0,235	12/15/95
Taconic	TLF-34, TLF-35	(3,4; 3,5)±0,07	20	–	0,36	21/23/85
Taconic	RF-35TC	3,50±0,05	11	–	0,87	11/13/34
Arlon	TC350	3,50±0,05	20	-9	1,00	7/7/23
Arlon	AD350A	3,50± 0,05	30	-55	0,45	5/9/35
Taconic	RF-35, RF-35P, RF35 A2	3,50±0,10	18–25	–	0,32, 0,33, 0,29	19/24/64,10/13/106, 8/10/104
Arlon	AD410	4,10± 0,12	30	-55	0,46	9/9/40
Taconic	TRF-XX	(4,10–4,50)±0,15	35	–	0,43	9/9/40
Arlon	AD430	4,30±0,06	30	-55	0,46	9/9/40
Arlon	AD450	4,50±0,25	35	-233,5	0,38	8/11/42
Arlon	TC600	6,15±0,15	20	-75	1,4 (X, Y), 1,1 (Z)	9/9/35
Rogers	RO3206	6,15 ±0,15	27	-212	0,67	13/13/34
Arlon	AD600	6,15±0,15	30	-241	0,46	11/10/45
Taconic	RF-60A	6,15±0,25	38	–	0,40	9/8/69
Taconic	CER-10	10,00±0,50	35	–	0,63	13/15/46
Arlon	AD1000	10,20±0,35	23	-380	0,81	8/10/20
Rogers	RO3210	10,20±0,50	27	-459	0,81	13/13/34
Композиционный материал на основе термореактивных смол (Thermoset Resin)						
Arlon	Multiclad HF	3,70±0,06	45	754	0,64	14/16/150
Композиционный материал на основе углеводородного термореактивного полимера с керамическим наполнителем (Thermoset/Ceramic)						
Rogers	TMM 3	3,27 ±0,032	20	37	0,70	15/15/23
Rogers	TMM 4	4,5±0,045	20	15	0,70	16/16/21
Rogers	TMM 6	6,00±0,08	23	-11	0,72	18/18/26
Rogers	TMM 10	9,20±0,23	22	-38	0,76	21/21/20
Rogers	TMM 10i	9,80 ±0,245	20	-43	0,76	19/19/20
Композиционный материал на основе углеводородного термореактивного полимера с керамическим наполнителем, усиленный стекловолокном(Thermoset/Ceramic/Fiber Glass)						
Rogers	RO4003C	3,38±0,05	29	40	0,71	11/14/46
Arlon	25N	3,38±0,06	25	-87	0,45	15/15/52
Arlon	25FR	3,58± 0,06	35	50	0,45	16/18/59
Rogers	RO4350B	3,48±0,05	37	50	0,69	14/16/35
Rogers	RO4360	6,15±0,15	38	-120	0,80	17/15/30
Высокотемпературный термопластичный материал (High Temperature Thermoplastic/Ceramic)						
Rogers	XT/Duroid 8000	3,34±0,05	35	7	0,35	18/23/68
Rogers	SYRON 7000	3,40 max	45	7	0,35	18/23/68

Таблица 2 (продолжение)

Фирма	Марка	ε_r	tg $\delta\times10^{-4}$	ТКε_r, ppm/°C	λ,[1] Вт/(мК)	КТР, ppm/°C (X/Y/Z)
		на частоте 10 ГГц				
Жидкокристаллический полимер (Liquid Crystal Polymer)						
Rogers	Ultralam 3850	2,9	25	24	0,20	17/17/150
Композиционный материал на основе эпоксидной смолы и фторопласта (Epoxy/PTFE)						
Nelco	N9000-13RF	3,00–3,48	40–55	–	–	13/20/67
Композиционный материал из бисмалеимидтриазина/эпоксидной смолы/стеклоткани/фторопласта (BT/epoxy/woven fiberglass/PTFE)						
Taconic	TLG-29	2,87	27	–	0,31	21/23/135
Модифицированный термопластичный полифениленоксид						
Polyflon	NorClad	2,55±0,05[4]	11	–	0,23	53/53/53
Polyflon	PolyGuide	2,32±0,005	5	–	0,51	108/108/108
Полиэфиримид (Polyetherimide)						
Polyflon	Clad ULTEM	3,05	30	–	0,22	56/56/56
Полифениленоксид (Polyphenylene Oxid)						
Молдавизолит	ФЛАН-2,8	2,8±0,1	40	–	–	–
Молдавизолит	ФЛАН-16	16,0±0,8	50	–	–	–
Полифениленоксид с наполнителем в виде полых стеклянных шариков						
Молдавизолит	БРИКОР	2,0±0,05	50	–	–	–
Эпоксидная смола (в т.ч. модифицированная), армированная стеклотканью (Epoxy/Woven Glass)						
Isola	IS680 XX	2,80–3,45	28–36	–	0,32	12/13/44,7
Nelco	Mercurywave 9350	3,5	40	–	0,50	10/14/48
Nelco	N4350-13 RF	3,5	65	–	0,35	10/14/TBD
Isola	IS620i	3,54	71	–	0,35	13/14/55
Nelco	N4000-12	3,6	80	–	0,3–0,5	12/15,5/60
Nelco	N4000-13	3,6	90	–	0,35	10/14/70
Isola	FR408HR	3,65	95	–	0,40	16/16/55
Isola	IS415	3,71	136	–	0,40	13/14/70
Nelco	N4380-13RF	3,8	80	–	0,35	10/14/TBD
Бисмалеимид триазин/эпоксидная смола (BT/epoxy)						
Nelco	N5000	3,6	140	–	TBD[5]	10/14/TBD
Isola	G200	3,65	150	–	0,35	13/14/55
Цианатный полиэфир/кварцевые волокна (Cyanate Ester/Quartz Fabric)						
Nelco	N8000Q	3,2	60	–	1,0	TBD/TBD/70
Nelco	N8000	3,5	110	–	–	11/13/TBD

Примечания:
[1] Для всех моделей λ измеряется в диапазоне температур [-40; 150], кроме Multiclad HF [0; 140].
[2] Перекрестно-армированный ламинат.
[3] Получены также значения на частоте 40 ГГц: ε_r=2,94, tg δ=0,002.
[4] Результат получен на частоте 3 ГГц.
[5] TBD (to be determined) – подлежит уточнению.

способность отвода тепла от медных линий у печатной платы. Это свойство приобретает особую важность, когда сложно обеспечить терморегулирование (например, в мощных устройствах). При значениях λ=0,2–0,4 Вт/(м·К) выполнить эту задачу можно, применяя металлическое основание из алюминия, олова или латуни толщиной от 0,5 до 12,7 мм.

Устойчивость к воздействию радиации – параметр, учитываемый при эксплуатации печатной платы в космических устройствах. Радиационная стойкость неорганических веществ зависит от их кристаллической структуры и типа химической связи. Для фторопласта-4 побочным эффектом воздействия радиации будет уменьшение молекулярного веса. Но поскольку в некоторых реакциях, вызываемых облучением, необходим кислород, то в безвоздушном пространстве повреждения будут минимальными. Уровни облучения, вызывающие 20–30% изменения свойств фторопласта-4, составляют $(2–5)\cdot10^3$ Гр гамма-излучения. Для эпоксидной смолы этот параметр составляет $10^6–2\cdot10^7$ Гр, у полиэфира – $(1–3)\cdot10^7$ Гр [14]. Мощность облучения в поясе Ван Аллена считают равной 0,1 Гр/ч. При таком облучении ламинаты на основе фторопласта-4 служат от 5 до 50 лет без заметного изменения механических свойств [15].

Пассивная интермодуляция (ПИМ) – генерирование нежелательных частот вследствие нелинейности вольт-амперных характеристик пассивных элементов. Обычно источником ПИМ является место соединения различных материалов. Процентные соотношения всех составляющих композиционного материала влияют на уровень пассивной интермодуляции. Правильный выбор материала ламината позволяет уменьшить значения ПИМ в проектируемых антеннах, фильтрах и др. Например, ламинат из слоев стеклоткани, покрытых фторопластом-4 [16], обеспечивает самый низкий уровень ПИМ (среднее значение -168,8 дБн) среди ламинатов с проницаемостью около 3,00 (на частоте 10 ГГц). Для сравнения, ПИМ фторопласта-4 с керамическим наполнителем и стеклотканью составляет -154,8 дБн.

При учете этого параметра выбор проводника почти так же важен, как и выбор диэлектрика. Например, при использовании тонкопрофильной медной фольги характеристика ПИМ может быть улучшена на 10–15 дБ и может достигать значения менее -153 дБн [16]. Это связано с тем, что среднеквадратическое значение шероховатости (R_q) тонкопрофильной фольги в четыре раза меньше, чем у фольги со стандартным профилем (рис.5) [17].

Устойчивость к воспламеняемости – еще одна важная характеристика ламинатов. Существует ряд стандартов, согласно которым определяется степень горючести полимеров: UL, CRF, ASTM, ISO и др.

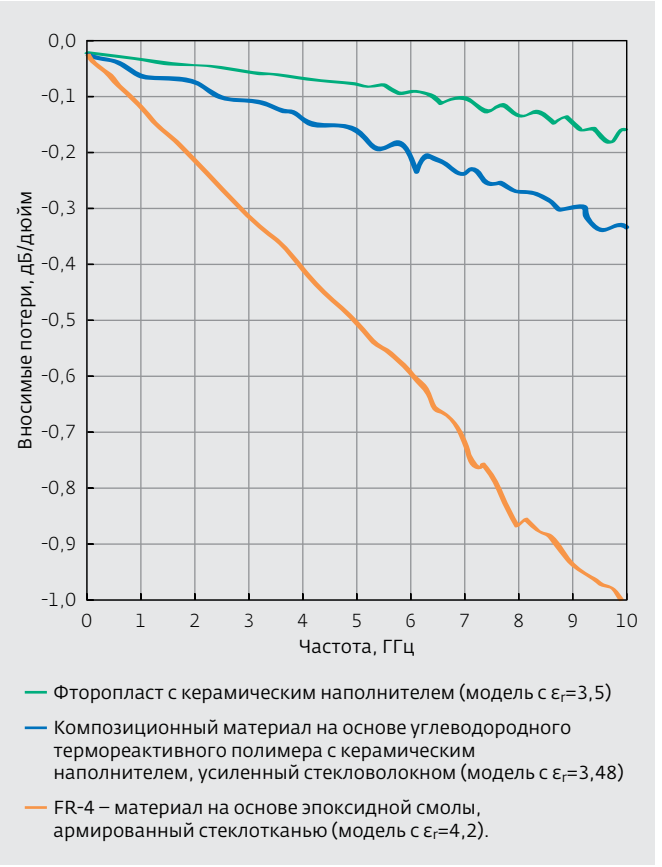

Рис.6. Уровень вносимых потерь в микрополосковых схемах с различными типами ламинатов

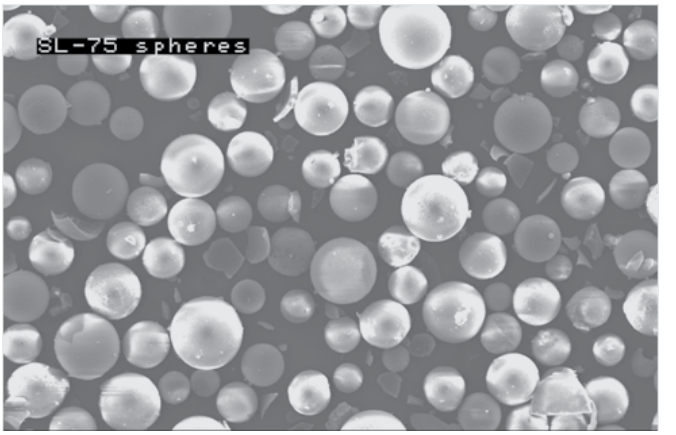

Рис.7. Часть поперечного сечения RT/Duroid 5880 LZ с наполнителями из полых стеклянных шариков. Плотность такого композиционного материала составляет 1,37 г/см³

Таблица 3. Марки препрегов и клеевых пленок различных производителей

Фирма	Марка	ε_r	tg δ×10^{-4}	λ, Вт/(м·К)	КТР, ppm/°C (X/Y/Z)
		на частоте 10 ГГц			
Препреги					
Rogers	RO4450B*	3,30±0,05	43	0,6	19/17/60
Rogers	RO4450B**	3,54±0,05	40	0,6	19/17/50
Rogers	RO4450F	3,52±0,05	41	0,65	19/17/50
Taconic	fastRise 27	2,7±0,1	14	0,25	59/70/72
Taconic	fastRise 28	2,96	18	0,36	11/77/66
Taconic	TPN-30	3,00	38	0,25	21/23/108
Taconic	TGN-30	3,00	38	0,25	21/23/109
Taconic	TGN-35	3,50	50	0,25	21/23/109
Taconic	fastRise 77	7,70	34	0,43	10/17/62
Клеевые пленки					
Rogers	3001	2,28	30	0,22	–
Rogers	2929	2,94±0,05	30	0,4	50/50/50
Rogers	RO3003	3,00±0,04	13	0,50	17/16/25
Rogers	RO3006	6,15±0,15	20	0,79	17/17/24
Rogers	RO3010	10,20±0,30	22	0,95	13/11/16
Rogers	RT/Duroid 6002	2,94±0,04	12	0,60	16/16/24
Rogers	Ultralam 3908	2,90	25	0,20	17/17/150
Taconic	FEP	2,00	3	–	–
Taconic	HT-1.5	2,35	25	0,22	–
Polyflon	Bonding film	2,34	20	–	–

Примечания: * Толщина 0,091 мм (0,0036″). ** Толщина 0,101 мм (0,004″).

Однако большинство из них не учитывают поведение полимерных материалов в условиях сильного пламени. Для электронных устройств и материалов электроники чаще всего применяется спецификация UL-94, разработанная Underwriters Laboratories – некоммерческой организацией, занимающейся тестированием свойств устройств, систем и материалов. Классификация материалов по степени горючести приведена в [2, 18, 19]. Отметим, что из представленных в статье материалов все марки компаний Arlon MED [20], Taconic ADD [21] и Isola Group [22] удовлетворяют стандарту UL-94 V0 (горение вертикального образца прекращается через 10 с. Допускаются капли частиц до тех пор,

пока они не воспламенятся). У Rogers Corporation неустойчивы к воспламенению практически все материалы, производимые на основе углеводородного термореактивного полимера, кроме RO4350B и RO4360 (они соответствуют UL-94 V0), жидкокристаллического полимера Ultralam 3850 и термопластичных базовых материалов XT/Duroid 8000, SYRON 7000, удовлетворяющих стандарту UL-94 VTM-0 (общий срок горения вертикального образца не превышает 50 с).

Производители предлагают широкий спектр базовых материалов [10, 11, 20–24], годных для применения как на ВЧ, так и на частотах мм-диапазона (табл.2).

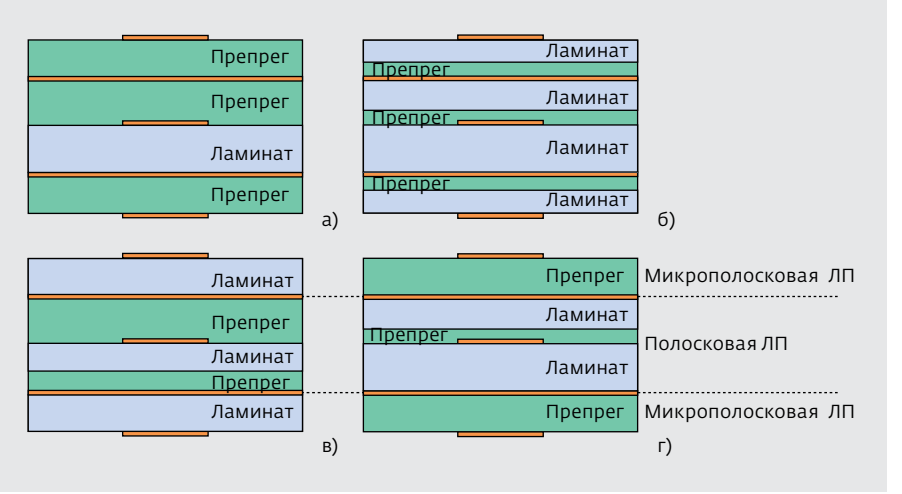

Рис.8. Примеры многослойных печатных плат

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВЧ/СВЧ БАЗОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Широко применяются ламинаты, составленные из эпоксидных смол, армированные стеклотканью с T_g=185–220°C и используемые в диапазоне до 10–20 ГГц. Это связано с хорошей совместимостью данного материала со стандартными процессами производства печатных плат, способностью выдерживать несколько циклов ламинирования, устойчивостью к температурам бессвинцовой пайки и др. Однако при производстве печатных плат с жесткими требованиями к уровню вносимых потерь и контролю импеданса, предпочтение отдается фторопласту-4 с различными типами армирования (рис.6) [25]. Используются также различные смешанные полимерные системы: бисмалеимид триазин/эпоксидная смола (BT/epoxy), полифениленоксид/эпоксидная смола (Epoxy/PPO). Например, сочетание BT/epoxy целесообразно использовать для плат под корпуса с матрицей шариковых выводов (BGA – Ball Grid Array).

Фторопласт-4 (известен также под названиями политетрафторэтилен (ПТФЭ), Teflon, ФАФ-4Д) обеспечивает хорошие электрические характеристики – постоянство проницаемости, низкие вносимые потери. Однако производство печатных плат из этого материала требует его особой подготовки к сверлению и металлизации отверстий. А главный его недостаток – слишком высокое значение коэффициента температурного расширения по оси Z (129 и выше), что приводит к ненадежности сквозных металлизированных отверстий в многослойных печатных платах. Кроме того, для качественной металлизации отверстий необходима тщательная предварительная подготовка для обеспечения смачиваемости поверхности фторопласта-4. Поэтому ПТФЭ применяется только для производства печатных плат с количеством слоев не более двух.

В 1950–1960-х годах в качестве базового материала использовался фторопласт-4, армированный стеклотканью или стекловолокном, с ε_r в диапазоне 2,2–3,2 и значениями $tg\delta$=0,0009–0,003. Области применения таких материалов – оборонная и аэрокосмическая промышленности, где определяющим фактором является надежность характеристик, а не цена. Преимущества этих материалов – точность значений ε_r и $tg\delta$. Но присущее им высокое значение ТКε_r может служить причиной частотного сдвига в резонансных элементах, например, в полосовых фильтрах. Основная проблема таких материалов (как и в предыдущем случае) – слишком высокое Z-КТР, что не позволяет использовать этот диэлектрик в многослойных печатных платах с толщиной более 0,762 мм (0,03″) [26].

Поиск композиционного материала, подходящего для широкого диапазона применений, привел к появлению фторопласта-4 с керамическими наполнителями с/без армирования стекловолокном [16]. Использование ламинатов такого типа предполагает увеличение диапазона значений относительной диэлектрической проницаемости, а также увеличение устойчивости к механическим и тепловым воздействиям. Значение ε_r меняется в зависимости от типа наполнителя и лежит в диапазоне 1,96–10,2. Стоит отметить, что для достижения более низкого значения проницаемости в качестве наполнителя применяются полые стеклянные шарики, например, в ламинате RT/Duroid 5880 LZ

(рис.7) [27]. За счет этого он имеет массу на 30% меньше, чем другие, похожие по свойствам, материалы. Еще одна отличительная особенность этого материала – невозможность лазерного сверления из-за риска повреждения структуры шариков.

В начале 1990-х годов появилось новое поколение материалов – углеводородные термореактивные полимеры с керамическими наполнителями. Процессы производства печатных плат с применением термореактивных полимеров и широко используемого FR-4 близки. Диапазон значений ε_r у них – от 3 до 12,78, tg $\delta < 0{,}003$. Также эти материалы имеют низкие значения ТКε_r и Z-КТР.

Отдельно стоит отметить препреги – материалы, полученные путем пропитки армирующей основы равномерно распределенным связующим (стеклоткань, пропитанная недополимеризованной эпоксидной смолой, углеводородная керамика и др.). Препреги могут применяться для самостоятельного изготовления ламинатов и выступать в качестве склеивающего прокладочного материала при изготовлении многослойной печатной платы [28]. В последнем случае могут также использоваться клеевые пленки, составленные из фторопласта с керамическим наполнителем, углеводородного полимера, жидкокристаллического полимера (табл.3).

С точки зрения процентного соотношения ламината и препрега при создании многослойной печатной платы возможно большое количество вариантов. Преобладание препрега в многослойной печатной плате (рис.8а) [29] приводит к уменьшению ее стоимости, а фольгированного ламината (рис.8б) – к улучшению электрических и механических свойств. Правда, в последнем случае увеличивается стоимость производства изделия. При необходимости в микрополосковых линиях передачи (ЛП) с жесткими требованиями к производительности верхний и нижний слои делают с использованием ламината (рис.8в), а для внутренних слоев полосковой ЛП применяются препреги или более низкочастотные ламинаты с менее точными характеристиками. Если же наиболее важны характеристики полосковой линии, то применяется обратный подход (рис.8г).

Продолжение в следующем номере

ЛИТЕРАТУРА

1. www.ipc.org
2. Печатные платы и покрытия. Базовые материалы. – М.: ЗАО "Остек", Информационный бюллетень, июнь 2012, №3.
3. **Коноп С., Юров Л., Фидченко В.** Материалы для печатных плат "Молдавизолит". – Электронные компоненты, 2001, №5, с.55–57.
4. **Медведев А., Можаров В., Мылов Г.** Печатные платы. Современное состояние базовых материалов. – Печатный монтаж, 2011, №5, с.148–162.
5. **Борисова Л., Шестаков А., Тарасов А.** Фольгированные материалы для изготовления печатных плат. – Электронные компоненты, 2001, №5, с.51–54.
6. **Coonrod J.** Understanding When To Use FR-4 or High Frequency Laminates. – OnBoard technologies, Sep. 2011, p.26–30.
7. **Coonrod J.** Considerations When Choosing High-Frequency Laminates. – www.rogerscorp.com, August 2010.
8. Application notes "Measuring and Understanding Tg (Glass Transition Temperature)". – www.arlon-med.com
9. en.wikipedia.org
10. www.parkelectro.com
11. www.rogerscorp.com
12. **Coonrod J.** Having lead-Free Soldering Issues? – The PCB Magazine, August 2011.
13. Everything You Ever Wanted to Know about Laminates... but Afraid to Ask. – www.arlon-med.com
14. dic.academic.ru
15. The Effect of Nuclear Radiation Exposure to RT/duroid PTFE-Based Composites. – www.rogerscorp.com
16. **Horn A., Agayo A.** Design consideration in the selection of high frequency materials for PCB Base Satation Antennas. – www.rogerscorp.com
17. **Romo G., Nwachukwu C. et al.** Stack-up and routing optimization by understanding micro-scale PCB effects. – DesignCon Proceedings, 31 Jan. – 3 Feb. 2011, p.758–783.
18. www.ul.com
19. **Gold C.** UL-94 – Test for flammability of plastic materials for parts in devices and applianc-es. – www.lairdtech.com
20. www.arlon-med.com
21. www.taconic-add.com
22. www.isola-group.com
23. moldavizolit.com
24. www.polyflon.com
25. **Coonrod J.** Should you be using a High-Frequency Laminate Instead of FR-4. – The PCB Magazine, June 2011, p.10–14.
26. **Diagle B.** PCB Materials and design approaches for commercial microwave applications. – Microwave Journal, Feb. 1996.
27. **Carrol J.** Low Density laminate overcomes PTFE limitations. – Microwave Journal, 2009, v.2, №10, p.150–151.
28. **Пирогова Е.В.** Проектирование и технология печатных плат. – Форум Инфра-М, 2005, гл.3, с.37.
29. **Coonrod J.** Navigating Multilayer Microwave PCB Tradeoffs. – MicroWaves & RF, May 2012, p.107–114.