

КАЧЕСТВО

Альтернативные СВЧ-материалы для печатных плат

Текст: Аркадий Медведев
Петр Семенов
Аркадий Сержантов

Традиционно считается, что материалы печатных плат для СВЧ-устройств – это фторопласты, немного – LTCC-керамика и совсем не учитывается возможность использования стеклоэпоксидных композиций, специально разработанных для СВЧ-применения. Однако если подходить к выбору материалов, используя многофакторные критерии, можно в СВЧ-диапазоне найти место и для современных фольгированных стеклоэпоксидных композиций, хорошо освоенных в производстве печатных плат¹.

Сегодня для изготовления СВЧ-плат используется ограниченный ряд материалов: политетрафторэтилен (PTFE – фторопласт, тефлон, Rogers – PTFE с керамическим наполнением), LTCC-керамика, фольгированные стеклоэпоксидные композиты. Конечно, с точки зрения диэлектрических свойств наилучшим СВЧ-материалом является PTFE – его диэлектрическая проницаемость,

тангенс угла потерь и водопоглощение самые низкие из всего многообразия твердых диэлектриков. Но технологические трудности обработки заставляют использовать его только в исключительных случаях, когда СВЧ-свойства преобладают над его нетехнологичностью.

Производство плат из LTCC-керамики – совершенно другое производство, в корне отличающееся от широко распространенного производства печатных плат по базовой технологии, использующей фольгированные диэлектрики из стеклоэпоксидных композиций. Присущая керамике усадка при обжиге, а точнее – разброс усадки по осям X, Y, Z (зависит от режимов ламинирования слоев, обжига керамики, свойств исходных материалов и т. д.) не позволяет обеспечить достаточную геометрическую точность больших размеров монтажных подложек.

Наибольшей технологичностью обладают фольгиро-

¹ Медведев А.М. Перспективный материал для изготовления печатных плат устройств СВЧ-диапазона. // Электроника. НТБ. С. 184–187.

ванные стеклоэпоксидные диэлектрики, используемые почти на всех предприятиях электроники. Но возможности их применения в СВЧ-диапазоне вызывают сомнения, которые сегодня не могут быть категоричными.

Если подходить к выбору материалов подложек с позиций формирования линий связи – основной функции СВЧ-плат – можно выделить два параметра, определяющих их работоспособность: затухание (потери) сигналов в линии и скорость распространения сигналов.

Известно, что потери в линиях пропорциональны диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь. Мощность потерь в линиях оценивается как:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

где U – напряжение на линии,

C – ёмкость линии,

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

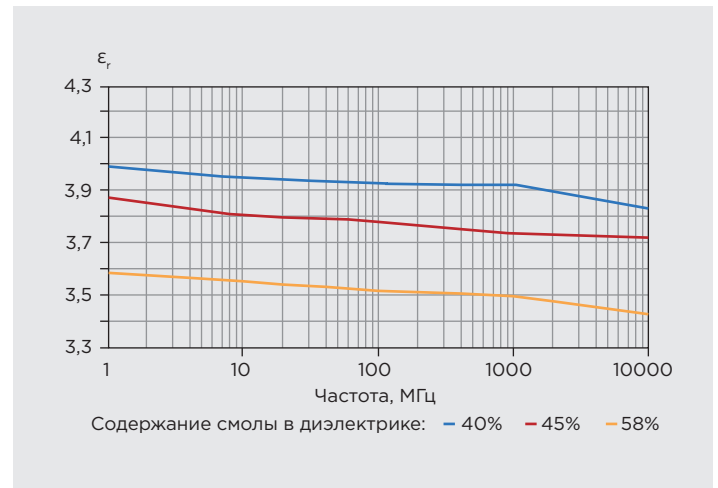
Диэлектрические потери в 1 см^3 диэлектрика в однородном поле E равны:

$$P = E^2 \omega \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta,$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость.

Произведение $\varepsilon_r \operatorname{tg} \delta$ называется коэффициентом диэлектрических потерь.

Второй критерий выбора материала – временная задержка сигнала в линии. Как известно, в вакууме скорость распространения сигнала (скорость света) составляет $300\,000 \text{ км/с}$, что соответствует задержке сигнала в линии $3(3) \text{ нс/м}$. В реальной диэлектрической среде скорость распространения сигнала уменьшается в $\sqrt{\varepsilon_r}$ раз.



1 Зависимость относительной диэлектрической проницаемости ε_r от частоты электрического поля³

Теперь можно сравнить разновидности базовых материалов по этим критериям¹ (Т 1)

Диэлектрическая проницаемость ε_r стеклоэпоксидных композиций существенно зависит от соотношения наполнитель-связующее, как показано на рис 1. Это обусловлено значительной разницей ε_r у стекла ($\varepsilon_r = 9$) и у эпоксидной смолы ($\varepsilon_r = 3,5$). Закономерности формирования свойств композиционных материалов (КМ) описываются логарифмическим законом Лихтенеккера⁴:

$$\ln \varepsilon_c = V_1 \ln \varepsilon_1 + V_2 \ln \varepsilon_2,$$

где ε_c – диэлектрическая проницаемость КМ (смеси);

ε_1 и ε_2 – диэлектрические проницаемости составляющих в КМ;

V_1 и V_2 – объемное содержание компонентов в КМ.

Т 1

Сравнение разновидностей базовых материалов

ТИП МАТЕРИАЛА	ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ, ε_r	ТАНГЕНС УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ, $\operatorname{tg} \delta$	ВРЕМЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА, НС/М	КОЭФФИЦИЕНТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ, $\varepsilon_r \operatorname{tg} \delta$	НЕТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ В БАЛЛАХ (ТРУДНОСТИ В ПРОИЗВОДСТВЕ)	ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, Вт/м К
Вакуум	1,0	-	3,(3)	-	-	-
Политетрафторэтилен – PTFE	1,8-2,2	0,001	4,7	0,002	6	0,3-0,6
LTCC-керамика	10-12 (20*)	0,006	10,4-11,4 (15)	0,07 (0,12)	4	2-4
Стеклоэпоксидная композиция	3,1-3,3**	0,0015	5,8-6,0	0,0045	1	0,4-0,5

* реальные значения для керамики

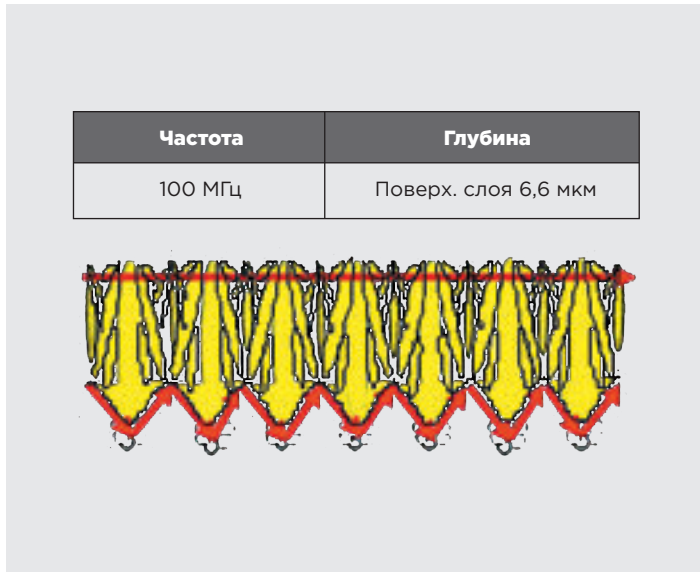
** СВЧ-стеклоэпоксид MCL-FX-2 фирмы HitachiChemical²

¹ все данные для гигагерцового диапазона

² Базовые и расходные материалы для производства печатных плат. – Каталог ООО «Остек-Сервис-Технология». – М. – 2017.

³ Информационные материалы фирмы Isola Asia Pacific Ltd. – www.isolaAG.com

⁴ Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. Москва: Техносфера. 356 с.



2

Проявление скин-эффекта в распространении высокочастотного сигнала по профилю поверхности фольги

Кроме того, на работоспособности плат в СВЧ-диапазоне сказывается водопоглощение, поскольку диэлектрическая проницаемость воды настолько большая ($\epsilon_r = 81$), что даже незначительное её присутствие в объеме ухудшает СВЧ-свойства диэлектрического основания. Здесь опять все преимущества принадлежат PTFE, его водопоглощение почти нулевое. Чего не скажешь о керамике и обычном стеклоэпоксиде – их водопоглощение серьезно сказывается на высокочастотных характеристиках. Тем не менее, ряд изготовителей базовых материалов на основе стеклоэпоксидов, например, фирма Hitachi Chemical, нашли возможность уменьшения влагопоглощения до 0,03 %, в результате при длительном пребывании во влажной среде ϵ_r увеличивается не более чем на 0,04 %.

Для фольгированных диэлектриков (стеклоэпоксидов и PTFE) большое значение приобретает правильный выбор фольги, поскольку профиль проводящей поверхности сказывается на их работоспособности в СВЧ-диапазоне. Для них в основном используют электролитическую фольгу с низким (LP – low profile) или очень низким профилем (VLP – very low profile)⁵. Это связано с тем, что с ростом частоты функционирования схемы профиль медной фольги оказывает влияние на распространение сигнала. Потому что на высоких частотах большая часть электрического сигнала сосредоточена в поверхностном слое проводника, что обусловлено так называемым «скин-эффектом» (рис 2). Высокий профиль фольги удлиняет путь следования сигнала, что влечет за собой большое его ослабление или даже потерю и увеличение времени задержки.

В табл. 2 показаны значения глубины прохождения сигнала в зависимости от частоты, данное значение рассчитано по известной формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}, \text{ где}$$

δ – глубина проводящего слоя;

μ – абсолютная магнитная проницаемость ($\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м)

σ – удельная электрическая проводимость меди, См/м (для меди $\sigma = 5,8 \times 10^7$ См/м)

ω – циклическая частота, рад/с ($\omega = 2\pi f$, где f – частота, Гц)

Табл. 2

Значения глубины прохождения сигнала в зависимости от частоты

ЧАСТОТА	ГЛУБИНА ПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ
50 Гц	9,3 мм
10 МГц	21 мкм
100 МГц	6,6 мкм
1 ГГц	2,1 мкм
10 ГГц	0,66 мкм

Согласно стандарту IPC 4562 максимальные значения высоты профиля медной фольги указаны в табл. 3 и показаны на рис. 3.

Табл. 3

Максимальные значения высоты профиля медной фольги

ТИП ПРОФИЛЯ	МАКСИМАЛЬНАЯ ВЫСОТА ПРОФИЛЯ, МКМ
Стандартный профиль (S)	не обозначается
Низкий профиль (L)	10,2
Очень низкий профиль (V)	5,1

Основными преимуществами использования фольг с низким и очень низким профилем являются:

- меньшая длина распространения сигнала;
- низкий фактор подтравливания.

Для точного воспроизведения волнового сопротивления линий связи важно гарантировано обеспечить точность рассчитанной геометрии проводников, для чего необходим низкий фактор подтравливания (рис. 4).

Фольга с гладкой обратной стороной (RTF или DSTF) также является одной из возможных составля-

⁵ IPC 4562. Metal Foil for Printed Wiring Applications.

ющих стандартной конструкции СВЧ-плат, поскольку сигнал распространяется по внутреннему полю линии.

Для керамических материалов профиль проводящей поверхности, вжигаемой в керамическую поверхность, не поддается выравниванию, что тоже (наряду с усадочными явлениями) ограничивает размеры керамических плат.

Для теплонагруженных конструкций электронных устройств важно сравнивать материалы и по тепловому сопротивлению. Здесь явные преимущества принадлежат керамике, у которой теплопроводность на порядок лучше других и составляет 2–4 Вт/м(К) в противоположность органическим материалам – 0,1–0,4 Вт/м(К). Это обуславливает её исключительность в соответствующем выборе.

Поскольку базовые технологии широко распространены в производстве печатных плат, целесообразно объективно оценивать возможность использования в СВЧ-диапазоне фольгированных стеклоэпоксидных композиций. Чтобы быть конкретнее, приведем параметры стеклоэпоксидных материалов для СВЧ-устройств на примере фольгированного диэлектрика MCL-FX-2 фирмы HitachiChemical (Т 4).

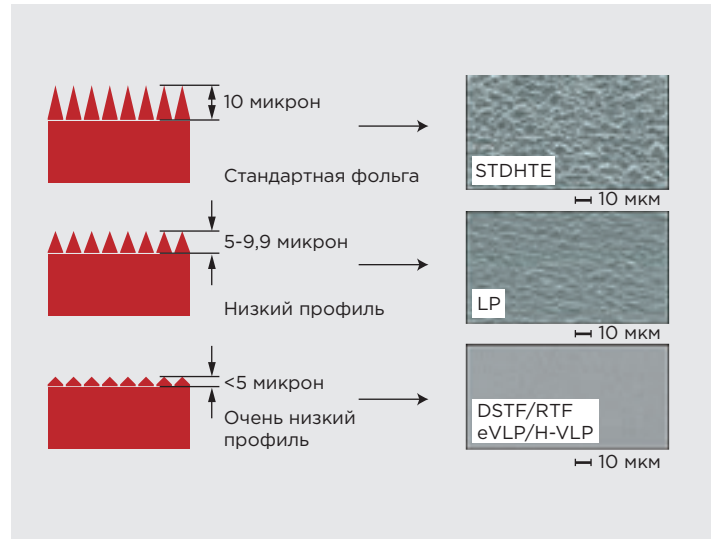
Т 4

Параметры стеклоэпоксидных материалов для СВЧ-устройств на примере фольгированного диэлектрика MCL-FX-2 фирмы HitachiChemical

ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ	ЧАСТОТА
Диэлектрическая проницаемость, ϵ_r	3,5	1 ГГц
Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg } \delta$	0,001	1 ГГц
Профиль поверхности фольги, мкм	6	
Водопоглощение, %	0,03	

Результаты

- Наиболее технологичными материалами, хорошо освоенным в производстве печатных плат, являются стеклоэпоксидные композиции, специально разработанные для СВЧ-применения. В отличие от материалов на основе фторопластов, из них можно строить большое разнообразие конструкций, что реализуется в HDI-платах, гибко-жестких платах, в платах с встроенными компонентами и оптоволоконными линиями связи и т. п.
- Наименее технологичным материалом является политетрафторэтилен, его исключительные свойства в СВЧ-диапазоне создают ему преимущества только по этой причине. Платы из PTFE уже не могут на-



3

Профили шероховатости поверхности фольги по стандарту IPC 4562



4

Определение фактора подтравливания проводников печатных плат

зваться «платами», потому что это уже «печатные схемы» с СВЧ-элементами: антеннами, трансформаторами, аттенуаторами и т. п. Применение PTFE затруднено еще и тем, что разнообразие конструкций плат из этого материала крайне ограничено.

- По теплопроводности явное преимущество принадлежит керамике.
- Керамические платы в некоторых отношениях хуже других альтернатив, но их сравнительно высокая теплопроводность дает им преимущества в теплонагруженных конструкциях. Из-за серьезных усадочных явлений и большой шероховатости проводящей поверхности область их применения ограничена мелкими изделиями: корпуса микросхем, подложки микросборок и т. п.