

ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БАЗОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Медведев, д.т.н., профессор МАИ medvedevam@bk.ru

В.Можаров v.a.mozharov@gmail.com

Г.Мылов, директор ПТК "Печатные платы" ФГУП ГРПЗ, pcb@grpz.ryazan.ru

В последние годы из-за усложнения конструкций печатных плат (ПП), ввода ограничений по использованию опасных веществ в производстве ПП и все более жестких требований со стороны заказчиков по эксплуатационным характеристикам ПП производители материалов для печатных плат увеличили номенклатуру выпускаемых базовых материалов. В обзоре, предлагаемом авторами, рассматривается многообразие современных базовых материалов, обсуждаются критерии (характеристики, параметры) их выбора в соответствии с изменившимися требованиями к качеству печатных плат.

Базовые материалы определяют технические возможности изготовления прецизионных печатных плат и их стоимость. К сожалению, развитие отечественного производства фольгированных диэлектриков остановилось много лет назад. Более того, сырьевая база для изготовления фольгированных композитных электроизоляционных оснований не удовлетворяет по качеству даже самые отсталые производства. В таких условиях изготовители печатных плат вынуждены использовать импортные материалы. Легально – с согласия соответствующих служб или нелегально – на свой страх и риск.

Выход из создавшегося положения возможен только при условии расширения отечественного производства электроники до объемов, когда производство фольгированных диэлектриков у нас в стране станет рентабельным. Только тогда можно будет говорить и о качественной стороне этого производства. А сейчас пока остается только определить цели, к которым надо стремиться, и понять серьезность проблем в развитии производства базовых материалов. Для этого мы и предлагаем читателю познакомиться с "кухней", на которой варятся

современные базовые материалы для печатных плат.

Базовыми принято называть те материалы, которые составляют конструкцию печатных плат. Под это определение подходят материалы оснований, металлизации, паяльные маски и т.д. Но с общего согласия понятием "базовые материалы" ограничили круг материалов – оснований печатных плат (синонимы: монтажная подложка, диэлектрическое основание).

В качестве базовых материалов обычно используются фольгированные медью (для субтрактивной технологии) листы диэлектрика: полимеры или композиционные материалы – слоистые пресованные пластики различного типа, армированные всевозможными волокнами на основе бумаги (гетинаксы), стеклоткани (стеклотекстолиты), тканей из полиэфирных волокон, стеклошпона, кварцевых тканей и т.п. В композиционных материалах в качестве связующего используются всевозможные смолы, обладающие хорошей адгезией к медной фольге, стойкие к воздействию агрессивных растворов, используемых в производстве печатных плат, устойчивые к температурам пайки, обеспечивающие

приемлемый коэффициент температурного расширения.

Основания печатных плат могут быть жесткими или гибкими. В ряде конструкций плат используются материалы, находящиеся первоначально в жидком или пастообразном состоянии. В объем диэлектрического основания могут быть введены добавки, придающие им особые свойства, – катализаторы для аддитивных и фотоаддитивных процессов, фирменные знаки (логотипы) и идентификаторы, ультрафиолетовая блокировка (она делает основание непрозрачным, что необходимо при двустороннем экспонировании) и т.д.

Область базовых материалов может показаться обманчиво простой. Ведь термин "базовые материалы" включает в себя всего три компонента: полимерную систему (связующее), армирование и проводящую фольгу. Однако существование многочисленных вариантов каждого из этих компонентов и множество возможных их комбинаций делает рассмотрение базовых материалов гораздо более сложным процессом. При этом необходимо учитывать, что печатные платы применяются во многих приложениях. Это, в свою очередь, приводит к разным требованиям по стоимости и техническим характеристикам и, как следствие, к многочисленным маркам базовых материалов.

Кроме того, поскольку базовые материалы являются наиболее важными компонентами самой печатной платы, то они участвуют фактически во всех процессах изготовления печатных плат. Поэтому чрезвычайно важны не только физические и электрические свойства материала, но и его совместимость с процессами, которые используются в производстве печатных плат.

Вступление в действие директивы Европейского союза по ограничению использования опасных веществ (RoHS) и, как следствие, внедрение процесса бессвинцовой пайки, а также ужесточение требований по увеличению плотности схем, повышению надежности и улучшению электрических характеристик, значительно повлияли на требования к базовым материалам в последние годы.

ТИПЫ БАЗОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Различные базовые материалы классифицируются по типу армирования, по системе используемых полимеров, по температуре стеклования этих полимеров, а также по многим другим

свойствам. Легитимными для России являются стандарты Международной электротехнической комиссии (МЭК) и, конкретно, стандарты Технического комитета ТК-91 серии 61249, охватывающие всю номенклатуру современных материалов. Однако наиболее широко представлены базовые материалы в стандартах IPC. Хотя IPC не является легитимным стандартом для России, но многие производители придерживаются именно его, так как он – единственный постоянно развивающийся и наиболее полный стандарт.

IPC-4101 "Технические условия на базовые материалы для жестких многослойных печатных плат". В этом документе содержится ряд требований на диэлектрики, применяемые при изготовлении печатных плат для коммерческого и военного назначения. В этих материалах можно найти минимальные требования для основополагающих свойств материалов.

IPC 4103 "Технические условия на пластмассовые подложки, фольгированные и не фольгированные, для высокочастотных структур межсоединений". В этом стандарте приводятся требования на диэлектрические подложки на основе политетрафторэтилена (тефлона) и других СВЧ-диэлектриков, используемых для изготовления печатных плат, предназначенных для высокопроизводительных или высокочастотных применений.

IPC 4104 "Технические условия на материалы, используемые для изготовления высокоплотных межсоединений (High Density Intercjnections – HDI) с микроотверстиями". В этом документе приведен перечень спецификаций материалов, используемых для изготовления HDI-плат с микроотверстиями.

IPC-4202 "Требования к гибким диэлектрическим основаниям, используемым в производстве гибких печатных плат". Приведены спецификации материалов для изготовления гибких печатных плат.

IPC-4204 "Гибкие фольгированные диэлектрические материалы, используемые в производстве гибких печатных плат". Стандарт содержит требования к фольгированным диэлектрическим материалам, применяемым в производстве гибких печатных плат.

Свойства базовых материалов можно разделить на физические, термомеханические, механические и электрические.

К физическим свойствам материала относятся: толщина основания и фольги, плотность

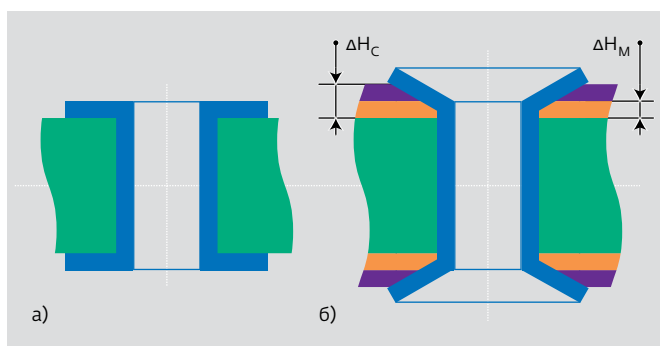


Рис.1. Растяжение металлизации отверстия за счет большого расширения диэлектрика: а) исходное состояние, б) расширения при температурах пайки. ΔH – изменение толщины меди и стеклотекстолита

материала, качество поверхности, горючесть, водопоглощение и т.д.

Термомеханические свойства – это, в первую очередь, температура стеклования и коэффициент температурного расширения материала, а также температура термодеструкции (разложения), степень полимеризации (отверждения) и т.д.

Механические свойства базового материала – упругость, прочность на изгиб и прочность сцепления фольги на отрыв и т.д.

Электрические свойства – относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, удельное поверхностное сопротивление, удельное объемное сопротивление, напряжение пробоя, дугостойкость (устойчивость материала на разрушение после образования электрической дуги на поверхности, измеряется в секундах) и т.д.

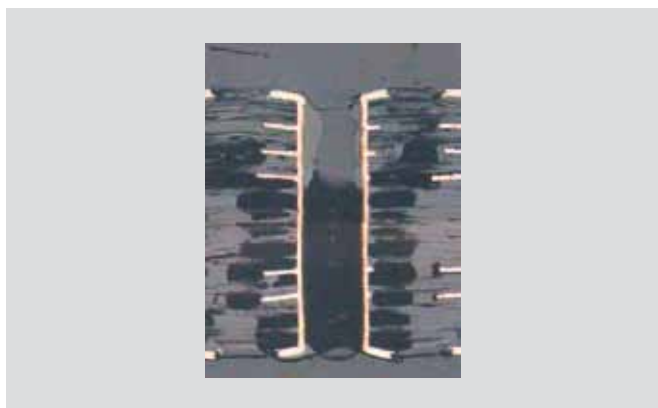


Рис.2. Микршлиф сквозного металлизированного отверстия после нагрева до температур пайки (этот эффект схематично представлен на рис.1)

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БАЗОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наиболее важным свойством диэлектрических оснований печатных плат является их температурное расширение в трансверсальном направлении, т.е. поперек армирующих волокон – по оси Z (рис.1 и 2). Это особенно актуально для HDI-плат, которые отличаются использованием узких металлизированных отверстий в толстых основаниях плат (рис.3). Разница в температурном расширении основания и металла в отверстиях могла бы приводить к значительному снижению надежности межсоединений, но предпринимаются специальные меры для обеспечения сопротивляемости тонкой металлизации отверстий разрывным усилиям, возникающим от большего, чем у меди, расширения диэлектрического основания.

Зависимость расширения от температуры имеет излом, после которого оно резко увеличивается, создавая еще большие напряжения в медной металлизации (рис.4). Из рисунка видно, что для обеспечения устойчивости металлизированного отверстия нужно уменьшать температурное расширение диэлектрика за счет увеличения температуры излома и увеличения пластичности медных осадков (чтобы они поддавались удлинению без разрывов).

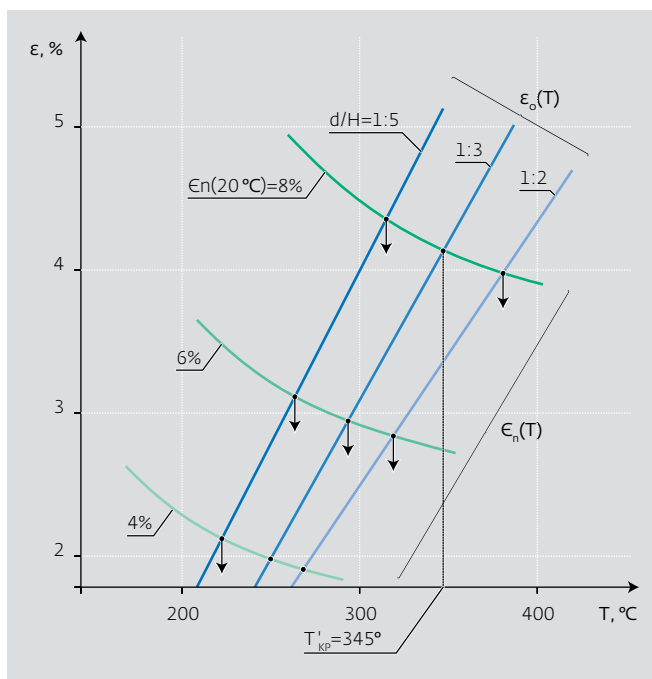


Рис.3. Увеличение расширения металлизации отверстий по мере сужению отверстий (уменьшения отношения диаметра отверстий к толщине платы)

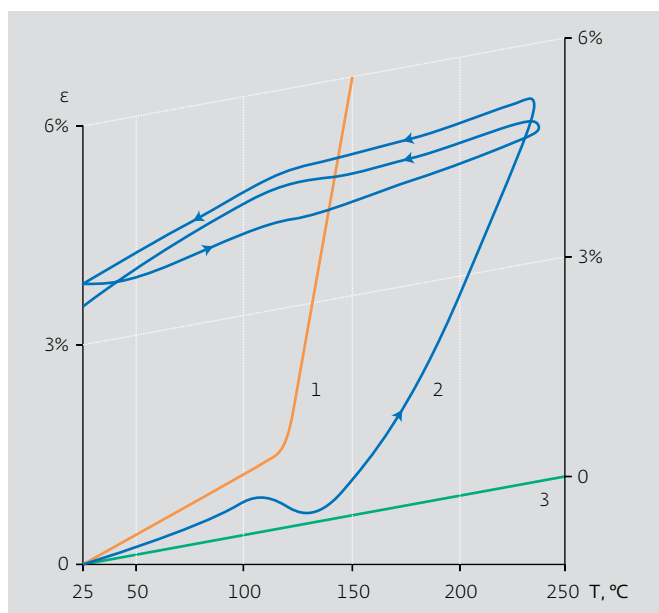


Рис.4. Эпюры расширения диэлектрика (1), меди (3) и результирующего расширения металлизации отверстий (2)

Излом в температурной зависимости расширения полимеров в химии полимеров называется температурой перехода, а в зарубежной терминологии — T_g (Glass-temperature). Исторически сложилось так, что параметр T_g наиболее широко используется для классификации базовых материалов печатных плат и считается одним из наиболее важных. Он занесен в стандарты МЭК и IPC. Материалы с высоким значением T_g считаются более надежными. Но сегодня выбор не сводится к заказу материала с высоким значением T_g . Переход на бессвинцовую пайку привел к пересмотру свойств, необходимых для обеспечения заданного уровня надежности. Это обусловлено тем, что сплавы, используемые при пайке бессвинцовыми припоями, требуют более высоких пиковых температур, чем те, что использовались при пайке с применением сплава олова и свинца. Эти более высокие температуры пайки могут значительно отличаться (или даже сравняться) от температуры, при которой многие базовые материалы начинают интенсивно разлагаться. По этой причине температура разложения T_d становится еще одним параметром, используемым для классификации базовых материалов. Типичные для всех полимеров фазовые переходы показаны на рис.5. Эта зависимость может быть отнесена только к термоактивным полимерам, не плавящимся при переходе через

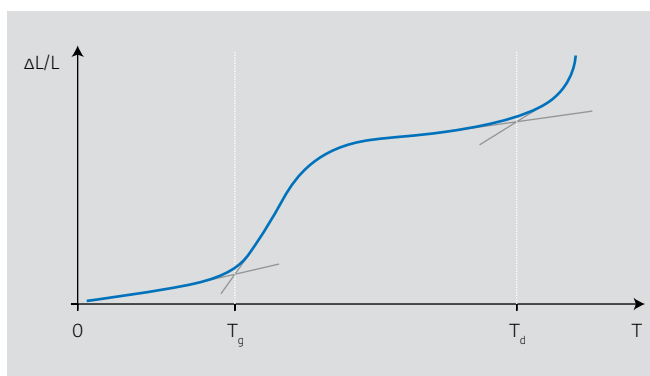


Рис. 5. Фазовые переходы при нагреве термоактивных полимеров: T_g — температура стеклования, T_d — температура разложения, $\Delta L/L$ — изменение размеров образца

температуру стеклования. Термопластичные полимеры типа полиэтилена, полистирола, полиэфира (лавсан), поливинилхлорида при нагреве просто плавятся и теряют свою первоначальную форму и здесь не рассматриваются.

Температура стеклования. T_g полимерной системы — это температура, при которой материал переходит из относительно жесткого, "стекловидного" состояния, в более пластичное. Это термодинамическое изменение материала обратимо до тех пор, пока полимерная система не деградирует. Другими словами, если материал был нагрет выше температуры T_g , а затем охлажден до температуры T_g , то он после возврата в более жесткое состояние в основном имеет те же свойства, что и прежде. Однако если материал был нагрет до температуры, намного превышающей T_g , то могут произойти необратимые изменения его свойств. Температура, при которой это происходит, меняется с типом материала и связана с разложением полимера.

Температуру стеклования обычно представляют как фиксированную величину, но это в какой-то степени является неверным, потому что физические свойства материалов из-за ослабления молекулярных связей могут начать меняться уже по мере приближения к T_g . По мере роста температуры связи ослабевают, этим объясняется плавный, а не резкий переход из одного состояния в другое (рис.6).

Понятие T_g полимерной системы имеет несколько значений:

- температурное расширение и его изменение при переходе через T_g ;
- степень твердости полимерной системы до и после T_g .

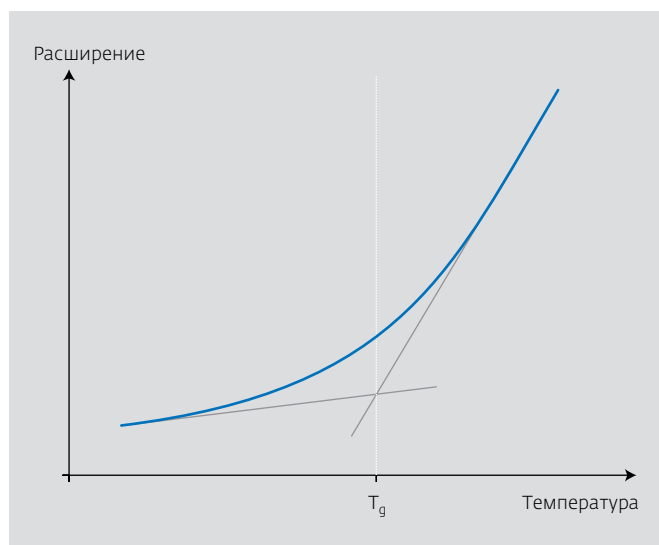


Рис.6. Определение температуры стеклования из эпюр температурного расширения полимера

Температурное расширение. Все материалы меняют свои физические размеры при изменении температуры. Коэффициенты расширения материала, армированного стеклотканью, отличаются по соответствующим осям из-за направленности армирования. В длину и ширину слоистый пластик или печатная плата занимают плоскость X, Y, а ось Z перпендикулярна этой плоскости.

Скорость расширения материала значительно меньше при температурах ниже T_g , чем при температурах, превышающих это значение. С помощью термомеханического анализа (ТМА) измерялись изменения размеров ($\Delta L/L$) в зависимости от температуры. Экстраполяция линейных участков кривой по направлению к точке, при которой они пересекаются, дает оценку величины T_g (см. рис.6). Наклоны линейных участков этой кривой выше и ниже T_g представляют относительные скорости теплового расширения, или как их обычно называют, температурные коэффициенты расширения (КТР). Значения КТР очень важны, поскольку они оказывают влияние на надежность платы. Это расширение гораздо больше в трансверсальном направлении. В направлении армирования оно сдерживается стеклотканью, имеющей относительно малый КТР. Поэтому меньшее температурное расширение по оси Z будет означать большую степень надежности и меньшие напряжения, оказываемые этим расширением на металлизацию отверстий.

Анализируя изменение значений КТР по мере роста T_g (см. рис.6), можно сделать вывод, что

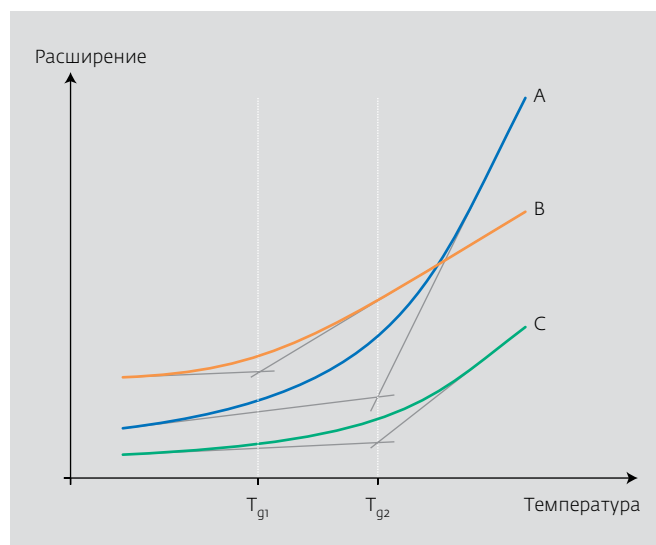


Рис.7. Температурное расширение материалов A, B, C с различной температурой стеклования

более высокое значение T_g задерживает наступление быстрого расширения, которое происходит после достижения температуры стеклования. Также заслуживает внимания и то обстоятельство, что материалы с наполнителями демонстрируют меньшие уровни расширения по оси Z по сравнению с аналогичными материалами без наполнителей (табл.1).

Степень отверждения. Используемые в базовых материалах полимерные системы изначально имеют компоненты, содержащие активные группы в своих молекулярных структурах. При нагревании и наличии катализаторов отверждения образуются мостиковые связи между активными группами, т.е. имеет место процесс отверждения полимерной системы. Когда большинство активных групп оказываются связанными между собой, считается, что произошло полное отверждение материала и установились его основные физические свойства. Этот процесс экспоненциальный во времени, поэтому полное отверждение проходит за время, неприемлемое для массового производства материалов. За 1,5-2 ч пребывания материала в горячем прессе степень его полимеризации едва может достигнуть 96%. В дальнейшем процесс полимеризации продолжается во время складирования и транспортировки материала, однако очень медленно. Это вынуждает производителей плат проводить так называемую термостабилизацию, чтобы хоть в какой-то мере довести процесс почти до полной полимеризации.

Таблица 1. Величины T_g , T_d и КТР при 40%-ном содержании смолы в некоторых часто используемых базовых материалах

Материал	T_g , °C	Температура разложения T_d (5%-ная потеря веса), °C	Расширение по оси Z, % (от 50 до 260°C)	КТР, ppm/°C (от -40 до 125°C)
FR-4 с эпоксидным связующим	140	315	4,5	13–16
FR-4 с улучшенным эпоксидным связующим	140	345	4,4	13–16
Армированный наполнителем FR-4 с улучшенным эпоксидным связующим	150	345	3,4	13–16
FR-4 с эпоксидным связующим с высоким значением T_g	175	305	3,5	13–16
FR-4 с улучшенным эпоксидным связующим с высоким значением T_g	175	345	3,4	13–16
Армированный наполнителем FR-4 с улучшенным эпоксидным связующим с высоким значением T_g	175	345	2,8	12–15
Смесь BT и эпоксидной смолы	190	320	3,3	14–16
PPO и эпоксидная смола	175	345	3,8	15–16
Смесь А эпоксидных смол с низким значением диэлектрических потерь	200	350	2,8	11–15
Смесь В эпоксидных смол с низким значением диэлектрических потерь	180	380	3,5	13–15
Современный материал с низким значением диэлектрических потерь	215	363	2,8	13–14
Цианатный полиэфир	245	375	2,5	11–13
Полиимид	260	415	1,75	12–16
FR-4 с не содержащим галогенов связующим с высоким значением T_g , армированным наполнителем	175	380	2,8	13–16

Преимущества и недостатки высоких значений T_g . На первый взгляд кажется, что более высокие значения температуры стеклования лучше. Но это не всегда так. Хотя и справедливо, что более высокие значения T_g будут задерживать начало интенсивного температурного расширения для данной полимерной системы, все же суммарное расширение может отличаться от материала к материалу. Материал с более низким значением T_g может демонстрировать меньшее суммарное расширение, чем материал с более высоким значением T_g , благодаря различным значениям КТР полимеров или за счет использования наполнителей в полимерной системе, которые понижают КТР композиционного материала.

У материала С температура стеклования выше, чем у материала А (рис.7), но материал С обладает большим тепловым расширением, потому что величина его КТР при температурах, превышающих T_g , значительно выше. С другой стороны, при одних и тех же значениях КТР для температур ниже T_g материал В с большим значением T_g демонстрирует меньшее тепловое расширение, чем материал А. И, наконец, при одинаковых температурах стеклования материал В демонстрирует меньшее тепловое расширение, чем материал С из-за более низкого значения КТР при температурах выше T_g .

Однако надо сказать, что многие обычные материалы FR-4 с температурой $T_g=140^\circ\text{C}$, имеют

Таблица 2. Время до начала расслоения и данные по дугостойкости для широко применяемых материалов

Материал	T_g , °C	T260	T288	Дугостойкость, с
Стандартный FR-4 с эпоксидным связующим	140	8–18	–	65–120
FR-4 с улучшенным эпоксидным связующим	140	20–30	5–10	75–120
Армированный FR-4 с улучшенным эпоксидным связующим	150	25–45	6–12	80–120
FR-4 с эпоксидным связующим с высоким значением T_g	175	4–10	–	70–120
FR-4 с улучшенным связующим с высоким значением T_g	175	30+	7–15	70–120
Армированный FR-4 с улучшенным эпоксидным связующим с высоким значением T_g	175	30+	8–16	80–120
Смесь BT и эпоксидной смолы	190	30+	2–8	100–120
PPO + эпоксидная смола	175	30+	8–20	110–120
Смесь А эпоксидных смол с низким значением диэлектрических потерь	200	30+	6–12	110–125
Смесь В эпоксидных смол с низким значением диэлектрических потерь	180	30+	10–20	110–120
Современная смесь с низким значением диэлектрических потерь	220	30+	15–35	110
Полиимид	260	30+	30+	120–130
Армированный FR-4 со связующим, не содержащим галогена, с высоким значением T_g	175	20–30	8–12	120–130

температуру разложения выше 170 °C (стандартная для FR-4). Другими словами, T_d является важным параметром для бессвинцовой пайки (ранее считались предпочтительными более высокие значения T_d). Современные полимерные системы FR-4

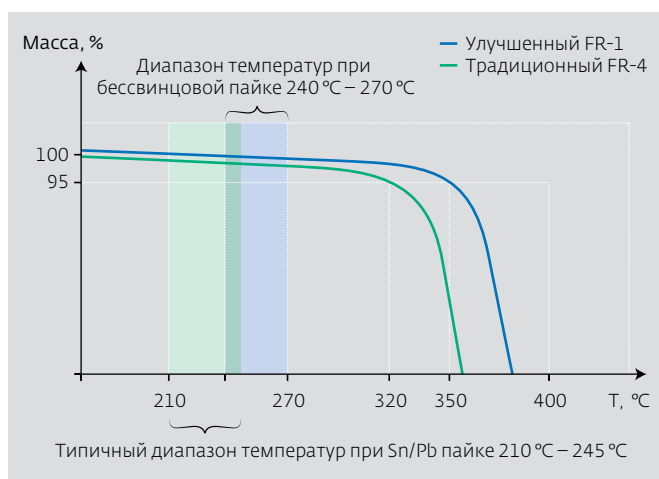


Рис.8. Кривые разложения традиционного и усовершенствованного материала марки FR-4

должны сочетать одновременно высокие значения как T_g , так и T_d .

Следует учитывать, что полимерные системы с повышенной температурой T_g могут оказаться более жесткими и хрупкими, чем системы с низкими значениями T_g . Это может неблагоприятно сказываться на производительности процесса изготовления печатных плат. В частности, может замедлиться процесс сверления отверстий в печатных платах или понизиться срок службы сквозных отверстий, либо может потребоваться уменьшение высоты пакетов при использовании материалов с высокими значениями T_g .

Уменьшение прочности сцепления медной фольги и уменьшение стойкости к расслоению могут также быть связаны с повышенными значениями T_g , хотя на это могут влиять и другие факторы. Время до начала расслоения является показателем прочности сцепления полимера и меди или полимера и армирующего материала. Спустя какое-то время они начинают отделяться друг от друга или расслаиваться. Время

расслоения может коррелировать с величиной T_d . Для определения времени до начала расслоения используется термомеханический анализатор (ТМА), т.е. образец нагревается до определенной температуры, а затем измеряется время до его повреждения. Обычно повреждением становится расслоение между полимером и медной фольгой или полимером и стекловолокном внутри основания платы. Для этого теста используется температура 260°C (тест называется T260) и 288°C (T288).

Температура термодеструкции (разложения). По мере нагревания материала до более высоких температур достигается точка (T_d), начиная с которой происходит разложение полимера. Химические связи внутри полимерной системы постепенно разрушаются и начинают выделяться летучие компоненты (низкомолекулярные фракции), что приводит к уменьшению массы образца. Традиционно T_d определяется как точка, в которой из-за разложения теряется 5% первоначальной массы. Однако 5% – это большая величина, если рассматривать надежность многослойной печатной платы, а температуры, при которых наблюдается нижний порог разложения, очень важны для бессвинцовой пайки (рис.8).

Традиционный FR-4 с T_g , равной 140°C, имеет температуру разложения 320°C (потеря массы 5%). Усовершенствованный FR-4 имеет температуру разложения 350°C (потеря массы 5%). Многие стандартные материалы марки FR-4 с высоким значением T_g фактически имеют температуры разложения в диапазоне 290–310°C, тогда как материалы марки FR-4 с T_g , равной 140°C, обычно имеют несколько более высокие значения T_d .

Заштрихованные области соответствуют диапазонам пиковых температур для стандартной пайки припоем из свинца и олова и для бессвинцовой пайки. Очень часто задают вопрос: если печатная плата паяется при 260°C, а материал имеет температуру разложения в диапазоне 310–320°C, то почему тогда он может оказаться несовместимым с бессвинцовой пайкой? Ответ: все зависит от деструкции материала в тех температурных диапазонах, при которых выполняется пайка. В диапазоне температур, соответствующем использованию сплава олова и свинца, ни один из материалов не демонстрирует заметного уровня разложения. Однако в температурном диапазоне бессвинцовой пайки (240–270°C) традиционный материал марки FR-4 теряет 1,5–3% своей массы.

Этот уровень разложения может неблагоприятно сказаться на долгосрочной надежности или привести к появлению дефектов, таких как расслоение, особенно в случае нескольких выполняемых одновременно циклов пайки или нескольких циклов переделки.

Время до начала расслоения. Для определения времени до начала расслоения (т.е. как долго материал будет сопротивляться образованию вздутий или расслоению при заданной температуре) применяется ТМА, в котором образец нагревается. Обычно нагревают до температуры 260°C. (T260). Используются и другие температуры – 288 или 300°C. Сравнивая характеристики различных типов материалов (табл.2), нужно отметить, что одни и те же материалы разных производителей имеют различные вариации характеристик. На значения T260 могут влиять конкретные смолы и катализаторы отверждения, используемые для данного материала, а также различия в значениях КТР у компонентов образца.

Хотя тестам по определению времени до начала расслоения и было уделено достаточно большое внимание по мере того, как бессвинцовые технологии стали приобретать широкое распространение, очень важно не ограничиваться исключительно одним этим свойством или типом измерения при определении материала для технологии бессвинцовой пайки. Во-первых, корреляция между временем до начала расслоения и пригодностью того или иного материала для сборки без применения свинца не всегда очевидна. Большая длительность промежутков T260 или T288 сама по себе не гарантирует высокой степени надежности применительно к бессвинцовой пайке. И наоборот, некоторые материалы с достаточными, но не обязательно большими интервалами T260 или T288 демонстрируют прекрасные характеристики для их применения в бессвинцовых технологиях пайки. И хотя важно учитывать такую характеристику, как время до начала расслоения при определении подходящих для бессвинцовой пайки материалов, ее не следует считать единственной. Для успешного применения в бессвинцовой технологии необходим баланс нескольких свойств материала.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Основные механические характеристики базового материала – упругость, прочность на изгиб и прочность сцепления фольги на отрыв. Так

Таблица 3. Прочность оснований фольгированных диэлектриков на изгиб

Тип материала	Предел прочности на изгиб, МПа	
	По основе	По утку
XXXPC	8,44×10 ⁶	7,39
CEM-1	21,1	17,6
CEM-3	23,2	19,0
FR-1	8,44	7,04
FR-2	8,44	7,39
FR-3	14,1	11,3
FR-4	42,3	35,2
FR-5	42,3	35,2
Полиимид/ стеклоткань	42,3	31,7
Цианатный полиэфир/ стеклоткань	35,2	35,2

как в производстве печатных плат очень часто объединяются компоненты материалов с разными свойствами, то это приводит к появлению термомеханических напряжений, которые вызывают усталость материала или неоднородность на границах раздела, что, в свою очередь, ведет к ухудшению механических свойств материала.

Упругость. Модуль упругости характеризует жесткость и прочность композиционного материала при воздействии нагрузки, предел текучести – максимальную нагрузку (обычно на 5% выше предела упругости), которую материал может выдержать в направлении X, Y до того, как он будет сломан. Из двух величин модуль упругости более важен. Он применяется для дифференциации материалов и их фактической прочности во время оценочных испытаний. Модуль

упругости как одно из ключевых свойств материала должен учитываться при выполнении численного моделирования корпусов и сборок печатных плат.

Прочность на изгиб. Это свойство, характеризующее механическую прочность материала по оси Z, зависит в основном от характеристик используемого связующего. Для примера в табл.3 приведены значения предела прочности на изгиб материалов толщиной 1,5 мм.

Прочность на отрыв медной фольги. Прочность медной фольги на отрыв у фольгированных материалов характеризует пригодность печатных плат к монтажу. Этот параметр отображает прочность сцепления с основанием проводников печатной платы при любой пайке и ремонте. Важность этого параметра существенно возросла после того, как проводники и контактные площадки стали существенно меньше, а количество и температура термоударов при производстве ПП значительно увеличились. Чем сильнее первоначальное сцепление материала, тем лучше.

ГОРЮЧЕСТЬ

Горючесть (воспламеняемость) слоистого материала классифицируется в соответствии со спецификациями компании Underwriters Laboratories (UL). Стандарт имеет название UL 94 и в соответствии с ним существует шесть классов горючести.

5VA (Surface Burn – поверхностное горение). Горение останавливается спустя 60 с после пятикратного воздействия пламенем. Не допускается выделение негорящих расплавленных капель вещества. Не допускается прожиг поверхности материала (это самый высокий рейтинг по UL 94).

5VB (Surface Burn – поверхностное горение). Горение останавливается спустя 60 с после пятикратного воздействия пламенем. Не допускается выделение негорящих расплавленных капель вещества. Допускается прожиг поверхности материала.

Таблица 4. Водопоглощение диэлектрических оснований

Материал	FR-4 – эпоксидная смола	FR-4 – эпоксидная смола с наполнителем	FR-4 – эпоксидная смола с высокой T _g	BT/эпоксидная смола	Эпоксидная смола с низкими потерями	Цианатный полиэфир	Полиимид
Водопоглощение, %	0,1	0,22	0,1	< 0,5	0,1	< 0,5	0,35

V-0 (Vertical Burn – вертикальное горение). Горение останавливается спустя 10 с после воздействия пламенем. Допускается выделение негорящих расплавленных капель.

V-1 (Vertical Burn – Вертикальное горение). Горение останавливается спустя 30 с после воздействия пламенем. Допускается выделение негорящих расплавленных капель.

V-2 (Vertical Burn – вертикальное горение). Горение останавливается спустя 30 с после воздействия пламенем. Допускается выделение горящих расплавленных капель.

H-B (Horizontal Burn – горизонтальное горение). Допускается медленное горение в горизонтальном положении со скоростью не более 76 мм/ мин при толщине образца менее 3 мм (это самый низкий рейтинг по UL 94).

ВОДОПОГЛАЩЕНИЕ, ВЛАГОСТОЙКОСТЬ

Влагостойкость фольгированных диэлектриков оказывает прямое влияние на состояние электрической изоляции. В зависимости от определенной молекулярной структуры каждый слоистый материал поглощает определенное количество воды. Это происходит не только при многочисленной влажной обработке в процессе изготовления печатных плат, но также в результате воздействия нормальных условий окружающей среды. Поглощенная влага может изменить свойства материала и повысить риск появления пузырей и расслоения при высокотемпературной обработке, подобной пайке оплавлением.

Водопоглощение определяется при погружении образца материала в воду на 24 ч. Это испытание несложно проводить, а результаты для различных материалов легко сравнивать между собой.

БАЗОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ СЕРИИ FR-4

Большое число перечисленных в стандартах базовых материалов относятся к материалам серии FR-4. FR-4 – это огнестойкий материал (FR – Flame Retardant), представляет собой полимерную систему на основе эпоксидной смолы, в качестве армирующего используется стеклоткань.

Многообразие FR-4. Материалы, выпускаемые промышленностью под маркой FR-4, имеют различные значения T_g . Минимальная температура T_g для FR-4 равна 110°C. Более распространенные материалы типа FR-4 имеют значения T_g в диапазонах 130–140°C и 170–180°C. Материалы марки FR-4 содержат различные типы эпоксидной смолы, что определяет их

свойства и значения температур стеклования (см. табл.2 и 3).

Материал FR-4 выпускается с огнестойкими добавками на основе фосфора, гидроокиси алюминия. Некоторые марки материалов типа FR-4 имеют в своем составе неорганические наполнители, которые уменьшают расширение по оси Z. Для аддитивного процесса осаждения меди в материал FR-4 добавляется катализатор в виде каолиновой глины, покрытой палладием.

В общем, существует множество комбинаций полимерных систем, огнестойких добавок и наполнителей, которые приводят к появлению на рынке различных типов материалов, называемых FR-4.

Долговечность FR-4. Материалы серии FR-4 за многие годы их применения зарекомендовали себя как наиболее популярные и широко используемые в производстве печатных плат. Для относительно простого применения подойдут FR-4 с T_g в диапазоне 130–140°C. При большом числе слоев многослойных плат, с большой толщиной, более высокой термоустойчивостью, подойдут материалы FR-4 с температурой стеклования в диапазоне 170–180°C. С появлением бессвинцовой пайки наряду с температурой стеклования должна учитываться и температура расслоения. Другими словами, чем шире диапазон конечного использования печатных плат, тем разнообразнее сортамент материалов серии FR-4.

Кроме того, компоненты, используемые в материалах FR-4, особенно стеклоткань и эпоксидная смола, обеспечивают очень хорошую комбинацию технических характеристик, технологичности и стоимости. Наличие различных отработанных технологий изготовления тканого стекловолна позволяет легко контролировать толщину диэлектрика и полную толщину печатной платы. Эпоксидные смолы имеют отличное сочетание электрических, тепловых и механических свойств, поэтому они стали основным полимером, используемым при изготовлении печатных плат. Материалы на основе эпоксидной смолы относительно легко обрабатывать в традиционных процессах изготовления печатных плат, по крайней мере, по сравнению с некоторыми другими типами доступных полимерных материалов.

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ БАЗОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Существующий стандарт ГОСТ 26246.0–89 (МЭК 249-1-82) "Материалы электроизоляционные

фольгированные для печатных плат. Методы испытаний" не отражает особенностей современных технологий. Поэтому в планах стандартизации предусмотрен выпуск ряда отечественных стандартов, соответствующих требованиям по качеству и испытаниям. Они разрабатываются на основе новых стандартов Международной электротехнической комиссии, в частности с использованием стандартов серии МЭК 61249 (ТУ) и МЭК 61188 (испытания).

Но пока их нет, приходится ориентироваться на международные и национальные стандарты, которыми пользуются зарубежные производители. К ним, в первую очередь, относятся стандарты Национальной ассоциации производителей электрооборудования (NEMA), стандарты Американского общества испытаний материалов (ASTM), стандарты Международной электротехнической комиссии (IEC) и стандарты ИРС. Систематизация требований по этим стандартам может помочь специалистам в области печатных плат принимать оперативные решения в подходе к процессу испытаний материалов, главных и новых из них, – испытаний термомеханических и электрических свойств материалов печатных плат. Важно обращать внимание на то, как проводить эти испытания, какие именно результаты имеют практическое значение в сегодняшней производственной среде и насколько значимы полученные результаты. Помимо испытаний диэлектриков нужно освоить современную методику оценки влияния процессов изготовления на свойства материалов.

В заключение можно сказать, что сегодня изменились условия изготовления электронных модулей: бессвинцовые технологии, групповые пайки, повышенные требования к стабильности различных свойств и т.д. Разработки отечественных стеклотекстолитов имеют сорокалетнюю давность, в то время как цивилизованный мир меняет свои технологии, и вместе с этим базовые материалы, с периодичностью в 5–6 лет. Это значит, что за 40 лет простоя в производстве ПП сменилось много поколений технологий. Более того, чтобы осуществить сегодня импортозамещение базовых материалов применительно к современным технологиям, необходимо предпринять гигантские усилия, на которые сегодня в России мало кто способен. Однако стоит отметить положительные тенденции в области стандартизации номенклатуры и испытаний материалов. Также надо понимать, что за материалом серии FR-4 стоит большой сортамент и уникальное сочетание

их технических характеристик, технологичности и стоимости, что сделало их наиболее распространенными в производстве печатных плат во всем мире.

ЛИТЕРАТУРА

1. Печатные платы: Справочник. В 2-х книгах./ Под ред. К.Ф. Кумбза. – М.: Техносфера, 2011.
2. **Медведев А., Можаров В.** Размерная стабильность слоев в многослойных структурах печатных плат. – Печатный монтаж (Приложение к журналу "Электроника: НТБ"), 2011, № 4.
3. ГОСТ 26246.0-89 (МЭК 249-1-82). Материалы электроизоляционные фольгированные для печатных плат. Методы испытаний.
4. ГОСТ 26246.10-89 (МЭК 249-2-11-89). Материалы электроизоляционные фольгированные тонкие общего назначения для многослойных печатных плат на основе стеклоткани, пропитанной эпоксидным связующим. Технические условия.
5. Технологии в производстве электроники. Часть II. Справочник по производству печатных плат./ Под ред. П.Семенова – М.: ООО "Группа ИДТ", 2007.