

ПОЛИМЕРИЗАЦИОННОЕ НАПОЛНЕНИЕ

НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

В.Уразаев

В технологии печатных плат наблюдаются те же тенденции, что и в микроэлектронике, — постоянная гонка за уровнем разрешения. Отличие лишь в том, что в микроэлектронике ведется борьба за десятки доли микрона, а в печатных платах — за десятки микрон. В результате перехода к печатным платам 6 и 7 классов точности ужесточились требования к материалу их диэлектрического основания. Ведущие зарубежные компании в комплексе задач миниатюризации печатных плат на первое место выдвигают разработку и применение новых базовых материалов [1]. И здесь существенную роль может сыграть разработанная технология полимеризационного наполнения, эффективность и целесообразность использования которой для производства суперсложных печатных плат не вызывает сомнения.

Печатные платы (ПП) были, есть и в обозримом будущем останутся основным конструктивным элементом радиоэлектронной аппаратуры. Благодаря удачному сочетанию технико-экономических характеристик в качестве диэлектрической подложки ПП наиболее распространены стеклотекстолиты — композиционные материалы из эпоксидной смолы и стеклоткани (в пропорции примерно 50 на 50). Электрофизические характеристики стеклотекстолитов определяются преимущественно свойствами полимерного связующего и степенью взаимосвязи на границе раздела "стекло — эпоксидная смола". При эксплуатации в экстремальных условиях, например при воздействии влаги, электрофизические показатели стеклотекстолита резко ухудшаются, и в первую очередь снижается поверхностное сопротивление изоляции. А его минимально допустимый уровень функционально связан с классом сложности печатных плат: чем сложнее плата (чем меньше зазоры между проводниками), тем выше должно быть сопротивление изоляции.

Традиционные методы повышения электрофизических свойств стеклотекстолитов основаны на улучшении структуры полимерной матрицы (химического состава, степени упорядоченности полимерной сетки и др.), а также на улучшении адгезии между полимерной матрицей и стеклом. "Цивилизованный" мир движется именно в этом направлении, последовательно решая те задачи, которые ставит перед разработчиками микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры.

Качество отечественных фольгированных стеклотекстолитов всегда оставляло желать лучшего. Оголение и проявление текстуры стеклоткани, побелесость — далеко не все дефекты диэлектрического основания ПП, о которых за рубежом и не слышали. Причем

некоторые из них были даже узаконены в нашей нормативно-технической документации. Естественно, такие дефекты при эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры в экстремальных условиях ни к чему хорошему не приводят. Поскольку разработчики и изготовители стеклотекстолитов не могли обеспечить желаемое качество базовых материалов для печатных плат, мы взяли инициативу в свои руки, задавшись вопросом: как из плохого стеклотекстолита сделать хорошие ПП? Существенным подспорьем оказалась монография А.М.Медведева [2], в которой отмечено, что:

- склонность к появлению дефектов структуры (микро- и макропористостей) заложена в самой гетерогенной природе стеклотекстолита. Он может быть только менее или более пористым. А если смотреть глубже, то и само эпоксидное связующее неоднородно по плотности и представляет собой своеобразную пористую структуру, роль пор в которой выполняют области с меньшей степенью сшивки;
- чем выше пористость, тем выше водопоглощение и ниже уровень сопротивления изоляции при воздействии влаги;
- уровень сопротивления изоляции между разобращенными цепями печатных плат определяется преимущественно состоянием поверхностного слоя стеклотекстолита.

Из сказанного следует, что путь к решению задачи лежит на поверхности — в прямом и переносном смысле. Нужно в первую очередь устранить пористость поверхностного слоя стеклотекстолита ПП.

В какой-то степени это получается само собой при нанесении лакового покрытия. Лак (раствор полимерного связующего в органическом растворителе) проникает в открытые поверхностные поры и частично заполняет их после улетучивания растворителя. Глубина проникновения ограничивается размером молекул полимеров или олигомеров, а коэффициент заполнения пор — сухим остатком лака. Но возникает техническое противоречие: если использовать лак с большим сухим остатком, то увеличивается коэффициент заполнения пор, но уменьшается глубина его проникновения из-за большой вязкости. Сильно же разбавленный лак проникает глубже, но коэффициент заполнения пор уменьшается. Следовательно, противоречивые требования необходимо разделить во времени [3]: пер-

Представляем автора статьи

УРАЗАЕВ Владимир Георгиевич. Окончил Казанский химико-технологический институт, автор свыше 20 публикаций и 40 изобретений. Работает старшим научным сотрудником в фирме "Три И", г.Казань.
E-mail: Urazaev@yandex.ru



вый слой покрытия наносить разбавленным лаком, а последующие слои – лаком с увеличивающимся сухим остатком. Но, к сожалению, результат не оправдал ожидания.

Кардинально разрешить это противоречие можно, используя для импрегнирования (пропитки) ПП полимеризационноспособные композиции, содержащие, как минимум, реакционноспособный мономер и инициатор полимеризации. В исходном состоянии это – маловязкие жидкости, отверждающиеся практически без изменения объема. Аналогичные решения известны в других областях [4]. Почему они не использовались в технологии ПП? В начале 90-х годов "верхом совершенства" были ПП 4–5 классов точности, для которых необходимые электрофизические свойства стеклотекстолита достаточно просто обеспечивались традиционными методами. С другой стороны, если кому-то и приходило в голову применять импрегнирование ПП полимеризационноспособными композициями, то сразу же вставала непростая задача: как эффективно заполнить открытые поры стеклотекстолита, избежав попадания заполимеризованной композиции на контактные площадки и поверхности стенок металлизированных отверстий? Ведь качество пайки для надежной работы радиоэлектронной аппаратуры не менее важно, чем влагостойкость.

Проблема решилась благодаря химическому эффекту, обратному тому, который наблюдается при отверждении олифы. В закрытой емкости олифа жидкость, на воздухе она затвердевает. А есть такие композиции, которые на воздухе жидкие, а в закрытой емкости затвердевают. В данном случае закрытая емкость – это внутренняя полость стеклотекстолита. Отметим, что на пути практической реализации технологии "полимеризационного наполнения" это было не последнее преодоленное препятствие.

Как и следовало ожидать, простейшая проверка подтвердила эффективность метода. Водопоглощение, следовательно, и пористость, уменьшались у всех стеклотекстолитов, в том числе и у стеклотекстолитов с нетрадиционными полимерными связующими. У отечественных стеклотекстолитов водопоглощение в некоторых случаях снижалось в несколько раз, у зарубежных – в среднем на 20%. Повышение уровня сопротивления изоляции при испытаниях на влагостойкость совпадало с приведенной в работе [2] зависимостью поверхностного сопротивления изоляции от влагосодержания и составляло 1–2 порядка. Автоматически устранялись и такие дефекты внешнего вида, как оголение и проявление текстуры стеклоткани.

Поставленная задача была успешно решена. Однако последующие работы с многослойными печатными платами (МПП) заставили по-иному взглянуть на возможности разработанной технологии. Если влагостойкость одно- и двухсторонних ПП определяется преимущественно минимально допустимым уровнем поверхностного сопротивления изоляции стеклотекстолита, то в МПП следует учитывать и их конструктивно-технологические особенности.

МПП можно представить в виде набора пакетов, состоящих из слоев (шин) "земли" и "питания". Между ними размещены сигнальные слои, связанные столбиками металлизированных отверстий, проходящих через отверстия в слоях "земли" и "питания". В такой структуре возможны утечки по пути "питание–диэлектрик–металлизированный столбик–диэлектрик–земля". Таким образом, в конструкции МПП изначально заложены элементы ненадежности, число которых в одной плате достигает нескольких десятков тысяч. Вследствие этого в цепях "земля–питание" МПП невозможно достичь (при прочих равных условиях) такого же уровня сопротивления изоляции, как в логических цепях. В нормативно-технической документации уровень требований по сопротивлению изоляции для

питающих цепей МПП при испытаниях на влагостойкость понижен до 100 МОм. На многих предприятиях эту величину вынужденно уменьшают до 10 МОм, что неблагоприятно сказывается на надежности изделий.

Полимеризационное наполнение в производстве МПП оказалось сверхэффективным. Оно довольно просто решает задачу обеспечения высокого уровня сопротивления изоляции в питающих цепях, что, казалось бы, невозможно с конструктивно-технологической точки зрения. Технология изготовления МПП предопределяет меньшую, по сравнению с двухсторонними ПП, и неравномерную степень отверждения эпоксидного связующего в основании. Это увеличивает глубину проникновения композиции в полимерную матрицу стеклотекстолита. Поскольку слои "земля–питание" расположены преимущественно вблизи от поверхности МПП, оказываются доступными для "усиления" те самые десятки тысяч участков диэлектрика между перфорированными слоями питания и пронизывающими их столбиками металлизированных отверстий.

При полимеризационном наполнении происходит модификация поверхностного слоя стеклотекстолита с градиентным характером распределения композиции в плоскости, перпендикулярной поверхности листа. В принципе, для одно- или двухсторонних ПП этого и достаточно. В МПП желательно "усилить" диэлектрик во всем объеме, что обеспечивает полимеризационное наполнение заготовки МПП после сверления переходных отверстий (перед проведением металлизации). В результате модификация диэлектрика в потенциально опасных зонах вокруг переходных отверстий происходит по всей высоте диэлектрического основания. Поскольку диффузионная проницаемость в слоистых пластиках вдоль слоев примерно на порядок выше, чем в перпендикулярном направлении, можно проводить полимеризационное наполнение и во всем объеме диэлектрической подложки. Причем чем сложнее печатная плата и, следовательно, чем меньше шаг сетки переходных отверстий, тем проще это реализовать.

Изучение механизма полимеризационного наполнения при импрегнировании проводилось импульсным методом ядерного магнитного резонанса. Было установлено, что на первой стадии происходит не только заполнение макро- и микрополостей на границе раздела стекло – эпоксидная смола, но и диффузия композиции в объем эпоксидной полимерной матрицы. При последующей полимеризации композиции в полимерной матрице образуются взаимопроницающие сетки (ВПС), что приводит к неаддитивному "усилению" физико-механических свойств полимерной матрицы стеклотекстолита [4]. Причем эффективность этого "усиления" тем выше, чем хуже ПП (чем ниже степень отверждения и/или нерегулярной структура сетки полимерного связующего в подложке). Суммарный эффект при полимеризационном наполнении складывается из эффектов от блокировки капиллярной пористости, сосредоточенной преимущественно на границе раздела стекло – полимер, и от "усиления" полимерной матрицы подложки. Отталкиваясь от ремонтной технологии, удалось получить принципиально новый инструмент для модификации стеклотекстолита непосредственно в ПП и, в первую очередь, его поверхностного слоя, ответственного за уровень сопротивления изоляции во влажных условиях.

Вышесказанное подтверждают результаты испытаний реальных МПП, отобранных непосредственно на предприятиях-изготовителях печатных плат (см. таблицу). Их анализ показывает, что в наиболее критичных цепях МПП (земля–питание) сопротивление изоляции повышается в зависимости от исходного уровня в среднем на 2–3 порядка, а в отдельных случаях – и на 8 порядков. Сопротивление изоляции значительно возрастает как у заведомо бракованных МПП

Влияние полимеризационного наполнения на уровень сопротивления изоляции МПП в цепях "земля – питание", МОм. Условия испытаний: 1 ч, 25°C, относительная влажность воздуха 95%

№ МПП	До наполнения		После наполнения	
	Нормальные условия	После испытаний	Нормальные условия	После испытаний
ИЫ 103.882-251	0,0002	–	500000	1200
ИЫ 103.540-013	500	300	100000	25000
ИЫ 103.509-79	30	–	10000	1000
ИЫ 103.509-95	0,0002	–	100000	1000
3425300	–	3	–	5000
2990300	–	10	–	4000
308523	–	25	–	150
286268	–	80	–	4000
25820	100	–	> 10000	700
49717	1000	1,8	> 10000	70
55380	1000	15	> 10000	220
ИЫ 102.858-228	10	2	–	1500
ИЫ 102.856-208	50	5	–	1300
ИЫ 102.860-226	–	5	–	50000
ИЫ 103.473-189	–	50	–	2500
ИЫ 104.046-5	–	150	–	4000

(с сопротивлением изоляции порядка кОм и даже Ом), так и у МПП, сопротивление изоляции которых близко к норме. Более того, в МПП сопротивление изоляции при полимеризационном наполнении повышается не только при испытаниях на влагостойкость, но и в нормальных условиях. Аналогичные результаты наблюдались и в функциональных цепях МПП.

Следовательно, предложенный метод полимеризационного наполнения не только проявил себя в качестве прекрасной ремонтной технологии, но и оказался способным повысить сопротивление изоляции всех типов печатных плат. Причем чем сложнее печатная плата, тем больше в этом необходимость и, соответственно, тем выше эффект. Своеобразный парадокс объясняется довольно просто. Один и тот же механизм капиллярного заполнения пористости ответственен как за проникновение влаги, снижающей уровень сопротивления изоляции, так и за эффективность полимеризационного наполнения. В печатных платах, изготовленных из откровенно плохого стеклотекстолита, эффект обусловлен в основном заполнением капиллярной пористости. В МПП, а также в суперсложных печатных платах всех типов выше вклад от "усиления" полимерной матрицы.

Технология полимеризационного наполнения отработывалась непосредственно на предприятиях-изготовителях МПП (завод САМ, г. Москва и ЗЭМЗ, г. Сергиев Посад). Поскольку работы финансировались заказчиками, акцент был сделан на получение максимального экономического эффекта непосредственно на предприятиях-изготовителях МПП. С этой точки зрения лучшим вариантом был ремонт МПП с пониженным уровнем сопротивления изоляции в цепях земля–питание. В итоге на выборке в несколько сотен МПП было установлено, что полимеризационное наполнение позволяет довести до требований нормативно-технической документации примерно 70% отбракованных МПП. Такие печатные платы успешно прошли периодические испытания по ГОСТ 23752-79 (3 группа жесткости). Затраты на ремонт не превышали 1% от стоимости восстановленной печатной платы. Технология получилась несложная. Основные операции – пропитка МПП обыкновенным погружением в композицию, удаление избытка композиции с поверхности МПП промывкой в воде, термообработка МПП в сушильном шкафу и отмывка в воде. Для реализации технологии достаточно иметь несколько ванночек и сушильный шкаф. Расход композиции составля-

ет не более 5 – 10 мл на 1 МПП стандартного типоразмера (250x250 мм).

В качестве иллюстрации значимости предлагаемой технологии коснемся проблемы создания суперкомпьютеров. Для них необходимы суперсложные МПП. Сотрудники ИТМ и ВТ разработали технологию изготовления двадцатислойных печатных плат размером 465x545 мм с шириной проводников и зазоров между ними 100 мкм и числом переходных отверстий до 37828 [5]. Ведутся работы по 40-мкм технологии [6]. Вызывает сожаление лишь тот факт, что пока это только опытные образцы, свидетельствующие об освоении основных операций изготовления МПП. Разве можно считать работоспособными изделия, у которых сопротивление изоляции в нормальных условиях ниже, чем это допускается при испытаниях на влагостойкость? Более того, сопротивление изоляции таких МПП даже при естественном колебании влажности воздуха изменяется в 1000–10000 раз.

Остается лишь напомнить, что есть такая технология...

ЛИТЕРАТУРА

1. www.ats.net/deutsch/technologie/technologieplattform.html
2. **Медведев А.М.** Надежность и контроль качества печатного монтажа.— М.: Радио и связь, 1986.
3. **Селюцкий А.Б.** Правила игры без правил.— Петрозаводск: Карелия, 1989.
4. **Мэнсон Дж., Сперлинг Л.** Полимерные смеси и композиты/ Пер. с англ.— М.: Химия, 1979.
5. **Галецкий Ф.П.** Технология изготовления двадцатислойных печатных плат с проводниками 100 мкм. – Экономика и производство, 2000, № 12.
6. **Галецкий Ф.П.** Этапы развития печатных плат в ИТМ и ВТ им. С.А. Лебедева. – Экономика и производство, 2001, № 1.

ПЕРФОКАРТЫ возвращаются?

Ученые IBM сконструировали запоминающее устройство, способное на площади размером с почтовую марку хранить до триллиона бит информации. В рамках проекта Millipede (Цюрихская лаборатория) разрабатывается технология записи информации в виде множества отверстий диаметром 10 нм на полимерной пленке. В технологии использован принцип атомно-силовой микроскопии. Запись происходит посредством "прожигания" в полимерной подложке отверстий кантилевером. Считывание основано на эффекте изменения теплопроводности запоминающей подложки, когда нагретый кантилевер оказывается над отверстием. Исследователи IBM недавно получили экспериментальный чип с более чем тысячей нагреваемых выводов-кантилеверов, позволяющий записывать и считывать информацию. В результате возможна плотность записи в 20 раз выше, чем на современных жестких дисках, что позволит, например, довести память сотового телефона до 10 Гбайт. Коммерческие продукты по данной технологии ожидают к концу 2005 г.

По материалам ZDnet и www.zurich.ibm.com