

Время — вперед!

Бесспорно, микроминиатюризация печатных плат (ПП) — объективная реальность. Не менее реально и то, что диэлектрические свойства подложек ПП (стеклотекстолитов) лимитируют микроминиатюризацию [1]. Стеклотекстолит — композиционный материал. Полимерное связующее (полимерная матрица) стеклотекстолита — эпоксидная смола, наполнитель — стеклоткань. Разработчики и производители базовых материалов для печатных плат традиционными методами шаг за шагом улучшают свойства, и в первую очередь диэлектрические свойства, стеклотекстолитов. Только вот шаги становятся все короче и короче.

**Владимир Уразаев,
к. т. н.**

Urazaev@yandex.ru

Яблочный спас

В физике полимеров сравнительно недавно появился термин «взаимопроникающие полимерные сетки» (ВПС). ВПС представляют собой уникальный тип полимерных смесей, получаемых при набухании сшитого полимера 1 в мономере 2 в присутствии сшивающих агентов и активаторов и последующей полимеризации *in situ* мономера 2 [2]. В предельном случае при высокой совместимости сшитых полимеров 1 и 2 обе сетки являются непрерывными и проникающими одна через другую в пределах всего макроскопического объема образца. Представьте себе, что два червя проделывают ходы в яблоке, и каждый червь может пересечь только свой собственный ход, но не ход соседа. Если эти ходы заменить полимерными цепями, то можно получить простейшую аналогию с ВПС.

Во многих случаях физико-механические свойства ВПС значительно превышают тот уровень, который реализуется в индивидуальных полимерах 1 и 2.

Особый интерес вызывают так называемые градиентные ВПС. В градиентных ВПС соотношение сетчатых структур полимера 1 и полимера 2 изменяется по толщине образца. Градиентные ВПС могут быть синтезированы при полимеризации мономера 2, который неоднородно размещен в сетке полимера 1. Такие ВПС уже нашли практическое применение в демпфирующих материалах с переменной жесткостью, в оптических материалах с переменным коэффициентом преломления и т. д. Если говорить шире, то градиентные ВПС — очень удачное техническое решение для получения изделий с изменяющимися по толщине физическими свойствами.

Автором впервые было предложено использовать эффект образования градиентных ВПС для модификации полимерной матрицы стеклотекстолитов в ПП. Если проводить аналогию, то и подложка ПП может (или должна?) иметь градиентное распределение уровня изоляционных характеристик

тик по толщине. Предпочтительно чтобы у поверхности он был выше. Причем, если вести речь о двухсторонних ПП, то можно сказать «должна», если же перейти к многослойным ПП, то можно сказать и «может».

Первые успешные эксперименты по полимеризационному наполнению ПП были осуществлены еще в 1988–1989 годах. Используя приведенную выше терминологию, можно сказать, что в этой технической системе полимер 1 — это эпоксидная полимерная матрица стеклотекстолита, мономер 2 — композиция, включающая бифункциональный мономер и вещественный инициатор полимеризации.

Подробнее о технологии полимеризационного наполнения ПП можно узнать, посмотрев статьи [3–4] или посетив сайт [5]. Гораздо интереснее уйти от «дел давно минувших дней» к современности. Сейчас, слава богу, уже 2004 год. Полимеризационное наполнение когда-то было эффективно в ПП, изготовленных на стеклотекстолитах пятнадцатилетней давности. Разработчики базовых материалов все эти годы не стояли на месте. Так нужно ли современным ПП полимеризационное наполнение?

В роли Шерлока Холмса

В таблице приведены самые свежие результаты испытаний двухсторонних ПП, изготовленных в едином технологическом цикле на стеклотекстолитах марок СТФ-35-2 -1,5 ТУ 16-503.161-83 и FR-4 (изготовитель — фирма Isola). Поскольку испытания проводились сторонней организацией (потенциальным заказчиком), объективность этих результатов, думаю, не следует подвергать сомнению.

Начнем с констатации фактов:

1. Исходный уровень сопротивления изоляции в цепях ПП, изготовленных из стеклотекстолитов СТФ и FR-4, довольно близок. Но, забыв о патриотизме, все-таки правильнее будет сказать, что при использовании FR-4 он чуть выше, а еще точнее — стабильнее.

Таблица. Влияние полимеризационного наполнения на уровень сопротивления изоляции в двухсторонних печатных платах

| Марка стеклотекстолита, номер печатной платы | Сопротивление изоляции, Ом | | | | | | |
|--|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Цепь 1 | Цепь 2 | Цепь 3 | Цепь 4 | Цепь 5 | Цепь 6 | Цепь 7 |
| СТФ (Россия), 4037011 | | | | | | | |
| до наполнения: | $1,9 \times 10^{10}$ | $2,0 \times 10^{10}$ | $2,1 \times 10^{10}$ | $9,0 \times 10^9$ | $4,6 \times 10^9$ | $9,0 \times 10^9$ | $1,3 \times 10^{10}$ |
| после наполнения: | $2,4 \times 10^{12}$ | $4,0 \times 10^{12}$ | $4,7 \times 10^{12}$ | $4,5 \times 10^{12}$ | $1,5 \times 10^{12}$ | $4,5 \times 10^{10}$ | $3,4 \times 10^{10}$ |
| СТФ (Россия), 4037009 | | | | | | | |
| до наполнения: | $2,0 \times 10^{10}$ | $9,0 \times 10^9$ | $1,1 \times 10^{10}$ | $1,1 \times 10^{10}$ | $4,2 \times 10^9$ | $3,3 \times 10^9$ | $4,2 \times 10^8$ |
| после наполнения: | $5,2 \times 10^{12}$ | $4,5 \times 10^{12}$ | $3,0 \times 10^{12}$ | $4,0 \times 10^{12}$ | $4,5 \times 10^{12}$ | $5,0 \times 10^{10}$ | $3,0 \times 10^{12}$ |
| FR-4 «Isola», 4027263 | | | | | | | |
| до наполнения: | $1,4 \times 10^{10}$ | $1,2 \times 10^{10}$ | $1,1 \times 10^{10}$ | $1,4 \times 10^{10}$ | $4,5 \times 10^9$ | $7,5 \times 10^9$ | $1,5 \times 10^{10}$ |
| после наполнения: | $9,0 \times 10^{10}$ | $1,3 \times 10^{11}$ | $1,9 \times 10^{11}$ | $8,5 \times 10^{11}$ | $1,6 \times 10^{11}$ | $2,5 \times 10^{10}$ | $4,5 \times 10^{10}$ |
| FR-4 «Isola», 4027264 | | | | | | | |
| до наполнения: | $1,35 \times 10^{10}$ | $1,2 \times 10^{10}$ | $1,2 \times 10^{10}$ | $1,2 \times 10^{10}$ | $5,1 \times 10^9$ | $1,2 \times 10^{10}$ | $1,7 \times 10^{10}$ |
| после наполнения: | $4,0 \times 10^{10}$ | $7,5 \times 10^{11}$ | $7,5 \times 10^{10}$ | $3,0 \times 10^{12}$ | $1,7 \times 10^{11}$ | $3,6 \times 10^{10}$ | $4,5 \times 10^{10}$ |
| FR-4 «Isola», 4027265 | | | | | | | |
| до наполнения: | $1,4 \times 10^{10}$ | $1,3 \times 10^{10}$ | $5,1 \times 10^9$ | $1,2 \times 10^{10}$ | $5,7 \times 10^9$ | $1,2 \times 10^{10}$ | $2,0 \times 10^{10}$ |
| после наполнения | $5,5 \times 10^{11}$ | $8,0 \times 10^{11}$ | $1,4 \times 10^{11}$ | $3,0 \times 10^{11}$ | $2,5 \times 10^{11}$ | $4,2 \times 10^{10}$ | $2,5 \times 10^{10}$ |

Примечания:

1. Печатные платы изготовлены в ОАО «Элара».
2. Измерения проводились специалистами ЧФ МНПК «Авионика» в испытательном центре ОАО «Элара».
3. Измерения проводились тероометром Е6-13А в нормальных условиях при испытательном напряжении 10 В.

2. Даже в нормальных условиях во всех цепях всех ПП после проведения полимеризационного наполнения повышается уровень сопротивления изоляции.
3. Каковы количественные характеристики? Максимальное изменение сопротивления изоляции составляет примерно 4 порядка. Минимальное изменение (в одной цепи) — в 1,25 раза. В подавляющем большинстве случаев уровень сопротивления изоляции повышается на 1–2 порядка.
4. Как себя ведут отечественный (производимый в странах СНГ) и зарубежный стеклотекстолиты? Поведение, по меньшей мере, странное. После проведения полимеризационного наполнения уровень сопротивления изоляции в цепях ПП, изготовленных из заведомо худшего материала (СТФ), в среднем на порядок выше, чем в ПП, изготовленных из FR-4.
5. Не совсем логичны изменения в тех цепях, уровень сопротивления изоляции в которых изначально был ниже, чем в целом по ПП. В одних случаях изменение (увеличение) очень велико, а в других — незначительно.

Перейдем к анализу этих результатов и придадим им легкую эмоциональную окраску.

В первую очередь меня интересовал вопрос: «Будет ли эффективно полимеризационное наполнение для стеклотекстолита FR-4?» Ответ однозначен: «Эффективно, да еще как эффективно!» Даже в нормальных условиях изменение таково, что его нельзя списать на ошибку экспериментов. В условиях воздействия влаги, как показывает практика, «ножницы» между тем «что было» и тем «как стало» еще больше увеличиваются. Следовательно, используя полиме-

ризационное наполнение, довольно легко можно «улучшить изоляцию» в печатных платах, изготовленных из самых современных базовых материалов, — со всеми вытекающими из этого последствиями. А последствия таковы: дальнейшая микроминиатюризация ПП, повышение влагостойкости и надежности ПП в экстремальных условиях эксплуатации.

Теперь прольем бальзам на душу отечественных производителей. Поговорим о странностях. Если взять отечественный стеклотекстолит и «скрестить» его с полимеризационным наполнением, можно дать фору и «хваленному» FR-4. Посмотрите таблицу. В «наших» ПП (в полном смысле этого слова) превалирует множитель 10^{12} , а в иных ПП — всего лишь 10^{11} . Нелогичный на первый взгляд результат объясняется довольно просто. У отечественных стеклотекстолитов все-таки чуть хуже характеристики эпоксидной полимерной матрицы (частота и регулярность полимерной сетки, степень отверждения и др.). Эти характеристики отрицательно влияют на эксплуатационные свойства ПП, увеличивая диффузионную проницаемость стеклотекстолита для влаги. Эти же характеристики положительно влияют на увеличение диффузионной проницаемости полимерной матрицы стеклотекстолита для мономера 1 при образовании ВПС. Следовательно, при проведении полимеризационного наполнения в ПП с заведомо худшими техническими характеристиками можно получить «сверхэффект». Аналогичные результаты были получены автором ранее при проведении полимеризационного наполнения многослойных ПП. Аналогичный эффект был использован автором и при разработке технологии изготовления изде-

лий из стеклопластиков с улучшенными физико-механическими свойствами.

Несколько слов о теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) — давнем увлечении автора. С точки зрения ТРИЗ здесь имеет место использование типовых приемов разрешения технических противоречий: «использовать частично недостающее действие» и «использовать вред в пользу» [6].

Почему же в некоторых случаях (в некоторых цепях) изменение уровня сопротивления изоляции было незначительным? Объяснения пока остаются на уровне гипотез. Возможно, в этих цепях имеются остатки токопроводящих примесей (фрагментарно имеет место недостаточная отмывка). Полимеризационное наполнение, снижая диффузионную проницаемость для электролитов, должно увеличивать уровень сопротивления изоляции, но не настолько высоко. Возможно, это является результатом еще и неравномерного по поверхности ПП полимеризационного наполнения. А наиболее вероятная причина, видимо, заложена в конструкции тестируемых ПП. В пользу этого свидетельствует капризное поведение преимущественно двух цепей (цепи 6 и 7).

При объяснении технического эффекта, который дает полимеризационное наполнение, был сделан акцент на образование в полимерной матрице стеклотекстолита градиентных ВПС. По ряду косвенных признаков образование ВПС в рассматриваемой технической системе было доказано автором ранее. В действительности же, на эффективность полимеризационного наполнения оказывает влияние еще и чисто механическое заполнение полимером-наполнителем дефектных полостей (капилляров) стеклотекстолита, локализованных преимущественно на границе раздела «стекло —

эпоксидная смола». Но, как следует из сопоставления данных, приведенных в монографии [7], и результатов собственных экспериментальных исследований автора, относительный вклад механического заполнения невелик.

Воспоминание о будущем

Итак, ответ на вопрос о том, нужно ли современному ПП полимеризационное наполнение, очевиден. Результаты впечатляющие. И практическое использование полимеризационного наполнения — вопрос времени. Несколько слов о категории «время». Привожу фрагменты из адресованного мне письма: «...и все-таки давайте начнем превращать гетинакс в стеклотекстолит... при существующей технологии изготовления ПП на данном этапе времени к вашей технологии никто не готов». Очень будет жаль, что когда наступит полная готовность, эта технология в яркой и дорогой упаковке все-таки придет в Россию, но уже «из-за бугра». Остается только сказать: «Время — вперед!»

И еще один экскурс в будущее. Разработаны два новых способа влагозащиты ПП, основанных на том же полимеризационном наполнении [8–9]. Преимущества этих способов в том, что градиентные ВПС «усиливают» не только поверхностный слой стеклотекстолита, но и влагозащитное полимерное покрытие ПП (защитную паяльную маску, лаковое покрытие). Кроме того, при реализации этих способов впервые в мировой практике стеклотекстолит ПП и влагозащитное полимерное покрытие связываются в единое целое полимерными цепочками полимера 2 ВПС. («Червячки» прогрызают ходы не только в стеклотекстолите, но и в полимерном покрытии.) Насколько это важно, думаю, нет нужды объяснять специалистам.

Автор выражает благодарность специалистам Чебоксарского филиала МНПК «Авионика» Ю. Е. Яковлеву, И. В. Кузьминой и Т. П. Кузьминой за интерес, проявленный к технологии, и проведение испытаний печатных плат.

Литература

1. <http://www.ats.net/deutsch/technologie/technologieplattform.html>.
2. Дж. Мэнсон, Л. Сперлинг. Полимерные смеси и композиты. М.: Химия. 1979.
3. Уразаев В. Г. Повышение влагостойкости многослойных печатных плат // Электронные компоненты. 2002. № 3.
4. Уразаев В. Г. О проблеме влагостойкости печатного монтажа // Компоненты и технологии. 2002. № 4.
5. <http://www.Urazaev.narod.ru>.
6. Уразаев В. Г. Путешествие в страну ТРИЗ. Записки изобретателя. М.: Солон-Пресс. 2003.
7. Медведев А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа. М.: Радио и связь. 1986.
8. Уразаев В. Г. Способ влагозащиты печатных плат по заявке РФ № 2003138069 от 29.12.2003.
9. Уразаев В. Г. Способ влагозащиты печатных плат по заявке РФ № 2004101214 от 14.01.2004.