

Селективная влагозащита

Владимир Уразаев,
к. т. н.

urazaev@yandex.ru

Можете ли вы посоветовать...

Начну статью с фрагмента из письма: «Вас беспокоит студент... Я окончил 5 курс по специальности «Проектирование и технология РЭС» и сейчас начинаю писать диплом по теме: «Селективная влагозащита печатных узлов». Я, к сожалению, пока не смог приобрести вашу книгу «Влагозащита печатных узлов». Можете ли вы посоветовать мне различную литературу по этой теме?»

Признаюсь, что первая мысль, которая появилась после прочтения этого письма, была о том, что не повезло студенту. Уж очень все тривиально: липкие ленты, замазки и т. д. Негде разгуляться фантазии. Есть всего лишь одно исключение — разработки компании Asymtek по селективному нанесению влагозащитных покрытий [1]. То же самое можно сказать и о литературе. В книге [2] есть всего лишь небольшой раздел, посвященный непосредственно этой теме. Не так уж много находок можно сделать и в Интернете, независимо от того, какой системой поиска пользоваться. Как быть?

На мой взгляд, есть одно очень простое решение. Следует трансформировать эту проблему в другую, гораздо более интересную и важную, используя неоднозначность толкования слов в великом и богатом русском языке.

Кто как может

Сначала рассмотрим эту проблему в традиционном толковании. А в традиционном толковании селективная влагозащита — это защита мест на печатном узле, не подлежащих покрытию. Когда-то в годы работы в Казанском научно-исследовательском радиотехнологическом институте эта задача ставилась автору именно так. И ничего кроме отторжения она не вызывала.

Проблема появилась из-за того, что, используя традиционные методы нанесения лакокрасочных покрытий (окувание, пневматическое распыление), гораздо легче нанести покрытие сразу на всю поверхность, чем осуществлять этот процесс избирательно. Как следствие, возникла необходимость в предварительной защите нелакируемых поверхностей. Это трудоемкая и неблагодарная работа, не вызывающая положительных эмоций.

Защита поверхностей, не подлежащих окраске, всегда была «головной болью» производителей, работающих с лакокрасочными покрытиями. В печатных узлах к таким поверхностям относятся тестовые площадки, разъемы и прочие негерметичные элементы. Защиту поверхностей обычно осуществляют по принципу «кто как может». Кто-то использует шаблоны, изоляционную ленту или пластырь. Кто-то предпочитает специальные изолирующие со-

ставы (замазки, латексные составы, съемные пленочные покрытия другими лаками, например, ХС-567 и т. д.). За рубежом для этих целей разработаны специальные материалы: клеящие ленты (HumiTape), клеящие площадки (HumiDots), защитные съемные покрытия на латексной основе (Spot-On) и др. Для предохранения разъемов практикуется использование защитных колпачков соответствующего типа-размера [3].

К специальным защитным составам предъявляется очень много требований, которые порой противоречат друг другу. Эти составы должны: легко наноситься на поверхность и удаляться с нее тампоном без применения растворителей или сниматься «чулком»; не взаимодействовать с материалами, на которые наносятся, а также с лакокрасочным покрытием и т. д. Кроме того, они не должны стирать, растрекаться и проникать в слой покрытия при горячей сушке. Очень сложно получить ровный и, самое главное, точный контур защищаемого от окраски участка. А это очень важно для современных печатных плат с высокой степенью интеграции.

Но самый главный недостаток способов защиты из серии «кто как может» заключается в том, что они практически не поддаются автоматизации и на фоне других операций современного сборочно-монтажного производства выделяются своей архаичностью.

Прорыв

Американская фирма Asymtek покончила с архаичностью. Этой фирмой разработано автоматизированное технологическое оборудование для селективного нанесения влагозащитных покрытий. Оборудование имеет настольное исполнение и может быть использовано в многоименном серийном производстве. Линейка систем селективного нанесения влагозащитных покрытий постоянно обновляется. Самая последняя модель — Select Coat Conformal Coating System SL-940E (рис. 1).

А на следующем рисунке (рис. 2) вы можете увидеть последнюю модификацию самой главной части такого рода систем — модуля нанесения. При разработке модуля нанесения SC-400 был сделан акцент на возможность его использования для влагозащиты печатных узлов с высокой степенью интеграции. Этот модуль был удостоен звания лучший новый инновационный продукт на ежегодной выставке «Productronica'2007».

Системы могут быть укомплектованы и другими модификациями модулей нанесения:

- SC-104 и SC-105 — циркуляционные модули;
- SC-204 и SC-205 — нециркуляционные модули;
- SC-300 — модуль нанесения с возможностью закручивания струи.



Рис. 1. Система селективного нанесения влагозащитных покрытий SL-940E



Рис. 2. Модуль нанесения SC-400

Для нанесения лакокрасочных материалов, требующих подогрева, используются циркуляционные модули. Возможна реализация различных режимов нанесения: режим струи, режим закрученной струи и режим распыления. Режим струи применяется, когда необходимо нанести покрытие в узкие места между компонентами или в непосредственной близости от непокрываемых зон. Режим закрученной струи используется при нанесении покрытий на печатные узлы с очень высокой плотностью монтажа. Режим распыления целесообразно применять при малой толщине покрытия и большом размере площади нанесения.

В самом распространенном модуле SC-205 используется струйное нанесение. Толщина одного слоя покрытия варьируется от 13 до 200 мкм. Наличие головки с пятью степенями свободы позволяет наносить покрытие на боковую поверхность компонентов и под ними. Повторяемость позиционирования привода — 25 мкм. Попробуйте с такой точностью приклеить пластырь или нанести латексный состав!

И в заключение следует сказать, что компания Asymtek продала в Европе уже более 1000 систем селективного нанесения влагозащитных покрытий [4]. В единичных экземплярах такие системы появились и в России.

Иной взгляд

Исторически сложилось так, что под влагозащитой понимают нанесение на поверхность печатного узла полимерного, чаще всего лакового, покрытия. (Хотя это далеко не так.) Поэтому под селективной влагозащитой понимают избирательное нанесение полимерного покрытия. Цель такой избирательности проста — на некоторых участках печатных узлов покрытия просто не должно быть.

Если же отвлечься от стереотипов, то проблему селективности влагозащиты можно сформулировать иначе. Под селективностью можно понимать реализацию различного уровня влагозащиты в разных местах печатной платы (печатного узла): выше там, где это очень нужно, и наоборот. Цель такой селективности гораздо масштабнее — обеспечить более высокий уровень влагозащиты, а следовательно, и надежности РЭА, при минимальных затратах.

Для военной или иной техники, которая эксплуатируется в очень жестких условиях, акцент можно сделать на надежность. В бытовой технике, изготавливаемой очень большими партиями, следует акцентировать внимание на минимизации затрат. В первом случае можно использовать избирательное повышение уровня надежности относительно среднего, во втором — избирательное понижение. Иному (нетрадиционному) взгляду на проблему селективности влагозащиты и будет посвящено продолжение этой статьи.

Некоторые варианты

Начнем с простого — как избирательно уменьшить уровень влагозащиты в том или ином месте печатной платы (печатного узла)? Диверсионный анализ говорит о том, что таких способов очень много. Но если ставить во главу угла сочетание надежности и низкой стоимости печатного узла, то выбор резко ограничивается.

На рис. 3 показан фрагмент печатной платы с влагозащитным покрытием.

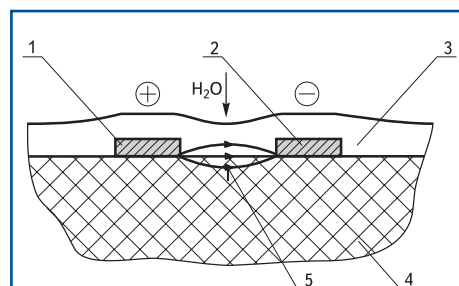


Рис. 3. Фрагмент печатной платы с влагозащитным покрытием:
1, 2 — проводники; 3 — полимерное покрытие;
4 — стеклотекстолит; 5 — токи утечки

Глядя на этот рисунок, можно сделать вывод, что влагостойкость печатного узла определяется многими факторами:

- толщиной и физическими свойствами влагозащитного покрытия;
- уровнем адгезии между влагозащитным покрытием и печатной платой;
- физическими свойствами стеклотекстолита;
- расстоянием между проводниками и др.

Другой вывод — максимальный уровень электрофизических свойств подложки печатной платы (стеклотекстолита) требуется только в поверхностном слое. Следовательно, если использовать стеклотекстолит с градиентно изменяющимся уровнем физических свойств (выше у поверхности), то можно существенно сэкономить практически без потерь в надежности. Уточню, что такое решение приемлемо преимущественно для одно- или двусторонних печатных плат. Такого рода стеклотекстолиты изготавливаются за рубежом. В наружных слоях стеклотекстолита СЕМ-1 в качестве наполнителя используется стеклоткань, а во внутренних — бумага. В стеклотекстолите СЕМ-4 различие физических свойств наполнителя внутри (стеклохолст) и снаружи (стеклоткань) менее существенно [5].

Реализовать различный уровень электрофизических свойств полимерного связующего по толщине стеклотекстолита с технической точки зрения значительно сложнее. Это требует существенной перестройки (усложнения) технологии изготовления. Однако такое решение можно довольно просто реализовать в многослойных печатных платах, варьируя химическую природу склеиваемых слоев. Хотя это решение правильное будет отнести уже к теме: как избирательно повысить уровень влагозащиты в том или ином месте печатной платы (печатного узла).

Избирательное повышение уровня влагозащиты можно реализовать и в пределах влагозащитного покрытия. Это решение лежит на поверхности в прямом и переносном смысле этого слова. В критических местах печатной платы (с наиболее плотной разводкой) можно наносить покрытие увеличенной толщины либо дополнительное покрытие с улучшенными электрофизическими свойствами. Традиционными методами нанесения влагозащитных покрытий сделать это довольно сложно. А вот с использованием оборудования по селективному нанесению влагозащитных покрытий фирмы Asymtek эта задача решается очень просто.

Селективное наполнение

Одно-, двусторонние печатные платы

Избирательное повышение уровня влагозащиты (самый привлекательный вариант) может быть получено и другими методами. Вернемся к рис. 3. Глядя на него, можно сделать еще один вывод. Влагозащитное покрытие и диэлектрическая подложка печатной платы вносят соизмеримый «вклад» в ненадежность печатного узла при эксплуатации в условиях воздействия влаги. Причем, чем жестче условия эксплуатации, тем больший «вклад» у подложки.

Подложка (стеклотекстолит) в отличие от влагозащитного полимерного покрытия является капиллярно-пористой структурой. Более того, своеобразная пористость есть даже непосредственно в полимерной матрице стеклотекстолита (дефекты надмолекулярной структуры). Эта пористость по разным причинам ухудшает диэлектрические свойства стеклотекстолита. Наличие пористости одновременно является и ресурсом для возможного улучшения этих свойств. Устранить пористость целиком не так просто, да и нужно ли? Селективное заполнение этой пористости с технико-экономической точки зрения — оптимальное решение. Именно такое решение стало основой технологии полимеризационного наполнения.

Полимеризационное наполнение (базовая технология) заключается в том, что жидкая композиция на основе бифункциональных мономеров (гликолевых диэфиров акриловых кислот) заполняет дефекты структуры подложки печатной платы, а затем при термообработке происходит полимеризация (отверждение) этой композиции непосредственно в подложке [6]. Таким способом осуществляется своеобразное наполнение одного полимера другим. При этом происходят благоприятные во всех отношениях изменения в поверхностном слое подложки: уменьшение пористости, водопоглощения, диффузионной проницаемости и, наоборот, увеличение уровня сопротивления изоляции.

В данном варианте осуществляется избирательное наполнение только поверхностного слоя стеклотекстолита, именно той зоны, которая несет максимальную ответственность за обеспечение влагостойкости печатных узлов, изготовленных на базе одно- и двусторонних печатных плат. Распределение полимера-наполнителя получается гра-

Таблица 1. Влияние полимеризационного наполнения на уровень сопротивления изоляции в цепях двусторонних печатных плат

Марка стеклотекстолита, номер печатной платы	Сопротивление изоляции, Ом						
	Цель 1	Цель 2	Цель 3	Цель 4	Цель 5	Цель 6	Цель 7
СТФ, 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, 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, 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, 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, 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	$5,5 \times 10^{11}$	$8,0 \times 10^{11}$	$1,4 \times 10^{11}$	$3,0 \times 10^{11}$	$2,5 \times 10^{11}$	$4,2 \times 10^{10}$	$2,5 \times 10^{10}$

Примечание. Измерения проводились тераометром Е6-13А в нормальных условиях при испытательном напряжении 10 В.

диентное: больше у поверхности, меньше в объеме (рис. 4).

Инструментальные исследования показали, что полимеризационное наполнение не ограничивается только «механическим» заполнением «пограничной» пористости (на границе раздела стеклоткань — полимерная матрица). В дополнение к этому улучшаются электрофизические свойства полимерной матрицы стеклотекстолита. Этот несколько неожиданный эффект объясняется образованием трехмерных взаимопроникающих полимерных сеток полимера-наполнителя и полимерной матрицы (чаще всего эпоксидной смолы).

В таблице 1 приведены некоторые результаты испытаний, свидетельствующие об эффективности полимеризационного наполнения в двусторонних печатных платах.

Влагозащитные покрытия

Базовая технология полимеризационного наполнения, «усиливая» поверхностный слой стеклотекстолита и, вследствие этого, уменьшая токовые утечки через этот слой, уже в какой-то степени решает проблему повышения влагостойкости. Кардинально решить эту проблему могут два других способа влагозащиты, основанных также на полимеризационном наполнении [7, 8]. Эти способы позволяют реализовать еще и селективное наполнение влагозащитных покрытий.

Распределение полимера-наполнителя по толщине печатного узла в способах 1 и 2 показано на рис. 5.

Способ 1 может быть реализован следующим образом. Заполнение дефектов структуры стеклотекстолита полимеризационно-спо-

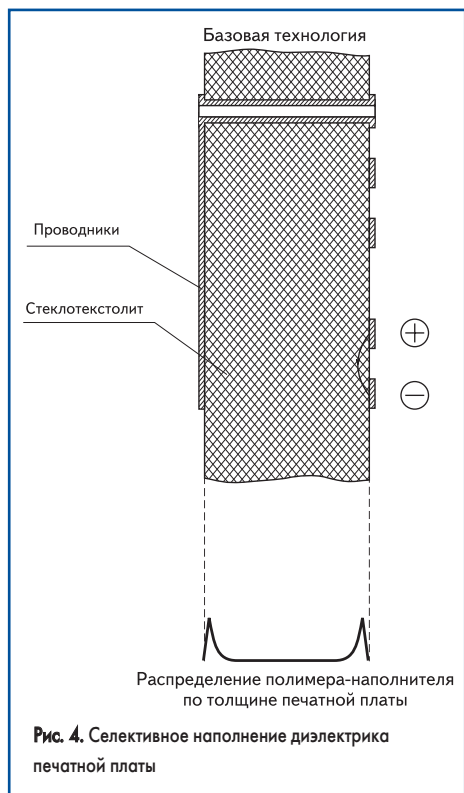


Рис. 4. Селективное наполнение диэлектрика печатной платы

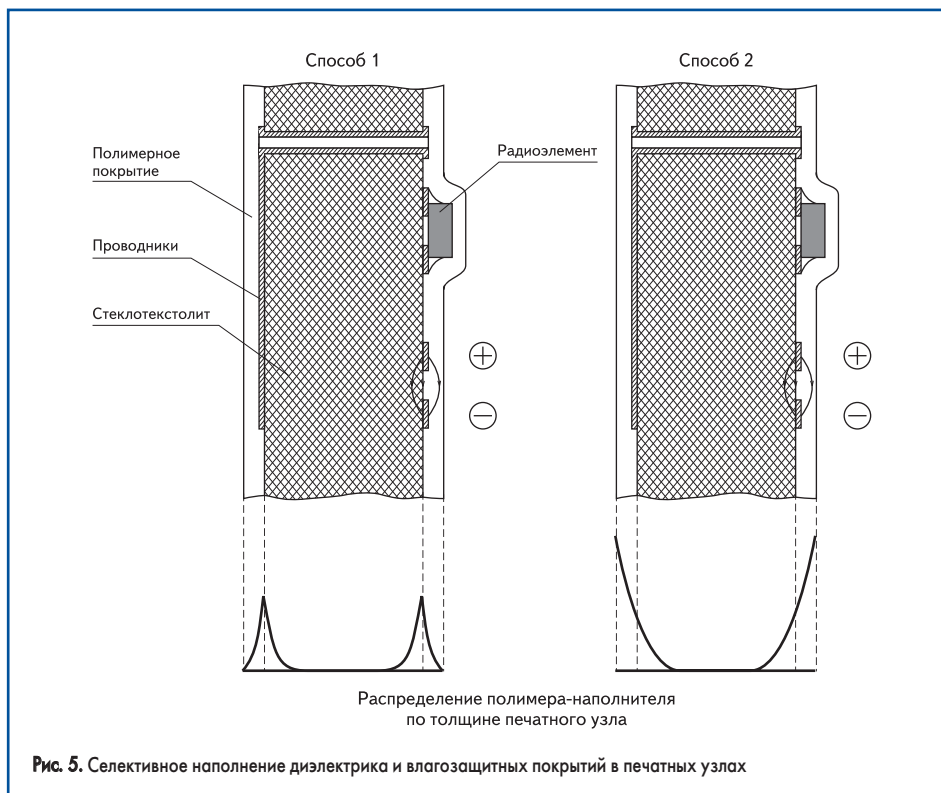


Рис. 5. Селективное наполнение диэлектрика и влагозащитных покрытий в печатных узлах

собной (жидкой) композицией осуществляется так же, как и в базовой технологии. Далее на поверхность печатной платы (печатного узла) наносят лак, или ламинат, или даже компаунд. Спустя некоторое время проводится термообработка печатной платы (печатного узла). При осуществлении этого способа композиция проникает не только в объем подложки печатной платы, но и в прилегающий к поверхности подложки материал покрытия. При термообработке происходит последовательное или совместное отверждение материала покрытия и композиции в зоне, прилегающей к подложке печатной платы.

Поскольку композиция одновременно полимеризуется и в объеме подложки, и в объеме покрытия, а полимеризация происходит с образованием трехмерной полимерной сетки, подложка и полимерное покрытие в дополнение ко всему связываются в единое целое. Дополнительный эффект — повышение влагостойкости из-за резкого снижения токовых утечек по границе раздела: подложка печатной платы — влагозащитное покрытие. Граница раздела как таковая в данном случае просто исчезает.

Способ 2 отличается тем, что на печатной плате сначала в полном объеме реализуют влагозащитное покрытие (нанесение + отверждение). Далее полимеризационное наполнение осуществляют так же, как и в базовой технологии. Отличия лишь в режимах его осуществления. На финише, так же как и в способе 1, композиция полимеризуется одновременно в полимерном покрытии и в подложке, связывая их своей трехмерной полимерной сеткой в единое целое. Отличие — иной профиль селективного наполнения подложки и влагозащитного покрытия.

Многослойные печатные платы

Практика показывает, что даже на стадии контроля примерно у 7% многослойных печатных плат (крупногабаритных — 20%) обнаруживается недостаточный уровень сопротивления изоляции или даже короткие замыкания [5]. Почему?

На рис. 6 приведен фрагмент типичной конструкции многослойной печатной платы.

Питающие слои конструктивно выполнены в виде перфорированных листов. Через

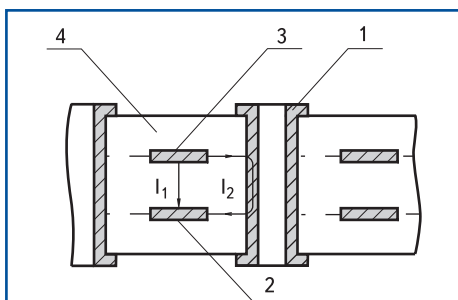


Рис. 6. Фрагмент конструкции многослойной печатной платы: 1 — металлизированное отверстие, пронизывающее слои «земля-питание»; 2 — слой «земли»; 3 — слой питания; 4 — диэлектрическое основание; I_1 и I_2 — токи утечки

многочисленные отверстия этих слоев проходят металлизированные переходы. Количество таких переходов измеряется тысячами и даже десятками тысяч. Токовые утечки между питающими слоями («земля» и питание) возможны либо напрямую через объем диэлектрика (I_1), либо обходным путем: кольцевой зазор — металлизированный столбик — кольцевой зазор (I_2). Токовые утечки (I_1), как правило, незначительны. Они определяются удельным объемным сопротивлением стеклотекстолита в направлении, перпендикулярном плоскости листа, которое имеет достаточно высокий уровень. Чего, к сожалению, нельзя сказать о сопротивлении изоляции того же стеклотекстолита вдоль слоев стеклоткани. Влияние этих участков на общее сопротивление изоляции в питающих цепях значительно: $I_2 \gg I_1$.

При очень большом количестве таких участков потенциальной ненадежности существенную роль начинает играть «принцип слабого звена». Кроме того, с увеличением степени интеграции печатных плат (реалии сегодняшнего дня) зазоры между проводящими слоями и пронизывающими их металлизированными пистонами становятся все меньше и меньше... В работе [9] приведены результаты испытаний двадцатислойных предельно больших печатных плат (545×465 мм) с предельно большим числом переходных отверстий (до 37 828) и с очень малыми изоляционными зазорами (0,1 мм). Оказалось, что даже в нормальных условиях сопротивление изоляции в цепях «земля-питание» таких печатных плат составляет 10^8 – 10^9 Ом (ниже требований нормативно-технической документации [10] при испытаниях на влагостойкость!). Более того, при изменении относительной влажности воздуха в пределах 45–80% (нормальные условия) такие печатные платы словно «дышат». Сопротивление изоляции в их цепях изменяется на 3–4 порядка.

Причин образования участков потенциальной ненадежности, как это обычно бывает в технике, очень много. И все-таки первопричина — это увеличенное (примерно на порядок) водопоглощение стеклотекстолита вдоль слоев стеклоткани. Кроме того, наличие трех различных материалов (медь, стекло, эпоксидная смола) с различными оптимальными режимами сверления и склонность слоистых пластиков к расслоениям способствуют появлению в стенках отверстий микро- и макрорасслоений. Результат — дополнительное увеличение водопоглощения и загрязнение диэлектрика в кольцевых зонах вокруг металлизированных столбиков потенциально опасными ионогенными примесями.

Устранить первопричину (уйти от стеклотекстолита) из-за очень удачного сочетания его технико-экономических характеристик в ближайшее время вряд ли удастся. По целому ряду причин использовать полимер для наполнения всего объема диэлектрической подложки многослойной печатной платы (идеальный результат) также нецелесообразно. На помощь вновь может прийти селективная влагозащита — селективное наполнение толь-

ко потенциально опасных кольцевых зон вокруг металлизированных переходов.

Селективное наполнение этих зон можно реализовать после операции сверления (до проведения химической и гальванической металлизации отверстий). Более того, реализовать такую технологию можно гораздо проще, чем базовую, поскольку диффузионная проницаемость стеклотекстолита вдоль слоев стеклоткани значительно выше. Если стеклотекстолит лучше поглощает воду, значит, лучше поглощает и мономер. Мономер идет по тому же пути, что и влага. Отличие лишь в том, что влага приводит к отказам печатных плат, а мономер после отверждения (полимеризации) перекрывает этот путь. Следует отметить, что даже в пределах селективно защищаемой зоны наполнение осуществляется избирательно. Где «хуже» стеклотекстолит — там и уровень дополнительной защиты будет выше. Оказалось, что при проведении полимеризационного наполнения таким способом можно получить еще и дополнительный эффект — исключить или значительно уменьшить появление дефектов печатных плат в виде непокрытых участков (разрывов) в металлизированных пистонах [2].

И, наконец, селективное наполнение в многослойных печатных платах может быть осуществлено не только в плоскости листа, но и в перпендикулярном ему направлении. Дело в том, что многослойная печатная плата, по сути дела, является совокупностью множества одно- и двусторонних печатных плат. Следовательно... Думаю, вы и сами можете домыслить, как реализовать иные варианты полимеризационного наполнения без подсказки автора.

Рельефные печатные платы

Рельефная печатная плата (рис. 7) представляет собой диэлектрическое основание, в которое углублены медные проводники и сквозные металлизированные отверстия для монтажа радиоэлементов и соединения проводников на двух сторонах печатной платы [11, 12]. Медные проводники выполнены в виде металлизированных канавок. Канавки и большая часть отверстий заполняются припоем. Расположение проводников в углублениях позволяет при том же сечении проводника делать его более узким. Диаметр переходных металлизированных отверстий не превышает ширины проводника. При этом контактные площадки вокруг переходных от-

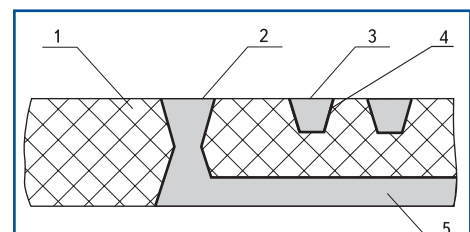


Рис. 7. Фрагмент конструкции рельефной печатной платы: 1 — диэлектрическое основание; 2 — сквозное металлизированное отверстие; 3 — проводник; 4 — медь; 5 — припой

Таблица 2. Полимеризационное наполнение рельефных печатных плат. Результаты испытаний

№ печатной платы	№ цепи	Сопротивление изоляции, МОм			
		в нормальных условиях		после испытаний на влагостойкость	
		без наполнения	с наполнением	без наполнения	
1	41-225	Во всех цепях от $0,4 \times 10^{-6}$ до $0,6 \times 10^{-6}$	150	Во всех цепях от $0,4 \times 10^{-6}$ до $0,6 \times 10^{-6}$	120
	61-228		Более 10 000		Более 10 000
	1-230		Более 10 000		Более 10 000
	11-232		9000		70
	27-250		Более 10 000		1000
	36-269		Более 10 000		170
	39-271		Более 10 000		1000
	272-259		Более 10 000		Более 10 000
	242-261		Более 10 000		9000
2	41-225	В цепи 1-230 300, в остальных цепях от $0,4 \times 10^{-6}$ до $0,6 \times 10^{-6}$	Более 10 000	Во всех цепях от $0,4 \times 10^{-6}$ до $0,6 \times 10^{-6}$	80
	61-228		Более 10 000		Более 10 000
	1-230		Более 10 000		2000
	11-232		Более 10 000		Более 10 000
	27-250		Более 10 000		Более 10 000
	36-269		Более 10 000		Более 10 000
	39-271		Более 10 000		3000
	272-259		2000		1200
	242-261		Более 10 000		5000
3	41-225		Более 10 000		Более 10 000
	61-228		Более 10 000		2000
	1-230		Более 10 000		1600
	11-232		Более 10 000		8000
	27-250		Более 10 000		8000
	36-269		Более 10 000		8000
	39-271		Более 10 000		1600
	272-259		Более 10 000		1200
	242-261		Более 10 000		1000
4	41-225		Более 10 000		1200
	61-228		Более 10 000		800
	1-230		Более 10 000		800
	11-232		Более 10 000		1200
	27-250		Более 10 000		2000
	36-269		Более 10 000		2000
	39-271		Более 10 000		900
	272-259		Более 10 000		1000
	242-261		Более 10 000		500

Примечания:

1. Условия испытаний на влагостойкость: температура 25 °С, относительная влажность воздуха 95%, время 1 ч.
2. В печатных платах № 1, 2 полимеризационное наполнение проводилось в готовой печатной плате.
3. В печатных платах № 3, 4 полимеризационное наполнение проводилось на стадии, предшествующей формированию токопроводящего рисунка.

верстий отсутствуют. Это позволяет резко повысить плотность печатного монтажа.

Рельефные печатные платы успешно эксплуатируются в космической аппаратуре. Осуществляются попытки (не всегда удачные) использовать такие платы и для ответственных изделий, предназначенных для эксплуатации в гораздо более жестких условиях и, в первую очередь, в условиях длительного воздействия высокой влажности.

В России получили распространение рельефные печатные платы, в которых диэлектрическим основанием является стеклотекстолит, а канавки формируются методом фрезерования. Поскольку при фрезеровании канавок вскрывается (и частично нарушается) капиллярно-пористая структура слоистого пластика, а слои стеклоткани сориентированы преимущественно вдоль поверхности листа, то токовые утечки между углубленными проводниками через объем диэлектрической подложки значительно превышают таковые, происходящие по по-

верхности. Проблема та же самая, что и в питающих цепях многослойных печатных плат. Но из-за большой протяженности параллельных, близко расположенных проводников в рельефных печатных платах эта проблема проявляется еще острее.

В таблице 2 приведены результаты испытаний рельефных печатных плат, изготовленных с использованием полимеризационного наполнения [13].

Для наполнения печатных плат № 1 и № 2 (заведомо бракованных по уровню сопротивления изоляции) использовалась базовая технология. То есть использовалось селективное градиентное наполнение поверхностного слоя диэлектрика. И оно оказалось очень эффективным.

Но есть ли смысл сначала доводить печатную плату до состояния, близкого к короткому замыканию, а затем пытаться «вытащить» ее? Правильнее будет проводить полимеризационное наполнение еще более избиратель-

но — сementировать капиллярно-пористую структуру стеклотекстолита между проводниками сразу же после формирования канавок и переходных отверстий в подложке печатной платы. Результаты испытаний эффективности такого способа [14] приведены в той же таблице (печатные платы № 3 и № 4).

Селективная защита: маски

Необходимость использования на печатных платах защитных паяльных масок возникла в связи с внедрением групповой пайки радиоэлементов. Современные паяльные маски практически безболезненно переносят кратковременное воздействие высокой температуры, а уровень их электрофизических свойств остается достаточным для последующего использования в качестве влагозащитного покрытия.

Паяльная маска покрывает не всю поверхность печатной платы. То есть формально можно сказать, что она также защищает поверхность печатной платы селективно. К сожалению, желаемый принцип селективной защиты «выше там, где это очень нужно, и наоборот» в данном случае не реализуется. Кроме того, толщина защитной маски недостаточна для обеспечения гарантированного уровня влагозащиты при эксплуатации изделий в жестких условиях. Для жестких условий, как правило, необходимо нанесение дополнительного покрытия.

Печатные платы с паяльной маской имеют еще один недостаток: открытые торцы. Водопоглощение стеклотекстолита через торцевую поверхность намного выше, чем через плоскость листа (капиллярный эффект). В печатных платах небольшого размера эти величины в абсолютном значении даже соизмеримы. Принцип селективной защиты «выше там, где это нужно, и наоборот» в данном случае может быть реализован опять же с использованием полимеризационного наполнения. Подтверждение эффективности этого способа приведено в таблице 3.

Влагозащитное покрытие в виде защитной паяльной маски получается само собой. В некоторых случаях (преимущественно в многослойных печатных платах) сами собой могут быть получены гораздо более эффективные по своим защитным свойствам маски. Сравним коэффициенты влагопроницаемости полимеров (основы паяльной маски) и металлов. Влагопроницаемость полимеров изменяется в довольно широком диапазоне

Таблица 3. Изменение водопоглощения стеклотекстолита при проведении полимеризационного наполнения

Марка стеклотекстолита	Полимеризационное наполнение	Водопоглощение, %	
		по ГОСТ 4650-80 (с защитой торцов)	без защиты торцов
СФ (Россия)	Нет	—	0,19
	Есть	—	0,13
FR-4 (Швеция)	Нет	—	0,13
	Есть	—	0,11
FR-4 (Япония)	Нет	0,15	0,19
	Есть	0,13	0,16

$(0,01 \times 10^{-8} \dots 20 \times 10^{-8})$ г/см·ч·мм. рт. ст, а у металлов близка к нулю. Следовательно, лучший материал защитной маски — это металл.

Металл (медная фольга) уже находится в стеклотекстолите. Большая часть базовых материалов — фольгированные стеклотекстолиты. В данном случае о слове «селективность» хотелось бы забыть, поскольку самым лучшим вариантом будет защита всей поверхности многослойной печатной платы металлической «броней». Но сделать так можно лишь в редких случаях: элементная база отсутствует (коммутационная печатная плата) или радиоэлементы располагаются внутри диэлектрического основания печатной платы.

Элементная база уже начинает проникать внутрь печатных плат: встраиваемые кристаллы микросхем, сенсорные датчики, микродатчики магнитного потока. Некоторые элементы электрических схем (индуктивности, емкости, сопротивления) изготавливаются методами печати непосредственно в процессе изготовления печатных плат [15–17]. В большинстве же случаев «влагозащита металлом» может быть применена только селективно. И реализация принципа «выше там, где это нужно, и наоборот» будет зависеть преимущественно от искусства разводки электрической схемы.

Металлическая «броня» может выполнить в многослойной печатной плате еще одну очень важную функцию — экрана. Если эту функцию сделать приоритетной, то возникает желание экранировать (металлизировать) еще и торцы печатных плат. Успешно реализовать такую технологию можно с использованием предварительного полимеризационного наполнения торцов. Металлизация стенок переходных отверстий и металлизация торцов печатных плат по сути дела мало чем отличаются друг от друга.

Вот примерно в таком плане была бы выполнена квалификационная работа на тему «Селективная влагозащита печатных узлов» автором этой статьи.

Литература

1. <http://www.asymtek.com>
2. Уразаев В. Г. Влагозащита печатных узлов. М.: Техносфера, 2006.
3. <http://www.springelectronics.ru/Multicore/covering.shtml>
4. <http://www.russianelectronics.ru/php/print.php?doc=263>
5. Медведев А. М. Печатные платы: конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005.
6. Уразаев В. Г., Сарбайцев А. А. Пат. РФ № 2052909. Способ влагозащиты печатных плат.
7. Уразаев В. Г. Пат. РФ № 2265976. Способ влагозащиты печатных плат.
8. Уразаев В. Г. Пат. РФ № 2265975. Способ влагозащиты печатных плат.
9. Галецкий Ф. П. Технология изготовления двадцатислойных печатных плат с проводниками 100 мкм // Экономика и производство. 2000. № 12.
10. ГОСТ 23752-79. Платы печатные. Общие технические условия.
11. http://www.pcbfab.ru/typepcb/typepcb_relief.html
12. Алферов А., Богданов А., Богданов Ю. Преимущества двусторонних рельефных печатных плат // Электронные компоненты. 2001. № 5.
13. Уразаев В. Г. Полимеризационное наполнение: новые технологии, контрафактные предложения // Компоненты и технологии. 2004. № 4.
14. Уразаев В. Г. Пат. РФ № 2280337. Способ изготовления рельефных печатных плат.
15. Медведев А. М. Летняя конференция-2005 Европейского института печатных схем // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 4.
16. <http://lmis2.epfl.ch/articles/pdt/16.pdf>
17. Ляйзинг Г., Штар Й. Тенденции развития печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 5.