

Влагозащита радиоэлектронной аппаратуры

Технология влагозащитного покрытия в электронной промышленности начала стремительно развиваться несколько десятилетий назад. Совершенствуются материалы, оборудование, операционные системы, но в любом случае, независимо от того, какой выбран материал или процесс покрытия, необходимо учитывать следующие вопросы: метод нанесения покрытия, условия эксплуатации изделия, ремонтпригодность, утилизация отходов, воздействие на окружающую среду, безопасность персонала, системная поддержка и обслуживание.

В этой сфере экономия производственных затрат может быть достигнута с помощью повышения эффективности системы и улучшения характеристик покрытия, что, в свою очередь, улучшает качество изделия.

Людмила ЧУЙКОВА
lchuiкова@sovtest.ru

Вопрос влагозащиты радиоэлектронной аппаратуры вставал всегда. Вода — самое распространенное вещество в природе, и за счет своей низкомолекулярной структуры способна проникать всюду. Имея уникально большую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 81$), она является хорошим растворителем. Вода — обязательный компонент почти всех технологических процессов, а диссоциация в воде считается основой большинства химических реакций.

Одна из проблем диэлектрических свойств подложки печатного узла — зависимость от влагосодержания. Влагозащитное покрытие должно выступать диффузионным барьером влаги, но если покрытие не способно создавать такой барьер, то влага начнет оказывать действие на поверхностный слой стеклотекстолита, и тогда будут определяться свойства диэлектрического основания. Известно, что стеклотекстолит и другие композиционные материалы имеют дефектность структуры, особенно на границе раздела стекло — эпоксидная смола в виде капиллярной пористости, повышенного влагопоглощения, что ведет к снижению электроизоляционных свойств во влажной среде.

В свою очередь, влагозащитные покрытия должны обеспечивать защиту печатного узла от случайного замыкания проводников посторонними токопроводящими предметами и надежную работу электронных изделий в течение всего срока службы радиоэлектронной аппаратуры в жестких условиях эксплуатации при воздействии таких факторов, как:

- влага;
- агрессивные химикаты;
- соляной туман;
- температурные колебания (перепады температуры, приводящие к возникновению

механических напряжений, низкое атмосферное давление);

- механические факторы (вибрации, удары, линейные ускорения, акустические шумы);
- микробиологическая коррозия (органические образования — грибки, бактерии).

Чтобы быть эффективным и создавать требуемую защиту элементов, покрытие не должно содержать пустот, иметь достаточную толщину, должно быть нанесено достаточно равномерно. Известно, что печатная плата с установленными компонентами представляет собой комбинацию различных материалов: стекловолокно, пластмасса, керамика, металлы, фоторезисторы. Технологические компоненты имеют различные химическое сопротивление, термический коэффициент и другие свойства, и задача состоит в том, чтобы обеспечить одинаково эффективную защиту всем этим материалам.

Влагозащитные покрытия

В настоящее время одним из главных вопросов при выборе защитного материала и методов его нанесения является вопрос о защите окружающей среды, и, согласно требованиям современного законодательства, производители несут ответственность за разработку покрытий и стремятся к созданию безвредных для окружающей среды систем нанесения и обработки покрытия. Эффективность систем покрытия значительно повысилась после вступления в силу жестких нормативов, касающихся утилизации отходов и повышения стоимости материалов.

Из огромного выбора представленных влагозащитных материалов выделяются пять основных групп:

- акриловые;
- уретановые;

- силиконовые;
- эпоксидные;
- параксилленовые (париленовые).

Они включают как материалы на основе растворителей, так и не содержащие растворителей (так называемые стопроцентно твердые покрытия).

Сегодня существуют различные методы полимеризации влагозащитных покрытий. Материалы, не содержащие растворителей, могут полимеризоваться с использованием ультрафиолетовой энергии, а также подвергаться термической обработке, в некоторых материалах проводится удаление растворителя, другие (с основой на растворителе и полиуретановые без растворителя, а также силиконовые) реагируют на влагу, содержащуюся в воздухе.

Материалы, не содержащие растворителей и обрабатываемые ультрафиолетом, являются в основном невоспламеняемыми, процесс обработки проходит относительно быстро по сравнению с материалами на основе растворителей. Например, силиконовые покрытия с термической обработкой и покрытия на основе растворителей могут потребовать специальной очистки воздуха и паров, относительно длинных обрабатывающих туннелей, высоких энергозатрат, они снижают скорость производства. Покрывающие материалы с ультрафиолетовой обработкой, а также силиконовые требуют применения меньшего по размерам оборудования и меньших затрат энергии по сравнению с материалами на основе растворителей с термической обработкой.

Акриловые покрытия (AR)

Материалы на основе акрила отличаются хорошей прочностью, стойкостью к нагреву, влагостойкостью, высокими диэлектри-

ческими характеристиками. Применяются там, где требуются хорошие электроизоляционные свойства. По технологии рекомендуется двух- либо трехслойное нанесение покрытия.

Полиакриловые материалы на основе растворов термопластичных полимеров служат для приготовления лаков и клея. В основном это покрытия естественной сушки. Полиакриловые лаки на основе терморезистивных полимеров (акриловые полимеры и сополимеры) обладают высокой атмосферо- и светостойкостью, ударопрочностью, эластичны, имеют высокую адгезию. Служат для изготовления паяльных масок с последующим ультрафиолетовым отверждением.

Акриловые покрытия в виде паяльных масок и фоторезисторных пленок хорошо освоены и широко применяются за рубежом. Диапазон температур применения акриловых материалов $-60...+135$ °С.

Покрытия ремонтпригодны, легко удаляются нагреванием до 150 °С. Однако они имеют избирательную химическую стойкость и требуют для разных условий и изделий разное время сушки на воздухе, имеют большую усадку при испарении растворителя.

Уретановые покрытия (UR)

Полиуретановые покрытия применяются там, где требуется низкая влаго- и газопроницаемость и сопротивление истиранию. Имеют хорошую химическую стойкость, атмосферостойкость и высокие температурные показатели.

Наибольшее применение получили гетероцепные полимеры, содержащие незамещенные или замещенные уретановые группы — полиуретаны.

Диапазон рабочих температур уретановых покрытий $-60...+120$ °С.

Покрытия ремонтпригодны. Тонкие покрытия можно паять насквозь очень горячим (420 °С) паяльником или удалять механически. Поддаются восстановлению после ремонта. Имеют тусклый внешний вид.

Силиконовые покрытия (SR)

Силиконовые покрытия или кремнийорганические полимеры имеют высокую термо-, свето- и атмосферостойкость, высокую гидрофобность и электрические свойства, обеспечивают высокие температурные, диэлектрические показатели. Но в ходе тестирования режима работы в условно влажной среде показывают результат в 10–20 раз хуже по сравнению с другими покрытиями. Один из серьезных недостатков этого покрытия — относительно большой коэффициент температурного линейного расширения, который может приводить к отрыву компонентов и проводников.

Эпоксидные покрытия (ER)

Материалы на основе эпоксидных смол давно получили самое широкое применение.

Таблица 1. Сравнение свойств покрытий

Свойства	Силиконовые	Акриловые	Уретановые
Время отверждения, мин	60	10	15
Условия отверждения	24 ч при КТ, 30 мин при 80 °С	24 ч при КТ, 30 мин при 80 °С	20 ч при 90 °С
Площадь покрытия, м ² /л	6	11	7,5
Рабочие температуры	$-65...+200$	$-60...+130$	$-70...+120$
ТКЛР (коэф. линейного расширения)	$7,5 \times 10^{-5}$	16×10^{-5}	15×10^{-5}
Диэлектрическая проницаемость	2,5	2,5	3,6
Тангенс угла потерь	0,01	0,01	0,03
Влагостойкость	5×10^{10}	6×10^{10}	$1,5 \times 10^{10}$

Таблица 2. График термической обработки

Покрытие	Основное преимущество	Диапазон вязкости	Механизм обработки
Акриловое	Простота в удалении/ремонте/переработке	200–1000* cps	Выпаривание растворителя
Полиуретановое	Прочное, износостойкое, хорошие диэлектрические свойства и химическое сопротивление	35–5000* cps	Выпаривание растворителя Химическая обработка Влажная обработка УФ-обработка
Силиконовое	Гибкое, обладает широким температурным диапазоном обработки, гасит вибрацию, выдерживает термические циклы, гидрофобное	60–50 000* cps	Термическая обработка УФ-обработка Выпаривание растворителя
Эпоксидное	Очень прочное, отличный диэлектрик и электроизолятор, отличные защитные свойства, отличное сопротивление химическим веществам и влаге	75–500* cps	Термическая обработка УФ-обработка

* В американской системе абсолютная вязкость выражается в cps (сантипуазах (сПуаз). Единица СИ абсолютной вязкости — миллипаскаль-секунда (мПа·с), где 1 сПуаз = 1 мПа·с.

Они обладают хорошей адгезией, высокой твердостью, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами. Используются в заливочных компаундах и в качестве полимерной основы влагозащитных покрытий. Эпоксидная смола или олигомер под действием отвердителей превращается в полимер.

Процесс отверждения полимеров сопровождается объемными усадками и возникновением усадочных напряжений. Эпоксидные смолы обладают минимальной химической усадкой.

Признано, что двухслойное или многослойное покрытие эффективнее однослойного той же толщины, так как часть дефектов (поры, раковины) первого слоя перекрываются при нанесении второго слоя. Недостаток — появление «пузырьковой сыпи».

Диапазон рабочих температур этих покрытий $-60...+200$ °С.

Покрытие ремонтпригодно. Тонкие покрытия можно паять насквозь, легко удалять механически. Поддается восстановлению после ремонта за счет процессов холодного отверждения. Имеет хороший внешний вид.

В таблице 1 дано сравнение некоторых свойств разных видов покрытий.

График термической обработки (табл. 2) является функцией температуры и времени. Например, типичная термическая обработка требует 10-минутной сушки при 100 °С или 30–40-минутной сушки при 65 °С.

Мы рассмотрели четыре основные группы покрытий. В настоящее время большое внимание, особенно в микроэлектронике, уделяется париленовым покрытиям.

Полипараксилилен (парилен) (XY)

Высокопрочное качественное покрытие с хорошей адгезией, устойчивостью к раство-

рителям и хорошими электрическими свойствами, на ощупь напоминает полиэтиленовую пленку. Пришло в Россию из военной промышленности США. Производство парилена — это высокотехнологичный процесс без применения растворителей и катализаторов. Исходным веществом для получения полипараксилиленового покрытия служат полимеры в виде сухого гранулированного белого порошка (рис. 1).

Получаемое покрытие покрывает все поверхности слоем одинаковой толщины, в том

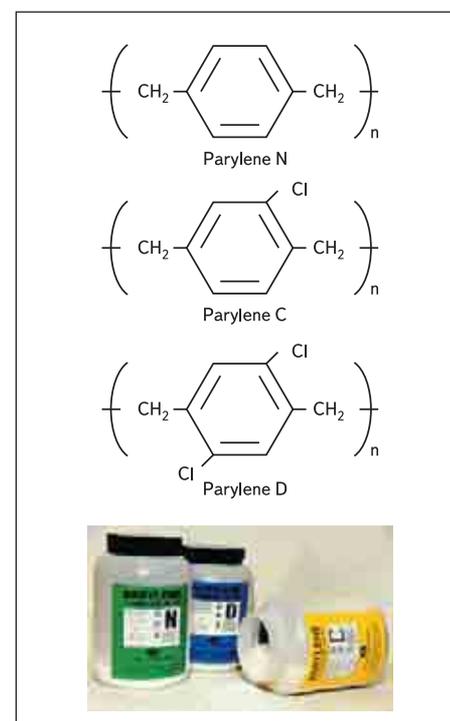


Рис. 1. Исходное вещество полипараксилиленового покрытия

числе тонкие зазоры, полости и «пазухи» при печатном монтаже. Полипараксилилен применим в микроэлектронике, оптике, при капсулировании веществ и материалов, чувствительных к влаге, когда требуется высокое качество и минимальная масса покрытия. Одно из его преимуществ в том, что благодаря отсутствию внутренних напряжений и усадки не происходит обрыва проводников.

Но покрытие не ремонтпригодно и применяется там, где требуется идеальное сплошное и равномерное покрытие.

Ремонт невозможен — его сдирают шкуркой.

Диапазон рабочих температур полипараксилилена $-70...+150$ °С.

Условия для нанесения влагозащитного покрытия

Одно из требований к влагозащитному покрытию состоит в том, что оно должно быть сплошным, не допускается попадание под покрытие влаги и других веществ, которые могут вызвать коррозию. Например, нанесение лаков следует проводить в условиях сухого атмосферного воздуха (до 60% влажности). Влага из воздуха, захваченная сырым лаком, вызывает гидролиз полимера или образование гидратов аминов, входящих в эпоксидную смолу, что приводит к их выделению на поверхности в виде помутнений или белесоватости.

Что касается условий нанесения влагозащитных покрытий, то нормативно-технические документы предъявляют ряд требований к уровню обеспечения чистоты помещений, вакуумной гигиены, в частности: максимальное устранение пыли, наличие приточно-вытяжной вентиляции и обязательная влажная уборка с антистатиком.

А самое важное условие нанесения качественного покрытия — очистка поверхности печатного узла. Поверхность должна быть полностью очищена от флюсовых остатков (рис. 2) и других ионных загрязнений, которые могут попасть под покрытие и снизить качественные характеристики, а это в результате приведет к полному отказу в работе.

Для выполнения этого требования необходима очистка поверхностей от загрязнений. Стандарт IPC-TM-650 «Test Methods



Рис. 2. Недопустимые остатки флюса

Таблица 3. Характеристики основных методов нанесения покрытия

Свойства	Кисть	Погружение	Напыление	Селективное	Вакуумное
Улучшение адгезионных показателей	Никогда	Никогда	Редко	Никогда	Общее
Эффективность переноса	Умеренная	Низкая	Низкая	Отличная	Умеренная
Контроль толщины	Низкий	Низкий	Умеренный	Хороший	Отличный
Линейность толщины	Низкая	Низкая	Умеренная	Умеренная	Отличная
Образование перемычек	Да	Да	Да	Да	Нет
Маскирование	Требуется	Требуется	Требуется	Минимальное или не требуется	Требуется
Возможность нанесения	Двустороннего	Двустороннего	Одностороннего*	Одностороннего*	Двустороннего
Покрытие краев/точечное	Низкое	Низкое	Низкое	Низкое	Отличное
Пустоты/отверстия	Возможны	Возможны	Возможны	Маловероятны	Нет
Экологические показатели	Низкие	Хорошие	Умеренные	Очень хорошие	Отличные

*Двустороннее нанесение покрытия возможно при наличии дополнительного оборудования.

Manual» (Руководство по тестовым методикам) в тестовом методе 2.3.27 устанавливает допустимые остатки флюса на поверхности печатных узлов в зависимости от класса производства:

- класс 1 — не более 200 мкг/см²;
- класс 2 — не более 100 мкг/см²;
- класс 3 — не более 40 мкг/см².

Методы нанесения влагозащитного покрытия

Существует несколько методов нанесения защитных покрытий (табл. 3), зависящих от вида покрытия и от того, на какую поверхность покрытие наносится.

Кисть

Процесс нанесения защитного покрытия кистью считается самым простым, легким и дешевым. В основном применяется для единичного производства небольших партий печатных узлов, для одностороннего или двустороннего нанесения покрытия.

Материалы в большинстве основаны на растворителях. Сушка изделия производится на воздухе. Однородность и толщина нанесения покрытия зависит от качества работы исполнителя.

Погружение

Процесс нанесения покрытия путем погружения применим, когда требуется полное покрытие печатного узла с простыми требованиями к маскированию. Так, места контактов, соединений, переключений и т. п. должны быть маскированы перед нанесением покрытия и демаскированы после обработки. Как правило, начало технологического цикла — это ручная загрузка и выгрузка печатных узлов, затем конвейерная система погружения транспортирует печатные узлы в вертикальном положении на проволочных крючках или в специальных быстростъемных приспособлениях в резервуар с покрывным материалом. Далее следует медленное поднятие и стекание перед ультрафиолетовой или термической обработкой. Покрытие погружением имеет большую толщину в нижней части печатного узла из-за напыла при предварительной обработке.

Напыление

Процесс конвейерной обработки печатных узлов при использовании фиксированных или подвижных головок в массовом производстве дает хорошее ровное покрытие с более низким расходом материала по сравнению с методом погружения.

Простые системы используют одну или несколько головок, которые автоматически включаются при прохождении печатного узла по конвейеру. При двухстороннем покрытии напылением предусмотрен инверторный механизм подачи. При нанесении покрытия способом напыления требуется маскирование и демаскирование.

Селективное нанесение

Современная система автоматизированного селективного нанесения влагозащитных покрытий (рис. 3), оснащенная сложными механизмами и компьютерным управлением, обеспечивает высокую скорость и точность нанесения. Система селективного покрытия использует стандартные покрывающие материалы, включая материалы на основе растворителей и стопроцентно твердые материалы с вязкостью от 30 до 100 000 ср.

Оборудование для селективного нанесения может включать установки с несколькими головками и инверторы для нанесения двухстороннего покрытия. Сокращение потребления используемого материала за счет точного нанесения покрытия на выбранные участки исключает необходимость применения маскирования и демаскирования схем, тем самым

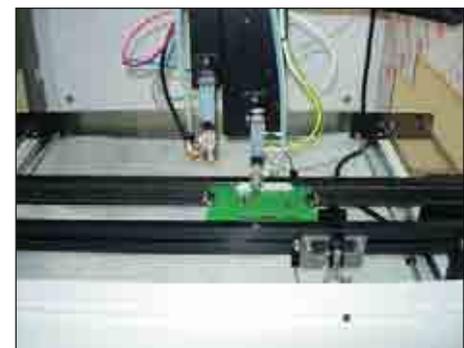


Рис. 3. Селективное нанесение влагозащитных покрытий

уменьшая затраты. Есть возможность создания программы прохождения напыляющей головки и точек нанесения покрытия для любого типа печатных узлов. Программы сохраняются и могут быть отредактированы и использованы для дальнейшей работы.

Дозирующее устройство является одним из самых важных элементов системы нанесения покрытия как для точности нанесения, так и для обеспечения выпуска качественной продукции. Большая часть видов селективных покрытий может быть нанесена с помощью стандартной тонкодисперсной напылительной головки, программируемой по осям X, Y, Z и по циклам включения и выключения. Более сложное покрытие вокруг отдельных компонентов, соединителей и других деталей платы может быть нанесено с помощью игольчатой насадки, которая монтируется к той же системе управления и программируется соответствующим образом.

Например, современные автоматические установки селективного покрытия SCS, производимые фирмой Specialty Coating Systems, США (рис. 4), обеспечивают работу с разными производственными партиями, имеющими от 10 и до более чем 14 000 компонентов и отдельных схем на печатном узле, позволяют получать эффективное покрытие больших площадей и точное нанесение покрытия на непокрытые участки. Точность нанесения покрытия $\pm 1/16$ дюйма. Размер покрываемых плат от 70×70 мм до 500×305 мм. Для работы



Рис. 4. Современные автоматические установки селективного покрытия SCS



Рис. 5. Производственная линия

на установке применяются различные влагозащитные материалы: одно- и многокомпонентные, в том числе и полиуретановые, имеющие вязкость от 50 до 2000 срз. Система обеспечивает нанесение влагозащитных материалов слоем 1,5 mil (мил — 1/1000 дюйма).

Система SCS оснащена интегрированным персональным компьютером, для программирования и работы используется интерфейс на основе Windows. Программа записывается для каждого печатного узла, хранится в файле, для защиты сохраняется копия. При необходимости добавления компонентов на печатный узел или работы с аналогичными узлами программа может редактироваться, исключая повторение всего процесса программирования.

Благодаря встроенному конвейеру система действует как самостоятельная единица, но может быть легко интегрирована в производственную линию (рис. 5).

Вакуумное нанесение

Современным эффективным методом влагозащиты считается метод вакуумной пиролизной полимеризации. Покрытие, полученное осаждением газообразной среды, обеспечивает необходимую толщину покрытия по всей поверхности, включая вогнутые участки поверхности, отверстия, края, углы.

Технологический процесс получения и дальнейшего осаждения происходит в специальном реакторе и состоит из трех этапов: 1) сублимация: возгонка димера (ди-пара-ксилена), вакуум 1 мм рт. ст., температура 150 °С; 2) пиролиз: термическое разложение, вакуум 0,5 мм рт. ст., температура 680 °С; 3) диффузионный процесс осаждения полимера.

Диффузионный процесс осаждения получаемого полипараксилиленового покрытия на печатный узел из паровой фазы в виде тонкой инертной пленки с высокой степенью конформности происходит в условиях глубокого вакуума (вакуум 0,1 мм рт. ст.) и при температуре 25 °С. Процесс идет около 2 часов при скорости осаждения пленки 2–3,5 мкм/с.

Покрытие высокорезистентное к влаге, растворителям, химическим веществам и газам. Требуется тщательного маскирования, так как

газообразная природа оседающей пленки позволяет проникать в отверстия намного быстрее, чем при использовании жидкого покрывающего материала. Эта проникающая способность очень эффективна при обработке комплексных изделий и изделий с внутренними поверхностями, на которые должно быть нанесено покрытие через мелкие отверстия. Является очень хорошим покрытием для точных изделий, для катушек с диаметром провода 0,1 мм. Имея много достоинств, затрудняет защиту участков, не покрывающихся влагозащитным покрытием.

Отсутствие фазы обработки, выбросов и отходов при вакуумном нанесении покрытия обеспечивает хорошие экологические показатели.

Заключение

Современное производство делает большой шаг вперед в выборе современных методов нанесения влагозащитных покрытий. Открывается перспектива использования в технологии влагозащиты электронных сборок высокоинтеллектуального оборудования, интегрированного в электронную производственную линию. Эта интегрированная система нанесения покрытия обладает такими качествами, как точность, стабильность, производственная эффективность. В свою очередь, строгое соблюдение технологической дисциплины на всех этапах позволит получить экономически выгодный процесс нанесения влагозащитного покрытия и обеспечит идеальное производство покрытий. Кроме того, система должна обладать функциональной гибкостью для работы с широким диапазоном покрываемых материалов, включая наиболее современные химические материалы (стопроцентно твердые вещества, non-VOC), которые на сегодняшний день становятся все более востребованными по сравнению с обычными материалами на основе растворителей.

Экономическая система нанесения влагозащитного покрытия должна быть легко программируемой при изготовлении печатных плат различных размеров и конфигураций. При использовании программ система должна иметь возможность для простого перепрограммирования оператором без использования компьютерных языков.

Литература

1. Стандарт IPC-TM-650 «Test Methods Manual». Руководство по тестовым методикам.
2. Медведев А. М. Влагозащита электронных модулей // Материалы семинара. ИДТ. Москва, 28–29 ноября 2006 г.
3. Уразаев В. Г. Влагозащита печатных узлов. М.: Техносфера, 2006.
4. Ламар Янг (Lamar Young). Вопросы соотношения цены и качества при выборе систем селективного покрытия. Specialty Coating Systems.