

БЕССВИНЦОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО — КОМПОНЕНТЫ И ПОКРЫТИЯ

Армин Ран, Ph.D., проф., компания RahnTec Consultants (Канада)

Рольф Дием, руководитель отд. разработки, компания Seho (Германия)

К середине 2006 г. вся европейская электроника, несомненно, будет выпускаться без использования токсичных веществ, таких как, к примеру, свинец. Следовательно, до момента вступления в силу Директивы ЕС о снижении объемов использования опасных веществ (RoHS) производителям предстоит перестроить технологии. В данной статье рассматриваются проблемы, касающиеся электронных компонентов и их покрытий.

Почему компания Hewlett-Packard потребовала внесения исключений в Директиву ЕС? Она добивается того, чтобы для некоторых компонентов с малым шагом выводов (менее 0,65 мм) было разрешено содержание малых доз свинца. Компания обосновывает это тем, что 15%-содержание свинца предотвращает образование «усов». Предыстория вопроса такова: 19 мая 1998 г. в Северной Америке внезапно прекратили работу около 40 млн. пейджеров. Причиной этой катастрофы явился отказ спутника Galaxy 4 стоимостью 250 млн. долл. Проведенный анализ дефекта выявил возможную причину — образование металлического монокристалла, так называемого «уса», который вызвал короткое замыкание в цепи оборудования. Хотя электроника космического и военного назначения и не подпадает под действие директивы RoHS, ученые опасаются, что при существующем ценовом давлении компоненты, изготовленные по обычным технологиям, могут попасть в электронные блоки, к которым предъявляются высокие требования по надежности. Или хуже того, что производители вообще свернут выпуск всех комплектующих, содержащих свинец, и откроют тем самым обычным комплектующим дорогу в высокопроизводительные устройства. Поскольку многие производители комплектующих приняли решение об использовании в качестве покрытия выводов чистого олова, такие опасения не выглядят необоснованными.

В секторе бытовой электроники данная проблема выглядит не столь драматично. «Ус», образовавшийся между выводами элемента или контактными площадками, можно сбить путем легкого постукивания по электронному блоку, и оборудование заработает вновь. Либо ток, протекающий через «ус» во время

замыкания, может испарить его, и перерыв в работе окажется временным. А вот постучать по спутнику в космосе будет сложнее.

Вследствие потенциальных проблем технические условия на электронику NASA, военного назначения и аэрокосмической техники требуют не менее 3% свинца в материале покрытия контактов и выводов, чтобы предотвратить образование таких монокристаллов. Здесь нет противоречий с Директивой ЕС, поскольку указанные виды оборудования в ней даже не упоминаются. Чтобы внести полную ясность, заметим, что олово — только один из металлов, спонтанно образующих «усы». Это может происходить со многими другими металлами при «благоприятных» условиях [1]. При всей озабоченности производителей по поводу формирования «усов», удивительно, что для идентификации поверхностей, склонных к их образованию, не существует общепринятой процедуры тестирования. Еще более удивительным может оказаться тот факт, что несмотря на возможность возникновения различных видов «усов», единой системы их классификации не существует.

Участникам дискуссий и публикаций, кажется, доставляет удовольствие подчеркивать, что некоторые бессвинцовые припои практически не обнаруживают этот эффект при «легком» загрязнении свинцом. Возможно, предполагается, что на ожидаемый срок службы паяных соединений ничтожно малый процент содержания свинца не повлияет. И почти всегда отсутствует определение того, что же подразумевается под понятиями «слегка загрязнен» или «ничтожно малый процент содержания». Может, эти авторы пытаются «увести» потребителей от более дешевых альтернатив, как, например,

висмутсодержащие припои? В конце концов, хорошо известно, что висмутовые припои реагируют катастрофически даже на ничтожно малое содержание свинца. В одной из своих статей [2] Карл Силиг и Дэвид Сураски словно получают удовольствие, доказывая, что даже разрекламированный припой SnAg4.0Cu0.5 не воспринимает без неприятных последствий «ничтожно малое» количество свинца. Используя обычный тестовый носитель кристалла ASTM E606, в независимой лаборатории они получили результаты, приведенные в таблице 1 (10 тыс. циклов соответствует заключению «тест пройден»). Достаточен ли для конкретной продукции показатель в 1000 циклов — решать потребителю, и во многих случаях этого действительно достаточно, а следовательно, присутствием «некоторого количества» свинца можно пренебречь. С другой стороны, для некоторых компаний важно, чтобы их продукт прошел 13 400 циклов, а не 3252. Таким образом, мы обнаружили два противоположных мнения: первое — за полное отсутствие свинца на любых элементах, второе — за его наличие, по крайней мере, на выводах и разъемах.

Свинец на выводах — не единственная проблема комплектующих. Нужно четко различать «бессвинцовые» комплектующие, компоненты, удовлетворяющие требованиям Директивы RoHS, и компоненты, процесс монтажа которых требует нанесения тугоплавкого припоя. Несмотря на то, что индустрия комплектующих изделий уже в течение ряда лет занимается разработкой бессвинцовых элементов и компонентов, соответствующих требованиям RoHS, в настоящее время только 40% процентов производителей заявляют, что готовы удовлетворить заказы на бессвинцовые компоненты. Одной из проблем является более высокая максимальная температура оплавления в пиковой зоне печей. При пайке оплавлением большинство процессов рассчитано на использование температур в интервале 240...260°C. Многие компоненты придется разрабатывать заново, чтобы они могли выдержать такие «экстремальные» условия. В противном случае, термическое воздействие на внутренние части приборов приведет к немедленному выходу из строя.

ФИНИШНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Если не вдаваться глубоко, то изменение состава финишных покрытий компонентов представляется второстепенным вопросом. Более важными кажутся вопросы смачивания и защиты паяемых поверхностей. Однако в процессе пайки ничто не является второстепенным, и поскольку во время проведения этой технологической операции поверхность растворяется, по меньшей мере, частично, результат требует особого внимания. Осторожный читатель

сразу же вспомнит обо всех замечательных патентах, заявки на которые были поданы или уже получены. Многие из них ловко написаны и защищают не только определенные сплавы в качестве припоев (можно еще поспорить, будут ли они пригодны для применения в каждом конкретном случае), но и все покрытия и даже паяные соединения, в которых применяются эти запатентованные сплавы. Осталось посмотреть, распространит ли судья или эксперт действие закона на два-три паяных соединения в блоке, если остальные не посягают на пресловутый патент.

Гораздо больше важна надежность получаемых в результате паяных соединений. Скорость растворения металлов в SnAg-припое гораздо выше, чем, например, в традиционных эвтектических припоях SnPb. Удалось показать, что растворенные металлы диффундируют через все паяное соединение. Это оказывает действие даже на противоположную сторону соединения. Исключить это влияние невозможно, и поэтому при оценке надежности паяного соединения нужно учитывать влияние на финишные покрытия обеих поверхностей — элемента и печатной платы, особенно, если они различны [4].

СПЛАВЫ ОЛОВО-СЕРЕБРО И ОЛОВО-МЕДЬ КАК НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫЕ КАНДИДАТЫ

До сих пор наиболее распространенным являлся сплав олово-свинец с содержанием олова приблизительно от 80 до 90%. Наиболее вероятными кандидатами на роль бессвинцового сплава являются популярные сплавы олово-серебро и олово-медь. Но на их пути стоят два препятствия: с одной стороны, существует проблема совместимости технологических процессов с участием этих металлов, а с другой стороны — отмечается недостаток средств производства для нанесения этих покрытий в промышленных масштабах. Все, что остается на сегодняшний день — покрытия из чистого олова. Они совместимы с бессвинцовыми припоями и с процессом изготовления электронных компонентов. Тем не менее, несмотря на все заявления производителей, им присуща проблема образования «усов», которую пока не удалось преодолеть.

Таблица 1. Термические испытания сплава SnAg4.0Cu0.5 с добавками свинца

Припой	Наработка на отказ, количество циклов
SnAg4.0Cu0.5	13400
SnAg4.0Cu0.5 + 0.5Pb	6320
SnAg4.0Cu0.5 + 1.0Pb	3252

Применение бессвинцовых покрытий возможно, однако оно вызывает у производителей некоторое беспокойство. Добавление в сплав небольших доз определенных металлов, препятствующих образованию «усов», может улучшить свойства чисто оловянных поверхностей. Такими добавками являются золото и индий. Оба металла дороги, кроме того, у них есть и некоторые другие негативные показатели, касающиеся пайки. В 1989 г. компания Texas Instruments представила покрытие никель-палладий для своих микросхем. Несмотря на то, что к сентябрю 2000 г. было продано более 35 млрд. микросхем с таким покрытием, эта технология, в основном, не находила широкого применения. Семью годами позже Япония представила миру покрытие никель-палладий-золото, показавшее при тестировании улучшенные свойства смачивания. Оба перечисленных покрытия сейчас широко применяются в Японии, но, заметим, без связи с европейской директивой RoHS. При этом ни Европа, ни Северная Америка не уделили этим технологиям особого внимания. Постоянно ведутся эксперименты с добавками других металлов, поскольку все понимают, что применение чистого олова может породить проблемы. Чтобы уйти от дорогих и несколько проблемных золота или индия, производители пробовали добавлять небольшие количества висмута, меди и даже серебра. Покрытие компонентов триметаллическими сплавами оказалось трудным делом, и многие производители отказались от этой идеи. Одним из наиболее перспективных покрытий представляется сплав олово-висмут, используемый в Японии (Seiko Epson Group), к которому, по-видимому, проявляют интерес некоторые производители комплектующих в Европе.

ПОЛНОЕ СОБРАНИЕ ПОКРЫТИЙ

Сегодня на рынке предлагаются такие покрытия, как никель-палладий, никель-палладий-золото, олово, олово-висмут, олово-медь, олово-серебро, золото и серебро-платина. Многие другие сейчас разрабатываются в Азии. Поскольку производители комплектующих могут только гадать, какое из бессвинцовых покрытий намерен использовать потенциальный заказчик, принятие решения по этому вопросу является рискованным. При любом тестировании изготовителю приходится принимать во внимание, что в качестве выбора возможны не только сплавы SnCu, SnAg или SnAgCu, но также и SnZn + X или SnBi + X, как более легкоплавкие альтернативы. При всей важности свойства смачивания, действительно определяющим результатом паяного соединения является надежность, особенно после старения. Многие производители компонентов полагают, что доминирующим сплавом при

пайке волной припоя будет Sn0.7Cu. Пока форма соединения соответствует ожиданиям, ни производитель компонентов, ни потребитель не обеспокоены его качеством. Остаются только вопросы, были ли надлежащим образом смочены выводы и полностью ли заполнены сквозные отверстия. Беспокойство по этим поводам будет оставаться до тех пор, пока температура пайки будет поддерживаться на сегодняшнем низком уровне.

ПРОБЛЕМЫ BGA- И CSP-КОРПУСОВ

Крошечные шарики припоя на выводах BGA надо рассматривать отдельно, так как они обеспечивают большую часть материала в любом паяном соединении. В случае применения бессвинцовой пасты, имеющей более высокую температуру плавления, SnPb-шарики на выводах расплавятся раньше, чем паста. При этом низкоплавкий SnPb соединяется с пастой с высоким содержанием олова, образуя неопределенный неэвтектиче-

ский сплав, который затвердевает еще до того, как оплавится паста. Таким образом, создается нечто вроде «холодно-паяного соединения», а любой специалист по пайке знает, что такие соединения имеют очень низкую прочность и быстро выходят из строя под нагрузкой. Если использовать бессвинцовые пасты, электронной промышленности придется заменить шарики из SnPb-припоя, «украшающие» выводы сегодняшних BGA. Их можно изготовить практически из любого сплава, следовательно, по большому счету, свобода выбора остается. Однако изменение материала этих шариков повлияет на всю структуру их сопряжения с микросхемой, а значит, и на поведение электронного компонента под нагрузкой. Без понимания структуры этого сопряжения и значительного объема научных исследований в этой области каждую разработку придется тестировать отдельно, учитывая при этом способ крепления к печатной плате.

У корпусов размера кристалла CSP, «младшего брата» концепции BGA, те же проблемы с надежностью. Было проведено множество исследований, направленных на предотвращение ранних отказов, ведь структура соединений CSP-корпусов важна для обеспечения длительного срока службы. Однако в настоящее время даже для этих изделий провозглашается требование отсутствия свинца. Для исследования поведения при плавлении и определения качества паяных соединений были протестированы сплавы SnAg + X (где X — либо индий, либо медь, либо висмут), а также шарики припоя Sn9Zn1Bi5In. Сплавы Sn3.5Ag8.5In и Sn3Ag1.0In1.0Cu при циклических термических нагрузках подверглись коррозии. Несмотря на коррозию, паяные соединения, созданные с применением этих бессвинцовых припоев,

обнаружили при циклических ударных нагрузках (от -65 до 150°C) даже лучшую надежность, чем соединения со сплавом Sn36Pb2Ag [3]. Даже для flip-chip приложений (а многие еще надеются, что технология C4 соединения кристалла контролируемым сжатием будет исключена из списков директивы ROHS) требуются бессвинцовые решения. Поскольку плавление контактов или даже частичное размягчение нежелательны из-за уменьшения надежности соединения, сплавы с температурой затвердевания ниже 260°C даже не рассматриваются. Изменение сплава для контактов и шариков влияет на структуру электронного компонента в целом. В качестве примера можно вспомнить о металлизации диффузионного барьера. В таблице 2 приведены максимальные значения температуры оплавления шариков припоя различных сплавов [5].

Свинец можно обнаружить не только в металлических покрытиях выводов. Некоторое количество свинца используется в соединителях, например, обжимных креплениях и IDC-разъемах. В пластмассах свинец может использоваться в качестве термического стабилизатора (например, в ПВХ) или красителя (хромат или оксид свинца). Директива RoHS не требует обязательной маркировки бессвинцовых или соответствующих RoHS компонентов. В результате целый ряд организаций принялся изощряться по этому поводу (JEITA, IPC/NEMI/JEDEC, Soldertec и др.) и сразу успел навредить. Как можно было ожидать, никаких усилий по координации деятельности различных организаций не было предпринято. Хуже того, изготовители взяли на себя решение вопроса, маркировать ли на этот счет свою продукцию или нет. Если производитель решает производить маркировку, то он может позволить себе разработать свою систему, полностью отличающуюся от систем маркировки перечисленных организаций. Чтобы облегчить себе задачу, производители часто маркируют не детали, а их упаковку, и после вскрытия упаковки компонент оказывается немаркированным. Не ясно и то, что именно маркировка должна донести до потребителя. Некоторые детали декларируются как не содержащие свинец, другие — как соответствующие требованиям RoHS, а иные — как соответствующие требуемому процессу изготовления. Существует разница между отсутствием свинца и соответствием требованиям RoHS, поскольку деталь, не содержащая свинец, может не удовлетворять требованиям относительно содержания других веществ, применение которых ограничено RoHS. Пригодна ли каждая конкретная деталь для пайки оплавлением при высоких температурах или пайки в проточном припое — это еще один вопрос. Прежде чем все эти вопросы прояснятся, пройдет некоторое время.

Компания, производящая поставку комплектующих в страны Евросоюза, вынуждена обеспечивать выполнение указаний RoHS, а также законов, действующих в каждой конкретной стране (лучше, если соответствующие ограничения указаны в письменной форме). Определить в спорных случаях факт содержания свинца относительно легко при помощи тестирования. Ручной анализатор рентгеновского излучения выдает результат достаточно быстро, примерно за 60 с. Простой в применении прибор имеет чувствительность порядка 0,01% для свинца в сплаве олова. Таким образом, тестирование образцов реально, но тестирование всех компонентов во время их установки, которое составляет менее 1 с, нереалистично. К счастью, на рынке уже имеется немало бессвинцовых компонентов, однако компоненты, удовлетворяющие директиве RoHS, менее распространены, поскольку кроме свинца под ее ограничения подпадает и ряд других веществ. Еще труднее найти комплектующие, которые удовлетворяют требованиям к характеристикам процесса изготовления. На этом фоне рекомендуется при приобретении комплектующих обращать более пристальное внимание на конструкцию, топологию и производство, чтобы переход к бессвинцовой и RoHS-совместимой технологии происходил без накладок.

Одна из типичных проблем — это наличие единственного источника поставки какой-либо позиции. Если найден только один производитель принципиально важной детали, это означает, что заранее запрограммировано «узкое место», а именно проблема со сроками поставок, не говоря уже о монопольных ценах. Отмечается увеличение сроков поставок комплектующих, удовлетворяющих требованиям RoHS, что меняет стратегию снабжения, а возможно, сказывается и на денежных потоках. Наконец, нередко оказывается, что некоторые детали еще не появились на рынке — около 40% производителей заявляют о своей неготовности. Возможно ли будет получить хотя бы временное послабление ограничений RoHS, пока неясно. В этих условиях остается лишь переработка конструкции изделий, хотя изменение топологии или конструктивных характеристик может открыть «ящик Пандоры».

Таблица 2. Максимальная температура оплавления шариков припоя

Сплав	Точка плавления, $^{\circ}\text{C}$	Макс. температура оплавления, $^{\circ}\text{C}$
Sn37Pb	183	210...220
Sn3.5Ag	221	245...255
Sn0.75Cu	227	250...260
Sn4.0Ag0.5Cu	217...218	240...250
Sn2.5Ag1.0Bi0.5Cu	216...221	240...250

Большинство производителей электронных компонентов проводят тестирование на предмет образования «усов» согласно следующей процедуре:

- детали с покрытием подвергаются изгибу и последующему старению;
- 6 мес. при комнатной температуре;
- 6 мес. при температуре 50°C;
- 6 мес. при температуре 52°C и относительной влажности 90%;
- 1000 термических циклов от –40 до 80°C.

Затем производится проверка на предмет образования «усов» при помощи сканирующего электронного микроскопа. Заключение «тест пройден» выдается, если «усы» длиннее 50 мкм не обнаруживаются. Вследствие исключительной длительности такой процедуры тестирования, ее результаты нужно рассматривать в качестве характеристики определенных методов, а не отдельных деталей или изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chudnovsky B.H. «Degradation of Power Contacts in Industrial Atmosphere: Silver Corrosion and Whiskers». Proc. 48th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2002.

2. Seelig K., Suraski D. «Lead-Contamination in Lead-Free Electronics Assembly». www.aimsolder.com.

3. Yoon S.W., Park C.J., et al. «Interracial Reaction and Solder Joint Reliability of Pb-Free Solders in Lead Frame Chip Scale Packages (LF-CSP)». J. Electronics Materials, 2000, Vol. 29, №10.

4. Zeng K. «Influence of Solder Reaction Across Solder Joints». 6th TRC, 2003, Austin, TX.

5. Roubaud P., Henshall G., et al. «Thermal Fatigue Resistance of Pb-Free Second Level Interconnect». SMTAI2001.

6. Henshall G., Roubaud P., et al. «Impact of Component Terminal Finish on the Reliability of Pb-Free Solder Joints». SMTAI 2002.