

# Исследование микроструктуры паяных соединений бессвинцовых BGA-компонентов, смонтированных припоем олово–свинец

**Цель данного исследования — изучение возможности монтажа BGA-компонентов с шариками припоя SnAgCu эвтектическим припоем олово–свинец, а также изучение влияния технологических параметров на структуру паяных соединений.**

**Гюнтер Гроссманн**

guenter.grossmann@empa.ch

**Перевод: Андрей Новиков**

andrej.novikov@uni-rostock.de

Пайка BGA-компонентов проводилась в конвекционной печи в атмосфере азота с варьированием температуры и скорости конвейера. После пайки были изготовлены микрошлифы компонентов. Хотя температура ликвидуса эвтектического припоя олово–серебро–медь составляет 217 °С, уже при 210 °С с помощью металлографического анализа была зафиксирована металлическая связь между шариком припоя SnAgCu и свинецсодержащим припоем. В этом случае шарик припоя лишь частично реагирует со свинецсодержащим припоем. При превышении температуры ликвидуса шарика припоя такой припой полностью растворяется в припое шарика. Температурный профиль с максимальной температурой шарика припоя 230 °С ведет к равномерной реакции свинецсодержащего припоя с шариком.

Пайка компонента BGA с бессвинцовыми шариками припоя свинецсодержащим припоем в принципе возможна и без изменения технологических параметров. Открытым остается лишь вопрос надежности паяных соединений с частично расплавленными шариками. В данный момент проводятся исследования надежности подобных паяных соединений в швейцарской Лаборатории по испытанию материалов (Eidgenössische Materialprüfanstalt — EMPA).

## Введение

Во время перехода от свинецсодержащей технологии пайки к бессвинцовому производству практически невозможно избежать использования смешанной технологии. Применение компонентов BGA с шариками припоя олово–свинец в комбинации с бессвинцовым припоем уже было изучено ранее [1]. После перехода на бессвинцовую технологию также возможна пайка бессвинцовых компонентов свинецсодержащим припоем SnPb, так как некоторые компоненты либо не допускаются к пайке бессвинцовым припоем, либо пайка свинецсодержащим припоем является требованием заказчика. Процесс

пайки простых компонентов с металлизацией из чистого олова припоем олово–свинец может быть надежно осуществлен. В бессвинцовых компонентах BGA, как правило, используется припой SnAgCu для шариковых контактов. В процессе пайки для свинецсодержащих припоев часто не достигается температура ликвидуса шарика припоя, составляющая 217 °С. Это дает основания для опасения, что результаты пайки будут неудовлетворительными, так как в процессе пайки не происходит оплавления шариков припоя. Однако пайка представляет собой диффузионные процессы, при которых расплавление соединяемой детали не является обязательным. В ходе данного исследования были изготовлены образцы при различных температурах пайки и скоростях конвейера конвекционной печи с целью анализа влияния температуры и времени в зоне максимальной температуры на результаты пайки. Для сравнения были также изготовлены образцы с бессвинцовыми компонентами BGA, смонтированные с помощью припоя SnAgCu.

## Параметры экспериментов

Для изготовления образцов были использованы компоненты PBGA-200. Размер компонентов: 13×13 мм<sup>2</sup>, толщина 1 мм. В корпусе находился микрочип размером 7×7 мм<sup>2</sup>. Шарика припоя расположены в матрице 15×15 с шагом 0,8 мм. Диаметр шариков 0,5 мм. Припой шариков — SnAg3,8Cu0,7 с температурой плавления 217 °С. Печатные платы были изготовлены из материала FR4 толщиной 1,6 мм с двумя внутренними слоями со сплошной металлизацией. Толщина внутренних слоев металлизации 35 мкм, внешних — 17,5 мкм. Металлизация контактных площадок: 4 мкм Ni/0,5 мкм Au. Для монтажа была использована свинецсодержащая паяльная паста припоя SnPb36Ag2 с температурой ликвидуса 179 °С и флюсом RMA (канифоль со слабой активацией). Бессвинцовая паяльная паста состояла из припоя SnAg3,8Cu0,7 с флюсом на основе смолы. Паяльная

Таблица. Параметры пайки, вычисленные из температурных профилей проведенных экспериментов

Макс. температура, °C	210	217	218	223	227	233	246
Скорость конвейера, мм/мин	700	900	700	900	700	900	700
$\Delta T_{SnPbAg}$ , K	31	38	39	44	47	54	67
$\Delta T_{SnAgCu}$ , K	–	–	1	6	10	16	29
$\Delta t_{SnPbAg}$ , c	62	66	82	71	90	76	100
$\Delta t_{SnAgCu}$ , c	–	–	6	28	46	43	73
$QT_{SnPbAg}$ , K·c	1000	1400	1880	1960	2790	2480	4700
$QT_{SnAgCu}$ , K·c	–	–	3,5	100	290	400	1820

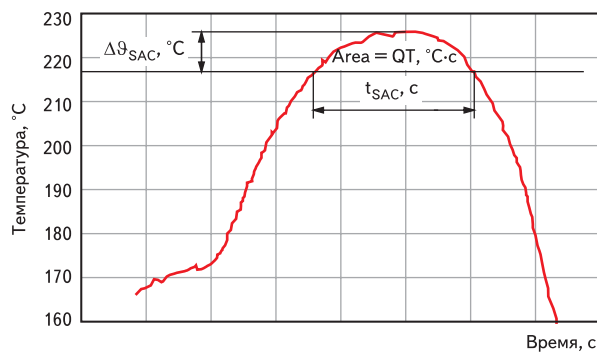


Рис. 1. Определение параметров процесса с помощью QT

паста наносилась с помощью стального шаблона толщиной 150 мкм.

Пайка проводилась при семи различных максимальных температурах и двух скоростях конвейера в атмосфере азота. Температурные профили были измерены с помощью термоэлементов типа К, которые крепились SMD-клеем к шарикку BGA с внешней стороны компонента. Максимальные температуры пайки были выбраны из интервала 210–246 °C. Скорость конвейера составляла 700 и 900 мм/мин (таблица).

Для исследования влияния параметров процесса на результат пайки процесс был охарактеризован с помощью интеграла «температура — время» (QT) [1]. В данном случае площадь под кривой «температура — время» над точкой ликвидуса используется в качестве величины тепловой энергии, введенной во время процесса пайки. Значение параметра QT было вычислено графически из измеренных кривых «температура — время». Для каждого профиля были вычислены два значения QT: выше ликвидуса припоя SnPb36Ag2 и выше ликвидуса припоя SnAg3,8Cu0,7 (рис. 1).

Для каждой комбинации «температура — время» был взят один образец для металлографического анализа. Использовался метод металлографического анализа, разработанный для исследования паяных соединений SnPb, который также подходит для исследования бесвинцовых паяных соединений [2]. Анализ микрошлифов проводился с помощью оптической микроскопии, электронной микроскопии (REM) с рентгеновской спектроскопией с дисперсией по энергии (SEM/EDX) при ускоряющем напряжении в 30 кВ и с помощью фокусированного ионного луча (FIB — Focused Ion Beam). Для полуколичественного EDX-анализа использовались средние величины из нескольких измерений. Вследствие использования металлографического метода препарирования и метода FIB с эффектом ка-

налирования не было необходимости химического травления микрошлифов. Также было установлено, что после проведения механической полировки на пробах остается тонкая смазочная пленка, которая может быть удалена травлением ионами галлия в установке FIB. Существуют ограничения для анализа очень маленьких фаз методом EDX. За счет проникновения луча электронов всегда производится измерение конечного объема. В связи с этим с помощью полуколичественного анализа могут быть получены только ориентировочные значения, которые, однако, позволяют проводить оценку образования фаз в процессе пайки. В измерениях указаны только основные элементы обнаруженных соединений в процентах по весу. Элементы Cu, Ag и Ni дополняют состав до 100%.

Из кривых «температура — время» были определены следующие величины:

- $\Delta T_{SnPbAg}$  [K] — разница между максимальной температурой и температурой ликвидуса припоя SnPbAg;
- $\Delta T_{SnAgCu}$  [K] — разница между максимальной температурой и температурой ликвидуса припоя SnAgCu;
- $\Delta t_{SnPbAg}$  [c] — время пайки над точкой ликвидуса припоя SnPbAg;
- $\Delta t_{SnAgCu}$  [c] — время пайки над точкой ликвидуса припоя SnAgCu;
- $QT_{SnPbAg}$  [K·c] — интеграл «температура — время» над точкой ликвидуса припоя SnPbAg;
- $QT_{SnAgCu}$  [K·c] — интеграл «температура — время» над точкой ликвидуса припоя SnAgCu.

## Результаты исследования

### Структура шариков припоя SnAgCu в исходном состоянии

На микрошлифе шарика припоя SnAgCu видна типичная дендритная структура с незначительными выделениями между дендритами. На снимке REM шарика припоя SnAgCu

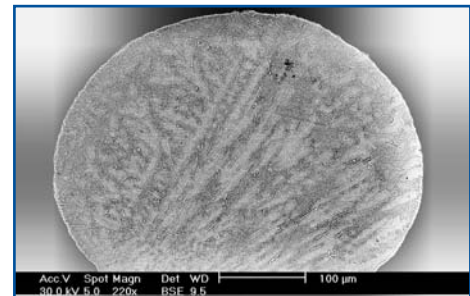


Рис. 2. Шарик припоя SnAgCu в исходном состоянии

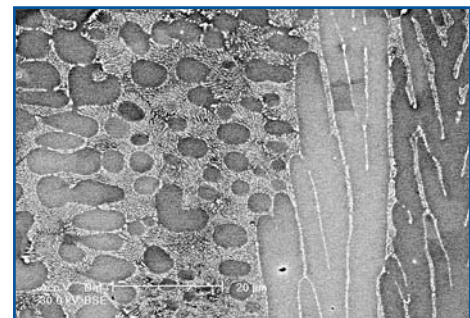


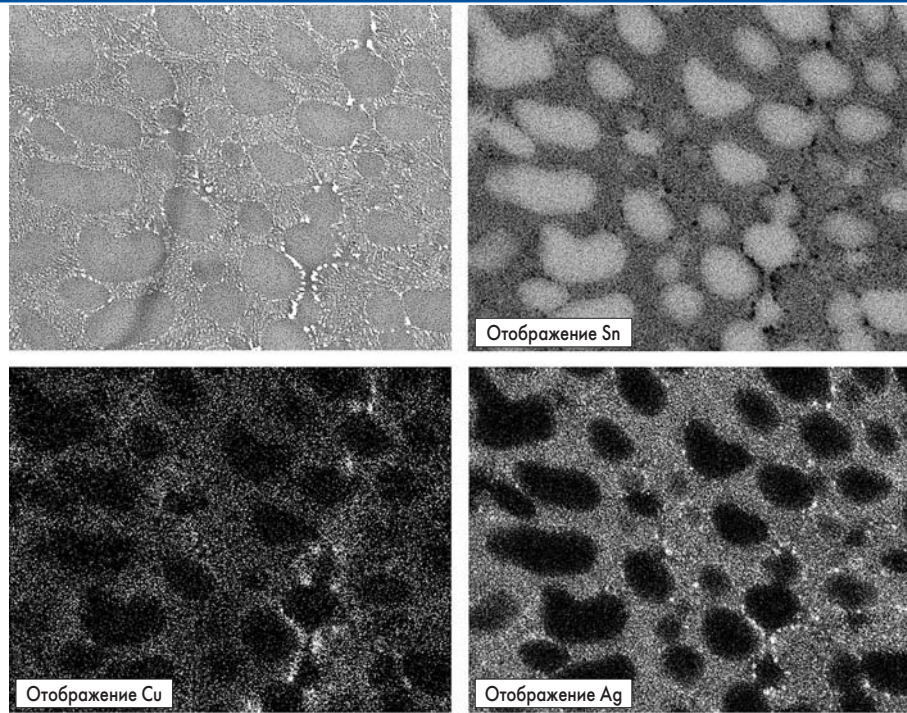
Рис. 3. Дендритная структура SnAgCu с интерметаллическими фазами между дендритами (деталь с рис. 2)

(рис. 2) и при детальном рассмотрении данного снимка (рис. 3) также хорошо видна дендритная структура с эвтектикой между разветвлениями дендритов.

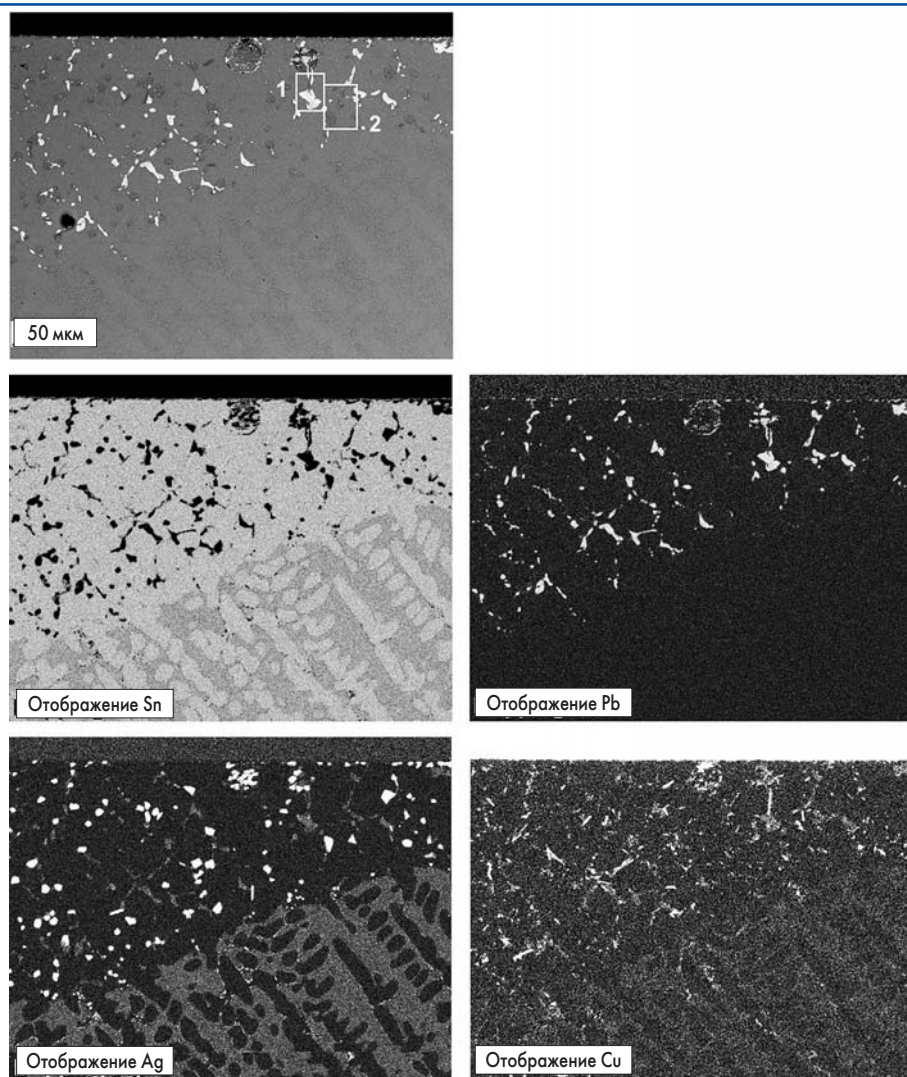
Дендриты состоят из олова  $\beta$ -фазы. В объеме припоя между разветвлениями дендритов находятся небольшие интерметаллические фазы ( $Ag_3Sn$  и  $Cu_6Sn_5$ ) в матрице из олова  $\beta$ -фазы [3, 4]. Кругообразная структура слева на рис. 3 обусловлена тем, что плоскость шлифа расположена перпендикулярно к стволу дендрита. С помощью топографического EDX-снимка структуры шарика SnAgCu было установлено, что значительная часть дендритов состоит из серебра. Полуколичественный анализ показал следующий состав дендритов: 98–99% Sn с максимальным содержанием серебра 1,5% и следы меди. Вдоль дендритов из  $\beta$ -олова были выявлены выделения, состав которых не соответствует предыдущим публикациям. Эти выделения, декорирующие дендриты, показывают явные сигналы Ag и Cu на топографическом снимке (рис. 4), а полуколичественный анализ показал следующий состав: до 45% Ag и до 8% Cu.

### Структура шариков припоя SnAgCu после пайки при температуре 210 °C и скорости конвейера 700 мм/мин

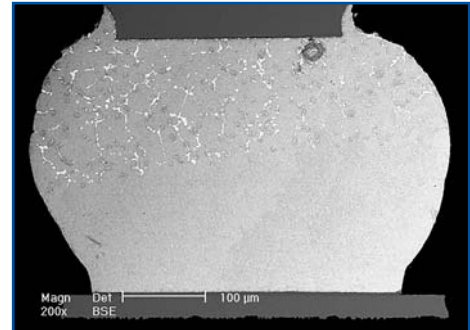
В первом эксперименте параметры конвекционной печи были выбраны таким образом, чтобы максимальная температура превышала температуру ликвидуса припоя SnPbAg на 30 К. В данном эксперименте была измерена фактическая температура шарика припоя в 210 °C. На микрошлифе видно, что произошла лишь частичная реакция между шариком припоя и припоем паяльной пасты. На REM-снимке хорошо видны две отдельные области (рис. 5).



**Рис. 4.** Топографический EDX-снимок структуры SnAgCu шарика в исходном состоянии. Хорошо видны фазы SnAg и SnCu между дендритами, а также фазы AgCu, окружающие дендриты



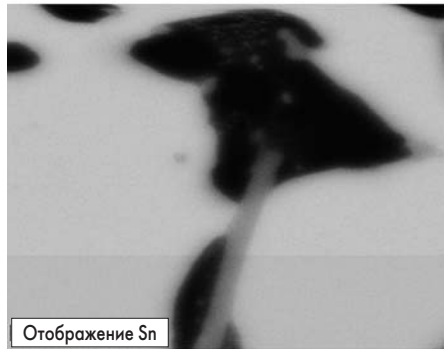
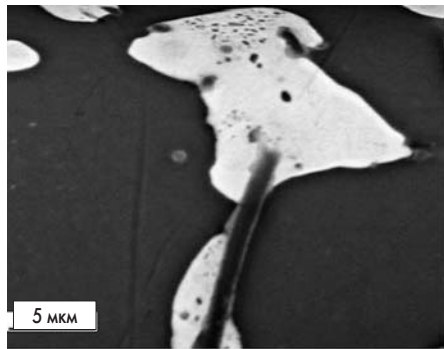
**Рис. 6.** Топографический EDX-снимок зоны реакции между шариком SnAgCu и припоем SnPbAg. Хорошо виден непрерывный переход от легированной зоны к шарiku припоя SnAgCu



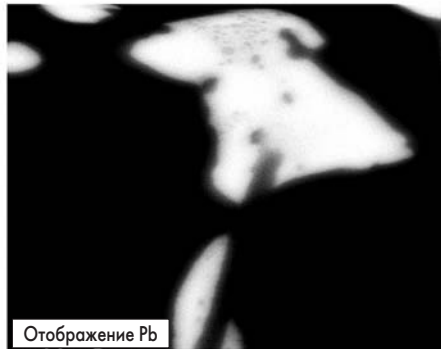
**Рис. 5.** Шарик припоя SnAgCu после пайки припоем SnPbAg при температуре 210 °C. Шарик не расплавлен, а лишь частично растворен в припое SnPbAg

Снизу расположен компонент, а сверху контактная площадка печатной платы, на которую наносится паяльная паста. Со стороны печатной платы, где шарик припоя находится в непосредственном контакте с паяльной пастой, наблюдается грубая структура с явными выделениями, в то время как со стороны компонента сохраняется исходная структура шарика припоя. EDX-анализ шарика припоя со стороны компонента показывает такой же состав, как и в исходном состоянии, а именно дендритную структуру, состоящую из  $\beta$ -олова с интерметаллическими фазами  $Ag_3Sn$  и  $Cu_6Sn_5$  между разветвлениями дендритов, а также выделения SnAgCu, декорирующие дендриты. В данной зоне свинец не был обнаружен. На топографическом EDX-снимке со стороны печатной платы видна сложная структура паяного соединения с шаровидной структурой олова с фазами PbAg, AgCu, CuSn, SnPb, AgSn, а также предположительно PbAgCu (рис. 6). Также хорошо видно, что свинец находится только в зоне реакции припоя контакта с припоем паяльной пасты. Шаровидные фазы состоят из олова с примерно 2% свинца.

Увеличение грибовидной фазы (зона 1 на рис. 6) показывает комплексность фаз, образующихся в процессе пайки (рис. 7). Сами фазы состоят на 90% из свинца, 8% олова и 2% серебра. Фазы могут также содержать включения из 78% Pb и 20% Sn со следами Ag, Cu и Ni и включения, состоящие из 41% Pb, 31% Sn, 25% Ag и 3% Cu. В направлении к краям соединения содержание свинца уменьшается, а содержание олова наоборот увеличивается. В углублении фазы во время кристаллизации предположительно был заключен расплав из первичных фаз, состоящий из 42% Sn, 34% Pb, 20% Cu и 4% Ag (зона А на рис. 7). EDX-анализ игольчатых фаз в нижней половине паяного соединения на рис. 7 показал следующий состав: 63% Sn, 21% Cu, 12% Pb и 4% Ag. Судя по внешнему виду, это интерметаллическая фаза. EDX-анализ зоны 2 (рис. 6) показал фазы AgSnPb и SnCuPb, а также выделения с повышенным содержанием свинца (рис. 8). Фаза 1 имеет состав, похожий на состав грибовидной фазы на рис. 7. Фаза 2 состоит из 70% Ag, 25% Sn и 5% Pb. Фаза 3 имеет похожий состав с явно более высоким содержанием свинца. Измерение фаз 4 и 5 показало 70% Sn, 20% Cu



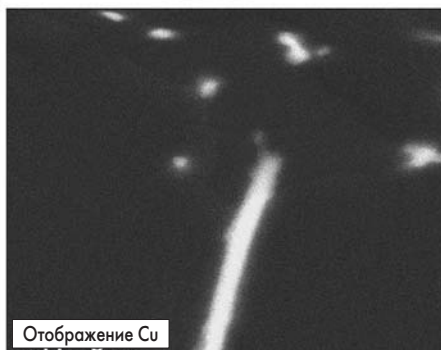
Отображение Sn



Отображение Pb



Отображение Ag



Отображение Cu

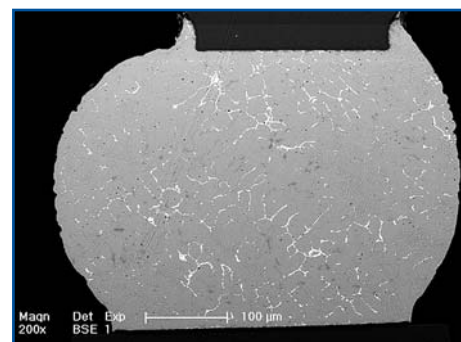
**Рис. 7.** Топографический EDX-снимок зоны 1, показанной на рис. 6. Грибовидная фаза состоит из свинца с небольшим содержанием серебра и окружена практически чистым оловом. Вокруг данной фазы находятся фазы SnPb и SnCu. Внутри хорошо видны отдельные выделения «серебро-свинец». Игольчатая фаза состоит из Sn, Ag, Cu и Pb

и 10% Pb, а также сходный состав с более высоким содержанием свинца для фазы 6.

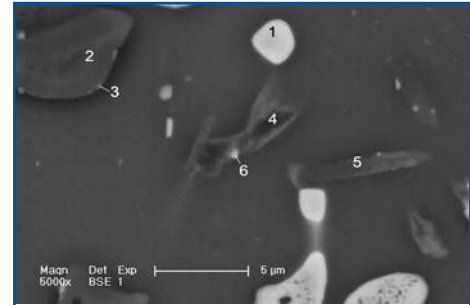
**Структура шариков припоя SnAgCu после пайки при 217 °C и скорости конвейера 900 мм/мин, а также после пайки при 218 °C и скорости конвейера 700 мм/мин**

При достижении температуры ликвидуса припоя SnAgCu весь шарик припоя реагирует с припоем SnPbAg. В процессе кристаллизации формируются большие дендриты β-олова. Дендриты разделены в матрице олова либо игольчатыми, скорее всего интерметаллическими, фазами, либо фазами с большим содержанием свинца (рис. 9). Это хорошо видно на топографическом EDX-снимке. Дендриты, состоящие большей частью из олова, расположены в эвтектической структуре из выделений с большим содержанием серебра и меди и фаз с большим содержанием свинца со следами никеля (рис. 10). На рис. 11 представлена одна область из рис. 10. Фаза 1 — дендрит — имеет следующий состав: 96% Sn, 2% Pb и отдельные следы Ag, Cu и Ni. Фаза 2 состоит из 78% Pb, 8% Sn, 6% Ag и 4% Cu и Ni. Вторичные выде-

ления в фазе 2 состоят из 78% Pb и 22% Sn. Фазы 3 и 4 являются по внешнему виду интерметаллическими фазами. EDX-анализ показал следующий состав: 50% Sn, 40% Ag и 6% Pb с различным содержанием Cu и Ni. EDX-анализ фазы 4 выявил такой состав: 70% Sn, 25% Cu, 2% Pb и отдельные следы Ag и Ni.



**Рис. 9.** Снимок SEM шарика припоя SnAgCu после пайки припоем SnPbAg при температуре 217 °C. Свинец (светлые линии) распределен во всем объеме шарика и кристаллизовался в крупных фазах



**Рис. 8.** Снимок SEM электронов обратного рассеяния с контрастом материала зоны 2, показанной на рис. 6 (хорошо видны различные фазы и выделения; фазы с большим содержанием тяжелых элементов кажутся на снимке светлее, чем фазы, состоящие из легких элементов)

Фазы 5 и 6 состоят из 54% Sn, 30% Cu, 9% Pb, 3% Ag и 4% Ni. Интерметаллическая фаза на контактных площадках печатной платы толще по сравнению с образцом после пайки при 210 °C. EDX-анализ показал следующий состав: 50% Sn, 26% Cu, 13% Ni, 7% Pb и 4% Ag.

Структура паяных соединений после обеих комбинаций «температура — скорость конвейера» одинаковая.

**Структура шариков припоя SnAgCu после пайки при температуре 223 °C и скорости конвейера 900 мм/мин**

При данных параметрах пайки была зафиксирована более равномерная реакция припоя контактов с припоем пасты, чем в пробах с температурой пайки около точки ликвидуса припоя SnAgCu. Паяное соединение имеет дендритную структуру во всем объеме (рис. 12). Дендриты и фазы свинца мельче, чем в паяных соединениях с температурой пайки 217 °C. Фазы свинца равномерно распределены во всем объеме соединения (рис. 13).

**Структура шариков припоя SnAgCu после пайки при температуре 227 °C и скорости конвейера 700 мм/мин**

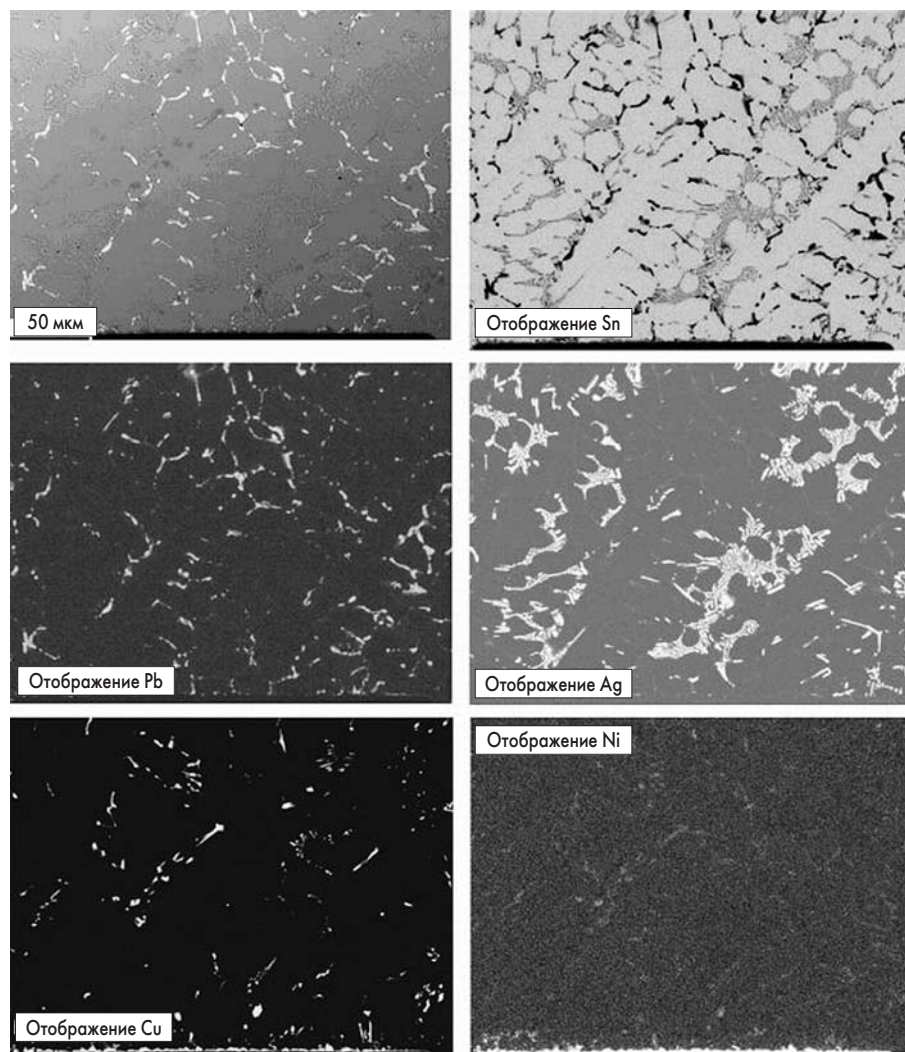
Паяные соединения кристаллизовались с дендритной структурой, и фазы свинца мельче, чем в пробах при более низкой температуре пайки.

**Структура шариков припоя SnAgCu после пайки при температуре 233 °C и скорости конвейера 900 мм/мин**

При температуре пайки, значительно превышающей температуру ликвидуса припоя SnAgCu, свинец из припоя паяльной пасты равномерно распределяется в объеме паяного соединения. Были зафиксированы небольшие интерметаллические фазы, образующиеся вдоль дендритов β-олова.

**Структура шариков припоя SnAgCu после пайки при температуре 246 °C и скорости конвейера 700 мм/мин**

При температуре 246 °C припой паяльной пасты полностью растворяется в припое шарика, и паяное соединение кристаллизуется с типичной для SnAgCu дендритной структурой.



**Рис. 10.** Топографический EDX-снимок структуры шарика SnAgCu после пайки припоем SnPbAg при температуре 217 °С.

Хорошо видны дендриты из чистого олова и отдельные выделения между ними, содержащие Pb, Ag, Cu и Ni

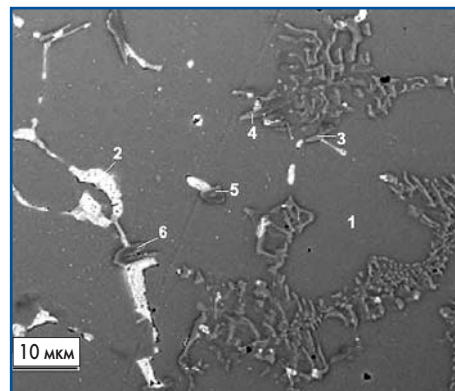
В паяном соединении могут быть замечены крупные игольчатые фазы, которые, возможно, являются интерметаллическими (рис. 14). На топографическом EDX-снимке видно, что дендриты состоят в основном из олова. Между дендритами находятся фазы с различным составом, например PbCu, PbAg, AgCu, SnPb, SnAg, SnCu. Большие игольчатые фазы содержат SnAgCu и Ni (рис. 15). EDX-анализ показал следующий состав дендритов: 94% Sn, 2,5% Pb и 1,5% Ag с отдельными следами Cu и Ni. Игольчатые фазы состоят из 65% Sn, 27% Cu, 5% Ni со следами Pb и Ag. Между дендритами находится большое количество фаз (рис. 16). Фаза 1 содержит 94% Pb и 4% Sn. Фаза 2 состоит из 68% Pb, 30% Sn и 3% Ag. Анализ фазы 3 показал следующий состав: 65% Sn, 18% Pb и 17% Ag. В фазе 4 было выявлено 75% Sn, 21% Ag и 3% Pb. Фаза 5 состоит из 60% Sn, 34% Ag и 5% Pb. Во всех фазах были найдены следы меди и никеля.

Интерметаллическая фаза на контактной площадке компонента имеет толщину около 2,5 мкм. Анализ с помощью FIB-метода показал, что толщина интерметаллических фаз имеет различные значения в широком диапазоне. Кроме того, видно, что интерметаллические фазы состоят из двух разных фаз, од-

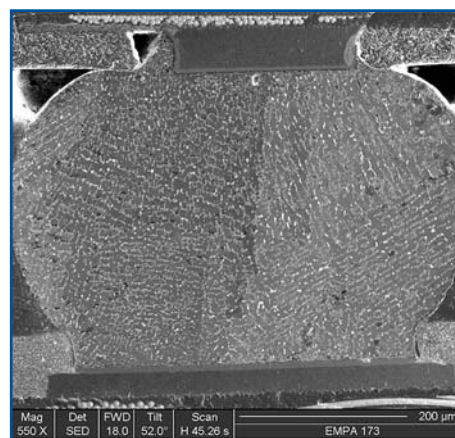
на из которых неравномерная и угловатая, а другая слегка разветвленная и частично вращается в угловатую фазу. С помощью EDX-анализа в этих фазах были найдены Sn, Cu, Ni и Pb. Состав подобных интерметаллических фаз подробно изучен в [5, 6, 7]. Под интерметаллической фазой видна темная линия, которая возникает из-за большого содержания фосфора в никелевом покрытии (рис. 17). В паяных соединениях было замечено большое количество пор. Возможно, они возникают вследствие разложения флюса паяльной пасты при высокой температуре пайки. При сравнении смешанных соединений с бессвинцовыми паяными соединениями было установлено, что в последних количество пор значительно меньше.

#### **Влияние параметров процесса на структуру паяных соединений**

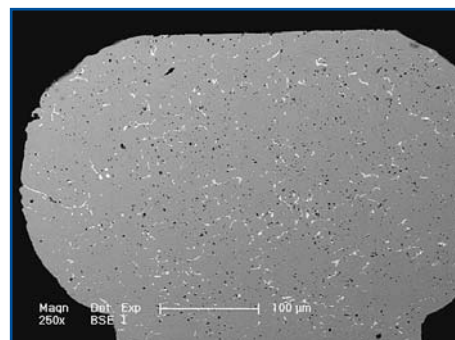
Только начиная с температуры 217 °С может быть установлено влияние параметра QT на структуру паяных соединений, так как до достижения такой температуры шарик припоя не полностью реагирует с припоем паяльной пасты. Выше точки ликвидуса припоя SnAgCu кристаллизация паяного соединения происходит с дендритной структурой. При значении



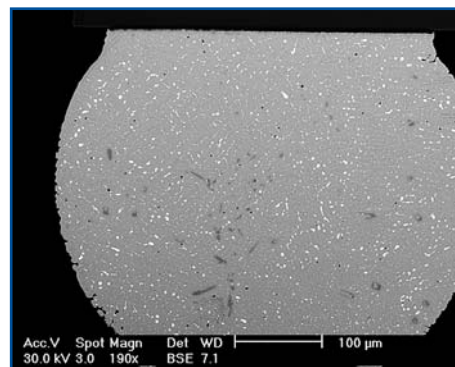
**Рис. 11.** Деталь, показанная на рис. 10, с контрастом по материалу



**Рис. 12.** Снимок FIB шарика SnAgCu после пайки припоем SnPbAg при температуре 223 °С



**Рис. 13.** Снимок SEM шарика SnAgCu после пайки припоем SnPbAg при температуре 223 °С



**Рис. 14.** Снимок SEM шарика SnAgCu после пайки припоем SnPbAg при температуре 246 °С

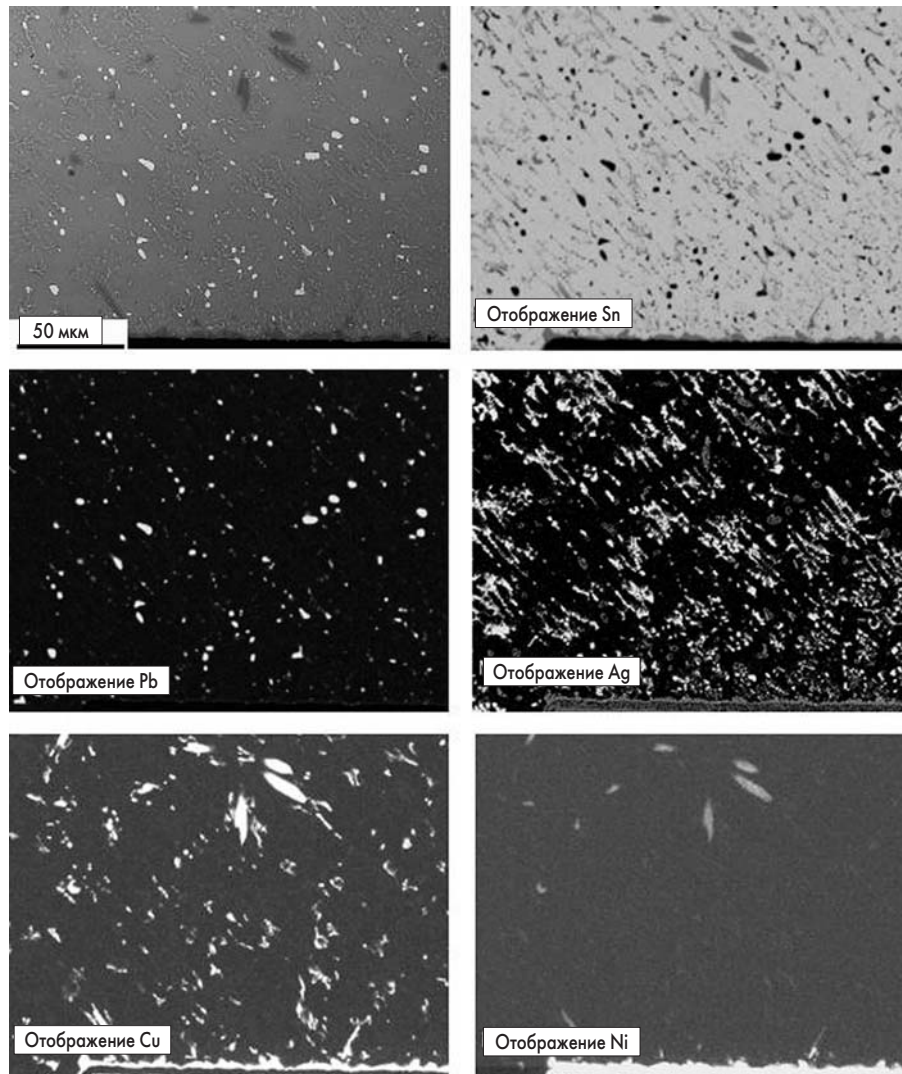


Рис. 15. Топографический EDX-снимок структуры шарика SnAgCu после пайки припоем SnPbAg при температуре 246 °С. Хорошо видны фазы SnAgCuNi, PbAg, CuNi, SnAg и SnCu

параметра  $QT_{SnAgCu}$  в 3,5 К·с образуются большие дендриты со значительными выделениями свинца. При увеличении параметра QT размер дендритов уменьшается, а начиная со значения  $QT_{SnAgCu}$  в 100 К·с — больше не изменяется. При увеличении параметра QT также происходит более равномерное распределение свинца в паяных соединениях. На рис. 18 представлен средний размер фаз свинца в зависимости от параметра  $QT_{SnAgCu}$ . При значе-

нии параметра  $QT_{SnAgCu}$  в 500 К·с размер фаз также больше не изменяется.

#### Анализ результатов

При максимальной температуре 210 °С шарик припоя частично реагирует с расплавленным припоем паяльной пасты. Расплавленный припой действует при этом на припой SnAgCu как растворитель. Растворенный при-

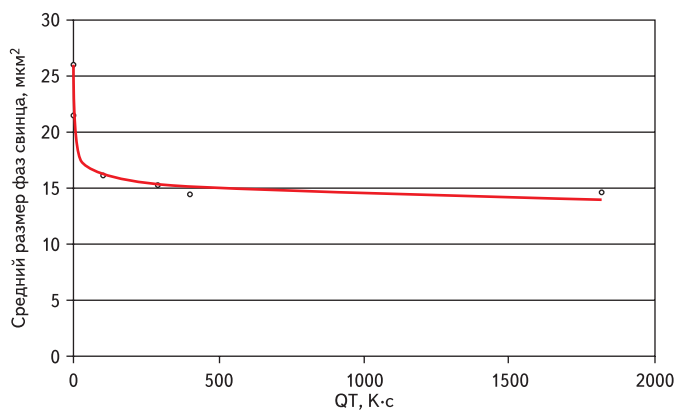


Рис. 18. Средний размер фаз с большим содержанием свинца в см<sup>2</sup> в зависимости от  $QT_{SnAgCu}$

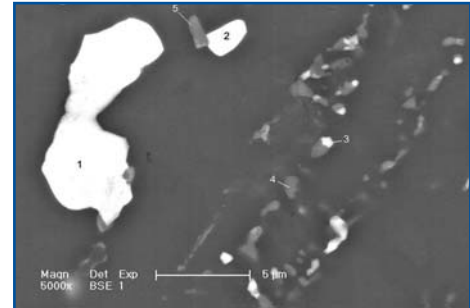


Рис. 16. Снимок SEM структуры шарика SnAgCu с контрастом по материалу после пайки припоем SnPbAg при температуре 246 °С

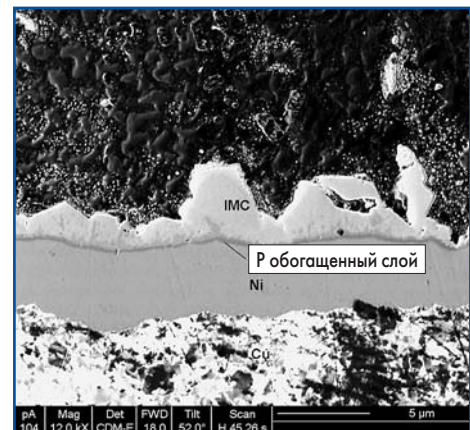


Рис. 17. Снимок FIB интерметаллической фазы на контактной площадке шарика SnAgCu компонента BGA после пайки припоем SnPbAg при температуре 233 °С

пой SnAgCu ведет к насыщению припоя оловом, а также к шаровидной структуре с большим содержанием олова. Эта структура бесшовно переходит в изначальную дендритную структуру шарика припоя в узкой зоне. С точки зрения материаловедения при этом не оказывается влияния на долговечность паяного соединения вдоль зоны перехода. Вдоль фаз припоя с большим содержанием олова могут быть замечены фазы с большим содержанием свинца и небольшие фазы, которые выглядят как фазы  $Ag_3Sn$  и  $Cu_6Sn_5$  в припое SnAgCu.

При температуре пайки, превышающей точку ликвидуса шарика припоя, происходит полное смешивание SnAgCu и SnPbAg. При кристаллизации образуется дендритная структура, которая характерна для припоев с большим содержанием олова. Анализ дендритов показывает в первую очередь олово с 2,5% Pb и примесями Ag, Cu и Ni с различным содержанием — от 1 до 3%. Между дендритами образуются фазы с большим содержанием свинца, в которых присутствует около 10% Sn и 1–4% Ni. Эти фазы неравномерны и содержат вторичные выделения, образуются, как правило, вместе с интерметаллическими фазами. Между дендритами находятся также включения, содержащие Ag и Cu, которые по внешнему виду являются интерметаллическими фазами. В отличие от исходной структуры шариков припоя SnAgCu эти включения состоят не из  $Ag_3Sn$  или  $Cu_6Sn_5$ , а являются многокомпонентными системами, которые

содержат значительные доли Pb и Ni. В некоторых таких системах было также зафиксировано значительное содержание серебра. Фазы со значительным содержанием серебра расположены, как правило, в объеме припоя между дендритами, в то время как фазы с большим содержанием меди декорируют границы дендритов. Распределение фаз иллюстрирует динамику кристаллизационных процессов. При расплавлении шарика припоя SnAgCu происходит диффузия элементов припоя паяльной пасты, а также никеля из контактных площадок в расплав. При росте дендритов во время кристаллизации они растворяют максимально возможное количество Pb вместе с Ag, Cu и Ni. Те части припоя, которые не растворились, передвигаются в расплаве дендритами. При этом возникают центры кристаллизации из SnAgPb и SnCuNiPb. Для дальнейшего роста центрам кристаллизации необходима определенная концентрация элементов в окружающей их расплаве. Это ведет к переохлаждению расплава между дендритами. Когда в распоряжении центров кристаллизации находится достаточное количество атомов, их рост происходит очень быстро. Вследствие дальнейшего переохлаждения отвердевшие кристаллы перенасыщаются, что приводит к образованию лишних атомов в виде вторичных выделений.

Размер фаз с большим содержанием свинца сокращается при увеличении значения QT. Увеличение температуры и времени пайки позволяет достичь более равномерного распределения свинца в расплаве, что ведет в свою очередь к уменьшению размера фаз при кристаллизации.

## Выводы

Данное исследование позволило показать, что шарики припоя SnAgCu могут быть монтированы свинецсодержащим припоем (при температуре пайки, типичной для свинецсодержащего припоя) с образованием безупречного металлургического соединения. Правда, если максимальная температура не превышает температуру ликвидуса припоя SnAgCu, то шарик припоя лишь частично реагирует с припоем паяльной пасты. При превышении температуры ликвидуса шарик припоя полностью расплавляется. При температуре пайки вблизи точки ликвидуса свинец распределяется в паяном соединении очень неравномерно. При достижении значения параметра  $QT_{SnAgCu}$  300–500 К·с происходит равномерное распределение свинца в виде небольших фаз между дендритами. При оплавлении паяльной пасты SnPbAg при температуре 246 °C наблюдается большое количество пор в паяных соединениях, из чего следует, что флюс паяльной пасты не подходит для пайки при данной температуре.

Испытание надежности паяных соединений с помощью медленных температурных циклов планируется провести в рамках проекта LEADFREE. Первые результаты [8] показали, что испытания быстрыми температурными циклами и механическим шоком ведут к ранним отказам на печатной плате, так как вся деформация концентрируется на паяном соединении SnPbAg.

**Примечание:** Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen, 2006, № 8, Германия).

## Литература

1. Nurmi S. T., Ristolainen E. O. Reliability of tin-lead balled BGAs soldered with lead-free solder paste // Soldering and Surface Mount Technology. 2002. 14/2.
2. Grossmann G., Nicoletti G.. Preparation of soft solder joints // Material characterisation. 36. 1996. No. 4/5.
3. Li L., Rao Y., Lin J. Pb-free solder paste reflow window study for flip chip wafer bumping // Proceedings of IEEE International symposium on advanced packaging materials: Processes, Properties and Interfaces. Bracelton (USA), 2001.
4. Park J., Kim C., Carper T., Puligandila V. Phase Equilibria Studies of Sn-Ag-Cu Eutectic solder using differential cooling of Sn3.8Ag0.7Cu Alloys // Journal of electronic materials 32. 2003. No. 11.
5. Jeon Y., Nieland S., Ostmann A., Reichl H., Paik K. A study on Interfacial Reactions between Electroless Ni-P UBM and 95.5Sn4Ag0.5Cu Alloy // Journal of electronic materials 32. 2003. No. 6.
6. Chen S., Wu S., Lee S. Interfacial reactions in the Sn-(Cu)/Ni, Sn-(Ni)/Cu, and Sn/(Cu,Ni) systems // Journal of electronic materials 32. 2003. No. 11.
7. Shiao L. C., Ho C. E., Kao C. R.. Reactions between Sn-Ag-Cu leadfree solders and the Au-Ni surface finish in advanced electronic packages // Soldering and Surface Mount Technology 14. 2002. No. 3.
8. Hillman D. et al. The Impact of Reflow A Pbfree Solder Alloy Using A Tin/Lead Solder Alloy Reflow Profile on Solder Joint Integrity // Proceedings International Conference on Lead-free Soldering. Toronto, 2005. May.