

Сборка силовых полупроводниковых приборов с бессвинцовой припойной композицией

Для сборки мощных полупроводниковых приборов методами вибрационной пайки и ультразвуковой разварки проволочных выводов предложена бессвинцовая припойная композиция Sn–Ag, формируемая последовательным напылением слоев Sn и Ag с различным соотношением толщин, что позволило варьировать температуру ее плавления в диапазоне от 210 до 300 °С.

Владимир Ланин д. т. н.

vlanin@bsuir.unibel.by

Анатолий Керенцев

akerentsev@transistor.com.by

Проблемы сборки полупроводниковых приборов

Для сборки мощных полупроводниковых приборов в корпусах ТО-92 и ТО-126 используют припойные композиции, которые послойно наносят на непланарную поверхность кристаллов. Основным недостатком припойной композиции $\text{Sn}_{2\pm 0,5}\text{-Pb}_{8\pm 1}\text{-Sn}_{1\pm 0,5}$ является наличие свинца, обладающего высокой токсичностью (ПДК = 0,01 мг/м³). Для монтажа кристаллов в корпус такие фирмы как International Rectifier, Motorola и Esec [1] широко применяют бессвинцовые припои: олово-серебро и олово-серебро-медь. Проволочный припой $\text{Sn}_{65}\text{-Ag}_{25}\text{-Sb}_{10}$ и двухкомпонентный эвтектический состав $\text{BiAg}_{2,6}$ с температурой плавления 262 °С пригодны для монтажа кристаллов и последующей разварки золотых проволочных выводов термозвуковой сваркой [2]. Однако эти припои характеризуются повышенным значением теплового сопротивления и для мощных приборов их использование нецелесообразно.

Бессвинцовые паяльные композиции не смачивают поверхность так же хорошо, как припой Sn63/Pb37, который растекается тонким и широким слоем. Исследования показали, что, в то время как припои Sn63/Pb37 имеют растекаемость 93%, у бессвинцовых этот параметр варьируется от 73 до 77% [3].

Применение бессвинцовых припоев приводит к изменению сборочных процессов и технологии пайки. Необходима корректировка режимов пайки, а также комплексные испытания бессвинцовых паяных соединений на прочность, тепловое сопротивление, коррозионную стойкость и др. [4]. При решении вопроса о надежности паяных соединений наряду с выбором оптимальных способов и режимов пайки необходимо учитывать свойства припоев, которые должны:

- обеспечивать хорошую паяемость с полупроводниковыми кристаллами и свариваемость с внутренними проволочными выводами;
- сохранять способность к пайке и сварке при заданном сроке хранения;
- обеспечивать антикоррозионную защиту;

- не подвергаться иглообразованию при хранении и разрушению при температурах сборки, испытания и эксплуатации;
- обеспечивать минимальное переходное электрическое сопротивление;
- быть устойчивыми к тепловому удару при монтаже приборов на печатные платы пайкой, к химическим реагентам, используемым в процессе сборки.

Особенности конструкции мощных полупроводниковых приборов

Основные конструктивно-технологические особенности приборов в пластмассовых корпусах типа КТ-26 (ТО-92), КТ-27 (ТО-126), КТ-89, КТ-92 (D-Pak, I-Pak):

1. Кристаллы размером 0,5 × 0,5 мм на непланарной поверхности содержат слой золота толщиной 1,75 мкм.
2. Выводные рамки выполняются из лент медного сплава для КТ-26 (латунь Л-68), КТ-89, КТ-92 (бронза БрХ), меди для КТ-27 (М3R) и многослойной плакированной ленты МЖМ, на поверхности которых в зоне монтажа кристаллов и разварки выводов содержится слой серебра толщиной 3–5 мкм для гальванического покрытия и 5–7 мкм для холодного плакирования.

3. Монтаж кристаллов:

- методом контактно-реактивной пайки с образованием трехфазной эвтектики Au-Si-Ag при температурах порядка 440–460 °С;
- методом пайки легкоплавким припоем в виде припойной композиции $\text{Sn}_{2\pm 0,5}\text{-Pb}_{8\pm 1}\text{-Sn}_{1\pm 0,5}$, наносимой на обратную сторону кристаллов.
- Основные требования к системам металлизации непланарной поверхности пластин заключаются в следующем:
 - Высокая электропроводность проводящих элементов металлизации.
 - Низкая величина удельного переходного сопротивления невыпрямляющего контакта.
 - Высокая адгезия к полупроводнику и другим контактирующим слоям.
 - Согласованность ТКЛР полупроводника и других контактирующих слоев.

- Возможность образовывать эвтектическое присоединение кристалла с материалом покрытия корпуса.
- Высокая технологичность процесса формирования металлизации.
- Возможность автоматизации производства монтажа кристалла в корпус.

Перед напылением системы металлизации пластины подвергаются механическому утонению методом шлифовки связанным абразивом неплланарной поверхности с толщины 420 мкм до 270 ± 20 мкм. После этого кремниевые пластины подвергаются процессам отмывки и последующей химической обработки в растворе HF. Затем на неплланарную поверхность пластин методом вакуумной конденсации послойно наносится металлизация $V_{0,05}-Au_{1,75}$ (рис. 1а) или Ti-NiV-Ag-Sn-Pb-Sn (рис. 1б).

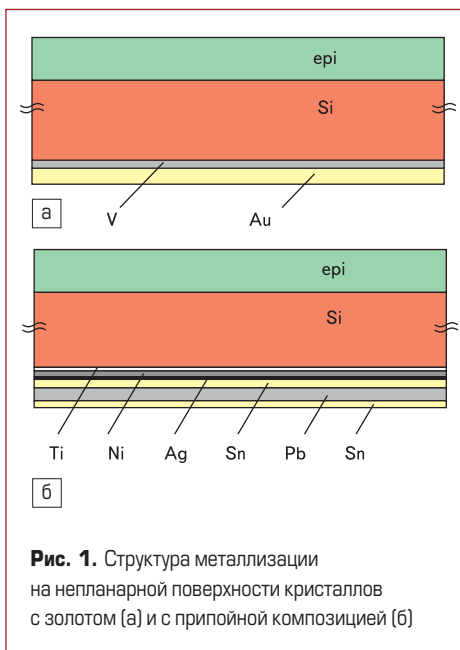


Рис. 1. Структура металлизации на неплланарной поверхности кристаллов с золотом (а) и с припойной композицией (б)

В качестве основы корпусов используются рамки выводные, полученные из ленточного плакированного материала, содержащего полосу серебра (рис. 2). В основе рамки содержится медь или медный сплав, что крайне важ-

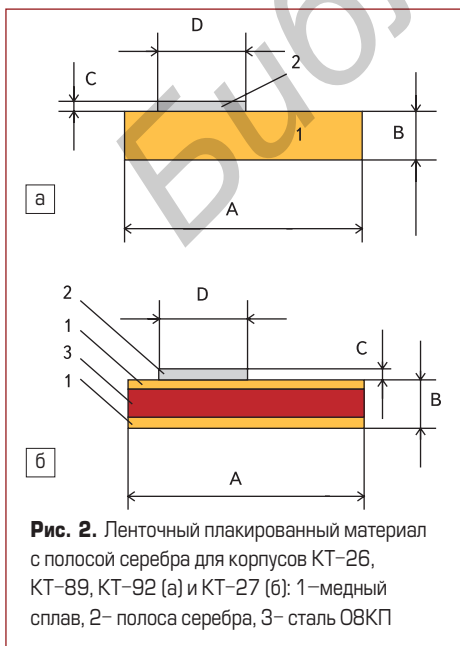


Рис. 2. Ленточный плакированный материал с полосой серебра для корпусов КТ-26, КТ-89, КТ-92 (а) и КТ-27 (б): 1 – медный сплав, 2 – полоса серебра, 3 – сталь ОВКП

но при изготовлении приборов с рассеиваемой мощностью более 0,5 Вт.

Но такие материалы имеют высокий коэффициент термического линейного расширения (КТЛР) — в пределах $(18-20)10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Поэтому рассогласование по КТЛР приводит к значительным механическим напряжениям в активной структуре полупроводникового прибора, уровень которых может превысить предел прочности кремния. Термомеханические напряжения в кристалле, возникающие после его монтажа в корпус, могут достигать уровня 180–240 МПа и определяются выражением [4]:

$$\sigma_{\max} = k(\alpha_1 - \alpha_2)(T_{\text{п}} - T_0) \sqrt{\frac{E_1 E_2 L}{d}}, \quad (1)$$

где σ_{\max} — максимальное напряжение, α_1 , α_2 — коэффициент линейного расширения кристаллодержателя и кремния, $T_{\text{п}}$ — температура пайки, T_0 — температура окружающей среды, L — линейный размер кристалла, k — безразмерная константа, d — толщина паяного соединения.

Как видно из выражения (1), для снижения внутренних напряжений в активной структуре, напаянной на медную рамку, требуется увеличивать толщину паяного соединения под кристаллом. Таким образом, при использовании рамки выводной из медного сплава требуется конструкция кристалла, которая должна содержать на неплланарной поверхности демпферный слой припойной композиции для предотвращения неконтролируемого роста внутренних напряжений в напаянном кристалле и исключения его растрескивания.

Оптимизация состава припойной композиции

Для сборки полупроводниковых приборов используют бинарную систему Sn-Ag в качестве припоя для монтажа кристаллов. При сравнении бинарной Sn-Ag с тройной системой Sn-Ag-Cu (или Sn-Ag-Sb) предпочтение отдано первой, как наиболее простой и дешевой (для тройной системы Sn-Ag-Cu или Sn-Ag-Sb потребовалась разработка специальной мишени).

При расчете толщины припойной композиции необходимо исходить из условия обеспечения устойчивости приборов к температурному воздействию при испытаниях на теп-

лоустойчивость при 260 °С. Из диаграммы фазового состояния системы Sn-Ag (рис. 3) следует, что при содержании серебра по массе 3% образуется эвтектический сплав с температурой плавления 221 °С. Для получения сплава с температурой ликвидуса более 260 °С (например, 300 °С) требуется вводить серебро в количестве 20 мас. % [5].

Для припойной композиции, наносимой путем распыления в вакууме на установке «Оратория-9», определим ее толщину, исходя из заданной системы металлизации, размера кристалла и режимов вибрационной пайки.

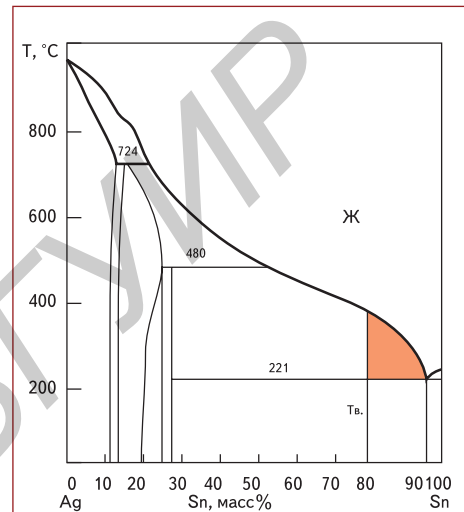


Рис. 3. Диаграммы фазового состояния системы Sn-Ag

Для приборов в пластмассовых корпусах типа КТ-26, КТ-27 с размером кристаллов $2,5 \times 2,5$ мм толщина паяного соединения под кристаллом выбрана в пределах 7–8 мкм.

В процессе вибрационной пайки с заданием амплитуды колебаний кристаллу по осям X, Y в пределах 150–200 мкм расходуета до 25% припоя на смачивание поверхности серебряного покрытия на рамке выводной, поэтому общая толщина припойной композиции составляет:

$$H_k = H_n(1 + k_{\text{см}}), \quad (2)$$

где H_n — толщина припоя, $k_{\text{см}}$ — коэффициент, учитывающий смачивание и растекание припоя.

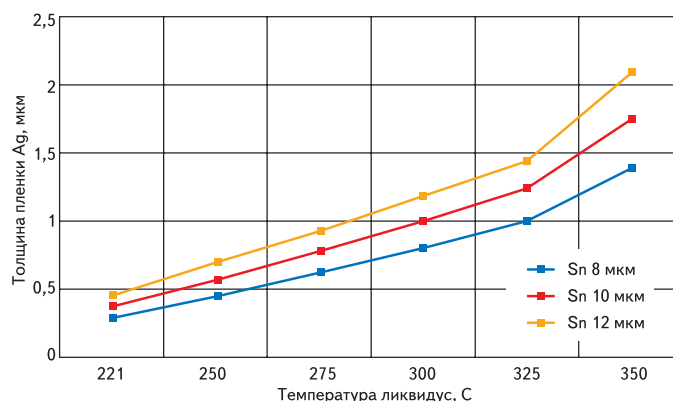


Рис. 4. Расчетная зависимость температуры ликвидуса от толщины серебра для заданной толщины олова в припойной композиции Sn-Ag

С учетом того, что $H_n = 7$ мкм, а $k_{cm} = 0,25$, общую толщину припоя выбираем в пределах 10 ± 2 мкм. Исходя из этого, определим толщину пленки серебра при заданной толщине слоя олова 10 ± 2 мкм:

$$h_{Ag} = \frac{A \times \gamma_{Sn}}{(1-A) \times \gamma_{Ag}} \times h_{Sn}, \quad (3)$$

где h_{Ag} , h_{Sn} — толщина слоя Ag и Sn соответственно; γ_{Ag} , γ_{Sn} — удельный вес Ag и Sn соответственно; A — требуемое содержание Ag в припое.

На рис. 4 приведена расчетная зависимость толщины слоя серебра для заданной толщины олова в припойной композиции, обеспечивающей температуру плавления в интервале $221-350$ °С. Для достижения температуры ликвидуса 300 °С при толщине олова 10 ± 2 мкм и с учетом минимальной толщины паяного соединения $7,0$ мкм толщина слоя серебра должна быть не менее $1,0$ мкм.

Для оптимизации свойств припойной композиции изготовлены пластины полупроводниковых приборов КТ816, КТ315 с металлизацией Ti-Ni и последующим напылением слоев олова и серебра в различном соотношении. Электронно-лучевое нанесение олова толщиной $8-12$ мкм путем испарения на установке «Оратория-9» длилось $5,0-5,5$ ч. Магнетронное напыление серебра выполнялось на установке «Магна-2М», где варьирование толщины серебра от $0,2$ до $1,5$ мкм достигалось изменением мощности магнетрона.

Исследованиями на Оже-спектрометре установлена неравномерность распределения элементов припойных композиций Ag_{1,5}-Sn₉-Ag_{1,5} и Ag_{1,5}-Sn₉ (рис. 5) по глубине до 12 мкм от поверхности. Так, содержание олова в зависимости от глубины слоя изменяется от 75 до 52% , что приводит к нарушению стехиометрического состава композиции, неконтролируемому изменению температуры ее плавления, и в итоге, к невоспроизводимости процесса сборки [6].

При контроле внешнего вида пластин КТ816 (1-6 вар) обнаружено, что с увеличением толщины серебра от $0,2$ до $1,5$ мкм наблюдалось укрупнение кристаллической структуры от базового среза и выше (рис. 6а, б).

Это указывает на то, что температура по площади пластины неравномерная — возле базового среза температура меньше и растет с удалением от него. Из-за перегрева пластины на противоположной области от базового среза происходит оплавление припойной композиции, а поверхность композиции становится рельефной и бугристой (рис. 6в).

Для вариантов с верхним слоем, состоящим только из олова, структуры кристаллитов не выявлены, поверхность композиции была однородной.

Оценка качества сборки приборов

Напайка кристаллов КТ816 на выводную рамку, содержащую полосу серебра толщиной $4-6$ мкм, проводилась на автомате ЭМ 4085 вибрационной пайки при температуре 330 °С и усилении нагружения 80 г, количестве колебаний в секунду — 4 , а КТ315 — на автомате ЭМ 4105

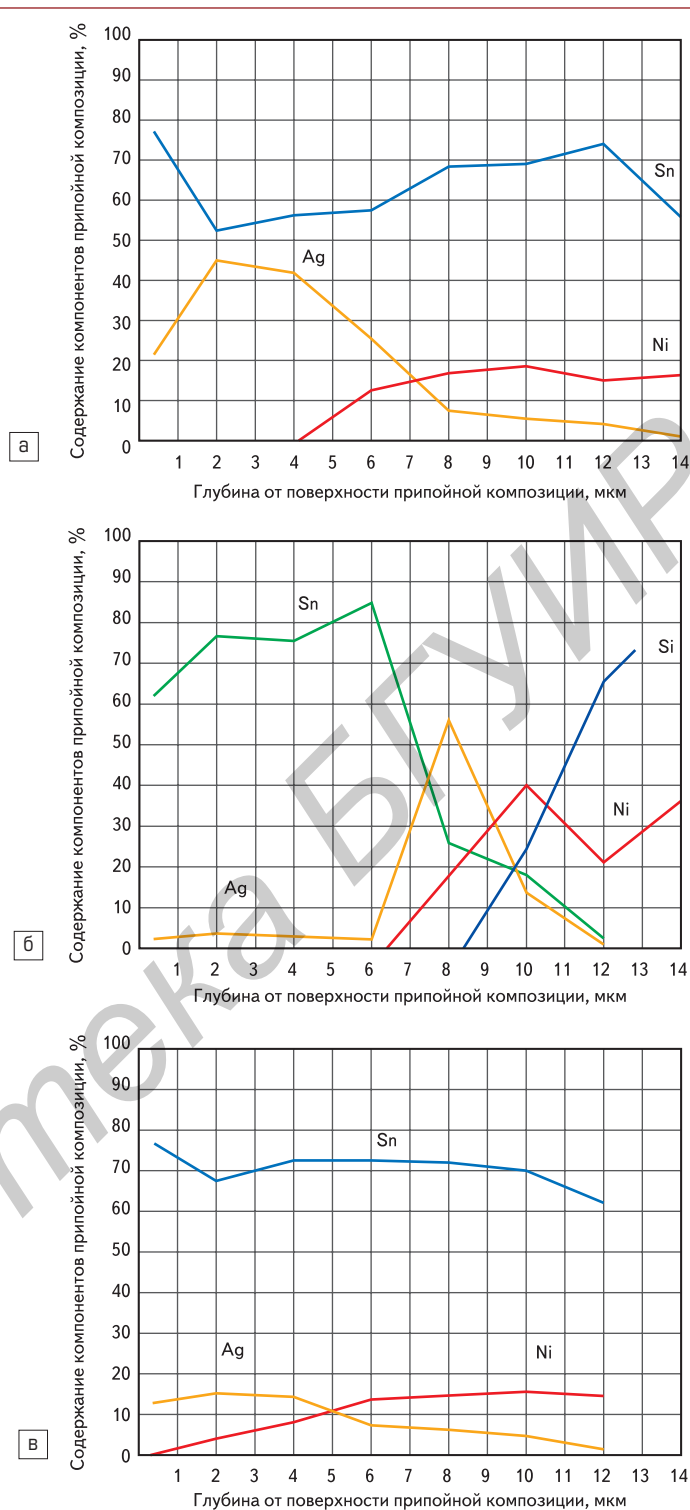


Рис. 5. Распределение содержания компонентов по глубине композиции: а) Ag_{1,5}-Sn₉-Ag_{1,5}; б) Ag_{1,5}-Sn₉; в) Ag_{0,2}-Sn₉-Ag_{0,2}

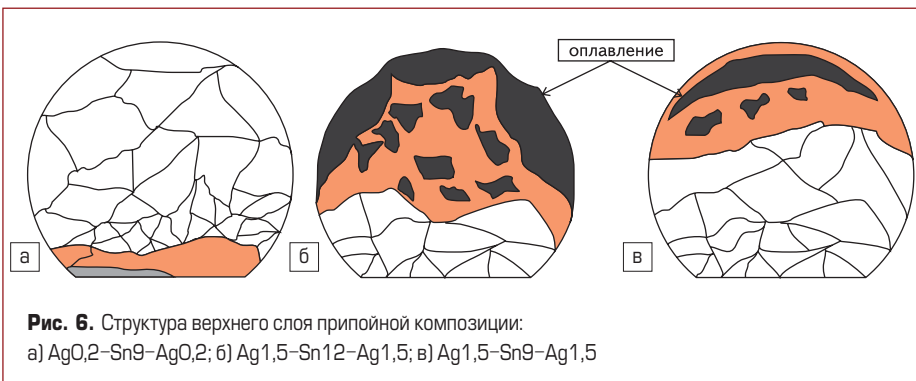


Рис. 6. Структура верхнего слоя припойной композиции: а) Ag_{0,2}-Sn₉-Ag_{0,2}; б) Ag_{1,5}-Sn₁₂-Ag_{1,5}; в) Ag_{1,5}-Sn₉-Ag_{1,5}

Таблица 1. Варианты припойных композиций и выход годных приборов

Вариант	Тип прибора, состав композиции	Выход годных, %
Изделие КТ816		
Ag1 Sn Ag2		
1	Ag ₁ = Ag ₂ = 0,2 мкм, Sn = 12,0 мкм	95,0-95,5
2	Ag ₁ = Ag ₂ = 0,2 мкм, Sn = 9,0 мкм	88,3-88,5
3	Ag ₁ = Ag ₂ = 0,45 мкм, Sn = 12,0 мкм	84,2-85,0
4	Ag ₁ = Ag ₂ = 0,45 мкм, Sn = 9,0 мкм	90,8-92,0
5	Ag ₁ = Ag ₂ = 1,5 мкм, Sn = 12,0 мкм	88,3-85,0
6	Ag ₁ = Ag ₂ = 1,5 мкм, Sn = 9,0 мкм	83,3-84,5
Ag Sn		
7	Ag = 0,45 мкм, Sn = 12,0 мкм	54,2-60,0
8	Ag = 0,45 мкм, Sn = 9,0 мкм	85,0-86,0
9	Ag = 1,5 мкм, Sn = 12,0 мкм	92,5-95,5
10	Ag = 1,5 мкм, Sn = 9,0 мкм	83,3-85,0
Изделие КТ315		
11	Ag ₁ = Ag ₂ = 0,6 мкм, Sn = 8,0 мкм	94,4-96,0
Изделие КП743А1		
12	Ag ₁ = Ag ₂ = 0,6 мкм, Sn = 8,0 мкм	88,8-90,0

при 360 °С. Качество напайки кристаллов для всех вариантов соответствовало требованиям процесса — равномерное растекание припоя по всему периметру, щели и непропаи отсутствовали. Прочность сцепления кристаллов с рамкой соответствовала техническим требованиям, при воздействии нагрузки на кристалл отслаивания его не происходило.

Разварка межсоединений проводилась на автомате ЭМ4060Т2 золотой проволокой диаметрами 40 и 25 мкм для КТ315. Для приборов КТ816 из-за низкой температуры плавления припойной композиции температура разварки была снижена с 255–270 °С до 210 °С на вариантах № 1, 2, 3, 4, 7, 8 и до 225–235 °С на вариантах № 5, 6, 9, 10. Изделия КТ816 и КТ315 были проведены по существующему технологическому маршруту и переданы на участок измерения электрических параметров. Выход годных приборов составил: для КТ816 — от 54,2% по варианту 7 до 92,0% по варианту 4, что ниже уровня текущего (95%); для КТ315 — 94,4–96,0%. Выход годных изделий на опытном варианте 1 и 9 (КТ816) и КТ315 находился на уровне текущего (92,5), а на остальных вариантах — ниже планового уровня на 9–30%. (таблица 1).

При выборе более низкой температуры разварки (для исключения отслоения кристаллов) наблюдались дефекты в виде отслаивания и непровары сварных точек.

Основной вид брака характеризовался превышением напряжения $U_{кэн} > N$. Как видно из рис. 7, толщина припоя под кристаллом со-

ставляет 3,5–7,0 мкм для вариантов, содержащих двухслойное серебро Ag-Sn-Ag, а для однослойного серебра Ag-Sn толщина паяного соединения составила 10,5–12,0 мкм.

Анализ брака выявил такие дефекты, как сколы, смещения кристалла, отслаивание проволочных соединений. Значения электрических параметров опытных приборов соответствовали нормативным данным.

В результате применения системы Sn-Ag в качестве бессвинцовой припойной композиции для сборки силовых полупроводниковых приборов установлено:

1. Неравномерность распределения элементов припойной композиции по глубине нарушает стехиометрический состав припойной композиции и изменяет температуру ее плавления, способствуя невоспроизводимости процесса сборки.
2. Увеличение мощности магнетронного напыления Ag вызывает неравномерный перегрев пластин по площади и проплавление припойной композиции.
3. При разварке золотых выводов возникают трудности, связанные с необходимостью подбора более низкой температуры, при этом более предпочтительны варианты, содержащие серебро толщиной 1,5 мкм.
4. Поскольку бессвинцовые припои имеют меньшую смачиваемость и текучесть, чем эвтектические оловянно-свинцовые, то для улучшения качества соединений необходима либо защитная атмосфера, либо вибрация в зоне монтажа кристаллов.

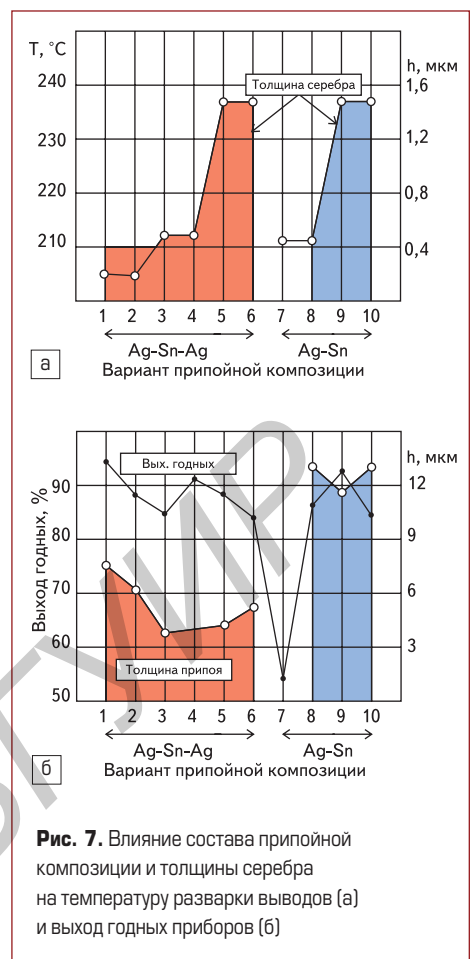


Рис. 7. Влияние состава припойной композиции и толщины серебра на температуру разварки выводов (а) и выход годных приборов (б)

Литература

1. Медведев А. Бессвинцовые технологии монтажной пайки // Электронные компоненты. 2004. № 11.
2. Бессвинцовые припои и их свойства // Электронные компоненты. 2004. № 11.
3. Lopez E. P., Vianco P.T., Rejent J.A. Solderability testing of Sn-Ag-xCu Pb-Free Solders on Copper and Au-Ni-Plated Kovar Substrates // Journal of Electronic Materials. 2005. V. 34. № 3.
4. Зенин В., Рагузов А, Гальцев В., Фоменко Ю. Припои и покрытия для бессвинцовой пайки изделий микроэлектроники // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 5.
5. Lead-Free Soldering in Electronics / Ed. By K. Saganuma. N.Y.: Marcel Dekker. 2004.
6. Ланин В. Л., Керенцев А. Ф., Турцевич А. С. Бессвинцовая припойная композиция для сборки полупроводниковых приборов // Доклады БГУИР. 2007. № 2(18).