

# Разработка и исследование бессвинцовых припоев для пайки кристаллов силовых полупроводниковых приборов

**В статье рассматриваются технологии пайки с использованием бессвинцовых припоев и физико-механические свойства металлов, входящих в состав припоев. На основе анализа диаграмм состояний двойных систем Al-Zn, Sn-Zn, Sn-Bi, Sn-Sb, Bi-Sb применительно к пайке кремниевых кристаллов к основаниям корпусов были разработаны и изготовлены три типа бессвинцовых припоев следующих составов (вес. %): 93-94Sn/1-2Ag/5-6Bi; 87-89Sn/9-11Bi/0,8-1,2Sb; 88-89Sn/5-6Bi/0,5-1Sb/5-6Zn. Проведены исследования смачивания и растекания припоев по серебряным покрытиям кристаллов и никелевым покрытиям корпусов при температурах напайки кристаллов в различных средах: водороде, формир-газе и вакууме. На примере сборки транзистора типа КП767В экспериментально установлено, что припой 87-89Sn/9-11Bi/0,8-1,2Sb является перспективным для напайки кристаллов СПП в формир-газе, так как данный припой обеспечивает площадь паяного шва не менее 95% от площади кристалла.**

**Виктор Зенин,**  
к. т. н., профессор

zenvik@bk.ru

**Владимир Бойко,**  
к. т. н.  
**Александр Кастрюлев,**  
к. т. н.  
**Александр Ткаченко**  
**Ольга Хишко,**  
к. т. н.

## Введение

Директива Европейского Союза по экологической безопасности RoHS (Restriction of use of Certain Hazardous Substances) с 1 июля 2006 года ограничивает использование свинца в новом электрическом и электронном оборудовании — не более 0,01%. Эти ограничения установлены не от веса изделия, узла или компонента, а от каждого отдельного гомогенного материала [1]. Уже к концу 2001 года было выдано более ста патентов на сплавы различных составов для замены свинцовых припоев. Каждый припой обладает своим сочетанием свойств, что затрудняет окончательный выбор для использования в производстве полупроводниковых изделий (ППИ).

В последние годы достаточно активно ведутся работы, посвященные способам и технологиям пайки с использованием бессвинцовых припоев [2-7]. Следует отметить, что по множеству бессвинцовых припоев, рекомендованных для сборки ППИ, отсутствуют сведения об основных технологических свойствах припоев (смачиваемости и растекании по паяемым поверхностям кристалла и основания корпуса), имеется недостаточно данных о практическом использовании их в технологиях сборки ППИ.

Существующая реальность на рынке импортных электронных компонентов и активная деятельность изготовителей компонентов по переходу на бессвинцовые технологии заставляют предприятия — производители полупроводниковых изделий — прини-

мать срочные меры по внедрению в производство данных технологий. При разработке новых способов и бессвинцовых технологий пайки необходимо учитывать традиционно сложившиеся методики конструирования и технологии производства ППИ.

В связи с выполнением директивы RoHS традиционно сложившиеся методики конструирования и технологии производства элементной базы требуются пересматривать, чтобы они остались на том же уровне надежности, каким он был до перехода на бессвинцовые технологии [3].

## Анализ бессвинцовых припоев

Исследования показали [2, 4, 6-11], что для пайки без свинца наиболее перспективно семейство сплавов олова, серебра и меди. В данных сплавах содержится от 3 до 4% Ag. Обычно в сплавах, произведенных в Японии, содержится 3% Ag, в Европе — 3,5%, а в Северной Америке — 3,8-4%.

Теплопроводность паяных соединений в значительной степени определяется теплопроводностью припоя, особенно при его слабом химическом средстве с паяемым металлом. В случае образования между ними твердых растворов теплопроводность паяных соединений может снижаться по сравнению с теплопроводностью припоя. Следует отметить, что теплопроводность припоев и паяных соединений является важным параметром для ППИ, особенно для силовых полупроводниковых приборов (СПП), в ко-

торых интенсивный теплообмен служит определяющей характеристикой надежности. Особенно важна высокая теплопроводность припоев с целью обеспечения высокого качества паяных соединений для деталей с различными коэффициентами теплопроводности, например, кремниевого кристалла с медным корпусом.

Качество припоя зависит от доли вредных примесей в сплаве, которые снижают прочность паяного соединения. Известно, что присутствие никеля ведет к образованию каверн, алюминия — к зернистости, железо способствует образованию окалины, избыток меди ухудшает смачиваемость при пайке, а сурьма повышает хрупкость паяного соединения при низких температурах. Поэтому чистота исходных металлов в припое является основным фактором формирования качественных паяных соединений. При выборе припоя предпочтительны эвтектические сплавы, так как их кристаллизация происходит в узком температурном диапазоне, при этом отсутствует смещение компонентов. Расплавы бескислородных металлов активно растворяют в своем составе большое количество оксидов, и, следовательно, получаемые паяные соединения обладают высокой прочностью.

Различные типы бессвинцовых припоев, которые можно использовать на операции пайки ППИ, подробно рассмотрены в работах [2, 3, 5, 9]. В качестве бессвинцовых припоев используются сплавы на основе олова с добавлением в него Ag, Cu, Bi, Zn и других металлов. С точки зрения надежности паяных соединений используют сплавы Sn–Ag и Sn–Ag–Cu (95–96,6Sn/2,5–4,1Ag/0,9Cu). Основным их недостатком является сравнительно высокая температура плавления — около 220 °С, негативно влияющая на сами ППИ и на плату.

При выборе припоя следует учитывать растворимость компонентов основного металла в расплавленном припое, так как в процессе пайки его состав и температура плавления могут существенно изменяться, что приводит к тому, что припой или не заполнит зазор, или будет растворять основной металл.

Как установлено при анализе литературных источников [4, 12], только два бессвинцовых сплава достаточно исследованы с точки зрения их использования на операции напайки кристаллов в изделиях микроэлектроники. Сплав (96,2Sn/2,5Ag/0,8Cu/0,5Sb), получивший название CASTIN [12], имеет температуру плавления 215...217 °С. Сплав Sn/Ag/Cu в припое CASTIN легирован сурьмой, что заметно улучшает его свойства, а именно: в нем не растут кристаллы интерметаллических соединений при температуре до 125 °С. Известно, что в соответствии с требованиями военных стандартов Sb добавляется в количестве 0,2–0,5% в оловянно-свинцовые припои для улучшения их стойкости при термоциклировании.

В статье [4] показано, что сплав CASTIN является перспективным для замены оловянно-свинцовых припоев и может применяться для

Таблица 1. Физико-механические свойства металлов, входящих в состав бессвинцовых припоев

№ п/п	Металл	Температура плавления, °С	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·К	Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Удельное электрическое сопротивление, $\alpha \times 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$
1	Висмут	271,3	8,37	1,66	109 (при 0 °С)
2	Индий	156,2	88	3,3	8,2
3	Кобальт	1492	69,08	1,2	5,68
4	Медь	1083	395-402	1,66	1,78
5	Золото	1063	310	1,4	2,42
6	Никель	1453	92	1,4	7,5
7	Олово	231,9	65,8	2,3	11,5
8	Серебро	960,8	418	1,9	1,66
9	Сурьма*	630,5	17,6	0,98	39,0
10	Цинк	419,5	110,9	3,97	5,9

\*Sb иногда относят к полуметаллам

конвекционной пайки, пайки волной, ручным паяльником, для лужения выводов компонентов и проводников печатных плат.

У сплавов Sn/Ag более высокая смачиваемость по сравнению с Sn/Pb. Эвтектический сплав 96,5Sn/3,5Ag [12] с температурой плавления 221 °С при испытаниях на термоциклирование показал более высокую надежность по сравнению с Sn/Pb. Данный припой многие годы успешно применяется в специальной аппаратуре.

В процессе исследований по замене оловянно-свинцового припоя на сборочных операциях ППИ рассматривались многие варианты [7]. Оценка вариантов бессвинцовой технологии сборки по сравнению с оловянно-свинцовым сплавом проводилась по следующим критериям [13]: способность к пайке, надежность паяных соединений, чувствительность к образованию нитевидных кристаллов, совместимость процессов пайки без свинца и пайки Sn–Pb припоем, переходное сопротивление контактов, коррозионное истирание, коэффициент трения, технология покрытия (гальваническое или окунанием), стоимость.

#### Металлы, входящие в состав бессвинцовых припоев

При разработке паяных конструкций (в том числе и ППИ) и технологии их изготовления конструкторы и технологи принимают во внимание физико-механические свойства металлов и припоев на их основе, учитывают физико-химическую стабильность припоев во времени и совместимость их с паяемыми покрытиями [14–16]. К физико-механическим свойствам припоев относятся: температура плавления, пределы прочности на растяжение, срез, предел текучести, относительное удлинение (пластичность), модуль упругости, температурный коэффициент линейного расширения, коэффициент теплопроводности, удельное электросопротивление и др. [17–19].

Анализ бессвинцовых припоев показал [2, 4, 5], что в их состав входят следующие металлы: Bi, In, Co, Cu, Au, Ni, Sn, Ag, Sb и Zn. В качестве флюсующих добавок в состав припоев иногда вводят Р. Для разработки новых припоев необходимо учитывать свойства металлов, входящих в их состав (табл. 1).

Таблица 2. Металлы и их свойства

Свойство	Металл, обладающий данным свойством
Особая легкоплавкость	In
Хорошая смачиваемость, в том числе неметаллов	In, Ti
Расширение при затвердевании	Bi
Высокая упругость испарения при давлении 100 кПа и низком вакууме	Bi, Sb, Zn
Особая пластичность	Au, Ag, Sn, Zn
Высокая теплопроводность	Au, Ag, Cu, Al

Для пайки различных изделий применяется большое количество известных припоев, в качестве которых используются как чистые металлы, так и сплавы, состоящие из двух, трех и более компонентов.

Разработка новых составов припоев определяется условиями эксплуатации конкретных ППИ. В таблице 2 приведены некоторые свойства металлов [20, 21], введение которых позволяет во многих случаях обеспечить специальные свойства припоев.

Следует отметить одну особенность припоев, содержащих висмут. Эти сплавы не могут применяться в процессах, где присутствует свинец (покрытия платы или выводов компонентов).

При использовании технологии пайки бессвинцовыми припоями особенно необходимо следить, чтобы свинец из паяемых покрытий не попадал в бессвинцовые припои. Установлено [12], что попадание свинца в бессвинцовые припои приводит к снижению их надежности. Если предприятие переходит на использование бессвинцовых припоев, то необходимо применять и бессвинцовые покрытия компонентов и печатных плат.

#### Разработка новых бессвинцовых припоев

Основной критерий при выборе припоя — это температура плавления. По данному параметру все припои разделяются на четыре группы: низкотемпературные ( $T_{пл} < 180 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), с температурой плавления эвтектики 63Sn/37Pb (183 °С), со средней температурой плавления (200–230 °С) и высокотемпературные (230–350 °С).

Анализ бессвинцовых припоев показал, что они, в основном, представляют собой двухкомпонентные сплавы. Для улучшения свойств

припоев и получаемых с их помощью паяных соединений в эти сплавы вводят те или другие металлы. Поэтому для разработки новых составов бессвинцовых припоев представляет интерес рассмотрение диаграмм состояний двойных металлических систем.

На основе анализа диаграмм состояний двойных систем Al–Zn, Sn–Zn, Sn–Bi, Sn–Sb, Bi–Sb применительно к пайке кремниевых кристаллов к основаниям корпусов были разработаны и изготовлены три типа бессвинцовых припоев следующих составов (вес. %): 93–94Sn/1–2Ag/5–6Bi; 87–89Sn/9–11Bi/0,8–1,2Sb; 88–89Sn/5–6Bi/0,5–1Sb/5–6Zn.

По нашим сведениям, припои с таким сочетанием компонентов в промышленности в настоящее время не используются. Данные припои имеют температуру плавления 200–240 °С, что позволяет использовать их при пайке кристаллов СПП.

В качестве основного компонента выбранных припоев используется Sn ввиду его высокой пластичности. Sn в составе различных припоев широко используется в производстве, в том числе при изготовлении изделий микроэлектроники:

- Ag обладает самым высоким коэффициентом теплопроводности по сравнению со всеми металлами, которые могут входить в состав различных припоев. В малых концентрациях Ag несущественно повышает себестоимость приборов.
- Bi — безвредный металл. Кроме того, Bi и Sb обладают взаимной растворимостью, что способствует повышению качества припоев, в состав которых входят данные материалы.
- Sb улучшает сопротивление сплава термической усталости. Наличие в сплаве около 1% Sb не ухудшает паяемость и незначительно изменяет температуру плавления припоев. В небольшой концентрации Sb улучшает стойкость припоев при термоциклировании.

Основным положительным свойством Zn является его особая пластичность и образование низкотемпературной эвтектики с Sn.

Так как данные припои были изготовлены в лабораторных условиях, они подвергались рентгеноспектральному микроанализу на предмет соответствия заданным составам (по навескам компонентов и реальным, полученным после расплавления). Для сравнения с разработанными новыми припоями проведен микроанализ припоя 95,5Sn/3,8Ag/0,7Cu, который изготавливается серийно на специализированном предприятии с соблюдением всех требований к металлургическим процессам. Данный припой, как утверждается в работах [4, 12], обладает хорошими паяемыми характеристиками и обеспечивает высокое качество паяных соединений в производстве изделий микроэлектроники. Проведение рентгеноспектрального микроанализа необходимо с целью подтверждения процентного содержания исходных металлов и их чистоты. Известно, что примеси, входящие в состав исходных металлов, существенно влияют не только на смачивание и растекание припоя по паяемым поверхностям, но и на качество

сформированных паяных соединений. Рентгеноспектральный микроанализ разработанных и изготовленных бессвинцовых припоев показал, что количественный состав элементов, входящих в данные припои, практически не изменился.

#### Оценка смачивания и растекания новых бессвинцовых припоев по паяемым поверхностям кристалла и корпуса

Способность паяемых покрытий при режимах пайки смачиваться припоем определяет качество пайки. Смачиваемость — это первая стадия физико-химического взаимодействия припоя с паяемой поверхностью изделия. Смачиваемость покрытий припоем относится к технологическим факторам, позволяющим проводить экспресс-анализ пайки как способа соединения элементов. Известно, если нет смачивания припоем паяемых поверхностей, то нет и паяного соединения.

Эксплуатационным параметром, позволяющим прогнозировать длительность хранения и эксплуатации деталей в заданных условиях, является прочность паяных соединений [21, 22], а применительно к СПП — и тепловое сопротивление кристалл–корпус, которое напрямую зависит от качества паяного соединения [23, 24].

Смачиваемость и растекание припоя связаны с краевым углом смачивания. Этот угол между поверхностями припоя и паяемым материалом на практике используется для оценки способов и режимов пайки.

Экспериментально установлено, что прямой зависимости между растеканием и течением припоя в зазоре нет. Припои могут хорошо растекаться по поверхности, но не заполнять капиллярный зазор, из-за того что расплавленный припой интенсивно насыщается компонентами паяемых поверхностей.

Количество растворенного металла в поверхностном слое зависит от концентрации его в объеме (паяном шве) и температуры. В реальных условиях происходят следующие процессы: при заполнении зазора припой взаимодействует с основным металлом, что приводит к увеличению вязкости расплава и, следовательно, к нарушению исходных условий течения; расплав припоя при заполнении зазора изменяет температуру, что наблюдается при неодинаковом нагреве соединяемых деталей, в результате условия взаимодействия основного металла с припоем и течение последнего будет неравномерным; при растекании припоя сложного состава в зазоре его компоненты избирательно взаимодействуют с паяемой поверхностью металла, что вызывает перемещение частиц припоя в направлении, перпендикулярном к потоку (отдельные компоненты основного металла также избирательно взаимодействуют с припоем); образование в расплаве и на границе с основным металлом отдельных кристаллов, что также влияет на течение припоя в зазоре.

Смачиваемость определяют по методу «лежачей капли». В этом случае для определения

величины краевого угла используют коэффициент растекания  $K_p$ , который рассчитывается по формуле [25]:

$$K_p = ((D-H)/D) \times 100\%,$$

где  $D$  — диаметр сферической капли припоя;  $H$  — высота капли после ее растекания по паяемой поверхности.

Величина  $D$  для сферической капли определяется из выражения:

$$D = \sqrt[3]{6P/\pi\gamma},$$

где  $P$  — вес исследуемой навески припоя;  $\gamma$  — удельный вес припоя.

С помощью индикатора высоту  $H$  застывшего припоя определяют с достаточной точностью.

При анализе качества паяных соединений полупроводникового кристалла с корпусом навеску припоя для исследований можно выбирать исходя из задаваемого объема припоя в паяном шве [25].

В данной работе оценку паяемости покрытий по растеканию навески припоя проводили по методу, изложенному в ГОСТ 9.302-88. При этом исследуемый припой имел диаметр 8,0 мм и толщину 0,3 мм. Коэффициент растекания припоя определяли по формуле:

$$K_p = S_p/S_0,$$

где  $S_p$  — площадь, занятая припоем после расплавления и растекания, мм<sup>2</sup>;  $S_0$  — площадь, занятая дозой припоя в исходном состоянии, мм<sup>2</sup>.

Нагрев образцов осуществлялся на оборудовании и по технологии напайки кристаллов на основания корпусов, применяемых в серийном производстве СПП. Проведен анализ внешнего вида растекания разработанных бессвинцовых припоев по никелевым покрытиям корпусов и серебряным покрытиям кристаллов. Данные покрытия в настоящее время широко используются на сборочных операциях СПП. Образцы с серебряными покрытиями были использованы для экспериментов непосредственно после напыления, то есть сульфидной пленки Ag<sub>2</sub>S на поверхности не было.

Исследования показали, что из всех исследуемых припоев лучшие результаты смачивания никелевых и серебряных покрытий корпусов и кристаллов соответственно при температурах нагрева в различных средах, используемых в производстве СПП, показал припой состава (вес. %) 87–89Sn/9–11Bi/0,8–1,2Sb. Смачивание и растекание данного припоя по паяемым поверхностям кристалла и корпуса хорошее ( $K_p$  составляет 1,10–1,15) в водороде, формирующем газе (смесь газов H<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> в соотношении 15:85) и вакууме. Это свидетельствует о высоких технологических свойствах припоя.

Содержание в припое (вес. %): 87–89 олова обеспечивает высокий коэффициент теплопроводности и хорошую смачиваемость паяемых покрытий кристалла и основания корпуса; 9–11 висмута повышает температуру плавления припоя до 230–240 °С; 0,8–1,2 сурьмы улучшает сопротивление сплава термической усталости.

При анализе растекания припоев по различным покрытиям (рис. 1) нельзя не обратить внимания на подготовку покрытий перед пайкой. Наблюдаются участки, не смачиваемые припоем, что свидетельствует о плохом качестве подготовки поверхности перед пайкой (рис. 1, образцы 2б, 2в). Такое явление недопустимо при напайке кристаллов к основаниям корпусов в производстве ППИ, особенно СПП.

### Апробирование припоя 87–89Sn/9–11Bi/0,8–1,2Sb (вес. %) в производстве транзисторов типа КП767В

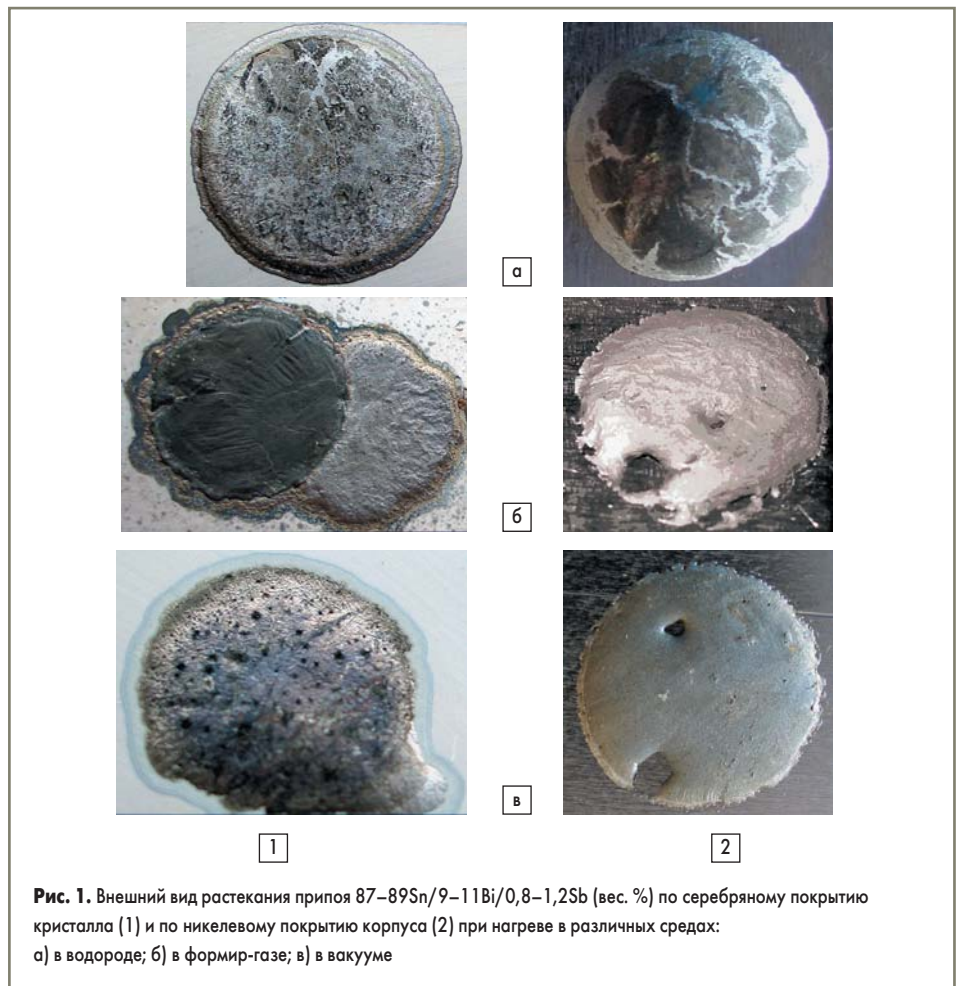
При напайке кристаллов на основания корпусов стремятся получить площадь спаиваемой поверхности не менее 95% от площади кристалла, поэтому к технологии и оборудованию для пайки предъявляются высокие требования. В то же время известно, что некоторые ППИ при площади неспаиваемой поверхности 10–15% от площади кристалла по всем электрическим параметрам, в том числе и по мощности рассеивания, находятся в пределах допустимых значений [26].

Основным элементом отвода тепла от полупроводникового кристалла к окружающей среде является паяный участок кристалла с основанием корпуса, то есть физическое соединение между кристаллом и корпусом, на который монтируется кристалл [27, 28]. Наличие зазора или пустот между кристаллом и поверхностью, на которую он крепится, при эксплуатации ППИ приводит к увеличению температуры активной части полупроводниковой структуры, и в конечном итоге к ухудшению их электрических характеристик.

Эксперименты по применению бессвинцового припоя для напайки кристалла к основанию корпуса проводились на операции сборки полевого транзистора типа КП767В. На паяемую поверхность полупроводникового кристалла в составе пластины по известной технологии наносили пленочную металлизацию Ti–Ti+Ni–Ag. Для сборки использовались медные корпуса типов КТ-28-2 (аналог ТО-220) и КТ-43В (аналог ТО-247) с покрытием химическим никелем.

Для исследования влияния качества паяных соединений кристалла с основанием корпуса на электрические параметры и тепловое сопротивление кристалл–корпус транзисторов КП767В пайку проводили в водороде и в формирующем газе на режимах, обеспечивающих необходимое качество паяных соединений. В качестве припоя использовали сплав 87–89Sn/9–11Bi/0,8–1,2Sb (вес. %).

Пайка полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов КТ-28-2 проводилась в конвейерной водородной печи 105А-72М. Температура в зоне пайки поддерживалась в пределах  $300 \pm 5$  °С в течение 3–4,5 мин (в зависимости от скорости движения кассеты с собранными приборами). Для напайки кристаллов на основания корпусов КТ-43В в формирующем газе использовалась установка ЭМ-4085-14М, которая позволяет осуществлять полную автоматизацию всех операций, включая подачу корпусов, выбор годных кристаллов с полу-



**Рис. 1.** Внешний вид растекания припоя 87–89Sn/9–11Bi/0,8–1,2Sb (вес. %) по серебряному покрытию кристалла (1) и по никелевому покрытию корпуса (2) при нагреве в различных средах: а) в водороде; б) в формирующем газе; в) в вакууме

проводниковой пластины и присоединение кристаллов. Температура в зоне пайки поддерживалась в пределах  $300 \pm 5$  °С в течение 5–10 с.

После напайки кристаллов внутренние выводы присоединялись ультразвуковой сваркой на установке УСИММ-61 на режимах, обеспечивающих получение максимальной прочности микросоединений. В качестве вывода истока использовали проволоку марки АОЦПоМ-400 (ТУ 6365-051-46594157-2004), в качестве вывода затвора — проволоку марки АК 0,9 ПМ-100 (ТУ 6365-051-46594157-2004).

Для экспериментов было изготовлено по 20 приборов в каждой партии. Измерения проводились на приборах после сборки, термоциклирования и 10 000 энергоциклов. Испытаниям подвергались только приборы, годные после сборочных операций.

На транзисторах после проведения сборки, термоциклирования и энергоциклов замерялись следующие электрические параметры: сопротивление сток–исток в открытом состоянии ( $R_{СИ,отк}$ ), пороговое напряжение ( $U_{ЗИ,пор}$ ), постоянное прямое напряжение диода ( $U_{ИС}$ ), пробивное напряжение диода ( $U_{СИ}$ ).

При испытании на воздействие изменения температуры среды (термоциклирование) температура в камере тепла  $125 \pm 5$  °С, в камере холода —  $минус 60 \pm 3$  °С, количество циклов — пять. Время воздействия температуры в каждой из камер для каждого цикла — 30 мин. Время переноса из камеры в камеру не более 2 мин. Испытания на устойчивость к энергоциклам проводились согласно ГОСТ В 28146-89 на режиме ток истока  $I_I = 3$  А.

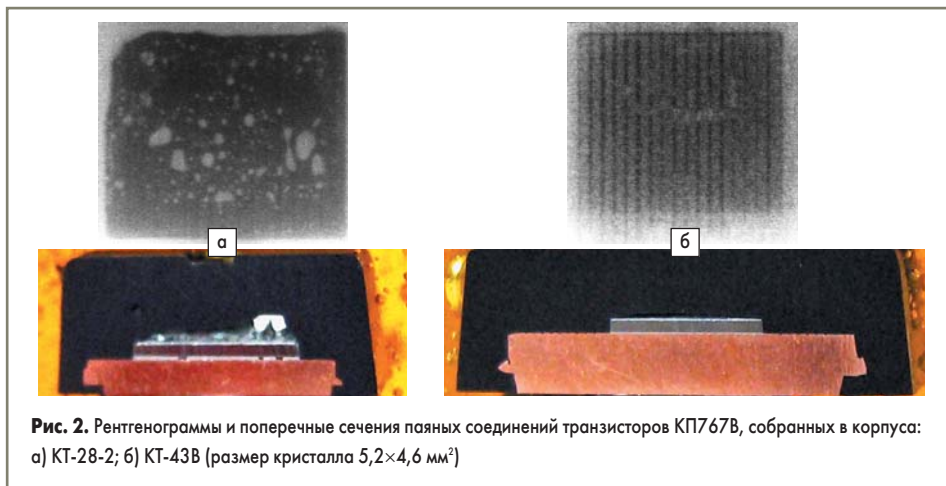
Установлено, что способы и режимы напайки кристаллов на основания корпусов КТ-28-2 и КТ-43В практически не влияют на электрические параметры транзисторов КП767В. Все исследуемые приборы (после сборки, термоциклирования и 10 000 энергоциклов) по электрическим параметрам находились в пределах допустимых значений (согласно ТУ).

Важнейшим параметром любого СПП является максимально допустимая температура нагрева кристалла. Превышение этой температуры чревато постепенным ухудшением электрических параметров или мгновенным выходом СПП из строя. Поэтому важно не допускать нагрева кристалла выше максимально допустимой температуры даже в таких кратковременных режимах, как лавинный пробой или работа при КЗ [29].

Известно, что электрические параметры нельзя однозначно использовать при оценке качества напайки кристаллов на основания корпусов. В производстве ППИ (особенно СПП) одним из основных параметров оценки качества напайки кристалла на основание корпуса является определение теплового сопротивления кристалл–корпус ( $R_{Ткр-к}$ ).

Для определения теплового сопротивления кристалл–корпус ( $R_{Ткр-к}$ ) монтаж кристаллов транзисторов КП767В к основаниям корпусов КТ-28-2 и КТ-43В осуществляли различными способами (пайка в водороде и формирующем газе).

Анализ качества паяных соединений осуществлялся методом рентгеновской дефектоскопии (после сборки, термоциклирования



**Рис. 2.** Рентгенограммы и поперечные сечения паяных соединений транзисторов КП767В, собранных в корпуса: а) КТ-28-2; б) КТ-43В (размер кристалла 5,2×4,6 мм<sup>2</sup>)

и 10 000 энергоциклов) и по поперечным шлифам (после 10 000 энергоциклов).

Установлено, что приборы, изготовленные с использованием разработанного припоя 87–89Sn/9–11Bi/0,8–1,2Sb (вес. %), по всем параметрам соответствуют нормам ТУ. Среднее значение теплового сопротивления кристалл–корпус составило 0,84 °С/Вт после сборки и 1,04 °С/Вт после 10 000 энергоциклов для транзисторов в корпусе КТ-28-2; 0,59 °С/Вт после сборки и 0,64 °С/Вт после 10 000 энергоциклов для транзисторов в корпусе КТ-43В. Незначительное увеличение теплового сопротивления кристалл–корпус ( $R_{Ткр-к}$ ) после 10 000 энергоциклов свидетельствует о пластичности паяных соединений, что повышает надежность СПП в целом.

На рис. 2 представлены рентгенограммы и поперечные сечения паяных соединений транзисторов КП767В, собранных в корпуса КТ-28-2 и КТ-43В с использованием припоя 87–89Sn/9–11Bi/8–1,2Sb (вес. %). Анализ рентгенограмм и поперечных сечений паяных соединений данной группы приборов показал, что использование разработанного припоя обеспечивает при пайке кристаллов к основаниям корпусов в формир-газе площадь паяного шва не менее 95% от площади кристалла.

Исследования паяных соединений кристалл–корпус транзисторов КП767В показали, что качество паяных соединений СПП, а в целом и надежность приборов в большей степени зависят от типов корпусов и от способа пайки. Рекомендуется пайку осуществлять с использованием притирки кристалла к основанию корпуса в защитной среде, например формир-газе. Данные выводы хорошо согласуются с известными работами [30, 31].

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 08-08-99033.*

### Литература

1. Шапиро Л. Внедрение европейской директивы RoHS // Электронные компоненты. 2006. № 1.
2. Медведев А. М. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что нас ожидает? // Электронные компоненты. 2004. № 11.
3. Медведев А. М. Электронные компоненты и монтажные площадки // Компоненты и технологии. 2006. № 12.

4. Григорьев В. Бессвинцовые технологии — требование времени или прихоть законодателей от экологии? // Электронные компоненты. 2001. № 6.
5. Зенин В. В. Бессвинцовые припои в технологии производства изделий микроэлектроники / В. В. Зенин, В. Н. Беляев, Ю. Е. Сегал, А. А. Колбенков // Микроэлектроника. 2003. Том 32. № 4.
6. Пайка без свинца. Bleifrei loten: Silber und Kupfer statt Blei. Krempelsauer // Elektor (BRD). 2000. № 5.
7. Шапиро Л. Использование бессвинцовых технологий не избежать // Вестник электроники. 2007. № 2.
8. Пайка оплавлением: краткий справочник по бессвинцовой пайке: <http://www.sovtest.ru>.
9. Зенин В. В. Бессвинцовая пайка кристаллов к основаниям корпусов ИЭТ / В. В. Зенин, Ю. Л. Фоменко, А. В. Рягузов, О. В. Хишко // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы докл. междунар. науч.-техн. семинара. М., 2003.
10. Шеголева И. Компания AIM решает проблемы перехода на бессвинцовую пайку // Производство электроники: Технологии, оборудование, материалы. 2006. № 2.
11. Зенин В. В. Покрывтия кристаллов и корпусов ИЭТ для пайки бессвинцовыми припоями / В. В. Зенин, Ю. Л. Фоменко, А. В. Рягузов, О. В. Хишко // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы докл. междунар. науч.-техн. семинара. М., 2003.
12. Seelid K., Suraski D. The Status of Head — Free Solder Alloys / Перевод А. Ермоловича // Электронные компоненты и системы. 2000. № 11.
13. Пинчук Р., Еркин А. Планы компании Molex по производству соединений с применением бессвинцовой технологии // Chip-News. 2005. № 3.
14. Соколов В. И., Лавренко С. П. Физические аспекты надежности интегральных схем // Сб. тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Физические аспекты надежности интегральных схем». Воронеж, 1993.
15. Горлов М. И., Золотухина О. М. Контроль качества монтажа кристаллов по тепловому сопротивлению // Тез. докл. IV науч.-техн. отрасл. конф. «Состояние и пути повышения надежности видеоманитрофонов». Саратов, 1990.

16. Горлов М. И., Ануфриев Л. П., Бордюжа О. Л. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем в процессе серийного производства. Минск: Интеграл, 1997.
17. Петрунин И. Е., Лоцманов С. Н., Николаев Г. А. Пайка металлов. М.: Металлургия, 1973.
18. Справочник по пайке / Под ред. С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрунина, В. П. Фролова. М.: Машиностроение, 1975.
19. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1976.
20. Лашко С. В. Проектирование технологии пайки металлических изделий: справочник / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко, И. Г. Нагапетян и др. М.: Металлургия, 1983.
21. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Пайка металлов. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1988.
22. Зенин В. В., Сегал Ю. Е., Колбенков А. А. Оценка смачиваемости и растекания припоя по паяемой поверхности // Петербургский журнал электроники. 2000. № 2.
23. Сегал Ю. Е. Обеспечение качества паяных соединений кристаллов в полупроводниковых приборах для силовой электроники в процессе их разработки и серийного производства: дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 2001.
24. Рягузов А. В. Модификация процесса бессвинцовой пайки кристаллов к основаниям корпусов силовых полупроводниковых приборов: дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 2006.
25. Манко Г. Пайка и припои / Перевод с нем. М.: Машиностроение, 1968.
26. Бокарев Д. И. Исследование зависимости электрических параметров мощных транзисторов КТ8232А1 от сборочных операций / Д. И. Бокарев, Ю. Е. Сегал, Ю. Л. Фоменко, В. В. Зенин // Твердотельная электроника и микроэлектроника: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2003.
27. Захаров А. Л., Асвадурова Е. И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов: метод эквивалентов. М.: Радио и связь, 1983.
28. Коваленко П. Ю. Конструктивно-технологические особенности разработки гибридных силовых модулей: дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 2001.
29. Лоренц Л. Состояние и направления дальнейшего развития в сфере разработки, производства и применения силовых полупроводниковых приборов // Электротехника. 2001. № 12.
30. Ануфриев Л., Керенцев А., Ланин В. Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 3.
31. Ланин В., Керенцев А., Турцевич А. Сборка силовых полупроводниковых приборов с бессвинцовой припойной композицией // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 2.