

Напайка кристаллов на основания корпусов силовых полупроводниковых приборов с образованием эвтектики Al-Zn

В статье рассмотрены способы пайки кристаллов в производстве силовых полупроводниковых приборов и проанализированы диаграммы состояний систем алюминий – цинк, алюминий – олово и цинк – олово. Также описаны разработка способа напайки кристаллов на основания корпусов с образованием эвтектики Al-Zn и проведение оценки прочности паяных соединений кристалл – корпус и анализа качества паяных швов методом рентгеновской дефектоскопии и по поперечным шлифам транзисторов КП767В.

**Виктор Зенин,
д. т. н., профессор**

zenvik@bk.ru

**Александр Кочергин
Ольга Хишко,
к. т. н.**

Особенности пайки кристаллов в производстве силовых полупроводниковых приборов

Образование паяного соединения происходит в результате возникновения химических связей в контакте основной металл – расплав припоя, что способствует формированию четырех разновидностей спаев: «бездиффузионного», растворно-диффузионного, контактно-реакционного и диспергированного [1, 2].

Существуют различные способы напайки полупроводниковых кристаллов на основания корпусов силовых полупроводниковых приборов (СПП). Известен способ, по которому небольшое количество припоя размещают рядом с кристаллом, расположенным на участке подложки, где он будет припаян [3]. При температуре пайки расплавленный припой смачивает края кристалла и за счет капиллярного эффекта заполняет зазор между кристаллом и подложкой. Основным недостатком данного способа является наличие непропаев в паяном шве, то есть невозможность получения спая, равного площади кристалла.

Известен способ [4] монтажа кристаллов БИС с использованием припоя на основе цинка, по которому на паяемую сторону кристалла напыляют алюминий толщиной 0,7–1,2 мкм, а затем проводят пайку к корпусу, покрытому припоем цинк – алюминий – германий (ЦАГ). Недостатком данного способа является его высокая трудоемкость, заключающаяся в изготовлении сплава ЦАГ и нанесении его на монтажную площадку методом электрического взрыва фольги. Это требует наличия специального дорогостоящего оборудования. Кроме того, при посадке кристаллов на сплав ЦАГ необходимо создавать наименьшее удельное давление кристалла на расплав и выполнять траектории движения кристалла в виде восьмерки для разрушения поверхностной оксидной пленки.

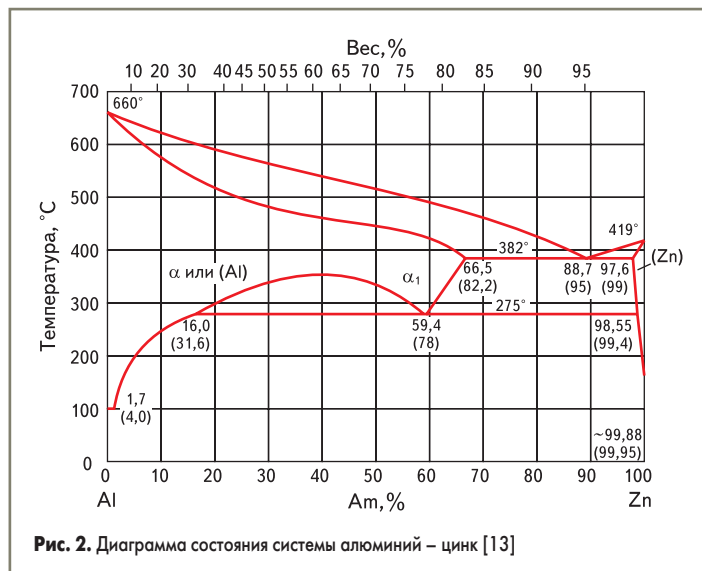
Разработан способ пайки полупроводниковых кристаллов СПП с использованием бессвинцовых припоев [5]. Сущность такого способа пайки заключается в том, что на алюминий на паяемой стороне кристалла наносят цинк, а напайку осуществляют на

основание корпуса, покрытого оловом, при этом толщину слоев цинка и олова выбирают исходя из заданной толщины паяного шва и образования эвтектического сплава цинк – олово. Пайка осуществляется в защитной среде при температуре несколько выше температуры образования эвтектического сплава Zn-Sn. При этом площадь спая равна площади кристалла.

Анализ способов пайки бессвинцовыми припоями показал, что наиболее перспективной является контактно-реактивная (капиллярная) пайка, при которой припой образуется в результате контактно-реактивного плавления соединяемых материалов, промежуточных покрытий или прокладок с образованием эвтектики [2].

Сущность контактно-реактивной пайки кристаллов к основаниям корпусов заключается в нагреве корпуса до определенной температуры при соответствующем давлении на кристалл. Для разрушения оксидных пленок на соединяемых поверхностях и ускорения образования эвтектического сплава производится механическое перемещение кристалла относительно корпуса. Это достигается введением в зону контакта присоединяемых элементов ультразвуковых или низкочастотных вибраций. Методы интенсификации процесса пайки имеют определенные недостатки: применение УЗ-колебаний требует тщательного контроля параметров (времени, давления и амплитуды колебаний), при низкочастотной вибрации затруднен процесс разрушения и удаления оксидных и адсорбированных пленок.

Авторы статьи [6] разработали устройство, в котором инструмент с кристаллом совершает движение по кругу или эллипсу в плоскости контактирования соединяемых поверхностей, создавая сдвиговые деформации, направленные строго параллельно плоскости раздела кристалла с корпусом. При перемещении инструмента по круговой траектории прочность соединения кристалла с корпусом на срез при одном и том же времени процесса пайки в 2–2,5 раза выше, чем при наложении НЧ-колебаний, и в 3 раза выше, чем без перемещения кристалла.



Для локализации нагрева поверхности корпуса при контактно-реактивной пайке кристаллов с образованием эвтектики Au-Si предлагается использовать индукционный нагрев корпуса токами высокой частоты [7]. Исследования влияния электромагнитного поля высокой частоты на параметры ИС показали, что кристалл ИС не выходит из строя под действием поля ВЧ.

С целью увеличения площади спаев между кристаллом и корпусом на верхней плоскости корпуса формируют V-образные канавки глубиной 25–75 мкм, расположенные друг от друга на расстояниях 0,25–1,0 мм. При использовании корпусов с канавками необходимо при пайке корпус или кристалл подвергать воздействию ультразвуковых или низкочастотных колебаний. При этом колебания должны быть направлены вдоль канавок. В противном случае при пайке кристаллов больших размеров V-образные канавки являются очагами непропаев [8].

В некоторых случаях, например в производстве полевых транзисторов (фирма IRF), на паяемом основании корпуса формируют углубления в шахматном порядке в виде усеченного конуса. При пайке в вакууме эти углубления практически полностью заполняются припоем.

Единственным общепризнанным методом удаления каверн (пузырей) из жидкого припоя является вакуумная пайка [9]. Рекомендуется также процесс пайки кристалла к основанию корпуса мощных транзисторов вести в вакууме, а после расплавления припоя впускать под колпак воздух [10]. Максимально допустимое содержание каверн в паяном соединении регламентируется в пределах не более 5% общей площади соединения, при этом самая большая площадь любого из пузырей не должна превышать 1% площади паяного шва.

Обеспечить равномерное растекание припоя с одновременным наличием минимального количества дефектов в паяном соединении в виде пустот возможно при монтаже кристаллов с приложением вибраций с амплитудой 0,5–1,0 мкм в плоскости основания [11]. Для этих целей в крупносерийном производстве для присоединения кристаллов к корпусу

сам СПП широко используется автомат ЭМ-4085-14М фирмы «Планар» (Республика Беларусь). Припой заданного сплава используется в виде проволоки диаметром $L_{0,07}$ мм, намотанной на пластмассовую катушку и закрепленной в специальном дозаторе.

Контактно-реактивная пайка при определенных режимах возможна в различных системах, при этом осуществляются разные механизмы пайки (контактного плавления). Если толщина жидкой фазы в процессе пайки растет пропорционально корню квадратному от времени, то такой режим плавления называется нестационарно-диффузионным, в случае постоянной толщины жидкой фазы — стационарно-диффузионным [12].

Паяные соединения кристалл — корпус с образованием эвтектики Al-Zn

Для напайки кремниевых кристаллов на основании корпусов СПП предложена новая технология, заключающаяся в том, что на паяемые поверхности кристалла и основания корпуса наносят алюминиевое покрытие, а между кристаллом и корпусом размещают припойную прокладку, представляющую собой сплав 20Zn/80Sn (вес. %).

На рис. 1 представлена диаграмма состояния системы Zn-Sn. На диаграмме видно, что сплав 20Zn/80Sn (вес. %) имеет температуру плавления в пределах 270–280 °С. Увеличивая содержание цинка в сплаве Zn-Sn, можно повысить температуру плавления сплава вплоть до 382 °С (температура эвтектики Al-Zn), то есть приравнять температуру плавления паяного шва с температурой эвтектики на границах кристалл – припой и припой – корпус. Но в этом случае содержание Zn в сплаве Zn-Sn будет в пределах 80%. Однако следует помнить, что сплавы Zn-Sn имеют высокую прочность и пластичность только при содержании Sn более 30%.

Сплавы Zn-Sn с температурой плавления в пределах 380 °С целесообразно использовать при изготовлении приборов, работающих при высоких температурах, например диодов Шоттки на основе карбида кремния.

В работе [12] описаны проведенные исследования контактного плавления в системе Al-Zn в нестационарно-диффузионном режиме в атмосфере водорода при температуре 399 °С. С помощью металлографического анализа контактных прослоек установлено концентрационное распределение компонентов в диффузионной зоне системы Al-Zn. Значения коэффициента вакуумной диффузии при температуре 399 °С для концентрации алюминия 7,6; 9,0; 11,0; 13,0 и 15,0 вес. % в системе Al-Zn соответственно составляет 2,5; 2,9; 3,3; 2,61; $1,5 \times 10^5$ см²/с.

Система Al-Zn имеет необычную фазовую диаграмму: в ней отсутствуют упорядоченные интерметаллические соединения, а неупорядоченный ГЦК — твердый раствор замещения Zn в Al — стабилен до 70 ат. % Zn при высоких температурах. При понижении температуры твердый раствор спиналиально распадается на два неупорядоченных ГЦК — твердых раствора, α_1 и α_2 с концентрациями 16 и 58 ат. % Zn соответственно [14].

При температурах ниже 275 °С раствор α_2 становится нестабильным, растворимость Zn в фазе α_1 уменьшается, и появляется широкая двухфазная область между фазой α_1 и гексагональным раствором на основе Zn. Расслоение твердого раствора в системе Al-Zn авторы работы [14] объясняют различием в электронной концентрации (числе электронов на атом): атом Al имеет три валентных электрона, а атом Zn — два.

Увеличение содержания цинка повышает вязкость расплавленных сплавов Al-Zn при температурах на 50 °С выше линии ликвидуса (рис. 2) [13]. Увеличение содержания цинка до 12% повышает электросопротивление алюминия с 2,985 до 4,206 мкОм·см. Теплоемкость алюминия при 250–270 °С в зависимости от концентрации цинка имеет максимальные значения и при 100 и 200 °С изменяется сравнительно мало.

Увеличение содержания цинка до 13,2% повышает ТКЛР с $2,23 \times 10^{-5}$ °С⁻¹ до $2,51 \times 10^{-5}$ °С⁻¹ в интервале температур от +20 до -50 °С. Содержание цинка от 0 до 26% приводит к повышению предела прочности до 380 МПа, а предела текучести — до 320 МПа.

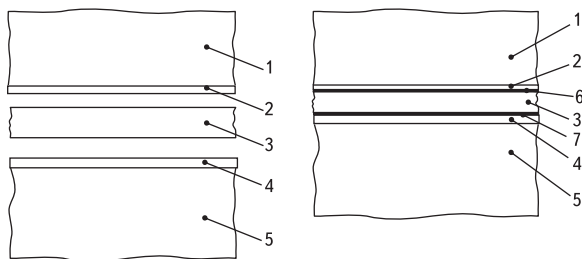


Рис. 3. Схема сборки контактно-реактивной пайки с образованием эвтектики Al-Zn:

- 1 — кристалл; 2 — Al-покрытие кристалла;
- 3 — прокладка припоя 20Zn/80Sn (вес. %); 4 — Al-покрытие корпуса; 5 — корпус;
- 6 — эвтектическое соединение Al-Zn со стороны кристалла;
- 7 — эвтектическое соединение Al-Zn со стороны корпуса

С целью обеспечения надежности изделий толщину паяного шва выбирают в пределах 25–50 мкм [11]. Схема пайки кристаллов с образованием эвтектики Al-Zn представлена на рис. 3.

На паяемой поверхности полупроводникового кристалла в составе пластины по известной технологии формировалась Al-металлизация толщиной 3 мкм. Для сборки использовались медные корпуса КТ-43В с покрытием химическим никелем и Al-металлизацией толщиной 4 мкм. На основаниях корпусов имелись V-образные канавки глубиной 25–75 мкм, расположенные друг от друга на расстоянии 0,25–1,0 мм.

Эксперименты по напайке кристаллов транзисторов КП767В на основания корпусов КТ-43В проводились на установке ЭМ-4085-14М. В качестве защитной среды использовался формир-газ (смесь газов H_2 и N_2 в соотношении 15:85). Температура в зоне пайки поддерживалась в пределах 420–430 °С в течение 5–10 с. При данной температуре происходит контактно-реактивное взаимодействие Zn, входящего в состав припоя, с Al-металлизацией кристалла и корпуса с образованием эвтектики Al-Zn (382 °С).

Следует отметить, что Sn, входящее в состав припоя, практически не взаимодействует с Al-металлизацией кристалла и корпуса. Согласно [13] растворимость Sn в Al в интервале 530–640 °С остается постоянной и равной 0,1 вес. % Sn. В литературных источниках растворимость Al в Sn в твердом состоянии точно не определена. Диаграмма состояний Al-Sn приведена на рис. 4.

Для проведения исследований по влиянию толщины Al-металлизации на паяемых поверхностях кристалла и основания корпуса на формирование соединений на основе эвтектики Al-Zn были изготовлены четыре группы образцов с различной толщиной Al-пленки: 2,09; 3,34; 3,37 и 4,2 мкм. Данные пленки напылялись на полированные пластины кварца. Затем на образцах размещали навески припоя 20Zn/80Sn (вес. %) и осуществляли нагрев в формир-газе на режимах напайки кристаллов к основаниям корпусов. Методом реверсографии анализировали взаимодействие припоя с Al-пленками. Анализ показал, что данный припой имеет хорошую адгезию (прочное

соединение) с Al-пленками. При этом эвтектика Al-Zn формируется на небольшой толщине. По крайней мере, даже на образцах с минимальной толщиной Al-пленки (2,09 мкм) очагов взаимодействия припоя с пленкой по всей ее толщине не обнаружено.

Оценка прочности паяных соединений кристалл – корпус и анализ качества паяных швов

При отработке новой технологии напайки кристаллов на основания корпусов оценка прочности паяного соединения проводилась разрушающим методом. Технологические испытания по данному методу заключаются в том, что кристалл с помощью специального приспособления сдвигают с корпуса, то есть кристалл подвергается сжатию, а паяное соединение — срезу.

Для испытаний было отобрано 10 кристаллов из одной пластины, которые напаялись на основания корпусов типа КТ-43В. Кристаллы имели следующие размеры: длина 5,2; ширина 4,6; толщина 0,569 мм.

При работе элемента паяной конструкции на сжатие расчетным значением прочности P' паяного соединения будет [15]:

$$P' = [\sigma]_{\text{сж}} \times F,$$

где $[\sigma]_{\text{сж}}$ — допускаемое напряжение для основного материала (кристалла) при сжатии, кгс/мм²; F — площадь поперечного сечения кристалла в направлении действия усилия сжатия, мм².

Подставляя значения $[\sigma]_{\text{сж}} = 9,47$ кгс/мм² (для кремния), длины и толщины кристалла соответственно 5,2 и 0,569 мм, получаем $P' = 28,01$ кгс. То есть кристалл будет разрушаться при усилии сдвига более 28,01 кгс.

Соединение кристалла с основанием корпуса относится к нахлесточному соединению. Для данного типа соединения расчет прочности P кристалла с корпусом определяется по формуле:

$$P = [\tau']_{\text{ср}} \times b \times l,$$

где $[\tau']_{\text{ср}}$ — допускаемое напряжение в паяном шве на срез, кгс/мм²; b — ширина шва, мм; l — длина нахлестки, мм.

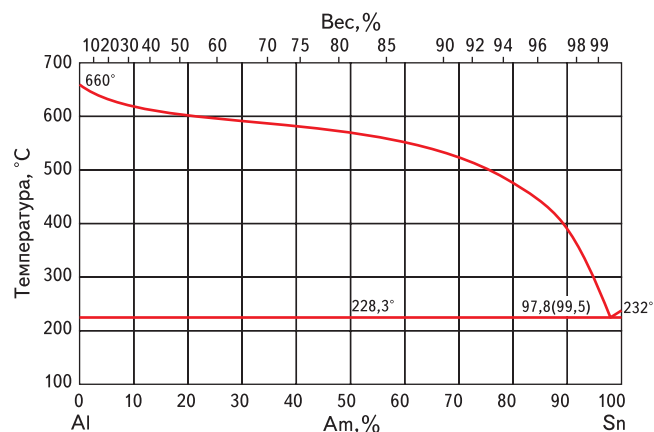


Рис. 4. Диаграмма состояния системы алюминий – олово [13]

Для сплава 20Zn/80Sn (вес. %) принимаем $[\tau']_{\text{ср}} = 3,5$ (размеры кристалла $b = 4,6$ и $l = 5,2$).

Подставляя эти значения в формулу прочности, получим $P = 83,72$ кгс.

Таким образом, прочность паяного соединения (при условии отсутствия непропаев в паяном шве) примерно в три раза превышает прочность кристалла при сжатии.

Из этих простых расчетов можно сделать вывод о том, что разрушающий метод контроля прочности паяных соединений путем механического сдвига кристалла с монтажной площадки может эффективно использоваться только для кристаллов, не превышающих определенные размеры (длина, ширина, толщина), то есть когда выполняется соотношение $P' = P$. В нашем случае площадь кристалла не должна превышать 8 мм².

Эксперименты по оценке прочности паяных соединений кристаллов с основаниями корпусов показали, что при усилии на кристалл 10 кгс (максимальное усилие приспособления) не наблюдалось ни одного случая сдвига кристалла с корпуса. Кроме того, ни один кристалл при испытаниях не разрушился.

Следует отметить, что прочность паяного соединения зависит также от величины зазора (толщины паяного шва), адгезионной прочности покрытия кристалла и основания корпуса, остаточных напряжений в кристалле, паяном шве, корпусе и от других факторов. На прочность паяных соединений влияют и физико-механические свойства припоев, которые до настоящего времени изучены недостаточно. Эти зависимости в данном разделе статьи не рассматривались.

Также был проведен анализ паяных швов по рентгенограммам и по шлифам (рис. 5). Установлено, что качество паяных соединений кристаллов с основаниями корпусов соответствует требованиям, предъявляемым к сборке СПП.

Заключение

Для выбора оптимальной толщины Al-металлизации на паяемых поверхностях кристалла и основания корпуса и с целью внедрения в серийное производство СПП, собранных с использованием предлагаемого способа пайки, необходимо проведение комплексных

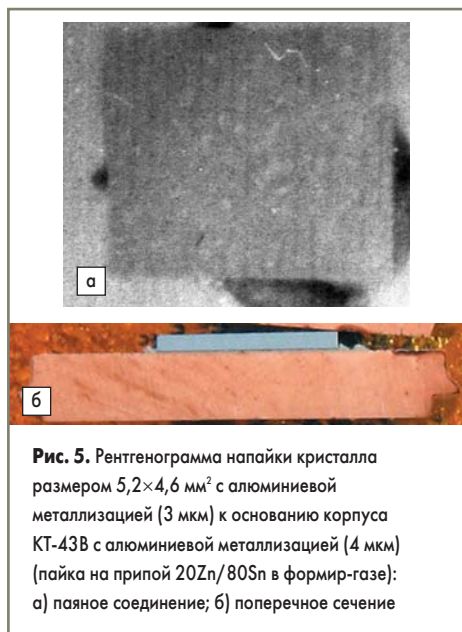


Рис. 5. Рентгенограмма напайки кристалла размером $5,2 \times 4,6 \text{ мм}^2$ с алюминиевой металлизацией (3 мкм) к основанию корпуса КТ-43В с алюминиевой металлизацией (4 мкм) (пайка на припой 20Zn/80Sn в формир-газе): а) паяное соединение; б) поперечное сечение

исследований приборов, включая испытания на воздействие изменения температуры среды (термоциклирование), на устойчивость к энергоциклам, определение теплового сопротивления кристалл – корпус. Основным критерием надежности СПП является стабильность электрических параметров и теплового сопротивления кристалл – корпус приборов после сборки и испытаний.

Разработанный способ пайки кристаллов с образованием эвтектики Al–Zn со стороны кристалла и корпуса рекомендуется применять для производства специальных приборов, работающих при высоких температурах. Данный способ пайки требует тщательного анализа алюминиевых покрытий, толщины сплава

20Zn/80Sn (вес. %) и режимов пайки. Перспективным способом формирования алюминиевой металлизации на корпусах является электролитическое алюминирование.

Рекомендуется напайку кристаллов на основании корпусов проводить на установке ЭМ-4085-14М в защитной среде (формир-газе) при температуре в зоне пайки 420–430 °С в течение 5–10 с.

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

Литература

1. Лашко С. В., Лашко Н. Ф., Нагапетян И. Г. и др. Проектирование технологии пайки металлических изделий: Справочник. М.: Металлургия, 1983.
2. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Пайка металлов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1988.
3. Патент № 0316026 EP (EПB), A1 H 01 L 21/60. Оpubл. 17.05.1989.
4. Маслова К. В., Мохте С. О., Панкратов О. В. и др. Монтаж кристаллов БИС с использованием припоя на основе цинка // Электронная промышленность. 1989. № 6.
5. Патент № 2212730 RU, H 01 L 21/52. Способ монтажа полупроводниковых кристаллов больших размеров в корпуса / В. В. Зенин, В. Н. Беляев, Ю. Е. Сегал. Оpubл. 20.09.2003. Бюл. № 26.
6. Беляков А. И., Шуньков С. И., Афанасьев В. В. Повышение эффективности процесса контактно-реактивной пайки полупроводниковых кристаллов // Сварочное производство. 1981. № 7.

7. Гаранин Е. В., Янович В. П., Якубович О. В. и др. Монтаж кристаллов ИС в металлический корпус ТО-5 с использованием индукционного нагрева токами высокой частоты // Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. 1985. № 2.
8. Зенин В. В., Беляев В. Н., Сегал Ю. Е., Фоменко Ю. Л. Пайка полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов // Петербургский журнал электроники. 2001. № 2.
9. Валеев С. Вакуумная пайка в производстве силовой электроники // Силовая электроника. 2006. № 3.
10. Мазур А. И., Алехин В. П., Шоршоров М. Х. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1981.
11. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 3.
12. Савинцев П., Малкандуев И., Гаврилов Н. И. Контактнo-реактивная пайка систем алюминий – цинк и висмут – олово // Адгезия расплавов и пайка материалов. 1978. № 5.
13. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов: Справочник: В 2 т. / Под ред. И. И. Новикова, И. Л. Рогельберга. М.: Металлургиздат, 1962. Т. 1.
14. Коржавый П. А., Смирнова Е. А., Эйдельман И. А., Абрикосов И. А., Рубан А. В., Векилов Ю. Х. Природа изоструктурного спиноидального распада в системе Al–Zn // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 4.
15. Лоцманов С. Н., Петрунин И. Е. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1966.