

Программно-управляемый монтаж кристаллов силовых транзисторов вибрационной пайкой в защитной атмосфере

Для обеспечения устойчивости изделий к термоциклическим нагрузкам и высокого выхода годных изделий по электрическим и тепловым параметрам необходим программно-управляемый монтаж кристаллов в защитной атмосфере. Оптимизация как траектории движения кристаллов при монтаже, так и дозы припоя позволила создать надежный технологический процесс с высокой стабильностью и воспроизводимостью тепловых параметров силовых транзисторов.

Владимир Ланин,
профессор

vlanin@bsuir.by

Иван Рубцевич
Анатолий Керенцев

akerentsev@transistor.com.by

Выбор технологии монтажа кристаллов

Операция монтажа кристаллов в корпуса — наиболее ответственная в технологическом процессе сборки изделий силовой электроники, так как обеспечивает требуемое расположение кристалла, прочное механическое соединение, надежный электрический контакт и хороший теплоотвод. Для присоединения кристаллов применяют пайку эвтектическими или легкоплавкими припоями.

При эвтектической пайке приводят в соприкосновение золотую контактную площадку кристаллодержателя и кремниевый кристалл при температуре, немного превышающей температуру образования эвтектики. Кремний, взаимодействуя с золотом, образует эвтектический сплав. Для ускорения образования жидкого сплава кристалл перемещают по поверхности контактной площадки. Контактно-реактивная пайка пригодна для присоединения к корпусу кристаллов небольшой площади. Для больших кристаллов применяют Au-Sn-Si с температурой плавления 280 °С, который при 0,1 весового процента Si образует эвтектический

сплав с отдельными включениями золота, которые позволяют растворяться в сплаве дополнительному количеству кремния. Этим достигается образование жидкой фазы припоя при температуре, соответствующей эвтектике, что особенно важно для кристаллов, не выдерживающих высоких температур [1].

Существенное влияние на характеристики соединения оказывает состояние поверхности и толщина золотого покрытия корпуса. Для образования качественного соединения требуемая толщина золотого покрытия составляет 6–9 мкм. При малых размерах кристалла, менее 0,7×0,7 мм, толщину покрытия можно уменьшить. При недостаточной толщине золотого покрытия между кристаллом и корпусом размещают таблетку из эвтектического сплава или прокладку из эвтектики кремний — золото [2].

Для разрушения оксидных пленок на соединяемых поверхностях и ускорения образования эвтектического сплава производят механическое перемещение кристалла относительно корпуса. Это достигается введением в зону контакта присоединяемых элементов низкочастотных вибраций (рис. 1). Для интенсификации процесса монтажа в зону образования соединения вводят механические колебания с частотой от нескольких герц до 40–60 кГц.

При посадке кристалла на эвтектику Au-Si, образующуюся в процессе пайки взаимным растворением материала кристалла и золотого покрытия при 400...420 °С, вибрация ускоряет разрушение оксидной пленки на кремнии. Оптимальная толщина эвтектического слоя достигает 5–7 мкм, площадь эвтектики под кристаллом — не менее 70%, содержание кремния — 2,4–2,8%. При пайке кристалла на его площадь напыляют слой олова до 1 мкм, соединение с золоченой поверхностью корпуса осуществляется за счет образования эвтектики Au-Sn (20% Au), имеющей температуру плавления 280 °С. Пайка происходит при температуре 320...350 °С с применением вибраций с амплитудой 0,5–1 мм. Оптимальные режимы присоединения кристаллов к золоченой поверхности: температура 390...420 °С, время 3–5 с, давление на кристалл — 29,5–49 кПа.

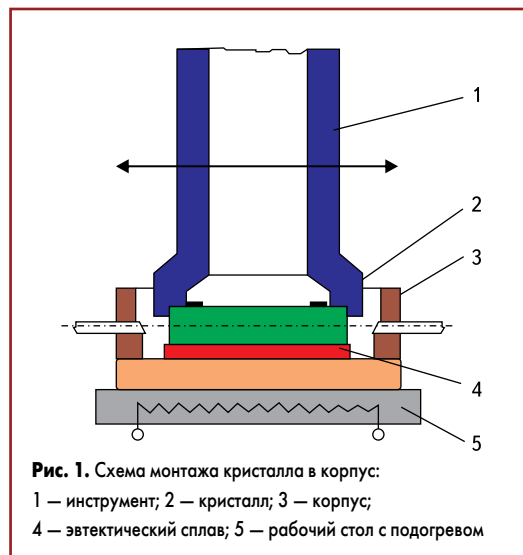


Рис. 1. Схема монтажа кристалла в корпус:

1 — инструмент; 2 — кристалл; 3 — корпус;
4 — эвтектический сплав; 5 — рабочий стол с подогревом

Для эффективного удаления оксидных пленок с поверхности расплава необходимо, чтобы работа сил вибрации значительно превосходила работу сил когезии расплава:

$$W_{\text{вибр}} \geq (5-10) W_{\text{ког}} \quad (1)$$

Учитывая, что интенсивность колебаний в расплаве равна:

$$I = 0,5\rho c(\omega A)^2, \quad (2)$$

где ρ — плотность расплава, c — скорость распространения колебаний, ω — круговая частота, A — амплитуда колебаний, то работа сил вибрации составит:

$$W_{\text{вибр}} = I \times S \times t, \quad (3)$$

где S — площадь кристалла; t — время.

Работа сил когезии затрачивается на образование двух единичных поверхностей расплава с поверхностной энергией $\sigma_{1,2}$ на площади S :

$$W_{\text{ког}} = 2\sigma_{1,2} \times S. \quad (4)$$

При амплитуде колебаний 250–500 мкм с частотой 5 Гц в течение 1 с работа сил вибрации в расплаве составляет 0,5–1,0 Дж, что в среднем на три порядка превышает работу сил когезии расплава в свободном состоянии (0,5 мДж), этого вполне достаточно для вытеснения оксидных пленок из зоны пайки.

Низкочастотная вибрация с однокоординатным перемещением кристалла применяется на установках, используемых в условиях мелкосерийного производства. В качестве примера можно привести модель ЭМ-415, которая состоит из стола, механизмов перемещения, нагружения и привода рабочего инструмента, микроскопа с держателем, нагревателя, газовой и вакуумной систем и электрооборудования (рис. 2а).

Шарнирный механизм перемещения осуществляет поочередную подачу под рабочий инструмент колонки нагревателя с корпусами либо стойки с кристаллами и золотыми прокладками. Одно звено этого механизма вместе с закрепленным на нем нагревателем поворачивается относительно неподвижной оси, а на втором располагается стойка. Заданное усилие прижима рабочего инструмента с кристаллом к золоченой поверхности ножки, а также однокоординатная вибрация инструмента в плоскости, перпендикулярной его вертикальной оси, обеспечиваются специальным приспособлением. Усилие нагружения технологического инструмента зависит от положения груза на линейке. Амплитуду колебаний регулируют переключателем напряжения. Кристалл захватывается технологическим инструментом и размещается в его торцевой части, заходя в него примерно на одну треть толщины, и удерживается там вакуумным захватом (рис. 2б). Пайку кристаллов к ножкам выполняют под бинокулярным микроскопом, закрепленным на держателе. В поле зрения микроскопа попадает инструмент, а также поочередно стойка с кристаллами и распо-



Рис. 2. Установка монтажа кристаллов вибрационной пайкой

женная на нагревателе ножка, вокруг которой создается защитная газовая среда. Действием газовой и вакуумной систем управляют с помощью электромагнитных клапанов.

Присоединение кристаллов мощных транзисторов к молибденовому термокомпенсатору на установке ЭМ-415 осуществляли методом контактно-реактивной эвтектической пайки с образованием Au-Si эвтектики с применением дополнительной золотой прокладки размером 4×4×0,016 мм. Монтаж кристаллов выполняли при температуре 420...450 °С, максимальной вибрации вдоль короткой стороны кристалла, времени воздействия вибрации 10 с, давлении на инструмент 0,4–1,1 Н, подогреве инструмента до 250 °С. Для обеспечения плоскостности торца инструмента с поверхностью кристаллодержателя проводилась регулировка с проверкой качества отпечатка инструмента на алюминиевой фольге. С увеличением размеров кристаллов более 3×3 мм² повышаются требования к настройке, после которой отпечаток торца инструмента должен иметь оттиск четкой и равной контрастности по четырем сторонам.

Такие методы интенсификации процесса пайки имеют определенные недостатки: при низкочастотной вибрации затруднен процесс разрушения оксидных и адсорбированных пленок, а применение УЗ-колебаний требует тщательного контроля параметров (времени, давления и амплитуды колебаний), чтобы исключить возникновение механических напряжений в кристалле.

В процессе монтажа было выявлено влияние технологических режимов на качество присоединения кристаллов. Так, при увеличении нагрузки на инструмент до 1,1 Н происходит значительное затухание амплитуды колебаний присоединяемого кристалла, что способствует формированию дефектов в эвтектическом слое в виде несплошностей и пустот. Наличие таких дефектов для мощных приборов недопустимо, так как в процессе эксплуатации будет происходить перегрев активной структуры. Поэтому напайка кристаллов проводилась при

давлении на инструмент в пределах 0,4–0,45 Н, при котором еще осуществляются колебательные движения кристалла. При температуре процесса до 420 °С отмечалось недостаточное растекание эвтектики по периметру кристалла. Формирование эвтектики с требуемым уровнем качества получено при повышении температуры до 430...450 °С. Для эффективного образования эвтектики Au-Si при монтаже кристаллов размером 4,7×5,6×0,42 мм требовалось проведение дополнительной активации процесса за счет колебания столика вручную на начальной стадии образования эвтектики.

Современное оборудование повышает эффективность образования эвтектики Au-Si за счет активации процесса присоединения в результате принудительного движения кристаллов по криволинейной замкнутой траектории, обеспечиваемой программируемыми параметрами вибрации. При амплитуде колебаний кристалла более 250 мкм за 8–10 периодов колебаний происходит эффективное удаление оксидных пленок и шлаков за пределы активной зоны, что обеспечивает равномерную толщину эвтектики в соединении. Кристаллодержатель закреплялся в ленточной кассете с помощью трех фиксаторов, выступающих над поверхностью кассеты и располагаемых по периметру отверстия. Для повышения эффективности автоматического процесса присоединения кристаллов и быстрого прогрева соединяемых деталей была доработана конструкция нагревательного столика установки путем введения дополнительных повторяющихся выступов диаметром 7,5 мм и высотой до 1,5 мм. Напайка проводилась при следующих условиях: температура 450...460 °С; количество периодов колебаний — 12; амплитуда двухкоординатных колебаний по оси X, Y — 250–500 мкм; пауза — 70; усилие нагружения — 1,45 Н.

Альтернативным направлением является программируемое движение кристалла в плоскости контактирования соединяемых поверхностей заданной траектории и амплитуды. Разработано 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 [3]. 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 мощных полупроводниковых приборов с максимальной мощностью рассеивания 125 Вт эффективно движение кристалла по сложной траектории с амплитудой колебаний 250–500 мкм при монтаже на эвтектику Au-Si при температуре 430...450 °С.

Основным недостатком контактно-реактивной пайки эвтектикой золото — кремний является значительный расход золота. Поэтому вместо золотой прокладки используют сплав 75% Au, 25% Sn, 1–2% Вi или сплавы, не содержащие драгоценных металлов, которые плавятся при 355...410 °С и эффективно смачивают кремний при температуре пайки 390...410 °С. Одним из таких сплавов является Zn-Al-Ge. Этот сплав предварительно наносят на подложку в виде пятна диаметром 4,5 мм и толщиной 10 мкм методом электрического взрыва фольги. Прочность присоединения кристаллов увеличивается в 2–4 раза за счет более высокой адгезии к керамике этого сплава по сравнению с эвтектикой Au-Si, а остаточные напряжения в больших кристаллах уменьшаются после пайки на 10–15% и на 20–25% после термоциклирования, при этом прочность соединения кристалла и корпуса не уменьшается [4].

Для монтажа кристаллов силовых полупроводниковых приборов предложено на паяемые поверхности кристалла и основания корпуса нанести алюминиевое покрытие толщиной 3 мкм, между кристаллом и корпусом разместить припойную прокладку из сплава 20Zn-80Sn. При нагреве до 420...430 °С в среде формирующего газа в течение 5–10 с происходит контактно-реакционное взаимодействие Zn, входящего в состав припоя, с Al-металлизацией кристалла и корпуса с образованием эвтектики Al-Zn (382 °С). Такую эвтектику целесообразно применять для приборов, работающих при высоких температурах, например диодов Шоттки на основе карбида кремния [5].

С целью увеличения площади сая между кристаллом и корпусом на верхней плоскости корпуса формируют V-образные канавки глубиной 25–75 мкм, расположенные на расстоянии 0,25–1 мм друг от друга. При использовании корпусов с канавками необходимо при пайке корпус или кристалл подвергать воздействию низкочастотных колебаний, направленных вдоль канавок. В противном случае при пайке кристаллов больших размеров V-образные канавки становятся очагами непропаев [6].

При выборе толщины припоя учитывают, что существует критическая величина паяного соединения, менее которой резко снижается надежность изделий в экстремальных условиях эксплуатации из-за возникновения внутренних механических напряжений, превышающих допустимый уровень для данной

конструкции прибора. Максимальное напряжение, возникающее при охлаждении кристалла, определяется выражением [7]:

$$\sigma_{\max} = K(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0)\sqrt{(E_1 E_2 L)/h}, \quad (5)$$

где σ_{\max} — максимальное напряжение; α_1, α_2 — коэффициенты линейного термического расширения припоя и кремния; E_1, E_2 — модули упругости припоя и кремния; T, T_0 — температуры пайки и окружающей среды; K — безразмерная константа, L — линейный размер кристалла, h — толщина припоя.

Внутренние напряжения в паяном кристалле могут достигать 50–65 МПа и при воздействии термоциклических нагрузок привести к образованию трещин в кристалле. Так как при уменьшении толщины припоя внутренние напряжения возрастают, то с целью обеспечения надежности изделий целесообразно выбирать толщину припоя в пределах 25–50 мкм.

Автоматизированное оборудование монтажа кристаллов

Темпы производства изделий силовой электроники за последнее десятилетие составляют не менее 20%. Для поддержания таких темпов развития и обеспечения конкурентоспособности выпускаемых изделий в возрастающих объемах необходима автоматизация ключевых операций сборки силовых полупроводниковых приборов. Сборка приборов в туннельных водородных печах традиционным методом с использованием касетной технологии пайки в восстановительной атмосфере имеет серьезные недостатки:

- Значительные затраты по потреблению электроэнергии при мощности печей до 25 кВт и по расходу водорода (до 3 м³/ч).
- Высокая трудоемкость процесса и большая занимаемая производственная площадь.
- Невысокое качество паяных соединений кристалла с основанием из-за образования пустот и непропаев, что увеличивает тепловое сопротивление соединения и является препятствием для монтажа кристаллов больших размеров.

- Не обеспечивается высокая точность и производительность монтажа кристаллов, требуемая в соответствии с ISO 9000, что делает эту технологию непригодной для экспортоориентированной продукции.

Разработан метод активного монтажа, в котором кристалл перемещается в горизонтальной плоскости относительно корпуса по заданной траектории в течение определенного времени, достаточного для вытеснения оксидных пленок из зоны контакта и образования непрерывного и сплошного паяного соединения. Монтаж кристаллов осуществляется в защитно-восстановительной среде формирующего газа (10–20% водорода, остальное — азот) в ограниченном пространстве, что обеспечивает значительную экономию водорода и энергоносителей.

Для альтернативной сборки мощных полупроводниковых приборов созданы новые технологии и автоматизированное оборудование, исключающие недостатки процессов сборки в водородных печах. Для монтажа кристаллов размером 1–11 мм в приборах в корпусах SOT, SOD, SO, PSSO, PSOP, DPAK, TO, PQFN, Power LED и других компания ESEC (Швейцария) разработала автомат Die Bonder 2009 SSI, имеющий автоматические загрузчики пластин и рамок приборов, дозатор припоя, 8-зонный контролируемый нагреватель и высокоразрешающую видеосистему. Время цикла монтажа составляет 0,6 с, точность присоединения ± 80 мкм/ $\pm 0,8^\circ$, коэффициент воспроизводимости монтажа $C_p > 1,33$ (рис. 3). Технология присоединения кристаллов на легкоплавкий припой запатентована, а стоимость такого оборудования — более \$250 000.

Для присоединения кристаллов к корпусам полупроводниковых приборов широкой номенклатуры вибрационной пайкой разработан автомат ЭМ-4085-14М УП «КБТЭМ-СО» (Беларусь) (рис. 4), в состав которого входят микропроцессорный контроллер, опико-телевизионная система распознавания кристаллов, линейный шаговый двигатель перемещения кристаллов, двухкоординатный стол сварочной головки и магазинный механизм автоматической подачи корпусов [8].



Рис. 3. Автомат присоединения кристаллов Die Bonder 2009 SSI



Рис. 4. Автомат присоединения кристаллов ЭМ-4085-14М

Структурная схема автомата монтажа кристаллов показана на рис. 5. Производительность автомата для пайки кристаллов размером от 1×1 до 10×10 мм составляет 2500, для посадки на клей — 3500 кристаллов в час. Погрешность присоединения кристаллов по осям X, Y составляет ±0,15 мм, по углу — 5°.

Автоматизированный процесс монтажа кристаллов на припой на автомате модели ЭМ-4085-14М обладает рядом особенностей, позволяющих осуществлять монтаж на выводные рамки из медного сплава, покрытые никелем. Нагреватель в автомате туннельного типа содержит 12 зон контролируемого и регулируемого нагрева до 450 °С; блок формирования защитно-восстановительной атмосферы смешивает поступающие газы H_2 и N_2 в смесь 10:90 (формир-газ) для активирующего воздействия на процесс монтажа кристаллов.

Нанесение дозы расплавленного припоя в зону монтажа кристалла осуществляется автоматически проволочным дозатором, при этом программируется не только скорость вращения центрального распределительного вала, но и скорости движения вакуумного захвата и съема кристаллов.

Программно-управляемый процесс монтажа кристаллов состоит в автоматизированном размещении кристалла по заданной траектории с определенной амплитудой на дозированной капле жидкого припоя на кристаллодержателе, которая может быть получена нанесением припойной композиции или дозированием проволочного припоя. Кристаллодержатель или выводная рамка транспортируются через нагреватель, где происходит контролируемый нагрев до 300...400 °С. Состав и свойства припоев выбирают с учетом следующих требований:

- хорошая паяемость с покрытиями на полупроводниковом кристалле;
- сохранение паяемости в течение заданного срока хранения и обеспечение при этом антикоррозионной защиты;

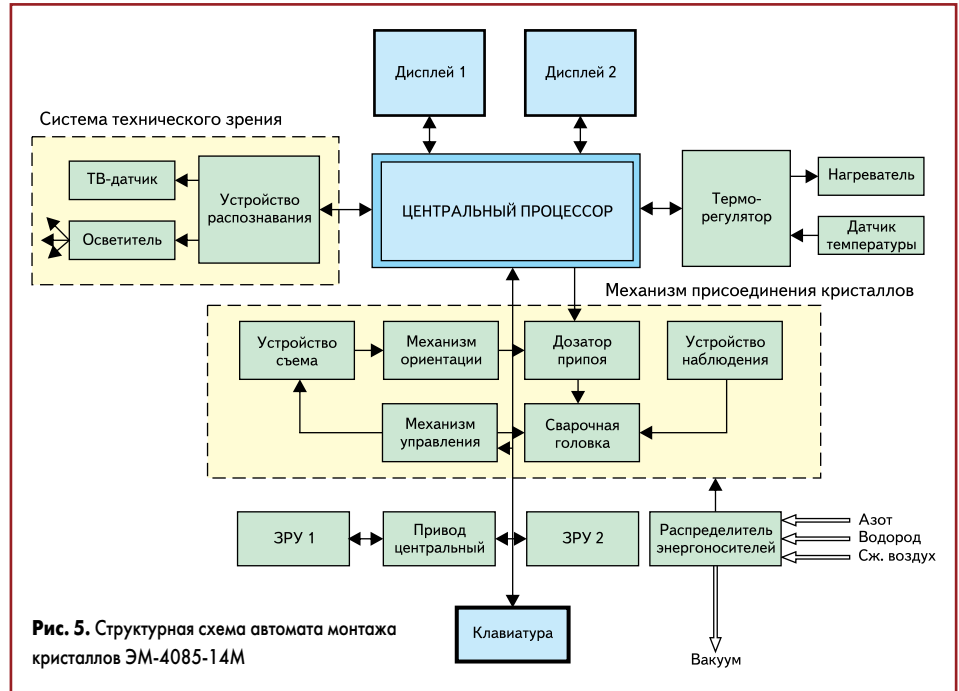


Рис. 5. Структурная схема автомата монтажа кристаллов ЭМ-4085-14М



Рис. 6. Излишки припоя (а) и наклон кристалла (б) при монтаже

- отсутствие иглообразования при хранении и разрушения при температурах сборки, испытания и эксплуатации;
- обеспечение минимального переходного электрического сопротивления;
- устойчивость к тепловому удару при монтаже приборов на печатные платы групповой пайкой, к химическим реагентам, используемым при сборке.

При нанесении дозатором с проволочным припоем важно обеспечить контролируемую толщину припоя между кристаллом и подложкой, низкий угол наклона кристалла и минимальное вытеснение припоя за периметр кристалла [9]. Однако при дозировании проволочного припоя не всегда удается обеспечить идеальные условия для его растекания, вершина припоя в результате образования оксидной пленки имеет неправильную форму. В результате при монтаже кристаллов может наблюдаться их значительный наклон, а также вытеснение припоя в одну сторону (рис. 6).

В автомате присоединения кристаллов ЭМ-4085-14М используется проволочный припой $\varnothing 1_{-0,07}$ мм марки ПСрОСу, намотанный на пластмассовую катушку 1, закрепленную в дозаторе (рис. 7). Подача припоя в зону лужения осуществляется линейным шаговым двигателем (ЛШД), на который поступают управляющие импульсы, количество которых предварительно программируется. При подаче импульсов тока на шаговый двигатель ролик 4

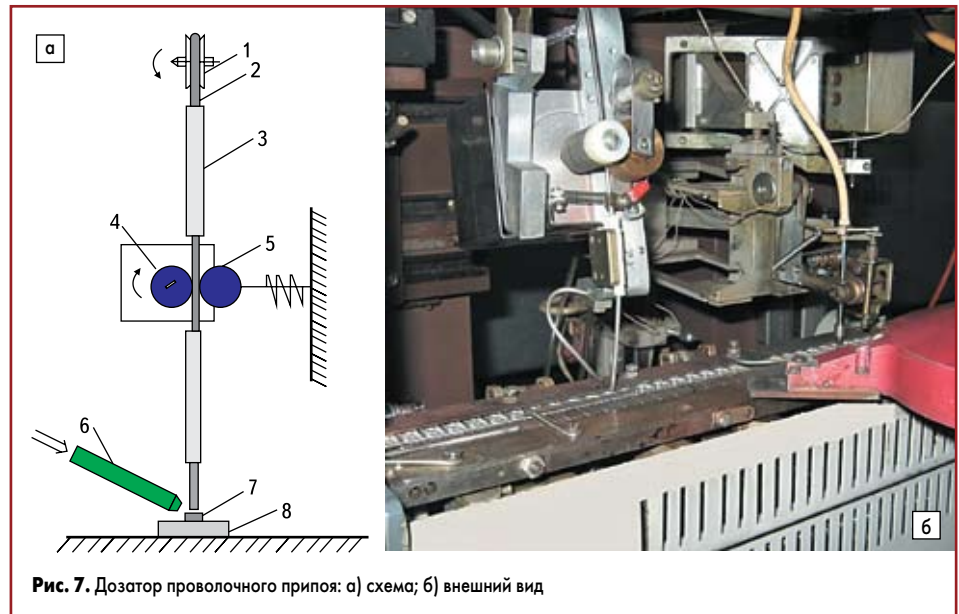


Рис. 7. Дозатор проволочного припоя: а) схема; б) внешний вид

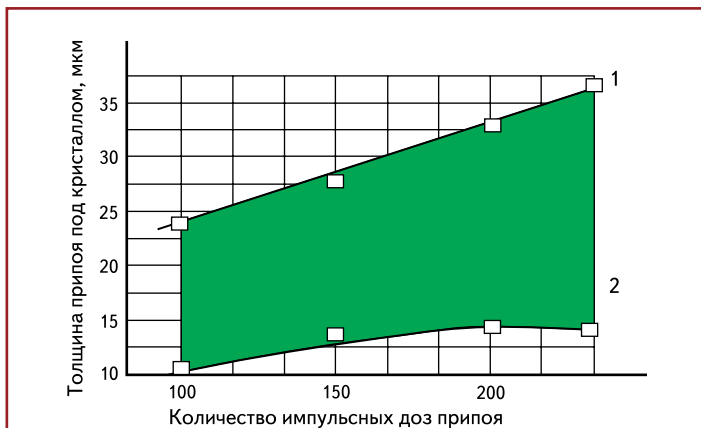


Рис. 8. Номограмма выбора толщины припоя под кристаллом при амплитуде вибрации: 1 — 100 мкм; 2 — 700 мкм

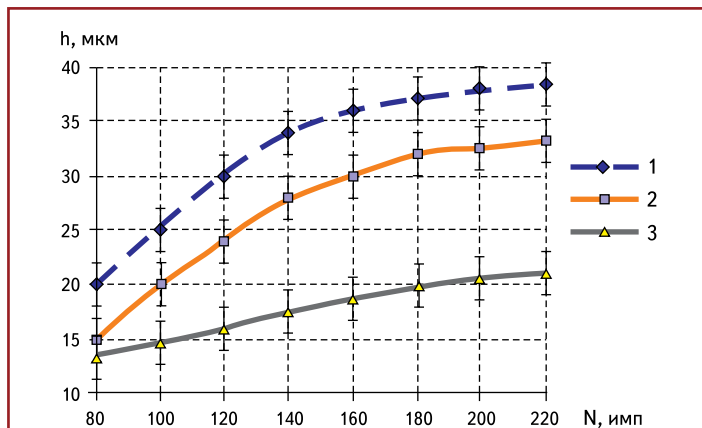


Рис. 9. Зависимость толщины припоя под кристаллом от дозы припоя ($N_{имп}$) при различной амплитуде колебаний: 1 — 250 мкм; 2 — 500 мкм; 3 — 750 мкм

на его валу поворачивается на определенный угол. За счет фрикционного сцепления ролика с подпружиненным роликом 5 проволоочный припой вытягивается с катушки 1 и поступает в направляющую трубку 3. При касании припоя с нагретой поверхностью кристаллодержателя 8 образовывается доза припоя 7 в атмосфере защитного газа, подаваемого по трубке 6.

Оптимизация параметров монтажа кристаллов

При расчете дозы припоя учитывалось, что минимальная толщина припоя под кристаллом должна быть на уровне 25–30 мкм. При вибрационной пайке часть припоя выдавливается за пределы кристалла, что составляет до 30% от полезного объема припоя, тогда общий объем дозы припоя должен быть равен:

$$V_{\Sigma} = V_K + V_{ПР} \quad (6)$$

где V_K — объем дозы припоя; $V_{ПР}$ — потери припоя.

При подаче одиночного импульса на дозатор ЛШД перемещает проволоку припоя в активную зону на шаг K , равный 8–10 мкм, поэтому доза припоя, задаваемая количеством импульсов на ЛШД, составляет:

$$D = L/K, \quad (7)$$

где L — расстояние, на которое необходимо переместить проволоку припоя:

$$L = V_{\Sigma}/S_{ПР}, \quad (8)$$

где V_{Σ} — объем припоя; $S_{ПР}$ — сечение проволоки припоя.

Определены условия эффективного отрыва капли припоя в зоне лужения кристаллодержателя. Оптимальный диапазон температур дозирования составил 370...390 °С. Для исследования выбран диапазон дозирования припоя в пределах 120–225 импульсов, а температура монтажа кристаллов должна на 20...30 °С превышать температуру дозирования капель припоя, то есть 400...410 °С.

Исследовался процесс монтажа высоковольтных мощных транзисторов типа

КТ872 ($U^{кб} = 1500$ В) с размером кристаллов $5 \times 5 \times 0,34$ мм, содержащих на непланарной стороне систему металлизации Ti-Ni-Ag. Присоединение кристаллов на рамку из медного сплава CuSn-0,15, покрытую слоем никеля толщиной 3–6 мкм, осуществлялось на припой SnAgSn на автомате ЭМ-4085-14М, где обеспечивалось движение кристалла в процессе пайки по программируемой траектории и заданной амплитуде. После пайки проводился контроль толщины паяного соединения индикатором часового типа. Измерялись толщина исходного кристалла (размер B), общая толщина кристалла и припоя (размер A), после чего определялась толщина паяного соединения $d_{ПР} = A - B$. Результаты контроля толщины паяного соединения для разных параметров вибрации представлены на рис. 8.

Исследованы факторы, определяющие температуру нагрева кристалла и величину остаточных термических напряжений в диапазоне температур пайки:

- толщина паяного соединения;
- сплошность припоя под кристаллом (наличие пустот, непропаев);
- образование зоны локальной деформации на непланарной стороне кристалла, вызванной воздействием металлической иглы механизма съема кристаллов с адгезионного носителя.

Зависимость толщины паяного соединения от параметров вибрации приведена на рис. 9. Контроль выхода годных приборов после изготовления контрольных партий с различными режимами вибрации в процессе монтажа кристаллов показал, что при малой дозе припоя (100 импульсов) выход годных составляет 93,5–95,0%. При этом малая амплитуда колебаний кристалла в пределах 250 мкм не позволяет получить сплошной паяный шов под кристаллом. При дозах припоя более 150 импульсов выход годных находился в пределах 96,3–97,8%. Припой, растекаясь за пределы кристалла, эффективно заполнял все пространство под кристаллом и образовывал паяный шов без пор, пустот и щелей.

Для обеспечения толщины паяного соединения кристалл — кристаллодержатель не менее 30 мкм необходимо не только увеличивать дозу припоя более 150 импульсов, но и уменьшать амплитуду колебаний кри-

сталла в процессе монтажа. Однако применение малых амплитуд вибраций имеет и отрицательное влияние. Так, при амплитуде менее 250 мкм качество паяного соединения ухудшается из-за образований локальных участков, не смоченных припоем, располагаемых вблизи центральной части кристалла. Площадь непропаев может достигать 25–30% площади активной транзисторной структуры. Образующиеся неоднородности способствуют развитию тепловой неустойчивости однородного токораспределения, искажению теплового фронта и за счет этого — перегреву кристалла. В результате выход годных изделий снижается до 88–94%. Увеличение параметров вибрации по координатам X , Y и амплитуды вибраций более 750 мкм приводит к эффективному растеканию припоя за пределами активной структуры. Толщина под кристаллом очень слабо зависит от дозы и не превышает уровня 15–22 мкм. При таких высоких уровнях вибрации припой под кристаллом имеет однородную структуру, благодаря этому обеспечивается равномерное распространение теплового потока (рис. 10), что способствует также росту выхода годных до 96–97,6%.

При монтаже кристаллов с амплитудой вибраций 500 мкм образуется не только бездефектное паяное соединение, как при $A_{xy} = 750$ мкм, но и достигается заданная толщина припоя в пределах 30–35 мкм, что позволяет получить выход годных по электрическим параметрам на уровне 96–98%.

Монтаж кристаллов силовых ДМОП-транзисторов на легкоплавкий припой выполнялся двумя методами: пассивным, с использованием касетной технологии сборки в конвейерной печи в восстановительной атмосфере водорода при температуре в диапазоне 375...450 °С; активным, на автомате ЭМ-4085-14М с движением кристалла в плоскости XU по заданной программе.

Для сборки использовалась выводная рамка из медного сплава, покрытая слоем химического Ni, толщиной 3–6 мкм. Качество монтажа кристаллов определялось по внешнему виду до и после воздействия разрушающей нагрузки, прикладываемой перпендикулярно боковой поверхности кристалла. Паяное соединение считалось удовлетворительным, если разрушение происходило по кремнию

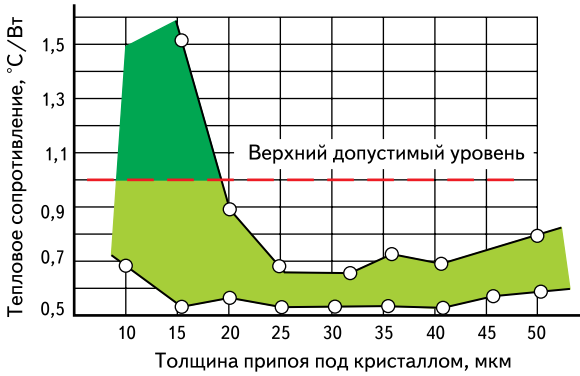


Рис. 10. Зависимость переходного теплового сопротивления кристалл – рамка от толщины припоя

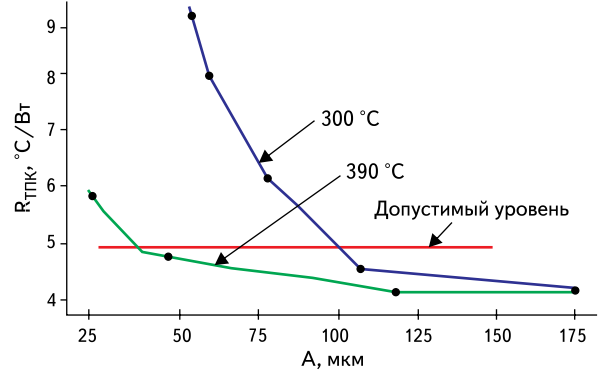


Рис. 11. Влияние режимов монтажа кристаллов на величину теплового сопротивления

и не менее чем 80% площади кристалла занято кремнием. Это требование подтверждалось и результатами контроля переходного теплового сопротивления «*p-n*-переход – корпус» ($R_{ТПК}$), выполненного с использованием зондового устройства.

Активация процесса монтажа кристаллов за счет принудительного вибрационного воздействия при амплитудах до 50 мкм не оказывает положительного результата. Это вызвано тем, что при малых амплитудах вибрации, в условиях выполнения процесса монтажа без применения защитной атмосферы, не происходит полного удаления окислов из зоны монтажа и образуются участки с непропаями, которые приводят к росту теплового сопротивления. Это особенно заметно при пайке кристаллов при температурах до 300 °С (рис. 11). Увеличение температуры монтажа кристаллов до 390 °С, а амплитуды колебаний до 75–150 мкм способствует эффективному удалению окислов из зоны монтажа, при этом исключаются пустоты и непропаи под кристаллом, что и позволяет получить требуемый уровень переходного теплового сопротивления. Это имеет существенное значение для мощных транзисторов.

Монтаж кристаллов на легкоплавкий припой вибрационной пайкой приводит к гомогенизации паяного соединения, исключению дефектов в виде пустот и непропаев. В результате снижается уровень термомеханических напряжений в активной структуре, снижается переходное теплое сопротивление, повышается производительность монтажа.

Процесс автоматизированного присоединения кристаллов большой площади требует учета следующих конструктивно-технологических факторов: синхронности движения иглы подкола и вакуумного устройства захвата кристалла с адгезионного носителя; формы рабочей части иглы подкола; силы удержания адгезионным носителем. Указанные факторы исследованы в процессе программно-управляемого монтажа кристаллов на автомате ЭМ-4085-14М кристаллов мощных биполярных транзисторов площадью до 25 мм²; имеющих металлизацию непланарной поверхности кристалла Ti-Ni-Ag с толщиной слоев 0,1±0,005, 0,5±0,1 и 0,6±0,1 мкм соответственно, присоединенных на адгезионный носитель: ленту-спутник ЛС-1А с толщиной клеящего слоя 20 мкм.

Устройство подкола содержало иглу из сплава ВК-20 с конусообразной рабочей частью. Устройство подкола и съема кристаллов с адгезионного носителя (рис. 12) работает следующим образом. После поворота кулачка на центральном приводе по механической тяге усилие передается на рычаг 1, который, воздействуя на шток 2, начинает поднимать иглу подкола 3. В этот момент включается вакуум, осуществляя фиксацию ленты-спутника 4.

Игла подкола, имеющая форму конуса, достигает обратной стороны ленты-спутника с адгезивным слоем и, прокалывая ее, касается непланарной поверхности кристалла 5, а затем поднимает его, отрывая от адгезионного слоя. Одновременно вакуумный захват 6, фиксируя кристалл, снимает его с носителя, поднимается по заданной траектории и передает его на следующую позицию.

Установлено существенное влияние силы удержания адгезивного слоя на процесс снятия кристалла. Усилие отслаивания кристалла определяется деформацией и силой сцепления ленты с металлизацией кристалла, скоростью деформации и расположением отслаиваемого участка. Чтобы избежать разрушения кремниевого кристалла, приложенный к нему момент изгиба должен оставаться ниже предела разрушения кремния. Момент изгиба можно определить из выражения:

$$M = \pi/2FR^2, \quad (9)$$

где F — усилие снятия кристалла; R — линейный размер плеча рычага.

При абсолютной синхронности движения иглы и вакуумного захвата возникают проблемы ориентированной фиксации снимаемого кристалла. В результате изменения упругих свойств ленты по периметру кристалла он подвергается воздействию момента вращения и смещается в захвате либо сбрасывается на ленту-спутник, что приводит к сбою в работе автомата. Для компенсации момента вращения необходимо вводить угол опережения иглы относительно начала подъема захвата.

Увеличение угла опережения иглы (рис. 13) приводит к увеличению динамического воздействия иглы на кристалл и к появлению локальных очагов разрушения кристалла. Формируемые таким образом дефектные зоны в кремниевом кристалле ухудшают условия

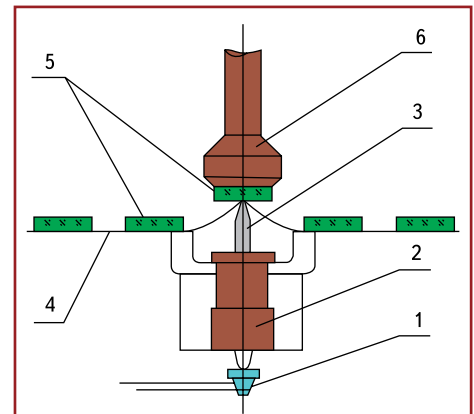


Рис. 12. Механизм съема кристалла с адгезионного носителя

отвода тепла, увеличивают теплое сопротивление, вызывают значительные деформации в кристалле и его растрескивание после циклического воздействия температуры. Внешний вид дефектных зон на кристалле, образованных иглой подкола, показан на рис. 14. Для ленты-спутника с различным усилием сцепления (0,05 и 0,14 Н) потребовалось увеличить угол опережения иглы с 10° до 15°, что вызвало локальные разрушения кристаллов в зоне контакта иглы с непланарной поверхностью кристалла, и в результате выход годных по тепловому сопротивлению составил 96% и 87% соответственно. Увеличение рабочего угла иглы более 20° приводило к частичному переносу клеящего слоя на кристалл, вызывая образование большой площади непропаев под кристаллом. Игла с рабочим углом менее 20° быстро становится тупой и часто ломается.

В результате исследований установлено, что для бездефектного присоединения кристаллов необходимо: настройку устройства съема кристаллов проводить с учетом выставления угла опережения иглы в пределах 5–10°; игла должна иметь рабочий угол заточки примерно 20°; для адгезионного носителя следует применять ленту-спутник с усилием удержания в пределах 0,05 Н.

Использование адгезионного носителя с $F_{y0} \gg 0,05$ Н для кристаллов площадью 25 мм² требует более тщательной настройки работы механизма съема кристаллов. При этом с целью компенсации крутящего момента, приводящего к развороту кристалла или

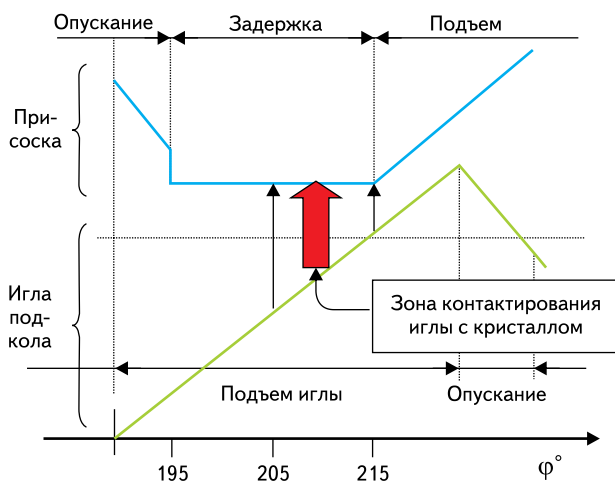
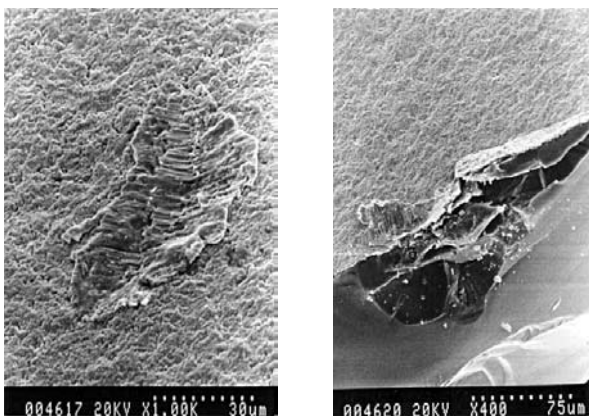

Рис. 13. Фрагмент циклограммы механизма съема кристаллов

Рис. 14. Внешний вид дефектов на кристалле после воздействия иглы подкола

Рис. 15. Внешний вид паяного соединения под кристаллом:
 а) для пассивного процесса пайки;
 б) для активного процесса пайки

приводит к росту динамического воздействия иглы на кристалл и увеличению площади дефектов.

Для оценки эффективности выбранных технологических режимов автоматизированного монтажа кристаллов проведены сравнительные испытания изготовленных приборов путем воздействия термоударов при $T = -196 \dots +200 \text{ }^\circ\text{C}$, $n = 100$ циклов с замером электропараметров $J_{КЭК}$, $U_{КЭ НАС}$, $U_{БЭ НАС}$, $R_{ТЛК}$ через каждые 10 термоударов. Увеличение параметров вибрации A_{XY} в процессе монтажа кристаллов приводит к снижению толщины припоя под кристаллом и снижению надежности приборов при термошоковых испытаниях из-за развития термомеханических напряжений в системе «кристалл – припой – кристаллодержатель», приводящих к возникновению трещин в кристалле.

Внешний вид паяного соединения под кристаллом для пассивного процесса монтажа, при котором кристалл находится в состоянии статического равновесия под действием силы собственного веса (напайка кристалла в конвейерной водородной печи), приведен на рис. 15а, а после программно-управляемой вибрационной пайки — на рис. 15б.

Для пассивного монтажа характерно образование локальных пустот и непропаев под кристаллом, которые, являясь концентраторами, способствуют росту напряжений более чем

в 2 раза после термоциклического воздействия. Это приводит также к ухудшению воспроизводимости по температуре перегрева кристалла, увеличивая ее до $50 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$ и снижая выход годных до $90 \dots 95\%$. Для варианта автоматизированного процесса присоединения кристаллов выход годных составил $97 \dots 98\%$, а температура перегрева — не более $40 \dots 55 \text{ }^\circ\text{C}$.

Заключение

Автоматизированный монтаж кристаллов с программно-управляемой вибрационной пайкой приводит к гомогенизации припоя в соединении, исключению дефектов в виде пустот и непропаев, в результате чего снижается уровень термомеханических напряжений активной структуры, снижается переходное тепловое сопротивление и повышается качество монтажа кристаллов. При амплитуде колебаний кристалла $250 \dots 500 \text{ мкм}$ по криволинейной замкнутой траектории происходит наиболее эффективное удаление оксидных пленок и шлаков за пределы активной зоны, что обеспечивает равномерную толщину припоя в соединении. Автомат ЭМ-4085-14М позволяет осуществлять автоматизированный монтаж на припое кристаллов площадью 25 мм^2 вибрационной пайкой с высоким качеством соединений и изготавливать мощные транзисторы с выходом годных по электрическим и тепловым параметрам до 98% .

Литература

1. Онегин Е. Е., Зенькович В. А., Битно Л. Г. Автоматическая сборка ИС. Минск: Высшая школа, 1990.
2. Технология СБИС. Кн. 2 / Пер. с англ. Под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986.
3. Беляков А. И., Шуньков С. И., Афанасьев В. В. Повышение эффективности процесса контактно-реактивной пайки полупроводниковых кристаллов // Сварочное производство. 1981. № 7.
4. Балашов Ю. С., Зенин В. В., Сегал Ю. Е. Сборочные операции и их контроль в микроэлектронике. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999.
5. Зенин В., Кочергин А., Хишко О. Напайка кристаллов на корпуса силовых полупроводниковых приборов с образованием эвтектики Al-Zn // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 2.
6. Зенин В. В., Беляев В. Н., Сегал Ю. Е., Фоменко Ю. Л. Пайка полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов // Петербургский журнал электроники. 2001. № 2.
7. Omi S., Fujita K. Causes of cracks in SMD and type specific remedies // IEEE Trans. Comp. Hybrid, Manufacture Technology. 1991. № 14.
8. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 3.
9. Arsalane S., Kellenberger D. Leading-edge Soft Soldering Dispensing Technology // Electronic journal Japan. 16.02.2001.