

Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой

Авторы статьи, имея многолетний опыт в области сборки и монтажа изделий электроники, активно занимаются разработкой автоматизированных процессов монтажа кристаллов транзисторов вибрационной пайкой в защитной атмосфере. Для обеспечения высокой устойчивости изделий к термоциклическим нагрузкам и высокого выхода годных изделий по электрическим параметрам необходима оптимизация дозы припоя и параметров вибрационной пайки. Оптимизация процесса монтажа кристаллов позволит получить надежный технологический процесс с высокой управляемостью, стабильностью и воспроизводимостью тепловых параметров транзисторов. Представленная информация будет полезна специалистам, работающим в области сборки изделий электроники.

**Леонид Ануфриев
Анатолий Керенцев
Владимир Ланин**

akerentsev@transistor.com.by

Проблемы монтажа кристаллов

Эксплуатационная надежность мощных транзисторов определяется, главным образом, их теплоэлектрическим состоянием, которое формируется на стадии присоединения кристалла к корпусу. При этом возможно образование скрытых дефектов (пустот, микротрещин, сколов), которые приводят к образованию участков под кристаллом с аномально высоким тепловым сопротивлением. Если площадь дефектов невелика по сравнению с площадью кристалла и не затрагивает активной структуры транзистора, то основная часть изделий имеет низкий уровень теплового сопротивления. Однако в процессе длительной эксплуатации в условиях экстремальных термоциклических воздействий такие изделия могут оказаться потенциально-ненадежными из-за развития микротрещин до активной структуры. Уровень остаточных термических напряжений во многом зависит от качества присоединения кристаллов на припой [1].

Существуют следующие методы монтажа кристаллов на выводные рамки: пайкой эвтектическими сплавами или легкоплавкими припоями, приклеиванием, посадкой на токопроводящую композицию. Все они должны обеспечить высокую прочность соединений при термоциклировании и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений.

Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0,5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. Для тех приборов, в которых мощность рассеяния кристалла невелика, а электрическое сопротивление между подложкой кристалла и рамкой незначительно влияет на работу

прибора, кристалл приклеивают на токопроводящую композицию [2].

Посадка кристалла на эвтектические сплавы, помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие), имеет и другие недостатки. Ввиду малой пластичности эвтектики Au-Si и разницы в коэффициентах термического расширения кристалла и рамки в напаянном кристалле возникают значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов при пайке, последующих технологических операциях и механических испытаниях, а также к снижению надежности приборов.

Тепловую модель мощного транзистора с напаянным кристаллом на кристаллодержатель можно представить в виде трех многослойных параллелепипедов, которые имитируют кристалл с плоским источником тепла на его поверхности, слой припоя заданной толщины и участок кристаллодержателя, ограниченного размерами паяного соединения (рис. 1). Тепловое сопротивление напаянного кристалла, исходя из упрощенной тепловой модели [3], можно определить из выражения:

$$R_{thjc} = \sum_{i=1}^3 R_{ti} = \frac{1}{\lambda_{Si}} \int_0^{L_{sp}} \left(\frac{dL}{b + LtgB} - \frac{dL}{a + LtgB} \right) + \frac{L_{np}}{\lambda_{np} \times S_{np}} + \frac{1}{\lambda_{Cb} (a - b)} \ln \frac{b + 2L}{a + 2L} \times \frac{a}{b}, \quad (1)$$

где λ_{Si} , λ_{np} , λ_{Cu} — теплопроводность кристалла, припоя, кристаллодержателя; L_{Si} , L_{np} , L_{Cu} — толщина кристалла, припоя, кристаллодержателя; a и b — размеры источника тепла; tgB — тангенс угла растекания теплового потока.

При толщине паяного соединения, равной 50 мкм, расчетное значение R_{thjc} составляет 0,545 °C/Вт, и при этом выполняется необходимое условие $R_{трасс} < R_{thjc}$. На зарубежных образцах изделий фирм Siemens

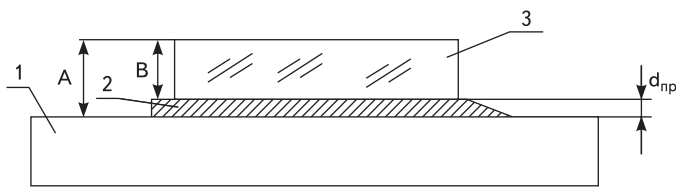


Рис. 1. Схема монтажа кристалла: 1 — кристаллодержатель; 2 — припой; 3 — кристалл

и International Rectifier реальная толщина припоя под кристаллом составляет 45–60 мкм.

При выборе нижнего предела следует иметь в виду то, что существует критическая величина паяного соединения, ниже которой резко снижается надежность изделий в экстремальных условиях эксплуатации из-за возникновения внутренних механических напряжений, превышающих допустимый уровень для данной конструкции прибора. Согласно [4] для ИМС и полупроводниковых приборов с площадью кристалла более 25 мм минимальная толщина соединения «кристалл–корпус» должна быть не менее 25 мкм. Максимальное напряжение, возникающее при охлаждении кристалла, определяется выражением:

$$\sigma_{\max} = K(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0) \sqrt{\frac{E_1 E_2 L}{X}}, \quad (2)$$

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 — температура пайки и окружающей среды; K — безразмерная константа.

Внутренние напряжения в напаянном 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.

Автоматизация монтажа кристаллов

Монтаж кристаллов с применением вибраций с амплитудой 0,5–1,0 мкм в плоскости основания позволяет обеспечить равномерное растекание припоя и до минимума свести дефекты в паяном соединении в виде пустот [5]. В крупносерийном производстве для присоединения кристаллов к корпусам полупроводниковых приборов вибрационной пайкой эффективен автомат ЭМ-4085-14М фирмы «ПЛАНАР» (Беларусь) (рис. 2), в состав которого входят микропроцессорный контроллер, оптико-телевизионная система распознавания кристаллов, линейный шаговый двигатель перемещения кристаллов, двухкоординатный стол сварочной головки и магазинный механизм автоматической подачи корпусов [6]. Производительность автомата для пайки кристаллов размером от 1×1 до 5×5 мм составляет 2000, для посадки на клей — 3500 и на стекло-припой — 600 кристаллов в час.

Автоматизированный процесс монтажа кристаллов на припой на автомате модели ЭМ-4085-14М обладает рядом особенностей, что позволяет осуществлять монтаж на выводные рамки из медного сплава, покрытого 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.



Рис. 2. Автомат присоединения кристаллов ЭМ-4085-14М

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

Исследовался процесс монтажа высоковольтных мощных транзисторов типа КТ872 ($U_{кб} = 1500$ В) с размером кристаллов 5,0×5,0×0,34 мм, содержащими на непланарной стороне систему металлизации Ti-Ni-Ag. Присоединение кристаллов на выводную рамку из медного сплава CuSn-0,15, покрытую слоем никеля толщиной 3–6 мкм, осуществлялось на припой SnAgSn на автомате ЭМ4085-14М, где обеспечивалось активное движение кристалла в процессе пайки по программируемой траектории.

В качестве припоя использовался проволоочный припой $\varnothing 1_{-0,07}$ мм марки ПСрОСу, намотанный на пластмассовую катушку, закрепленную в дозаторе. Подача припоя в зону луже-

ния осуществлялась линейным шаговым двигателем (ЛШД), на который поступают управляющие импульсы, количество которых предварительно программируется.

Заранее были определены условия эффективного отрыва капли припоя в зоне лужения кристаллодержателя. Оптимальный диапазон температур дозирования составил 370–390 °С. При расчете дозы припоя учитывалось, что минимальная толщина припоя под кристаллом должна быть на уровне 25–30 мкм. В процессе вибрационной пайки часть припоя выдавливается за пределы кристалла, что составляет порядка 30% от полезного объема припоя, тогда общий объем припоя при дозировке должен быть примерно равен:

$$V_{\Sigma} = V_k + V_{\text{п}} = 0,975 \text{ мм}^3, \quad (3)$$

где V_k — объем капли припоя, $V_{\text{п}}$ — потери припоя.

При подаче одиночного импульса на дозатор ЛШД перемещает проволоку припоя в активную зону на расстояние K , равное примерно 8 мкм, поэтому доза припоя, задаваемая количеством импульсов на ЛШД, составляет:

$$D = L/K = 155,2 \text{ имп.}, \quad (4)$$

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

$$L = V_{\Sigma}/S_{\text{пр}} = 1,242 \text{ мм}, \quad (5)$$

где V_{Σ} — объем припоя, $S_{\text{пр}}$ — сечение проволоки припоя.

Для исследования выбран диапазон дозирования припоя в пределах 120±225 имп., а температура монтажа кристаллов — на 20±30 °С выше температуры дозирования капель припоя, $T_m = 380+30 = 410$ °С.

В процессе присоединения кристаллов параметры вибрации — амплитуда и траектория принудительного движения кристаллов — программировались. После пайки проводился контроль толщины паяного соединения индикатором часового типа. Измерялись толщины исходного кристалла (размер B) и общая толщина кристалла и припоя (размер A), после чего определялась толщина паяного соединения $d_{\text{пр}} = A-B$.

Оптимизация параметров вибрационной пайки

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, вызванное воздействием металлической иглы механизма съема кристаллов с адгезионного носителя.

Результаты контроля толщины паяного соединения для разных параметров вибрации

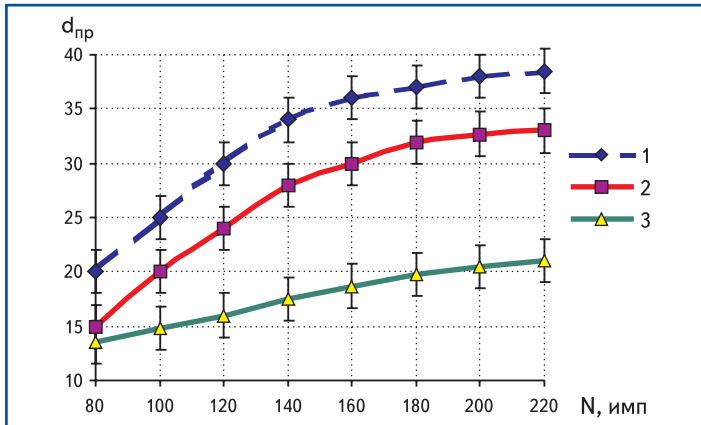


Рис. 3. Зависимость толщины припоя под кристаллом от дозы припоя ($N_{\text{имп}}$) при различной амплитуде колебаний: 1 — 250 мкм; 2 — 500 мкм; 3 — 750 мкм

представлены на рис. 3. Контроль выхода годных приборов после изготовления контрольных партий при использовании различных режимов вибрации в процессе пайки кристаллов показал, что при малой дозе припоя (100 имп.) 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 имп. выход годных находился в пределах 96,3÷97,8%. Припой, растекаясь за пределы кристалла (на величину заданной амплитуды колебаний), эффективно заполняет все пространство под кристаллом и вытекает со всех сторон кристалла. Паяный шов образуется без пор, пустот и щелей.

Для обеспечения толщины паяного соединения «кристалл–кристаллодержатель» не менее 30 мкм необходимо не только увеличивать дозу припоя более 150 имп., но и уменьшать амплитуду колебаний кристалла 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, не смоченных припоем участков, располагаемых вблизи центральной части кристалла. При этом площадь непропаев может достигать 25–30% от площади активной транзисторной структуры. Образующиеся неоднородности способствуют развитию тепловой неустойчивости однородного токораспределения, искажению теплового фронта и, за счет этого, перегреву кристалла. В результате отмечается снижение процента выхода годных до 88,2÷93,5%. Увеличение параметров вибрации по координатам X, Y и амплитуды вибраций более 750 мкм приводит к эффективному растеканию припоя за пределами активной структуры. При этом 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, что способствует также росту выхода годных до 95,9÷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. Качественное присоединение кристаллов позволяет получить выход годных по электрическим параметрам на уровне 95,5÷97,8%.

Определены требования к величине силы удержания кристалла $F_{\text{уд}}$ на адгезионном носителе, оптимальная величина которой составляет 0,05 Н. Использование адгезионного носителя с $F_{\text{уд}} \gg 0,05$ 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 его сбрасыванию с вакуумной присоски, необходимо корректировать в сторону увеличения угол опережения движения иглы подкола. Это приводит к росту динамического воздействия иглы на кристалл и увеличению площади дефектов.

Для оценки эффективности выбранных технологических режимов автоматизированного монтажа кристаллов были проведены сравнительные испытания изготовленных приборов путем воздействия термоударов при $T = -196 \pm 200$ °С, $n = 100$ циклов с замером электропараметров $J_{\text{кэж}}$, $U_{\text{кэнас}}$, $U_{\text{бэнас}}$, $R_{\text{тлж}}$ через каждые десять термоударов. Увеличение параметров вибрации A_{xy} в процессе монтажа кристаллов (рис. 4) приводит к снижению толщины припоя под кристал-

лом 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 припоя под кристаллом после вибрационной пайки и травления приведен на рис. 5а. При пассивном процессе монтажа кристалл находится в состоянии статического равновесия под действием силы собственного веса (вариант пайки кристалла в конвейерной водородной печи показан на рис. 5б). 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 ΔT_j до (40÷90) °С и снижая выход годных до 90÷95%. Для варианта автоматизированного процесса присоединения кристаллов выход годных составил 97,2÷98,6%, а $\Delta T_j = (40 \div 55)$ °С.

Автоматизированный монтаж кристаллов вибрационной пайкой приводит к гомогенизации паяного соединения, исключению дефектов в виде пустот и непропаев, в результате чего снижается уровень термомеханических напряжений активной структуры, снижается

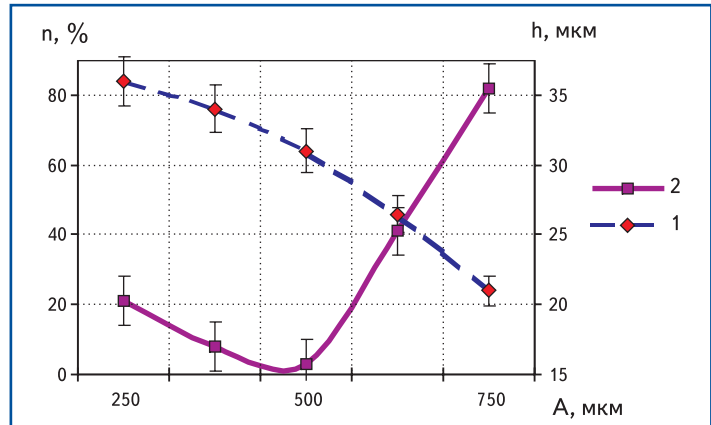
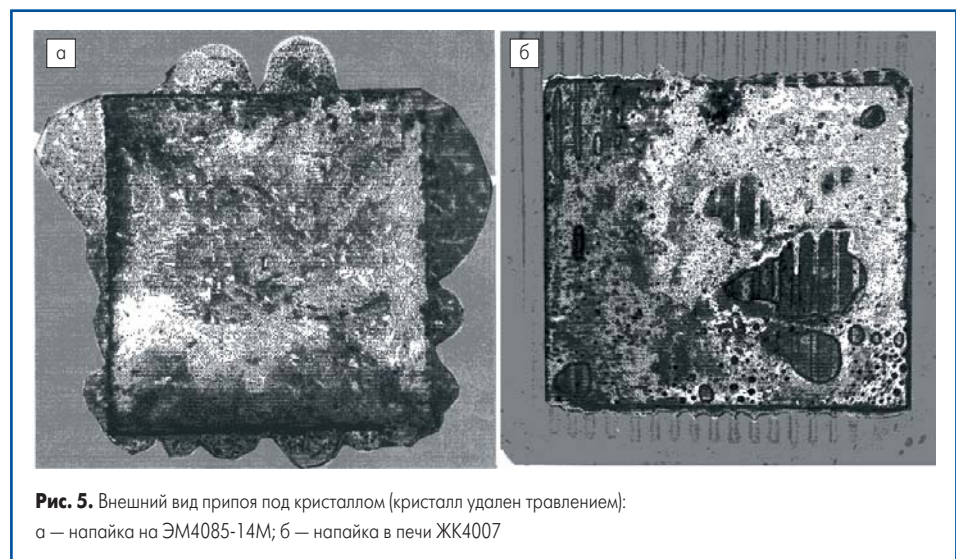


Рис. 4. Зависимости количества отказов и толщины припоя в соединении от амплитуды вибраций: 1 — толщина припоя; 2 — количество отказов после термоударов



переходное тепловое сопротивление и повышается его воспроизводимость. При амплитуде колебаний кристалла 250–500 мкм по криволинейной замкнутой траектории происходит наиболее эффективное удаление окисных пленок и шлаков за пределы активной зоны, что обеспечивает равномерную толщину припоя в соединении. Автомат ЭМ4085-14М позволяет осуществлять автоматизированный монтаж на припой кристаллов площадью 25 мм² вибрационной пайкой с высоким качеством соединений и изготавливать высоковольтные мощные транзисторы с выходом годных по электрическим параметрам до 98%. Для обеспечения высокой устойчивости к термоциклическим нагрузкам при $T = -196 \pm +200$ °С необходимо тщательно выбирать параметры вибрационной пайки и дозу припоя. ■

Литература

1. Синкевич В. Ф. Физические основы диагностирования предельных состояний и обеспечения надежности мощных транзисторов // Электронная промышленность. 1990. Вып. 6.
2. Левицкий Л. М. Электропроводящие клеи для микроэлектроники // Зарубежная электронная техника. Научн.-техн. сборник обзоров № 7 (339). М.: ЦНИИ «Электроника». 1989.
3. Захаров А. Л., Асвадунова Е. И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь. 1983.
4. Закс Д. И. Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем. М.: Радио и связь. 1983.
5. Современное сборочное оборудование для микроэлектроники в Беларуси // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 1998. № 3–4.
6. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л., Иваш А. М. Автоматизированный монтаж кристаллов мощных транзисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2000. № 4.
7. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Статистическое регулирование процесса монтажа кристаллов мощных транзисторов // Электроника и электротехника. Каунас: Технология. 2000. № 3 (26).
8. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Электрические и тепловые параметры контактов при монтаже кристаллов в приборах силовой электроники // Электроника и электротехника. Каунас: Технология. 2002. № 1 (36).