

УДК 621.315.592

Исследование процессов пайки кремниевых кристаллов мощных транзисторов в их корпуса

© 2017 г. В. С. Аносов, Д. В. Гомзииков, М. И. Ичетовкин, Л. А. Сейдман§, Р. И. Тычкин

АО «Государственный завод «Пульсар»», Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Россия

Аннотация. Качество монтажа кристаллов транзисторов в их корпусах характеризуется тепловым сопротивлением собранного транзистора. Достижение низкого значения теплового сопротивления особенно важно для мощных кремниевых транзисторов. Существует несколько способов монтажа кристаллов мощных кремниевых транзисторов в корпуса приборов с помощью пайки, в частности, эвтектикой золото—кремний, свинцовым припоем ПСр–2,5 или бессвинцовыми припоями, например сплавом золото—олово.

Рассмотрена возможность сокращения трудоемкости и стоимости изготовления кремниевых транзисторов при сохранении низкого теплового сопротивления. Проведено экспериментальное исследование замены пайки кристаллов эвтектикой золото—кремний пайкой главным образом преформой из припоя ПСр–2,5, а также некоторыми паяльными пастами. Это дает экономию золота и увеличение производительности операции монтажа кристаллов за счет использования групповой технологии пайки. Одновременно исследовано влияние на значение теплового сопротивления способа обработки обратной стороны кристаллов и их утонения. Для повышения качества пайки применена предварительная металлизация обратной стороны кремниевой пластины покрытием Ti—Ni, что значительно облегчило процесс пайки.

Экспериментальная работа по переходу на пайку свинцово—серебряными припоями проведена на кристаллах мощного серийного транзистора КТ–866, монтируемых в корпуса КТ–57. При площади кристалла 24 мм² тепловое сопротивление транзистора с утоненным кристаллом составило примерно 0,6 К/Вт, что ниже значения для серийно выпускаемых транзисторов. Значение теплового сопротивления транзистора с не утоненным кристаллом составило примерно 0,8 К/Вт, что ниже предельно допустимого для данного прибора значения 1,0 К/Вт.

Ключевые слова: кремниевые кристаллы, мощные транзисторы, приборы, монтаж кристаллов, пайка сплавом, металлизация кремния, корпуса приборов, тепловое сопротивление.

Введение

Качество монтажа кристаллов транзисторов в их корпусах характеризуется тепловым сопротивлением собранного транзистора. Достижение низкого значения теплового сопротивления особенно важно для мощных кремниевых транзисторов. Существует несколько способов монтажа кристаллов мощных кремниевых транзисторов в корпуса приборов с помощью пайки, в частности, эвтектикой золото—кремний [1], свинцовым припоем ПСр–2,5 [2] или бессвинцовыми припоями, например сплавом золото—олово [3—6].

В настоящее время серийно выпускаются мощные кремниевые транзисторы, в том числе, КТ–866,

монтаж кристаллов в которых осуществляют пайкой эвтектикой золото—кремний, образующейся при взаимодействии золотой прокладки с обратной стороной кремниевого кристалла.

Цель работы — выяснение возможности сокращения трудоемкости и стоимости монтажа кристаллов транзисторов при сохранении низкого значения теплового сопротивления. Для достижения этой цели проведено экспериментальное исследование возможной замены пайки кристаллов эвтектикой золото—кремний пайкой преформой из сплава ПСр–2,5, а также паяльными пастами. Это даст экономию золота и увеличение производительности операции монтажа кристаллов за счет использования групповой технологии пайки.

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования проводили на примере монтажа кристаллов мощного транзистора КТ–866 размером 6 × 4 мм² в корпуса КТ–57. В серийном производстве этих транзисторов используют исходные кремниевые пластины *n*-типа

Аносов Василий Сергеевич — зам. директора НТК, e-mail: vanosov@yandex.ru; **Гомзииков Денис Васильевич** — старший инженер—технолог, e-mail: d.pulsar@mail.ru; **Ичетовкин Максим Иванович** — инженер—технолог 1 кат., e-mail: 3399imi@gmail.com; **Сейдман Лев Александрович**§ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий специалист, e-mail: seid1@yandex.ru; **Тычкин Роман Игоревич** — начальник НИЦИТА, e-mail: kb-it@mail.ru

§ Автор для переписки

проводимости толщиной 450 мкм и диаметром 76 мм с эпитаксиальным слоем на лицевой полированной поверхности. После завершения технологического цикла изготовления транзисторных структур и их разбраковки кремниевые пластины утоняют для уменьшения теплового сопротивления кристалла кремния. Утонение проводят механической шлифовкой до 260 мкм и последующей полировкой обратной стороны пластины примерно на глубину 15 мкм. Монтаж кристаллов транзисторов осуществляют методом вибрационной пайки эвтектикой золото—кремний в ручном режиме, используя золотую прокладку. Монтаж кристаллов выполняют на установке периодического действия ЭМ–4075А. Среднее значение теплового сопротивления при серийном выпуске транзистора КТ–866 составляет 0,66 К/Вт. Предельное значение теплового сопротивления, согласно ТУ на этот прибор, — 1,0 К/Вт.

Полировка пластин после шлифовки в рассматриваемом случае необходима, поскольку пайка эвтектикой золото—кремний кристаллов из утоненных шлифованных пластин создает отдельную проблему. Поверхность пластин содержит заметные линейные неровности — царапины глубиной единицы микрометров, оставшиеся после шлифовки (рис. 1). Кроме того, присутствует нарушенный слой толщиной порядка 1—2 мкм (рис. 2) [7]. Физическая поверхность в этом случае в несколько раз больше геометрической. Следовательно, она содержит существенно большее количество оксида кремния. По этим причинам в процессе пайки золото прокладки взаимодействует с кремнием кристалла не по всей площади контакта, уменьшая таким образом его эффективную площадь. Это сказывается в увеличении теплового сопротивления границы раздела кристалл—припой. Поэтому дополнительно для получения гладкой поверхности механически полируют обратную сторону кремниевых пластин или применяют ее травление растворами кислот (HF или HNO₃) с использованием центрифуг [7]. Обычно таким методом можно снять слой в 10—30 мкм [7]. Эти операции повышают трудоемкость и удорожают процесс изготовления транзистора.

В отличие от работы [7], мы не применяли механическую или химическую полировку отшлифованной пластины, а ограничились только шлифовкой её обратной стороны:

- глубокой (до толщины 260 мкм) для утонения кристалла;
- неглубокой (на толщину до 8 мкм) для снятия нарушенного и загрязненного слоя кремния.

Затем все пластины кремния подвергали металлизации поверхности обратной стороны. Это связано с тем, что неметаллизированная поверхность кристалла кремния практически не смачивается припоем ПСр–2,5. Полученные результаты по

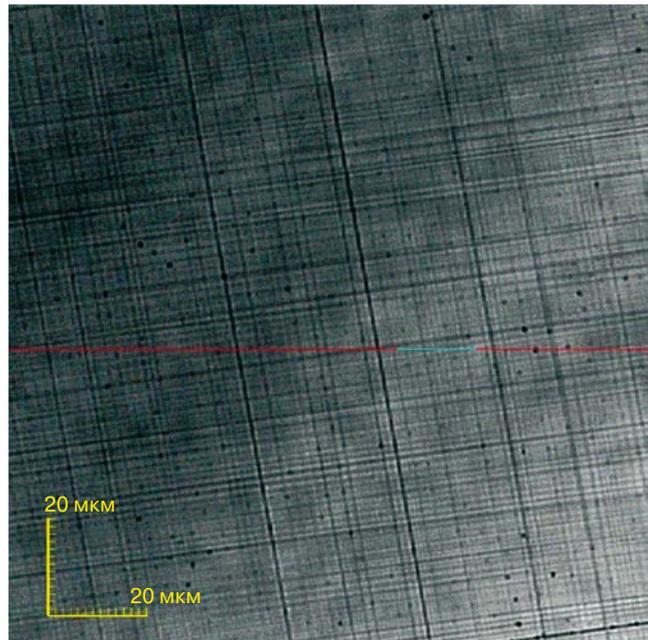


Рис. 1. Неровности, оставшиеся после шлифовки обратной стороны пластины кремния

Fig. 1. Roughness after silicon chip back side grinding

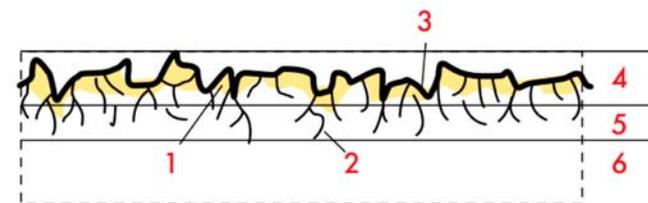


Рис. 2. Поперечное сечение отшлифованной пластины: 1 — зона неупругой деформации; 2 — микротрещины; 3 — поверхность после шлифовки; 4 — рельефный слой (0,5—1,0 мкм); 5 — приповерхностный слой (1,0—2,0 мкм); 6 — основной материал [7]

Fig. 2. Cross section of ground wafer: (1) inelastic strain area, (2) microcracks, (3) As-ground surface, (4) 0.5–1.0 μm roughness layer, (5) 1.0–2.0 μm subsurface layer, (6) bulk [7]

тепловому сопротивлению собранных транзисторов будут описаны ниже и оценены в сравнении с результатами, полученными при серийном выпуске прибора КТ–866.

Оборудование

Шлифовку обратной стороны кремниевых пластин проводили на высокопроизводительной шлифовальной установке ЭМ–2050. Стандартная отмывка после шлифовки состояла из операций жидкостной отмывки и обработки ультразвуком.

После шлифовки и отмывки на обратную сторону пластин в одном процессе в установке Kurt J. Lesker PVD 250 наносили двухслойную металлизацию Ti—Ni (0,1/0,1 мкм) [1, 2]. Это было необходимо, так как неметаллизированные кристаллы плохо смачиваются припоем. Подложки при нанесении

пленок не нагревали. Испарение металлов вели электронным лучом из вольфрамовых тиглей. Уже в вакуумной камере перед напылением титана пластину обрабатывали бомбардировкой пучком ионов аргона в течение 5 мин. Эту процедуру применяли для устранения слоя оксида кремния и улучшения адгезии пленки титана, играющей роль адгезионного подслоя. Нанесенная затем пленка никеля нужна для создания поверхности, хорошо смачиваемой припоями и не склонной к окислению. Кроме того, при использовании свинцовосодержащих припоев преимущество никеля заключается в том, что система Ni—Pb характеризуется отсутствием промежуточных фаз и практической взаимной нерастворимостью при температурах до 600 °С, даже когда свинец находится в жидком состоянии [8].

Разделение кремниевой пластины на кристаллы осуществляли на установке proVectus ADT (*advanced dicing technologies*) 7100.

Пайку различными припоями выполняли в программируемой печи SST–5100. Эта вакуумная печь обеспечивает откачку, нагнетание, продувку и вытяжку при давлении от $\sim 7 \cdot 10^{-5}$ до 2,7 атм. Программное обеспечение позволяет осуществлять изменение температуры деталей, ее выдержку, понижение и повышение давления в любой момент во время проведения процесса в автоматическом цикле. Такая вакуумная печь позволяет проводить технологический процесс пайки одновременно в 100 корпусах КТ–57 всего за 30 мин, включая время загрузки и выгрузки корпусов. В качестве температуры пайки далее будет указываться температура плиты в камере печи, которая заведомо выше температур корпуса прибора, припоя и кристалла. Это связано с тем, что поток тепла идет от плиты через корпус к припою и кристаллу. Его величина определяется теплопроводностью этих элементов и тепловым контактным сопротивлением между ними. Параллельно этому потоку еще идет поток тепла от плиты к корпусу прибора, припою и кристаллу через формирующий газ, когда он используется при пайке.

Для микросварки выводов использовали систему 3600, которая представляет собой установку с одиночной головкой для клиновой ультразвуковой микросварки.

Оценку морфологии поверхности пластин и внешнего вида транзисторов осуществляли на лазерном микроскопе 3D Measuring Laser Microscope OLS4000. Прямые измерения теплового сопротивления паяного соединения проводили на установке БКВП411189044, разработанной в НПП «Пульсар».

Процедура экспериментов

Эксперименты проводили с пайкой различными припоями кристаллов приборов КТ–866 в корпуса КТ–57 (позолоченные или никелированные). При

этом использовали металлизированные с обратной стороны кристаллы, сформированные в пластинах кремния трех типов, отличающихся степенью механической обработки их обратной стороны.

1. Пластины, подвергшиеся утонению шлифовкой до толщины 260 мкм.

2. Пластины после неглубокой шлифовки (примерно 8 мкм).

3. Исходные пластины без шлифовки обратной стороны.

Для пайки использовали, главным образом, преформу толщиной 100 мкм из припоя ПСр–2,5, имеющего состав 2,5 % Ag + 92,5 % Pb + 5 % Sn [9]. Для сравнения использовали также паяльные пасты фирмы Indium Corporation: пасту марки Indium NC–SMQ®75 того же состава, что и преформа, и пасту марки Indalloy 182, имеющую состав Au 80 % + Sn 20 %. Температуры плавления выбранных припоев близки: у сплава ПСр–2,5 температура плавления составляет 295—300 °С [9] и немного ниже у сплава золото—олово — 280 °С [3, 5, 6]. Температуры пайки (максимальная температура плиты в камере печи) всегда существенно выше температуры плавления припоя. В некоторых процессах пайки использовали флюс, им служил флюс–гель Indium TACFlux 010 [10], наносимый тонким слоем на корпус прибора и на преформу припоя.

Пайку осуществляли в двух режимах:

– первый — при температуре 350 °С в среде рабочих газов с использованием флюса [2];

– второй, альтернативный, — при температурах 350—450 °С в вакууме без использования флюса.

Существенное отличие второго (альтернативного) автоматического цикла работы печи от первого заключалось в том, что большая часть рабочего процесса шла в вакууме, который создавался еще до плавления припоя. Это отличает второй режим от обычно используемых режимов пайки в вакууме [11, 12], в которых вакуум в печи во время пайки создают на стадии, когда припой уже расплавлен. В этом случае газ не может быть откачан из всех полостей, сформированных неровностями поверхностей паяемых деталей, так как расплав припоя герметизирует объемы полостей, отделяя их от объема камеры, в которой создан вакуум [13—15]. Поэтому вакуум в печи мы создавали на предварительной стадии, когда припой еще твердый и между ним и кристаллом еще существуют каналы откачки, через которые газ из полостей может быть удален. В этом случае, когда наступает стадия расплавления припоя, газ в полостях уже не препятствует заполнению полостей жидким припоем. В результате должен обеспечиваться более плотный тепловой контакт припоя с паяемой шероховатой поверхностью кристалла. Сравнение результатов пайки в обоих режимах позволит оценить степень влияния неровностей паяемой поверхности кристалла.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты пайки для двух видов кристаллов.

Кристаллы, утоненные до 260 мкм с помощью шлифовки обратной стороны. Первоначальную оценку качества пайки осуществляли визуально по растеканию припоя и смачиванию им поверхностей паяемых деталей. Хорошим растеканием считали покрытие ровным тонким слоем припоя свободной от кристалла и преформы посадочной площадки корпуса транзистора (рис. 3, а). Для хорошего растекания, как минимум, необходимо, чтобы температура припоя и паяемых деталей была выше температуры плавления припоя. В действительности их температура зависит не только от температуры плиты, но и от теплового сопротивления между кристаллом и плитой. Когда оно низкое, т. е., обеспечен хороший контакт через расплавленный флюс и нагрев через формиргаз, то температура деталей становится выше температуры плавления припоя даже при сравнительно низкой температуре плиты. Поэтому хорошее растекание было получено в первом режиме уже при 350 °С.

Следующий эксперимент показал, что при пайке без флюса в формиргазе температуры плиты печи (350 °С) уже недостаточно. Поэтому для растекания припоя была необходима более высокая температура — 400 °С. Это объясняется увеличением контактного теплового сопротивления между припоем и паяемыми поверхностями, поскольку контакт осуществлялся не через жидкий флюс, а в отдельных точках контактирующих твердых тел. Поэтому для достижения той же температуры припоя, и поверхности кристалла в отсутствие флюса была необходима более высокая температура плиты в печи. Точно также при пайке в вакууме, когда нет теплопередачи по формиргазу, для хорошего растекания припоя тоже необходимо увеличивать температуру плиты в печи до 400 °С при использовании флюса и даже до 450 °С, если флюс не используется.

Таким образом, флюс и формиргаз, помимо других важных функций, в процессе пайки играют существенную роль в теплопередаче от нагретой плиты к припою и паяемым деталям. Поэтому в их отсутствие приходится увеличивать температуру плиты.

Более важную оценку качества пайки осуществляли по величине теплового сопротивления собранного транзистора. Результаты пайки в различных режимах кристаллов с обратной стороной, обработанной по-разному, сведены в табл. 1. Процедура экспериментов была описана выше. Необходимо было выяснить насколько целесообразна пайка металлическими припоями вместо эвтектики золото—кремний, сравнить близкие по свойствам припои, оценить важность применения флюса, срав-

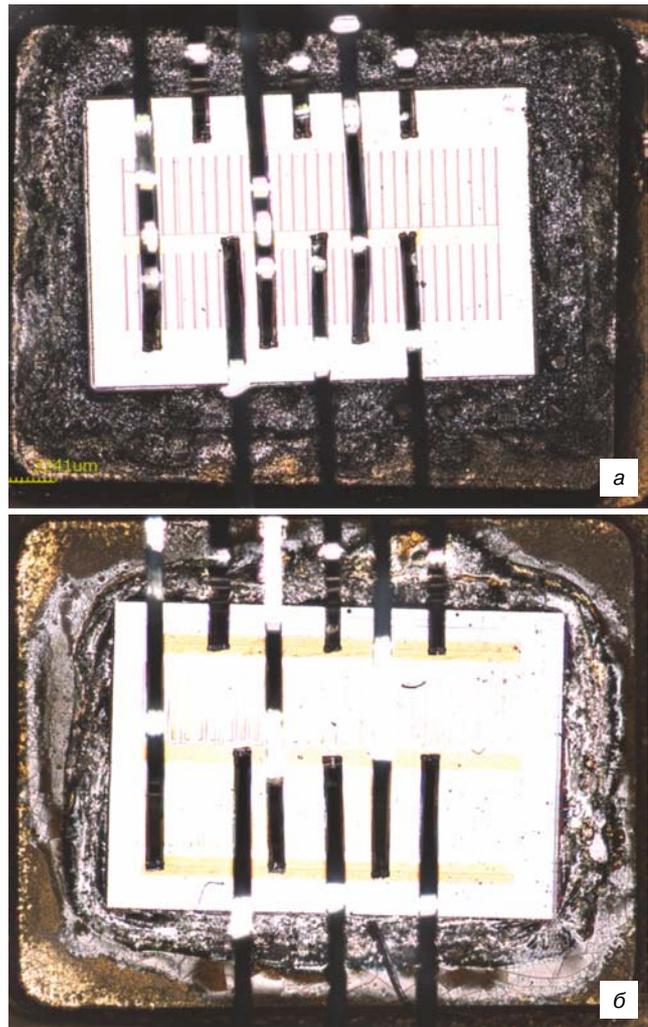


Рис. 3. Вид собранных транзисторов без крышки: а — хорошее растекание припоя, когда тонкий слой припоя покрывает свободную площадь корпуса транзистора; б — менее хорошее растекание припоя, когда видны свободные от припоя поверхности позолоченного корпуса

Fig. 3. Appearance of assembled transistors without caps: (a) good solder flowing, with a thin solder layer covering the free area of the transistor housing; (b) worse solder flowing, where some gold-plated housing areas are not covered with the solder

нить пайку в вакууме и в среде формиргаза, оценить влияние на теплового сопротивление транзистора глубины шлифовки обратной стороны кристалла и золотого покрытия корпуса транзистора.

Как видно из табл. 1, при пайке припоем ПСр–2,5 утоненных шлифовкой кристаллов получено теплового сопротивление (0,6—0,63 К/Вт), которое даже на 5—10 % ниже, чем его среднее значение в серийном производстве транзисторов при пайке эвтектическим сплавом золото—кремний (0,66 К/Вт). Причем при пайке в вакууме при 450—480 °С низкое R_t (всего 0,6—0,63 К/Вт) получено, как с флюсом, так и без него (см. табл. 1). Таким образом, при пайке в вакууме при 450 °С шлифованных утоненных кристаллов, металлизированных с обратной стороны, наличие флюса не влияет на значение теплового сопротивления транзистора. Его влияние, как было

Таблица 1

Среднее значение измеренного теплового сопротивления R_t транзисторов, полученных после пайки в различных условиях кристаллов с обработанной по-разному обратной стороной
 [Average transistor thermal resistance R_t after different chip back side treatment and soldering modes]

Обработка обратной стороны	Толщина кристалла, мкм	Припой	Наличие дополнительного флюса	Пайка в среде	Температура пайки, °С	R_t , К/Вт
Без шлифовки	450	Сплав ПСр–2,5	+	Газ	350	0,83
			–	Вакуум	450	1,14
			–	Вакуум	480	1,08
Шлифовка на 8 мкм	442		+	Газ	350	0,83
			–	Вакуум	450	0,83
			–	Вакуум	480	0,6
Шлифовка до 260 мкм	260		+	Газ	350	0,61
			+	Вакуум	450	0,6
			–	Вакуум	450	0,63
		–	Вакуум	480	0,6	
		Паста ПСр–2,5	–	Газ	350	0,56
			–	Вакуум	450	0,56
		Паста Золото—олово	–	Газ	350	1,05
–	Вакуум		450	1,1		

показано выше, сказывается только в повышении температуры нагрева припоя и кристалла за счет повышения теплопередачи от плиты через корпус прибора к припою и кристаллу.

Поскольку оба режима пайки в формирующей газе и в вакууме дали одинаковые результаты по тепловому сопротивлению транзистора, то в данном случае неровности шлифованной обратной стороны кристалла не играют существенной роли, т. е. между ними не осталось каких-либо газовых включений, препятствующих теплопередаче.

Неутоненные кристаллы с необработанной или шлифованной обратной стороной. При сравнении пайки кристаллов с различной шлифовкой обратной стороны получили ожидаемый результат: транзисторы с более толстыми кристаллами имели более высокое тепловое сопротивление, что ясно видно из сравнения данных в табл. 1. Тем не менее, повышенное, но приемлемое сопротивление 0,83 К/Вт на неутоненных кристаллах с нешлифованной обратной стороной получили в режиме пайки в формирующей газе с флюсом (см. табл. 1). Но при пайке таких же кристаллов в вакууме без флюса при 450 и 480 °С получили еще более повышенное $R_t = 1,08+1,14$ К/Вт (см. табл. 1), превышающее предельно допустимое. Объясняется это тем, что нешлифованная поверхность обратной стороны кристалла в контакте с припоем вносит большее дополнительное контактное тепловое сопротивление. Из-за этого в процессе пайки в вакууме без флюса температура такой поверхности ниже, и растекание припоя по ней хуже.

В тех же условиях у транзистора с кристаллом, шлифованным на 8 мкм с обратной стороны (конечная толщина 442 мкм), при пайке в обоих ре-

жимах получено среднее тепловое сопротивление 0,83 К/Вт (см. табл. 1). Этот эксперимент показал, что со шлифованным с обратной стороны кристаллом можно получить допустимое значение сопротивления 0,83 К/Вт и при пайке без флюса в вакууме при 450 °С. Таким образом, есть даже неглубокая шлифовка поверхности обратной стороны кристалла позволяет использовать безфлюсовую пайку в вакууме.

Следовательно, приемлемое, но повышенное, сопротивление 0,83 К/Вт можно получить с неутоненными кристаллами: а) с нешлифованной обратной стороной в режиме пайки в формирующей газе с флюсом; б) с неглубоко (на 8 мкм) шлифованной обратной стороной в обоих режимах пайки. То, что альтернативный режим пайки (в вакууме) не выявил явных преимуществ, говорит о том, что и в этом случае между неровностями шлифованной поверхности кристалла не остаются газовые включения. Поэтому они не сказываются на значении теплового сопротивления. Это влияние становится заметным при пайке без флюса нешлифованной поверхности кристалла.

Влияния состава припоя на тепловое сопротивление. Для пайки кристаллов в корпусах транзисторов, как известно, используют различные припои. Некоторые из них имеют близкие температуры плавления. Поэтому было интересно сравнить их между собой. Кроме описанных выше процессов пайки утоненных шлифовкой кристаллов с помощью преформы из сплава ПСр–2,5 (см. табл. 1) были опробованы припои в виде паяльных паст: свинцово–серебряной ПСр–2,5 и бессвинцовой золото—олово 80Au20Sn. Паста ПСр–2,5 была выбрана для сравнения с преформой того же состава,

а паста золото—олово для оценки возможностей бессвинцовой пайки.

Пайку осуществляли, как и в предыдущих экспериментах, в двух режимах:

- при температуре 350 °С в среде формиргаза с флюсом;
- при температуре 450 °С в вакууме без флюса.

Результаты экспериментов с пайкой паяльными пастами также сведены в табл. 1.

Растекание припоя из пасты ПСр–2,5 было очень хорошим, чего нельзя сказать о припое из пасты золото—олово. Растекание припоя из пасты золото—олово (рис. 3, б) было менее успешным, хотя температура плавления пасты немного ниже, чем у сплава ПСр–2,5. По–видимому, поэтому применение паяльной пасты золото—олово в обоих режимах пайки дало неприемлемый результат — тепловое сопротивление 1,05—1,1 К/Вт, что выше допустимого значения для данного транзистора. Объясняется это, помимо худшего растекания припоя (см. рис. 3, б), еще и тем, что требуется оптимизация режима пайки в силу особенностей этого сплава. Дело в том, что фазовая диаграмма этого сплава [4, 6] демонстрирует одно важное свойство сплава 80Au20Sn — резкое увеличение температуры плавления (ликвидуса), даже при незначительном увеличении концентрации золота. Эту особенность необходимо учитывать при пайке деталей с золотым покрытием, когда золото из металлизации корпуса прибора во время пайки растворяется в припое и может изменять его состав [2, 4—6, 16, 17], увеличивая количество интерметаллида Au₅Sn [4, 6], ухудшающего теплопроводность сплава. Описанный процесс насыщения золотом сплава 80Au20Sn зависит от режима пайки (температуры и времени нагрева выше точки ликвидуса). Режимы были выбраны для пайки сплавом ПСр–2,5. Для сплава 80Au20Sn, по–видимому, необходимо подобрать свой оптимальный режим, учитывая рекомендации по температурному профилю пайки, приведенные в работах [4, 6].

Применение паяльной пасты ПСр–2,5 дало хорошие результаты по тепловому сопротивлению (см. табл. 1), которые даже немного лучше, чем ре-

зультаты после использования преформы из этого же сплава. Кроме этого преимущества за счет наличия флюса в самой пасте, она удобнее в использовании, так как позволяет применять автоматические дозаторы и раскладчик кристаллов.

Влияния золотого покрытия корпуса прибора на тепловое сопротивление транзистора. В работах [2, 17] уже отмечалось влияние золотого покрытия корпуса прибора на тепловое сопротивление собранного транзистора. Причем оно тем больше, чем больше толщина золотого покрытия. Такое влияние имеет место из–за нежелательного растворения золотого покрытия в расплавленном припое, как в свинцово–серебряном [2, 17], так и в сплаве золото—олово [4—6]. Поэтому имело смысл исследовать, как будет происходить пайка кристаллов при исключении золотого покрытия из конструкции корпуса прибора. Для этого в экспериментах использовали никелированные корпуса КТ–57 без золотого покрытия. В качестве припоев применяли два, которые продемонстрировали наиболее низкие значения теплового сопротивления (см. табл. 1): преформу из сплава ПСр–2,5 и паяльную пасту из того же сплава.

Эксперимент показал, что внешний вид никелевого покрытия корпуса после пайки не изменился. Следовательно, при нагреве корпуса в среде формиргаза видимого окисления никеля не произошло. Микросварки выводов транзистора на никелевых площадках прошли в тех же режимах, что и на позолоченных площадках. Растекание обоих припоев по никелевому покрытию корпуса было незначительно хуже, чем по золотому, но, тем не менее, на значении теплового сопротивления это не сказалось (табл. 2).

Применение никелированных корпусов дало такие же низкие значения теплового сопротивления транзисторов (см. табл. 2), как и применение позолоченных корпусов (см. табл. 1). Таким образом, отсутствие золотого покрытия корпуса прибора не повлияло на значение теплового сопротивления при пайке припоями на основе сплава ПСр–2,5. Поскольку никель практически не растворяется в свинце при температурах до 600 °С [8], то здесь, в отличие от золотого покрытия [2], во время пайки не происходит изменение состава припоя и соответствующее

Таблица 2

Среднее значение измеренного теплового сопротивления R_t транзисторов, полученных после монтажа кристаллов, утоненных шлифовкой до 260 мкм, в никелированные корпуса в среде формиргаза при 350 °С

[Thermal resistance R_t of transistors after installation of chips thinned to 260 μm into nickel plated housings in formiergas atmosphere at 350 °С]

Припой	Наличие дополнительного флюса	R_t , К/Вт
Преформа из сплава ПСр–2,5	+	0,57
Паяльная паста ПСр–2,5	–	0,56

этому ухудшение его тепло- и электропроводности. Это дает возможность применять более дешевые никелированные корпуса и за счет этого снизить расход золота.

Показано, что оба режима пайки (в формиргазе и вакууме) дают одинаковые результаты по тепловому сопротивлению транзистора. То есть в рассмотренном случае неровности шлифованной и металлизированной обратной стороны кристалла не играют существенной роли, поскольку между ними не остаются газовые включения, мешающие тепловому контакту. Благодаря этому применение пайки припоем на основе сплава ПСр-2,5 вместо эвтектики золото—кремний дает несколько лучшие результаты по тепловому сопротивлению при наличии металлизации обратной стороны кристалла.

Во время изготовления транзисторов обратная сторона пластины кремния подвергается различным нарушениям структуры и загрязнениям, в частности, при диффузионных и окислительных процессах изготовления транзисторной структуры. Поэтому целесообразно удалять с обратной стороны пластины шлифовкой слой толщиной несколько микрометров. Поверхность кремния после шлифовки и металлизации пригодна для получения при пайке низких тепловых сопротивлений. Действительно, благодаря металлизации обратной стороны кристалла двухслойным покрытием Ti—Ni, в большинстве случаев получено тепловое сопротивление существенно ниже допустимой величины для данного транзистора.

Кроме того, при пайке припоем на основе сплава ПСр-2,5, полученные значения тепловых сопротивлений (см. табл. 1) при монтаже кристаллов разной толщины 260 и 460 мкм составили 0,63 и 0,83 К/Вт соответственно. Таким образом, эффект от утонения кристаллов на 200 мкм — это снижение теплового сопротивления данного транзистора на 0,2 К/Вт. Обе полученные величины сопротивления меньше допустимого значения для данного прибора. Следовательно, иногда можно не подвергать кремниевые пластины с кристаллами существенному утонению.

Этот вывод можно подтвердить оценкой балластного (паразитного) электрического сопротивления кристалла кремния между активной частью транзистора и припоем. Приборы КТ-866 сформированы в эпитаксиальных слоях на подложках кремния *n*-типа проводимости с удельным электрическим сопротивлением 0,01 Ом · см и толщиной 0,45 мм. При площади кристалла 24 мм² электрическое сопротивление неутоненного кристалла будет не выше 0,002 Ом. Для сравнения, удельное электрическое сопротивление припоя ПСр-2,5 составляет $21,4 \cdot 10^{-8}$ Ом · м [9], при площади 24 мм² и толщине слоя свинцового припоя 0,05—0,1 мм электрическое сопротивление слоя припоя — 0,045—0,09 Ом, что

значительно выше, чем у самого кристалла кремния. То есть утонение кристалла для снижения его балластного электрического сопротивления практически не влияет на значение электрического сопротивления от активной части до корпуса собранного транзистора.

Таким образом, утонение кристалла не влияет заметно на электрическое сопротивление между активной зоной и корпусом собранного транзистора, а значение его теплового сопротивления остается в пределах допуска. Влияние использования утоненных до меньшей степени кристаллов на другие параметры транзисторов, в частности на их надежность, требует дальнейших исследований.

Заключение

Проведены исследования монтажа кристаллов мощных кремниевых транзисторов КТ-866 со шлифованной обратной стороной в позолоченные и никелированные металлокерамические корпуса КТ-57 с помощью пайки припоями на основе сплавов металлов, не содержащих золото.

Показано, что оба режима пайки (в формиргазе и в вакууме) дают одинаковые результаты по тепловому сопротивлению транзистора. Таким образом, в этом случае неровности шлифованной и металлизированной обратной стороны кристалла не играют существенной роли, поскольку между ними не остаются газовые включения, мешающие тепловому контакту.

Установлено, что флюс можно исключить из процесса пайки с применением преформы из сплава ПСр-2,5 при наличии металлизации обратной стороны кристалла, что даст повышение надежности транзисторов.

Обнаружено, что допустимые значения теплового сопротивления транзисторов можно получить без существенного утонения пластин.

Применение пайки припоем на основе сплава ПСр-2,5 вместо эвтектики золото—кремний дает несколько лучшие результаты по тепловому сопротивлению при наличии металлизации обратной стороны кристалла. В свою очередь, это позволяет осуществить переход на групповую технологию пайки и сэкономить золото, расходуемое на прокладки.

Разработанный групповой процесс пайки свинцово-серебряным припоем упрощает и удешевляет монтаж кристаллов кремниевых приборов в их корпуса по сравнению с монтажом их индивидуальной пайкой эвтектикой золото—кремний.

Показано, что возможна дополнительная экономия золота за счет отказа от золочения корпусов транзисторов.

Библиографический список

1. Аносов В. С., Гомзииков Д. В., Пашков М. В., Сейдман Л. А., Тычкин Р. И., Фомин В. М. Исследование технологии монтажа

кремниевых кристаллов пайкой эвтектическим сплавом золото—кремний // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 2016. – № 3. – С. 4—12.

2. Аносов В. С., Гомзиков Д. В., Пашков М. В., Сейдман Л. А., Тыхкин Р. И., Фомин В. М. Исследование технологии монтажа кремниевых кристаллов мощных транзисторов в позолоченные и никелированные корпуса с помощью сплава ПСр–2,5 // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 2016. – № 4. – С. 4—10.

3. Indium #182 (80Au20Sn) припой в виде пасты // <http://www.ostec-materials.ru/materials/indium-182-80au20sn-priпой-v-vide-pasty.php>

4. Кондратюк Р. Свойства и особенности применения припоя 80Au20Sn в сборке изделий микроэлектроники // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2015. – № 10(150). – С. 154—160.

5. Forman R. S., Minogue G. The basics of wafer-level AuSn soldering // *Chip Scale Review*. – 2004. – Т. 8, № 7. – С. 55—59.

6. Minogue G., Mullapudi R. A novel approach for hermetic wafer scale MEMS RF and GaAs packaging // *CS ManTech*, 2015. URL: <http://csmantech.org/OldSite/Digests/2005/2005papers/9.3.pdf>

7. Мухина Е. Технология обработки ультратонких полупроводниковых пластин // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – № 3. – С. 80—81.

8. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 3. [Кн. 1]. 872 с.

9. ГОСТ 19738-74: Припой серебряные. Марки.

10. Indium флюс-гели (020В, 018, 025, 010, 007 и 0120) // <http://www.ostec-materials.ru/materials/indium-flyus-geli-020v-018-025-010-007-i-012.php>

11. Валев С. Вакуумная пайка в производстве силовой электроники. Современное решение для лабораторного и крупносерийного производства // *Силовая электроника*. – 2006. – № 9. – С. 104—108.

12. Кантер А. Вакуумная пайка — залог качественного паяного соединения // *Технологии в электронной промышленности*. – 2013. – № 6. – С. 30—33. URL: http://budatec.ru/fileadmin/articles/Statja_vakuumnaja_paika.pdf

13. Chao Yuan, Bin Duan, Lan Li, Bofeng Shang, Xiaobing Luo. An improved model for predicting thermal contact resistance at liquid–solid interface // *Internat. J. Heat and Mass Transfer*. – 2015. – V. 80. – P. 398—406. DOI: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2014.09.048

14. Prasher R. S. Rheology based modeling and design of particle laden polymeric thermal interface materials // *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, 2004. IThERM'04. The Ninth Intersociety Conference on. – Las Vegas (NV, USA) : IEEE, 2004. – P. 36—44. DOI: 10.1109/IThERM.2004.1319151

15. Hopkins P. E. Thermal transport across solid interfaces with nanoscale imperfections: effects of roughness, disorder, dislocations, and bonding on thermal boundary conductance // *ISRN Mechanical Eng.* – 2013. – Art. N 682586 (19 p.).

16. Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Конструктивно-технологические особенности MOSFET-транзисторов // *Силовая электроника*. – 2007. – № 4. – С. 100—104.

17. Ланин В. Л., Ануфриев Л. П. Монтаж кристаллов IGBT-транзисторов // *Силовая электроника*. – 2009. – № 2. – С. 94—99.

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2016 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = *Materials of Electronic Technics*. 2017, vol. 20, no. 1, pp. 51—59.

DOI: 10.17073/1609-3577-2017-1-51-59

Study of high power transistor silicon chip soldering in housings

V. S. Anosov¹, D. V. Gomzikov¹, M. I. Ichetovkin¹, L. A. Seidman^{1,§}, R. I. Tychkin¹

¹*GZ Pulsar JSC, 27 Okruzhnoy Proezd, Moscow 105187, Russia*

Annotation. The aim of this work is to find out the possibility to reduce the laboriousness and cost of high-power silicon transistors manufacturing with retention of their low thermal resistance. To this end we carried out experimental research of replacement soldering silicon chips in the housing transistors of Au—Si solder for lead–silver solder and some other solders. This will reduce the consumption of gold and increase the productivity of the high-power transistors silicon chips installation due to the collective technology application. At the same time it was found that different treatments of the reverse side of the silicon wafer and their thinning influence the thermal resistance. To improve the quality of soldering we used preliminary metallization of the reverse side of the silicon wafer — Ti—Ni coating.

We performed experimental evaluation of the influence of the outer layer materials of the housings and the back side metallization of the chips. When one utilizes soldering silicon chips with lead–silver solder, the housing with a nickel outer layer has the advantage, rather than the gold–plated one, as far as the resulting thermal resistance was lower and the absence of gold made the technology cheaper. We obtained a thermal resistance of 0.6 K/W for a chip area of 24 mm².

Keywords: Silicon devices, installation of crystals of silicon devices, the soldering alloy, silicon metallization, housing devices, thermal resistance

References

1. Anosov V. S., Gomzikov D. V., Pashkov M. V., Seidman L. A., Tychkin R. I., Fomin V. M. Investigation of silicon die braze bonding

Vasily S. Anosov¹: Deputy Director of the Scientific–Technical Complex; **Denis V. Gomzikov¹:** Senior Process Engineer; **Maxim I. Ichetovkin¹:** Process Engineer; **Lev A. Seidman^{1,§}:** Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Leading Specialist (seid1@yandex.ru); **Roman I. Tychkin¹:** Head of Research Centre of Innovative Technologies (kb-it@mail.ru)

[§] Corresponding author

method using Au—Si eutectic alloy. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* = *Electronic engineering. Series 2. Semiconductor device*, 2016, no. 3, pp. 4—12. (In Russ.)

2. Anosov V. S., Gomzikov D. V., Pashkov M. V., Seidman L. A., Tychkin R. I., Fomin V. M. Research of the installation of the power transistors silicon chips in gold–plated and nickel–plated housings with a ПСр 2.5 alloy. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* = *Electronic engineering. Series 2. Semiconductor device*, 2016, no. 4, pp. 4—10. (In Russ.)

3. Indium #182 (80Au20Sn) solder paste [Indium #182 (80Au20Sn) brazing pastes]. URL: <http://www.ostec-materials.ru/materials/indium-182-80au20sn-priпой-v-vide-pasty.php> (accessed: 23.12.2016). (In Russ.)

4. Kondratyuk R. 80Au20Sn solder – properties and application features. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2015, no. 10, pp. 154–160. (In Russ.)
5. Forman R. S., Minogue G. The basics of wafer-level AuSn soldering. *Chip Scale Review*, 2004, vol. 8, no. 7, pp. 55–59.
6. Minogue G., Mullapudi R. A novel approach for hermetic wafer scale MEMS RF and GaAs packaging, CS ManTech, 2015. URL: <http://csmantech.org/OldSite/Digests/2005/2005papers/9.3.pdf>
7. Mukhina E. Ultrathin semiconductor wafers processing technology. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2009, no. 3, pp. 80–81. (In Russ.)
8. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem: Spravochnik: V 3 t.* [Binary constitutional diagram for metals: Handbook: In 3 volumes]. Moscow: Mashinostroenie, 2001. Vol. 3, book 1, 872 p. (In Russ.)
9. GOST 19738–74: Pripoi serebryanye. Marki [GOST Standard 19738–74: Silver solders. Types]. (In Russ.)
10. Indium gel flux (020B, 018, 025, 010, 007 and 012). URL: <http://www.ostec-materials.ru/materials/indium-flyus-geli-020v-018-025-010-007-i-012.php> (accessed: 23.12.2016). (In Russ.)
11. Valev S. Vacuum soldering in power electronics production. Modern solution for laboratory production and high-volume fabrication. *Silovaya elektronika = Power Electronics*, 2006, no. 9, pp. 104–108. (In Russ.)
12. Kanter A. Vacuum soldering — the key to the high quality braze joint. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti = Technologies in Electronic Industry*, 2013, no. 6, pp. 30–33. (In Russ.). URL: http://budatec.ru/fileadmin/articles/Statja_vakuumnaja_paika.pdf
13. Chao Yuan, Bin Duan, Lan Li, Bofeng Shang, Xiaobing Luo. An improved model for predicting thermal contact resistance at liquid–solid interface. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 80, pp. 398–406. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.048
14. Prasher R. S. Rheology based modeling and design of particle laden polymeric thermal interface materials. *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004. ITherm'04. The Ninth Intersociety Conference on*. Las Vegas (NV, USA): IEEE, 2004, pp. 36–44. DOI: 10.1109/ITHERM.2004.1319151
15. Hopkins P. E. Thermal transport across solid interfaces with nanoscale imperfections: effects of roughness, disorder, dislocations, and bonding on thermal boundary conductance. *ISRN Mechanical Eng.*, 2013, article no. 682586. pp. 1–19. DOI: 10.1155/2013/682586
16. Kerentsev A. F., Lanin V. L. Constructive–technological features of MOSFETs. *Silovaya elektronika = Power Electronics*, 2007, no. 4, pp. 100–104. (In Russ.)
17. Lanin V. L., Anufriev L. P. IGBTs die bonding. *Silovaya elektronika = Power Electronics*, 2009, no. 2, pp. 94–99. (In Russ.)

Received December 15, 2016