

Монтаж кристаллов IGBT-транзисторов

Исследованы способы монтажа IGBT-транзисторов средней мощности пайкой легкоплавкими припоями и показано их влияние на тепловое сопротивление перехода кристалл – корпус, структуру соединений и параметры изделий.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.by

Леонид Ануфриев

Особенности IGBT-транзисторов

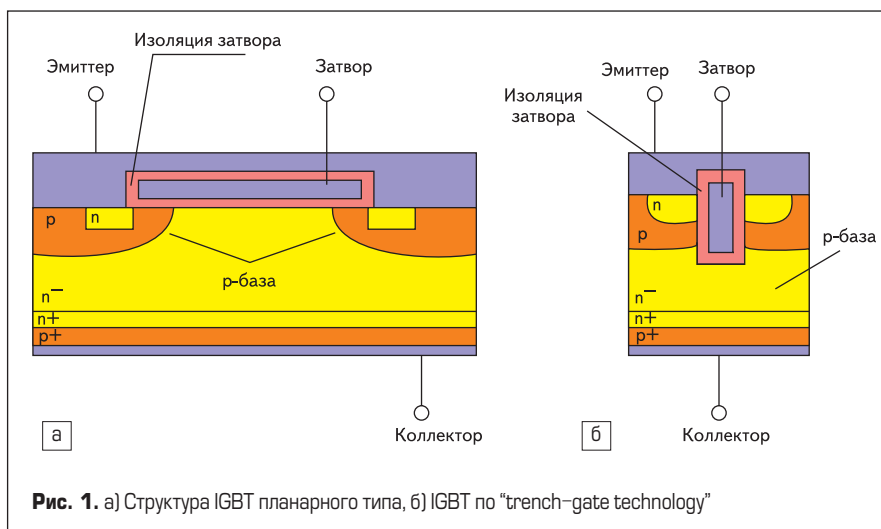
В современных условиях наиболее качественное преобразование электроэнергии при максимальной компактности и надежности устройств обеспечивается электронными модулями на базе управляемых силовых полупроводниковых приборов с изолированным затвором (IGBT — Insulated Gate Bipolar Transistor). Повышенный интерес к IGBT объясняется чрезвычайно малой мощностью управления и высоким быстродействием, что позволяет создавать на их основе компактные силовые устройства с частотой переключения до нескольких десятков килогерц. Повышение эффективности работы преобразовательной техники требует постоянного снижения стоимости и габаритных размеров преобразователей. Для успешного решения этих задач необходимо повышать эффективность работы силовых ключей. Быстрый рост рынка ветроэнергетики, сопровождаемый увеличением мощности вводимых в эксплуатацию установок, в которых токовые нагрузки систем достигли уровня, который не может быть обеспечен низковольтными устройствами, а также создание солнечных энергетических термальных станций предъявляет к силовым ключам конверторов следующие требования: это предельно высокая отдача энергии, очень низкое тепловое сопротивление, гарантирующее минимальный нагрев чипов, высокая плотность тока и максимальная эффективность преобразования энергии.

На данный момент IGBT как класс приборов силовой электроники занимает доминирующее положение для диапазона мощностей от единиц киловатт до единиц мегаватт. Дальнейшее развитие IGBT идет по пути повышения диапазона предельных коммутируемых токов и напряжений (единицы кА, 5–7 кВ); быстродействия; стойкости к перегрузкам и аварийным режимам; снижения прямого падения напряжения; разработки новых структур с плотностями токов, приближающихся к тиристорным; развития «интеллектуальных» IGBT (со встроенными функциями диагностики и защиты) и модулей на их основе; создания новых высоконадежных корпусов, повышения частоты и снижения потерь быстро восстанавливающихся обратных диодов; применения прямого водяного охлаждения для исключения соединения основание – охладитель [1].

Современные IGBT находят широкое применение при создании неуправляемых и управляемых выпрямителей, автономных инверторов для питания двигателей постоянного и переменного тока средней мощности, преобразователей индукционного нагрева, сварочных аппаратов, источников бесперебойного питания, бытовой и студийной техники.

IGBT являются продуктом развития технологии силовых транзисторов со структурой металл-оксид-полупроводник, управляемых электрическим полем (MOSFET) и сочетают в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Таким образом, IGBT имеет три внешних вывода: эмиттер, коллектор, затвор. Соединения эмиттера и стока (D), базы и истока (S) — внутренние. Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включенном состоянии.

Схематично структура IGBT показана на рис. 1а. Биполярный транзистор образован слоями $p+$ (эмиттер), n (база), p (коллектор); полевой — слоями n (исток), $n+$ (сток) и металлической пластиной (затвор). Слои $p+$ и p имеют внешние выводы, включаемые в силовую цепь. Затвор имеет вывод, который входит в цепь управления. На рис. 1б изображена структура IGBT IV поколения, выполненного по технологии «утопленного» канала (trench-gate technology), позволяющей исключить сопротивление между p -базами и уменьшить размеры прибора в несколько раз.



Процесс включения IGBT можно разделить на два этапа: после подачи положительного напряжения между затвором и истоком происходит открытие полевого транзистора (формируется *n*-канал между истоком и стоком). Движение зарядов из области *n* в область *p* приводит к открытию биполярного транзистора и возникновению тока от эмиттера к коллектору. Таким образом, полевой транзистор управляет работой биполярного.

Для IGBT с номинальным напряжением в диапазоне 600–1200 В в полностью включенном состоянии прямое падение напряжения, так же как и для биполярных транзисторов, находится в диапазоне 1,5–3,5 В. Это значительно меньше, чем характерное падение напряжения на силовых MOSFET в проводящем состоянии с такими же номинальными напряжениями. С другой стороны, MOSFET с номинальными напряжениями 200 В и меньше имеют более низкое значение напряжения во включенном состоянии, чем IGBT, и остаются непревзойденными в этом отношении в области низких рабочих напряжений и коммутируемых токов до 50 А.

По быстродействию IGBT уступают MOSFET, но значительно превосходят биполярные. Типичные значения времени рассасывания накопленного заряда и спада тока при выключении IGBT находятся в диапазонах 0,2–0,4 и 0,2–1,5 мкс соответственно. С помощью рис. 2 можно сравнить возможности IGBT, MOSFET и биполярных транзисторов по току коммутации, рабочему напряжению и частоте.

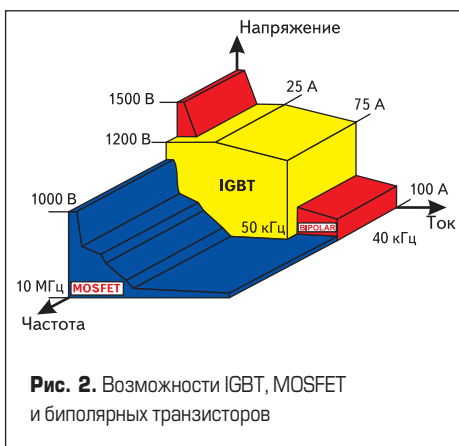


Рис. 2. Возможности IGBT, MOSFET и биполярных транзисторов

Область безопасной работы IGBT позволяет успешно обеспечить его надежную работу без применения дополнительных цепей формирования траектории переключения при частотах от 10 до 20 кГц для модулей с номинальными токами в несколько сотен ампер. Такими качествами не обладают биполярные транзисторы, соединенные по схеме Дарлингтона. MOSFET вытеснили биполярные в ключевых источниках питания с напряжением до 500 В; IGBT делают то же самое в источниках с более высокими напряжениями (до 3500 В). Дискретные приборы в корпусах TO-220 и TO-247 имеют низкую стоимость в расчете на один ампер номинального тока и максимальном значении рабочего тока 70 А.

Для IGBT применяют новые корпуса — Super-220 и Super-D2Pak, которые имеют такую же топологию и расстояние между выводами, что и стандартные, но содержат кристаллы значительно больших размеров. Super-

220 имеет топологию TO-220, но в нем размеры кристалла увеличены почти вдвое, это обеспечивает ток до 95 А, что на 20 А больше. Корпус допускает поверхностный монтаж и крепление зажимами. Super-D2Pak имеет топологию D2Pak, но содержит кристалл на 40% больше и допускает ток до 95 А.

Выбор технологии монтажа кристаллов IGBT

Эксплуатационная надежность мощных транзисторов определяется, главным образом, их теплоэлектрическим состоянием, которое формируется на стадии присоединения кристалла к корпусу. При образовании скрытых дефектов (пустот, микротрещин, сколов) под кристаллом образуются участки 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 припоем.

Мощные IGBT работают в режиме коммутации больших токов, поэтому наиболее распространенной причиной их катастрофического отказа является вторичный пробой вследствие локальных участков структуры с аномально высокой температурой и повышенного теплового сопротивления «*p-n*-переход – корпус» за счет дефектов в припое под кристаллом.

В настоящее время в электронной промышленности наибольшее распространение получили следующие способы монтажа кристаллов на подложку: пайка припоями, пайка эвтектическими сплавами, приклеивание токопроводящими клеями на органической основе, с помощью легкоплавких или тугоплавких стекол. Способ монтажа кристалла должен обеспечивать: максимальный отвод тепла, высокую механическую прочность соединения, малое сопротивление контакта.

Посадка кристалла на эвтектические сплавы помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие) имеет и другие недостатки. Ввиду малой пластичности эвтектики Au-Si и различия 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. 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 для обеспечения надежности изделий необходимо выбирать толщину припоя в пределах 25–50 мкм. Установлено, что основными причинами, при-

водящими к снижению выхода годных изделий, являются: отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади; образование микротрещин и растрескивание кристаллов после пайки и термокомпрессионной разварки выводов.

Из всех перечисленных способов пайка считается единственным способом, обеспечивающим электрические и тепловые характеристики силовых полупроводниковых приборов, так как припой обладает лучшей теплопроводностью и электропроводностью, чем стекла и клеи. 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 устройства, кристалл приклеивают на токопроводящую композицию.

Качество пайки кристалла во многом зависит от месторасположения припоя перед пайкой. При размещении прокладки припоя непосредственно под кристаллом существует вероятность того, что в процессе пайки оксидные пленки и загрязнения на поверхности прокладки при расплавлении останутся в зоне шва, что ухудшает смачиваемость припоем поверхности кристалла, приводит к образованию непропаев и каверн, нарушает сплошность шва и, в конечном итоге, ведет к ухудшению теплопроводности шва и снижению надежности полупроводниковых изделий.

Для улучшения смачивания припоем паяемых поверхностей кристалла и подложки широко используется капиллярный эффект заполнения зазора припоем в процессе пайки кристалла. Перед пайкой при непосредственном касании одной из боковых граней кристалла располагается навеска припоя в виде одного или двух шариков (в зависимости от площади кристалла). Детали фиксируются относительно подложки специальной кассетой. Кассету со сборками помещают в водородную печь, где при температуре пайки происходит расплавление припоя, который под действием капиллярных сил заполняет зазор между кристаллом и корпусом, смачивает паяемые поверхности, таким образом при кристаллизации образуется паяный шов. Оксидные пленки и загрязнения остаются за пределами паяного шва — в месте первоначального расположения навески припоя. Основным недостатком данного способа является высокая температура нагрева, которая значительно выше температуры плавления. Это необходимо для разрушения оксидной пленки припоя и обеспечения его капиллярного течения. Кроме того, при пайке кристаллов больших размеров, особенно в приборах силовой электроники, из-за неполного смачивания соединяемых поверхностей в паяном шве образуются непропаи (в основном на участке кристалла, противоположном месту расположения навески припоя).

При изготовлении полупроводниковых приборов для увеличения площади спаивания между кристаллом и корпусом на кристаллодержателе формируют V-образные канавки глубиной 25–75 мкм, располагаемые друг от друга на расстоянии 0,25–1,0 мм. При использовании корпусов с канавками при пайке корпус или кристалл необходимо подвергнуть воздействию ультразвуковых или низкочастотных вибраций. Механические колебания должны быть направлены вдоль канавок. В противном случае при пайке кристаллов больших размеров эти канавки станут очагами непропаев.

Оловянно-свинцовые припои, применяемые для монтажа кристаллов, имеют ряд недостатков:

1. Низкая температура плавления (<190 °С). Поэтому их нельзя применять при сборке кремниевых полупроводниковых приборов, допускающих высокую температуру нагрева. В производстве силовых полупроводниковых приборов при пайке кристаллов необходимо использовать припой с температурой плавления выше 210 °С, что связано с температурой эксплуатации модулей и технологическим процессом сборки в несколько этапов, припоями с различными температурами плавления.
2. Высокая температура нагрева при пайке кристаллов большой площади в водородной печи. Например, при пайке припоем ПОС40 и ПСр1,5 в виде шариков и фольги, чтобы разрушить оксидную пленку на поверхности припоя и обеспечить смачиваемость припоя в зазоре между кристаллом и основанием, требуется температура нагрева 390+20 °С.
3. Интенсивное растворение золота (покрытия и проволоки), как в жидкой фазе при пайке, так и в твердой фазе при эксплуатации.
4. При охлаждении паяного соединения свинец быстро рекристаллизуется на участке перепада температур (по периметру кристалла) и не дает выйти газовым включениям из-под кристалла наружу. Таким образом, под кристаллом образуются каверны, которые могут занимать до 25% всей площади паяного соединения.
5. С 2006 г. свинцовосодержащие припои запрещены к применению в странах Евросоюза.

Припои для монтажа кристаллов выбирают исходя из особенностей конструкции, механических и электрических характеристик прибора, условий его эксплуатации. При выборе учитывают температуру плавления припоя, надежность паяных соединений, устойчивость монтируемых компонентов к температуре пайки, различия ее режимов. Особое внимание обращают на наличие вредных примесей в припое, снижающих прочность паяного соединения. Известно, что присутствие никеля ведет к образованию каверн, алюминия — к зернистости, железо форсирует образование окалин, избыток меди ведет к недостаточной смачиваемости при пайке, а сурьма повышает хрупкость паяного соединения на холоде. Для монтажа предпочтительны эвтектические сплавы, поскольку их кристаллизация происходит в узком температурном диапазоне, при этом отсутствует смещение компонентов, в результате чего достигается более высокая надежность

соединений, и меньше вероятность получения «холодных паек». Также необходимо строго соблюдать требования по чистоте применяемых припоев, поскольку только расплавы бескислородных металлов способны активно растворять в значительном количестве оксиды и, следовательно, образовывать соединения, обладающие высокой прочностью.

Особенностью технологического процесса сборки силовых модулей паяной конструкции является сборка в два этапа. На первом этапе осуществляется пайка кристалла на керамику, контроль качества пайки, разварка кристалла, контроль функционирования. На втором — пайка одной или нескольких керамических подложек с кристаллами на медное основание, присоединение силовых шин и управляющих выводов, контроль функционирования, корпусирование, герметизация и испытания. Для того чтобы обеспечить технологический процесс сборки и надежность изделия в целом, необходимо проводить пайку припоями, имеющими разницу температур плавления не менее 70–100 °С.

Монтаж кристаллов на легкоплавкий припой

Наиболее распространенной причиной катастрофического отказа IGBT-транзисторов является вторичный пробой, который может развиваться в приборах даже при их эксплуатации с запасами по коммутируемому току, рабочему напряжению и средней величине рассеиваемой мощности. Основная причина снижения устойчивости IGBT к развитию вторичного пробоя — это наличие локальных участков структуры с аномально высокой температурой («горячие пятна») и повышенное тепловое сопротивление перехода кристалл – корпус за счет дефектов в припое под кристаллом, уменьшающих эффективную площадь сечения активной структуры и затрудняющих распространение теплового потока за пределы кристалла. Все это приводит к перегреву кристалла и изменению уровня электрических параметров. Поэтому особое внимание уделяется оптимизации конструктивно-технологических факторов и технологического процесса монтажа кристаллов с целью повышения эксплуатационной надежности.

Были проведены исследования. Кристаллы мощного IGBT-транзистора, поступившие на сборку (рис. 3), имели два вида металлизации — Ti-Ni-Ag и V-Au на непланарной стороне по следующему маршруту: шлифовка, отмывка, обработка в 1%-ном растворе HF, напыление металлизации, измерение электропараметров, контроль внешнего вида. Напыление металлизации Ti-Ni-Ag осуществлялось магнетронным способом на установке «Магна 2М» с толщиной слоев: Ti — 0,1±0,05 мкм; Ni — 0,5±0,1 мкм; Ag — 0,6±0,1 мкм. Напыление металлизации V-Au проводилось на установке «Оратория 9». Напыление золота толщиной 1,75 мкм выполнялось термическим испарением с использованием резистивного испарителя. После разбраковки транзисторных структур по электрическим параметрам и внешнему виду пластины поступали на участок малой сборки, где проводился комплекс

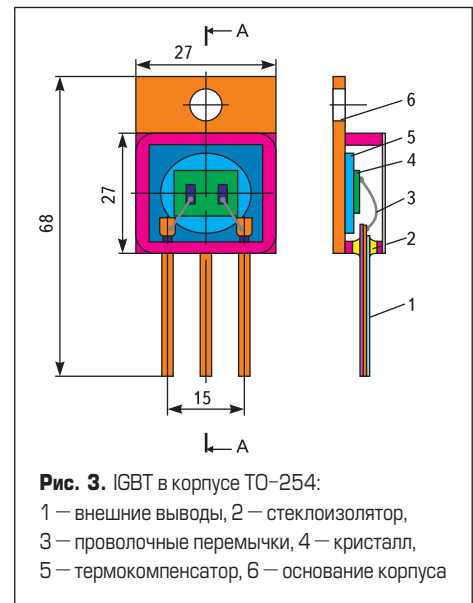


Рис. 3. IGBT в корпусе TO-254:

1 — внешние выводы, 2 — стеклоизолятор, 3 — проволочные перемычки, 4 — кристалл, 5 — термокомпенсатор, 6 — основание корпуса

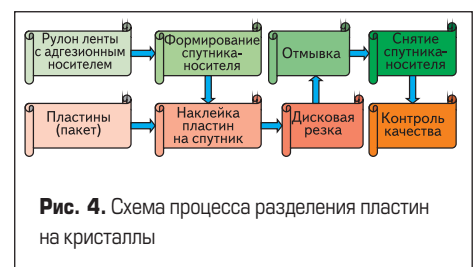


Рис. 4. Схема процесса разделения пластин на кристаллы

операций, связанных с разделением пластин на кристаллы (рис. 4).

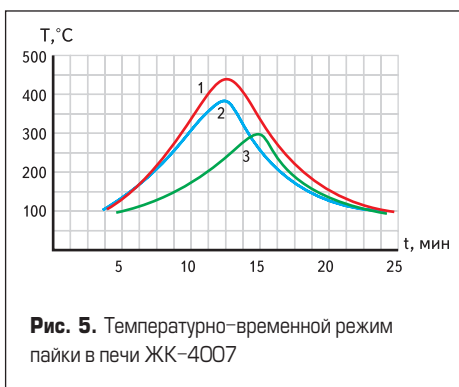
Разделение пластин на кристаллы выполнялось на автомате ЭМ-2005 методом сквозной дисковой резки. Режим — встречно-попутный со скоростью подачи 50 мм/с. Алмазный диск ДАР-4В-3 имел ширину режущего лезвия, равную 30 мкм. В качестве адгезионного носителя использовалась лента-спутник марки ЛС-1 с клеящим слоем толщиной 20 мкм. После резки автоматически выполнялась отмывка пластин с последующим контролем по внешнему виду. Затем годные кристаллы снимались с адгезионного носителя и размещались ориентированно в специальной кассете.

Монтаж кристаллов в корпус выполнялся двумя способами: пассивным и активным. При пассивном монтаже пайка кристаллов проходила в конвейерной водородной печи ЖК-4007 по кассетной технологии сборки. В процессе пайки на кристалл действовали только силы смачивания расплава, и он находился в состоянии пассивного равновесия под действием сил поверхностного натяжения расплава припоя. При активном способе пайка кристаллов выполнялась на автоматизированном оборудовании типа ЭМ-4085-03, где была задана специальная траектория движения кристалла при определенных значениях амплитуды колебаний и количества периодов колебаний по осям X и Y.

Для пайки кристаллов в конвейерной водородной печи с применением кассетной технологии использовались два типа припоев — ПОС-10 и ПСрОСу-8. Были изготовлены припойные прокладки толщиной 30, 50 и 100 мкм. Сущность кассетной технологии пайки заключается в следующем: в кассету специальной конструкции укладывается корпус; затем трафарет с окнами для укладки в них кристаллов; кри-

талл сверху поджимается специальными грузиками. Собранный в таком виде кассета с кристаллами устанавливается на конвейер печи.

Пайка выполнялась при следующих температурных режимах: 1 вариант — 360 °С; 2 вариант — 400 °С; 3 вариант — 450 °С. Для каждого температурного режима получено распределение температуры по длине канала печи с использованием термопары ХК и прибора ПП-63 (рис. 5). Поскольку градиент температур значителен и составляет 90–100 °С/мин, а время нахождения каждого из кристаллов в зоне напайки 4–4,5 мин, то резкое снижение температуры после напайки приводит к образованию мелкокристаллической структуры припоя, но при этом могут возрастать механические напряжения в активной структуре из-за различия в ТКЛР системы кремний – припой – основание выводной рамки (медь).



Наличие короткого канала печи не позволило снизить градиент температур при указанных температурных режимах.

В результате проведенных исследований установлено, что паяный шов по периметру кристаллов не имеет несмоченных участков, пор, каналов практически на всех образцах. С ростом температуры растекание припоя по кристаллодержателю увеличивается. Характер растекания припоев ПОС10 и ПСрОСу-8 по поверхности кристаллодержателя несколько отличается. Микрондовый рентгеноспектральный анализ на «STEREOSKAN-360» позволил определить более равномерное распределение элементов припоя ПСрОСу-8 по толщине паяного шва. Для припоя ПОС10 выявлены участки, где обнаружено в основном олово без свинца. Это указывает на то, что в процессе пайки происходит расслоение элементов припоя ПОС10. При этом олово как наиболее легкоплавкий элемент при высокой температуре «закипает», что способствует образованию пустот в паяном шве.

Для припоя ПОС10 характерно образование пустот большей площади, а для ПСрОСу-8 — наличие мелких, не связанных между собой пустот. При увеличении толщины припоя с 30 до 100 мкм размеры пустот уменьшаются для ПСрОСу-8, а для ПОС-10 пустоты остаются большими.

Наличие несплошностей припоя под кристаллом может приводить не только к перегреву кристалла электрической мощностью, но и к росту внутренних механических напряжений. Внутренние механические напряжения в напаянных кристаллах определены на рентгеновском двухкристалльном спектрометре

ДТС-1 (рис. 6). Кристаллы, напаянные на припой ПОС-10, испытывают напряжения сжатия такие же, как и при использовании припоя ПСрОСу-8. При малой толщине припоя (30 мкм) максимальное напряжение для припоя ПСрОСу-8 и ПОС-10 увеличивается с 70 МПа для МД-40 до 180 МПа для меди. Такое различие обусловлено влиянием ТКЛР кристаллодержателя. С увеличением толщины припоя до 100 мкм внутренние напряжения сжатия снижаются до 40 МПа для обоих типов припоев и материалов кристаллодержателя. Для сплава МД-40 ТКЛР меньше, в результате чего механические напряжения в напаянном кристалле снижаются.

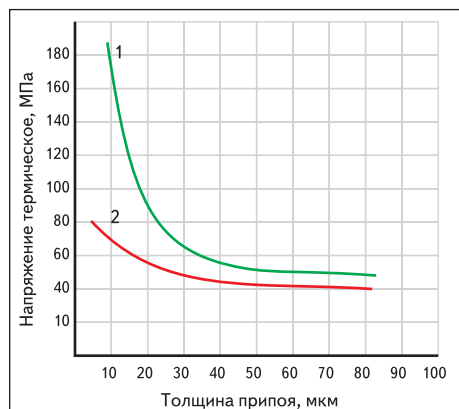


Рис. 6. Зависимость механических напряжений от толщины припоя:
1 — кристаллодержатель медный,
2 — кристаллодержатель из материала МД-40

Для компенсации больших внутренних напряжений, возникающих по причине неодинакового теплового расширения кремниевого кристалла и медного основания, в конструкциях корпусов мощных полупроводниковых приборов между кремнием и основанием корпуса вводят термокомпенсатор. Материал компенсаторов должен обладать ТКЛР, близким к ТКЛР кремния, выдерживать возникающие напряжения, иметь высокую теплопроводность и теплоемкость, а также незначительное электрическое сопротивление.

Имея близкий по величине ТКЛР с кремнием, термокомпенсатор создает незначительные напряжения в кремнии, не превышающие его предел прочности, а поэтому при нагреве и охлаждении кремниевый кристалл не разрушается. В то же время материал термокомпенсатора должен обладать высокой механической прочностью, чтобы воспринимать с незначительной деформацией возникающие при нагреве и охлаждении между ним и медью высокие напряжения растяжения, сжатия и изгиба.

Указанными свойствами в некоторой степени обладают молибден и вольфрам, которые к тому же имеют довольно высокую температуру плавления, что делает их перспективными при возрастании предельных рабочих температур полупроводниковых приборов. Обычно термокомпенсаторы изготавливают в виде дисков различных диаметров и толщин. Свойства термокомпенсаторов из тугоплавких металлов зависят от способа их изготовления. Заготовками для термокомпенсаторов могут служить кованные прутки, прессованные дис-

ки или диски, вырубленные из листового материала. Кованные прутки после шлифовки до требуемого диаметра разрезают на диски заданной толщины с помощью алмазных кругов.

Применение термокомпенсаторов, изготовленных из кованных прутков, является предпочтительным, так как в этом случае термокомпенсаторы имеют гомогенную структуру без пор и расслоений, что создает наиболее благоприятные условия для их работы. Диапазон размеров термокомпенсирующих дисков лежит в пределах от 0,635 до 22,2 мм, а их минимальная толщина составляет 0,38 мм.

Термокомпенсаторы, вырубленные штамповкой листового молибдена или вольфрама, не лишены недостатков. Механические свойства листового материала, изготовленного прокаткой, неодинаковые как в направлении прокатки, так и в направлении, перпендикулярном прокатке. Кроме этого, при вырубке термокомпенсаторов возможно расслоение металла, что свойственно штамповке. Это ограничивает широкое применение термокомпенсаторов, вырубленных из листа на штампах, несмотря на малую трудоемкость их изготовления.

В компании Demetron молибденовые диски вырубают, как правило, из листового материала, так как считают, что такой метод изготовления термокомпенсаторов гарантирует оптимальную плотность материала и отсутствие пор на поверхности. Края вырубленных дисков специально обрабатывают, а рабочие поверхности доводят.

В Западной Европе и США вольфрамовые термокомпенсаторы не получили распространения потому, что они не дают особых преимуществ по сравнению с молибденовыми и не оправдывают свою высокую стоимость. Для улучшения условий смачивания припоем термокомпенсирующие диски перед их монтажом на медный фланец покрывают слоем никеля или драгоценных металлов (золото, серебро). Никелевое покрытие на листовом материале обычно наносят до вырубки дисков. При штамповке дисков из подогретого листового материала с покрытием необходимо, чтобы температура плавления покрытия была значительно выше температуры нагрева листового материала. Фирма Demetron в корпусах мощных транзисторов применяет молибденовые прокладки, которые с помощью твердого припоя припаивают к медному фланцу (основание корпуса), а кремниевый кристалл — к молибденовой прокладке золотым припоем (золото чистоты 99,999) толщиной 25 мкм. Молибденовые прокладки обычно имеют форму квадратов с размером сторон от 5×5 до 7×7 мм и толщиной от 0,4 до 0,5 мм.

Известно, что вольфрам и молибден с медью и серебром не образуют твердых растворов, а представляют собой смесь твердого и износостойкого металла (вольфрам, молибден) с мягким металлом, обладающим хорошей тепло- и электропроводностью (медь, серебро). Наибольшее применение имеют вольфрамомедные и молибденомедные псевдосплавы, из них последние — дешевле и легче (по сравнению с вольфрамомедными — в 2 раза) (таблица).

Изменяя содержание молибдена в сплаве, можно добиться снижения термических напря-

Таблица. Свойства материалов и сплавов

Свойства	МД-40	Mo	Cu	Si
ТКЛР, 10 ⁻⁴ , 1/°С	7,5	6,1	19,0	4,2
Теплопроводность, Вт/м °С	220	140	390	80
Удельное электрическое сопротивление, мкОм·см	0,03	0,05	0,017	-

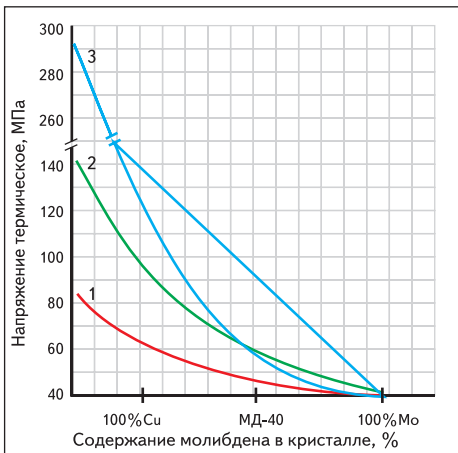


Рис. 7. Зависимость внутренних напряжений от содержания молибдена в сплаве материала кристаллодержателя при монтаже кристаллов: 1 — на припоей толщиной 100 мкм, 2 — на припоей толщиной 10 мкм, 3 — на эвтектику

жений за счет согласования ТКЛР материала термокомпенсатора и напаваемого кристалла. На рис. 7 показана зависимость механических напряжений в напаянном кристалле от содержания молибдена в кристаллодержателе.

Монтаж кристаллов большой площади на эвтектику Au-Si приводит к значительному росту напряжений деформаций кристалла при использовании кристаллодержателя из меди. Добавка 40% молибдена к меди способствует снижению напряжений до 60–70 МПа, а использование чистого молибдена снижает

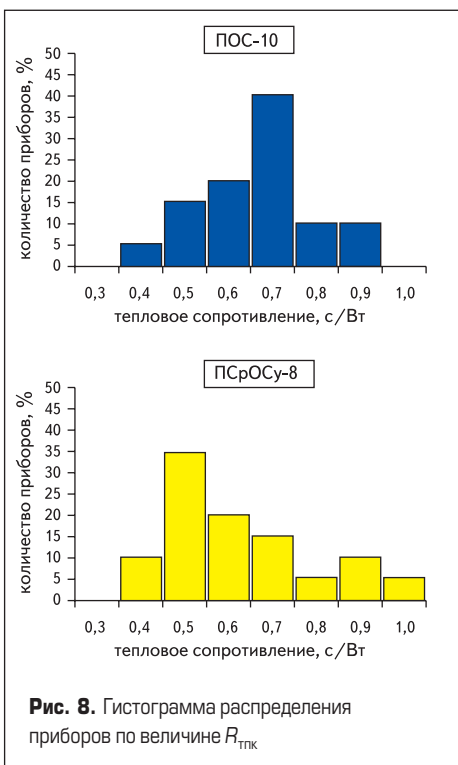


Рис. 8. Гистограмма распределения приборов по величине R_{тнк}

напряжение до 30–40 МПа. Качество монтажа кристаллов на припоей дополнительно оценивалось также контролем температуры перегрева кристалла ΔT_j на измерителе при $J_k = 2,5$ А, $U_k = 40$ В и последующим определением переходного теплового сопротивления $R_{тнк}$ переход – корпус. По полученным результатам построены гистограммы распределения приборов по величине $R_{тнк}$ (рис. 8).

Снижение толщины припоя до 10 мкм при использовании кристаллодержателя из меди привело к увеличению $R_{тнк}$, что обусловлено наличием сквозных пор в припоей под кристаллом. При толщине 50 и 100 мкм сквозные поры в припоей частично закрываются верхними слоями припоя, то есть происходит экранирование пустот. Однако основная причина роста теплового сопротивления при малой толщине припоя под кристаллом — это влияние значительного отличия в ТКЛР кремниевого кристалла и кристаллодержателя, приводящее к образованию микротрещин в кристалле, которые задерживают передачу тепла от кристалла. Припоей толщиной 30 мкм и более способствует компенсации термических напряжений и исключению трещин в кристалле, и тепловое сопротивление при этом снижается, а затем частично растет из-за потерь тепла уже в толстом слое припоя.

Исследовано влияние толщины пленки никеля на непланарной поверхности пластины на прочность паяных соединений. Были изготовлены варианты транзисторных структур с подслоем Ti толщиной 0,05 мкм и различной толщиной никеля: 0,12; 0,27; 0,42; 0,6; 0,8 мкм. С ростом толщины слоя никеля механическая прочность паяного соединения резко возрастает. Начиная с толщины никеля порядка 0,4 мкм и выше, прочность соединения практически не меняется.

Рентгеноспектральный анализ позволил установить, что в процессе высокотемпературной пайки происходит физико-химическое взаимодействие компонентов припоя с металлом покрытия (Ni) и дополнительное растворение Ni в олове с образованием интерметаллидов Sn_xNi_y. В процессе физико-химического взаимодействия припоя с Ni основную роль играют процессы диффузии. Поэтому для сниже-

ния диффузионного взаимодействия элементов припоя с никелем необходимо уменьшать температуру пайки. Однако при этом будет снижаться и механическая прочность паяного соединения. На скорость процесса диффузии помимо температуры оказывает влияние состояние металла. Искажения кристаллической решетки и появление вакансий, наличие пор увеличивает диффузию между зерен и вдоль дислокаций, что сопровождается увеличением диффузионной зоны и растворением никеля.

Влияние толщины никеля на $R_{тнк}$ отличается только в области малых толщин и, как было установлено выше, обусловлено растворением никеля в олове. В местах растворения никеля выявляются локальные области, в которых припоей не смачивает поверхность кристалла. В результате этого через эти локальные области происходит слабое растекание тепла. Это приводит к дополнительному перегреву кристалла и повышению уровня $R_{тнк}$. При толщине никеля, равной 0,55–0,8 мкм, $R_{тнк}$ практически не изменяется.

Монтаж кристаллов на автомате ЭМ-4085-03

Монтаж кристаллов IGBT-транзисторов в корпусе ТО-254 на автомате ЭМ-4085-03 выполнялся следующим образом: загрузочно-разгрузочное устройство (ЗРУ) автомата выгружало из контейнера ленточную кассету с корпусами и перемещало ее по треку до первого нагревательного столика, над которым был установлен дозатор ленточного припоя. При поступлении первого кадра выводной рамки в зону крепления припойной прокладки дозатор припоя производил резку ленты припоя и с помощью вакуумной присоски опускал припойную прокладку определенной длины на кристаллодержатель корпуса, где при температуре 240...250 °С происходил ее монтаж путем частичного оплавления, чтобы при дальнейшем перемещении рамки она не изменила своего положения. При покадровом перемещении кассеты с корпусами по треку дозатор припоя осуществлял аналогичные манипуляции. Кристаллы поочередно снимались с липкого носителя вакуумной присоской и укладывались по одному на лопатки мальтийского креста, который пошаговым передвижением вокруг своей оси доставлял кристалл к зоне монтажа. При поступлении первого кадра и припойной прокладки на позицию монтажа автомат при помощи специального микроинструмента осуществлял съем кристалла с лопатки мальтийского креста и его монтаж на кристаллодержатель. Затем по заданной программе инструмент совершал колебания определенной амплитуды, за счет чего происходила притирка кристалла к поверхности кристаллодержателя. Процесс осуществлялся при температуре 300...320 °С, и, следовательно, припойная прокладка находилась в расплавленном состоянии. После напайки кристалла ЗРУ перемещал кассету с корпусами по треку автомата и загружал в контейнер.

Монтаж кристаллов на автомате ЭМ-4085-03 повысил эффективность образования эвтектики Au-Si за счет активации процесса присоеди-

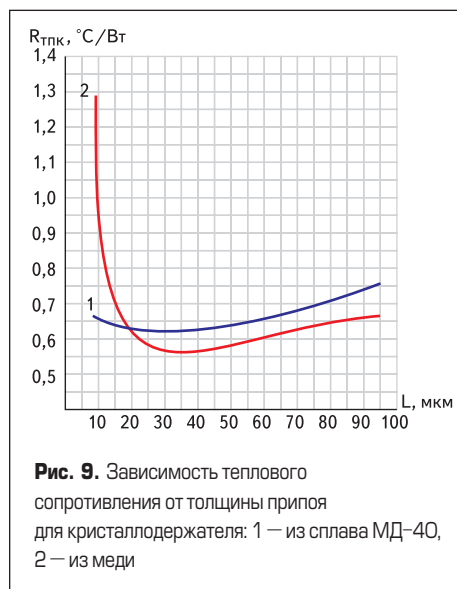


Рис. 9. Зависимость теплового сопротивления от толщины припоя для кристаллодержателя: 1 — из сплава МД-40, 2 — из меди

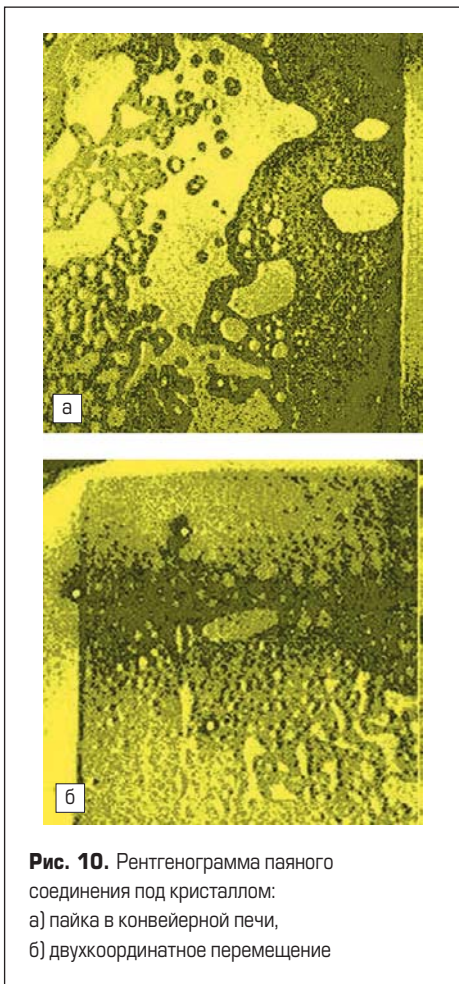


Рис. 10. Рентгенограмма паяного соединения под кристаллом: а) пайка в конвейерной печи, б) двухкоординатное перемещение

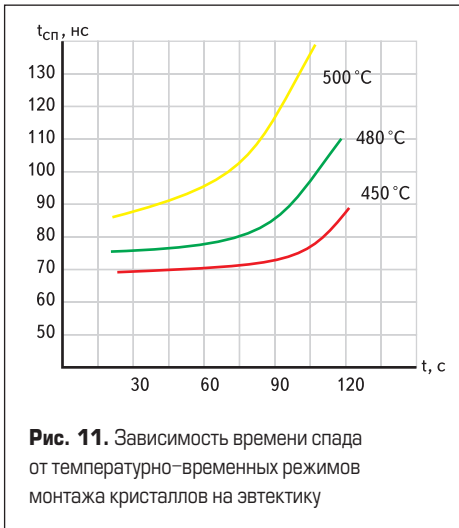


Рис. 11. Зависимость времени спада от температурно-временных режимов монтажа кристаллов на эвтектику

нения 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 происходило эффективное удаление оксидных пленок и шлаков за пределы активной зоны, что обеспечило равномерную толщину эвтектики в соединении. Для повышения эффективности автоматического процесса присоединения кристаллов и быстрого прогрева соединяемых деталей доработана конструкция нагревательного столика установки: были введены дополнительные выступы диаметром 7,5 мм и высотой до 1,5 мм.

Пайка кристаллов на эвтектику проводилась в следующих режимах: температура 450...460 °С;

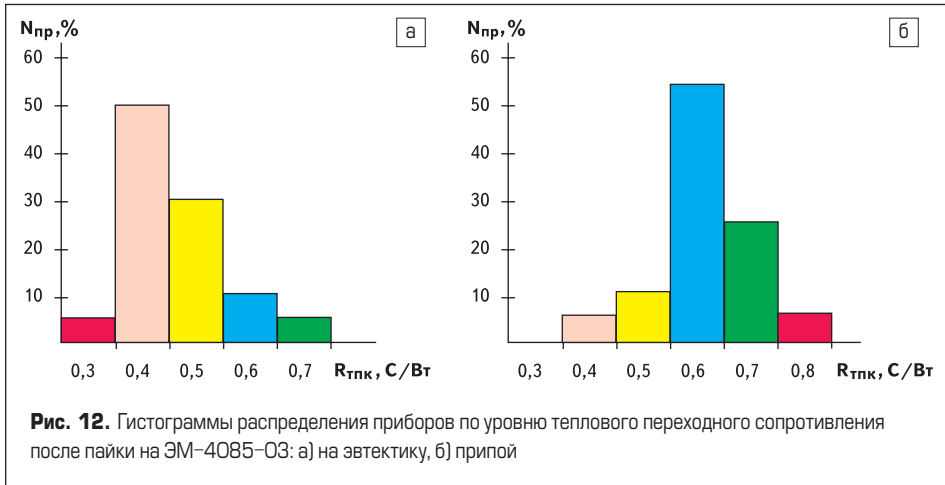


Рис. 12. Гистограммы распределения приборов по уровню теплового переходного сопротивления после пайки на ЭМ-4085-03: а) на эвтектику, б) припой

количество периодов колебаний — 12; амплитуда двухкоординатных колебаний по оси X, Y — 250–500 мкм; пауза — 70; усилие нагружения — 1,45 Н.

Проверка качества паяных соединений проводилась методом оптического контроля внешнего вида с использованием МБС-10 при $\times 16-32$ и ММУ-3 при $\times 50-100$. Установлено, что присоединение кристаллов в оптимальных режимах позволяет получить ровное растекание припоя со всех четырех сторон кристалла без пор и непропаев. Использованы и диагностические методы анализа: рентгенотелевизионное диагностирование внутренних микродефектов (неплотностей, пористости, неоднородностей, инородных включений и т. д.) в паяном соединении; лазерная микроинтерферометрия и фотоакустическая диагностика контроля качества монтажа и оценка напряженно-деформированного состояния кристаллов. Результаты анализа регистрировались цифровой фотокамерой НР912 с экранов мониторов рентгенотелевизионного микроскопа МТР-7, лазерного фотоакустического микроскопа ФМ-3М и лазерного микроинтерферометра.

Методом рентгенотелевизионной дефектоскопии явных неплотностей в эвтектике под кристаллом не обнаружено, но выявлены неоднородности в виде разноконтрастных участков проекции рентгеновского теневого изображения Au-прокладки, частично прореагировавшей по толщине в пределах 60% площади кристалла в связи с неполным растворением этой прокладки, что обусловлено режимом однокоординатного перемещения кристалла в процессе монтажа (рис. 10а).

Это указывает на неэффективность метода однокоординатного перемещения кристалла относительно подложки. Двухкоординатное перемещение кристаллов относительно подложки по замкнутому контуру при монтаже на автомате ЭМ-4085-03 является оптимальным способом присоединения кристаллов больших размеров. В этом случае дефектов в паяном соединении не выявлено (рис. 10б). Методом лазерной микроинтерферометрии определен уровень напряженно-деформированного состояния кристаллов, который составляет 60–72 МПа.

Измерение электрических параметров проводилось на установке «Гамма-154М», а теплового сопротивления — на «СИС-24». Определено, что параметры быстродействия IGBT,

в том числе время спада ($t_{сп}$), существенно зависят от режимов монтажа кристаллов на эвтектику. Поэтому в процессе монтажа кристаллов очень важен контроль температурно-временных режимов пайки, превышение которых ухудшает быстродействие прибора (рис. 11). Результаты контроля уровня переходного теплового сопротивления $R_{тнк}$ представлены на рис. 12.

Результаты показали, что монтаж на автомате ЭМ-4085-03 позволяет снизить средний уровень $R_{тнк}$ с 0,6 до 0,4 °С/Вт. Сравнительный анализ приборов выявил значительную дефектность паяного соединения в случае пайки кристаллов в конвейерной печи. В то же время после монтажа на автомате выявлено значительно меньше дефектов, и все они занимают малую площадь.

Выводы

Способ монтажа кристаллов оказывает существенное влияние на качество паяного соединения, величину теплового сопротивления кристалл – корпус и на параметры приборов силовой электроники, что определяет их быстродействие и надежность эксплуатации в экстремальных условиях. Активация процесса монтажа кристаллов на легкоплавкий припой за счет введения нагрузки на кристалл и задания траектории движения кристалла по программе с амплитудой колебаний 0,3–0,5 мм с целью удаления пузырьков воздуха и оксидов из зоны пайки позволила значительно повысить воспроизводимость теплового сопротивления $R_{тнк}$ и снизить его абсолютное значение.

Литература

1. Ньюман П. Эффективность преобразования и совершенствование технологий силовых модулей // Компоненты и технологии. 2008. № 3.
2. Khanna V. K. IGBT. Theory and Design. N.Y., IEEE Press, 2005.
3. Ануфриев Л. П., Ланин В. Л., Солодуха В. А., Керенцев В. Ф. Монтаж кристаллов IGBT-транзисторов / Материалы НПК «Современные информационные и электронные технологии». Одесса, 21–23 мая 2007.
4. Ланин В. Л., Керенцев А. Ф., Турцевич А. С. Сборка силовых полупроводниковых приборов с бессвинцовой припойной композицией // Силовая электроника. 2008. № 2.