

Ультразвуковая микросварка проволочных выводов больших диаметров при монтаже мощных полупроводниковых приборов

В. Ланин, д. т. н.¹, И. Петухов, к. т. н.², Л. Драгилев³

УДК 621.791.16 | ВАК 05.27.06

При разварке кристаллов в мощных полупроводниковых приборах используются проволочные и ленточные выводы большого поперечного сечения. Для повышения качества микросварки таких выводов создана ультразвуковая технологическая система новой автоматической установки микросварки, которая отличается стабилизацией сварочного усилия и безударной отрезкой проволоки (ленты) в конце цикла монтажа вывода. Исследовано влияние формы рабочего торца сварочного наконечника на прочность сварных соединений, определены факторы, влияющие на их качество и надежность приборов, предложены дополнительные виды испытаний, необходимые для достоверного контроля прочности сварных соединений повышенного сечения.

МЕЖСОЕДИНЕНИЯ В МОДУЛЯХ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Наблюдаемый в последние годы бурный рост использования возобновляемых источников электрической энергии в совокупности со стремлением к снижению удельной энергоемкости в промышленности и на транспорте вызывает большой спрос на компоненты силовой электроники (дискретные корпуса и модули), необходимые для создания вторичных источников питания и переключающих устройств. Они нашли свое применение в промышленных приводах и управляемых инверторах, оборудовании солнечных, приливных и ветряных станций, электротранспорте. Дальнейшее развитие альтернативных, энергосберегающих и высокоэффективных источников электроэнергии позволит уверенно снижать долю ископаемых видов топлива и гарантирует рост компаниям, которые работают в сфере производства компонентов для «чистой энергетики». Успех на рынке будут иметь только те производители, которые гарантируют качество своих изделий, поскольку отказы систем энергоснабжения несут огромные риски.

Внедрение энергосберегающих технологий неразрывно связано с достижениями в области силовой электроники. При монтаже мощных дискретных полупроводниковых приборов и модулей (рис. 1) одним из наиболее распространенных способов электрического соединения между контактными площадками кристалла и выводами корпуса являются межсоединения с помощью проволочных перемычек. Проволочный монтаж остается одним из основных методов сборки полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИС), что объясняется высокой автоматизацией процесса, универсальностью по отношению к различным технологическим вариантам производства и геометрическим размерам изделий [1].

Основное внимание при использовании проволочного монтажа уделяется качеству и надежности процесса. Проволочное межсоединение деформируется в процессе присоединения в точке сварки под действием прилагаемого усилия и ультразвука, а при последующем формировании петли из-за возникающих напряжений возможно образование микротрещин в области сварного соединения и прилегающей к нему части перемычки. Если такое соединение подвергается воздействию каких-либо напряжений, связанных, например, с циклическими тепловыми нагрузками, вызываемыми рассеиваемой мощностью и условиями эксплуатации, с расширением герметизирующей пластмассы, то возникает высокая вероятность его разрушения [2, 3, 4].

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, профессор, vlanin@bsuir.by.

² ОАО «Планар-СО», начальник научно-технического центра, petuchov@kbtcm.by.

³ ОАО «Планар-СО», начальник отдела научно-технического центра.

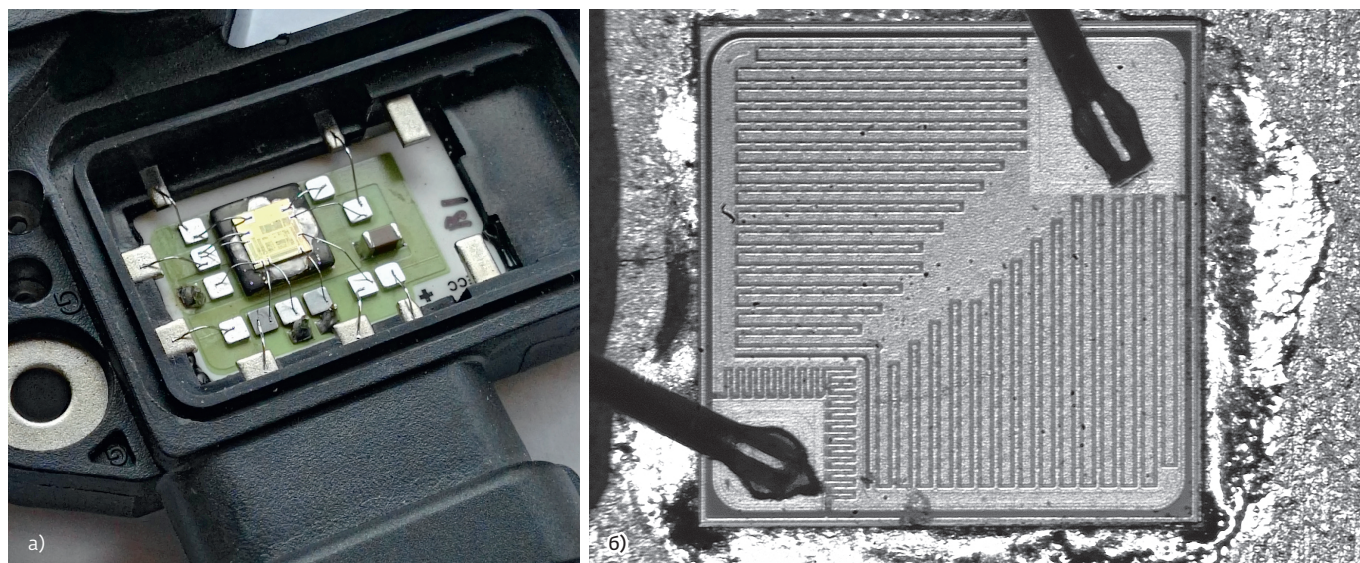


Рис. 1. Примеры микроэлектронных силовых устройств: а – силовой модуль (микросборка); б – силовой транзистор (дискретный полупроводниковый прибор)

Проволочные межсоединения выполняются после того, как кристаллы отсортированы и смонтированы в корпусе. Монтаж межсоединений в мощных дискретных полупроводниковых приборах и модулях осуществляется в основном методом ультразвуковой сварки алюминиевой (медной) проволоки или ленты. Диапазон диаметров используемых круглых проводников – от 100 мкм до 500 мкм^{*}. Используемые ленточные выводы также имеют различный типоразмер, в обозначении которого отображены ширина вывода и его толщина. Типовой диапазон размеров ленточных выводов составляет от 700×80 мкм до 200×250 мкм (ширина×толщина) [5].

Наиболее часто используемый материал проволоки с большим сечением – это 99,99% алюминий, в отдельных случаях используется сплав алюминий-магний (AlMg). Выбор используемой проволоки в значительной степени зависит от материала металлизации контактной площадки прибора, к которой она присоединяется. Материал проволоки марки AlMg гораздо тверже, чем чистый алюминий. Если металлизация контактной площадки мягкая, то более пластичная проволока

из чистого алюминия будет привариваться легче, чем более твердая из сплава AlMg. Если металлизация более твердая, то материал проволоки AlMg будет обеспечивать процесс присоединения лучше чистого алюминия.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ РИСКА

Важной задачей в совершенствовании технологии микросварки является изыскание параметров, позволяющих прогнозировать качество соединений в процессе сварки. Решение этого вопроса дало бы возможность одновременно с автоматизацией значительно повысить воспроизводимость результатов сварки, а также оценить прочность соединений без их разрушения.

Как уже сказано, основной причиной возможного разрушения сварных межсоединений в процессе испытаний и эксплуатации являются напряжения, связанные со знакопеременными тепловыми нагрузками. Чем хуже охлаждается полупроводниковый кристалл, тем выше перегрев всех слоев электронного компонента. Следовательно, для увеличения стойкости к термоциклированию целесообразно в первую очередь улучшать свойства «внешних» (т.е. ближайших к радиатору) проблемных элементов конструкции. При их повреждении увеличивается градиент температуры у всех расположенных выше соединений, что приводит в конечном итоге к их отказу.

На этой стадии проблема решается путем изменения конструкции электронного прибора и применения новых конструкционных материалов и сборочных технологий. В качестве примера можно рассмотреть основные конструктивные элементы модуля IGBT, часть из которых непосредственно определяет его надежность.

* Минимальный диаметр проводника d_{\min} (мм) ограничен максимальным постоянным током I (А) через него [6]:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{I \cdot L}{\pi \cdot M}}$$

где M – постоянная, зависящая от материала провода. Для алюминия она равняется $3,489 \cdot 10^3$ А/мм, меди – $6,314 \cdot 10^3$ А/мм, золота – $4,685 \cdot 10^3$ А/мм; L – длина проводника, мм.

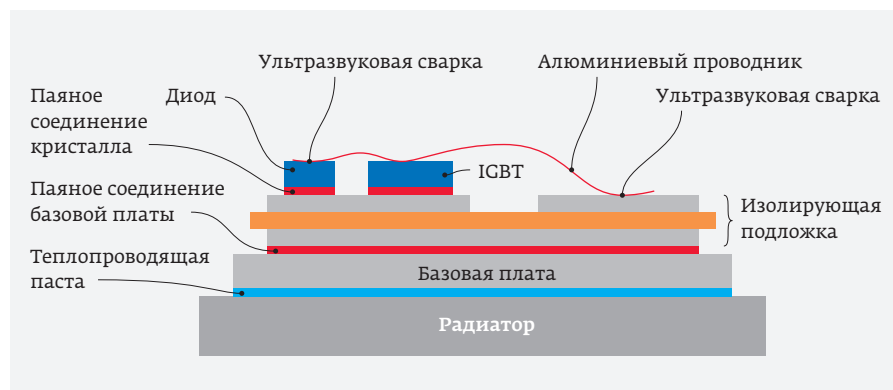


Рис. 2. Типовая структура IGBT-модуля

На рис. 2 показана типовая конструкция IGBT-модуля, включающая элементы из полупроводников, диэлектриков и металлов. Воздействие перепадов температуры на материалы с различным КТР создает термомеханические напряжения, которые приводят к постепенному старению соединительного слоя. В разработанных компанией SEMIKRON в 90-х годах модулях прижимной конструкции SKiP отсутствует базовая плата, а соответственно и ее паяный слой, являющийся основным источником отказов силовых ключей. Внедрение технологии низкотемпературного спекания для установки кристаллов на DBC-подложку позволило устранить второй паяный слой и кардинально повысить стойкость полупроводниковых модулей к термоциклированию. В результате самым слабым местом на сегодня является само сварное соединение алюминиевых проводников от кристалла к контактным площадкам корпуса, несмотря на то, что совершенствование технологий ультразвуковой сварки позволило в последние годы существенно повысить его надежность [3, 4, 7]. Работы в этом направлении продолжаются; в частности, ими активно занимаются специалисты ОАО «Планар-СО» совместно с учеными Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Первая по ходу технологического процесса операция, определяющая качество будущего сварного соединения, проводится еще до этапа собственно сварки. Это обработка свариваемых поверхностей. В общем случае ровные и чистые (тщательно обработанные) контактные поверхности свариваются лучше. И наоборот, грубая механическая обработка свариваемых поверхностей, наличие различных поверхностных пленок, плакирование, как правило, ухудшают свариваемость металлов, а в ряде случаев и исключают ее.

При подготовке приборов к ультразвуковой сварке (УЗС) важным технологическим процессом является микроочистка и активация поверхностей с использованием аргоно-кислородной плазмы. Это эффективный

способ, который позволяет стабилизировать параметры сварки, а также пайки и нанесения покрытий, и при этом избежать использования опасных и ядовитых растворителей. Молекулы ионизированного газа в наведенном поле тока высокой частоты и условиях разрежения (при давлении порядка 0,1 МПа) действуют на физическом и химическом микроуровне, они «счищают» загрязнения и очаги окисления с поверхности деталей, а также возбуждают атомы верхних слоев поверхности деталей, увеличивая адгезионные

свойства очищаемых поверхностей и таким образом делая их более восприимчивыми к соединению с другими деталями. Этот эффект дополняется улучшением смачиваемости поверхности (уменьшением силы поверхностного натяжения при контакте). С помощью плазменной очистки можно оптимизировать параметры УЗС и улучшить качество заливки модуля компаундом [7, 8].

С самим процессом сварки связан целый ряд факторов, отвечающих за качество сварного соединения; для их понимания необходимо в общих чертах вспомнить, что представляет собой процесс ультразвуковой микро-сварки.

УЗС соединений между выходными выводами модуля и контактными площадками полупроводниковых кристаллов в нем – критически важный процесс, пришедший на смену прижимным и паяным конструкциям. Современный подход к технологии производства силовых модулей типовой конструкции состоит в минимизации количества сварных и паяных соединений, что уже привело к почти полному вытеснению пайки силовых выводов. Оборудование ультразвуковой сварки должно позволять гибко подходить к конструированию траверс корпусов, применять проволоку, ленту, алюминиевые и медные проводники разного сечения для получения полной гаммы высококачественных приборов, способных конкурировать с аналогами от мировых лидеров.

Источником тепла при УЗС является трение между свариваемыми металлами при их относительном перемещении. В технологическом плане процесс УЗС обусловлен параметрами режима сварки: мощностью колебательной системы, контактным давлением, амплитудой колебаний сварочного наконечника и временем сварки. Он сопровождается увеличением температуры в зоне сварки до 120 °С при усилении сжатия в диапазоне 1,5–14 Н. Неоптимальный выбор любого из параметров сварочного процесса или их сочетания ведет к риску получения негативного результата, вплоть до отсутствия соединения либо его разрушения при эксплуатации изделия.

При малых значениях амплитуды колебаний сварное соединение не образуется, поскольку сдвиговых напряжений не хватает для разрушения окисных пленок в зоне контакта, а при больших – в свариваемых элементах возникают усталостные процессы, приводящие впоследствии к разрушению соединения.

При малых перемещениях инструмента и времени сварки передача УЗ-колебаний в зону монтажа недостаточно эффективна, при больших значениях амплитуды колебаний снижается сила сцепления двух металлов вследствие эффекта скольжения. Большое время сварки может привести к разрыву проволочного проводника по «шейке» из-за его чрезмерной деформации. Кроме того, при выборе длительности сварки надо учитывать результаты проведенного исследования зон схватывания под микроскопом: в его ходе установлено, что глубина объемного взаимодействия свариваемых металлов возрастает с увеличением времени микросварки до 0,2 с, а при дальнейшем увеличении времени прочность соединений снижается вследствие появления трещин в зоне сварки.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УЗ-СИСТЕМЫ: ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЯ

Если не принимать к рассмотрению внешних по отношению к собственно сварке факторов – качество материалов, чистота среды в помещении и т. п., – то механическая прочность получаемых сварных соединений определяется приведенными выше параметрами сварочного процесса: мощностью колебательной системы, амплитудой колебаний инструмента, усилием сжатия и временем сварки. Выбор еще одного ключевого параметра – частоты УЗ-колебаний – основан на необходимости ограничения амплитуды колебаний с целью уменьшения знакопеременных напряжений в соединяемых деталях и опасности разрушения соединений. Следует также учитывать мнение авторитетных специалистов в области УЗС, сообщающих, что для шероховатых поверхностей предпочтительны колебания пониженной ультразвуковой частоты (50–60 кГц) [9].

Влияние амплитуды колебаний инструмента на сварку необходимо рассматривать только с учетом мощности системы, а не ее конструктивного исполнения, когда за счет изменения коэффициента усиления концентратора можно изменить амплитуду смещений инструмента.

Амплитуда колебаний сварочного инструмента должна быть такой, при которой могли бы возникнуть относительные перемещения в контакте между деталями; с этой точки зрения ее оптимальные значения составляют 1,5–2,0 мкм. Однако следует понимать, что нельзя просто назначить величину амплитуды в пределах этого диапазона, не учитывая ее взаимосвязи с другими параметрами процесса.

С одной стороны, амплитуда колебаний инструмента зависит от силы сцепления торца сварочного инструмента с зоной сварки, изменяющейся как в течение цикла сварки, так и при переходе от одной точки сварки к другой. Механизм этого явления прост: изменение силы сцепления приводит к изменению тока через УЗП, а значит, и амплитуды колебаний инструмента в процессе сварки. С другой стороны, и усилие сжатия свариваемых изделий, и время сварки определяются с учетом амплитуды.

Такая взаимосвязь параметров дает основание сделать вывод о том, что, контролируя изменения амплитуды колебаний сварочного инструмента, можно получить достаточно достоверную информацию о прочности сварного соединения. Прямое измерение механических колебаний столь малой амплитуды, происходящих в малоразмерной и труднодоступной рабочей области сварочного автомата, крайне затруднено. На практике задача контроля качества решается благодаря существованию пропорциональной зависимости между электрической мощностью и амплитудой механических колебаний инструмента. Ранее проведенные авторами исследования [10, 11, 12] показали хорошую корреляцию механических колебаний торца сварочного инструмента и тока УЗП, что дает возможность контролировать в процессе сварки амплитуду колебаний и, соответственно, качество соединений с помощью мониторинга тока УЗП.

Из сказанного выше следует, что качество технологического процесса в установке УЗС определяется согласованным выбором всего комплекса основных параметров технологической системы «ультразвуковой генератор (УЗГ) – сварочная головка (СВГ) с ультразвуковым преобразователем (УЗП)». УЗГ должен подводить контролируемую электрическую мощность на резонансной частоте УЗП, а система нагружения СВГ в процессе сварки должна обеспечивать постоянное заданное усилие на сварочный инструмент, закрепленный в волноводе УЗП. На последнем требовании стоит остановиться подробнее.

Чем лучше обеспечивается постоянство сварочного усилия (сжатия) в зоне сварки, тем меньше отклонения от заданных значений амплитуды его колебаний. Следовательно, при проектировании УЗ-системы сварочной установки необходимо принимать меры по стабилизации прижимного усилия инструмента в течение всего цикла сварки.

В современных установках УЗС значительная составляющая неравномерности сварочного усилия определяется колебаниями, вносимыми подвеской УЗП. В различных конструкциях СВГ подвеска УЗП осуществляется различными способами, в частности, на подшипниковых опорах или плоскопараллельных пружинах. Преимуществом подвески на плоскопараллельных пружинах является отсутствие трения качения и повышенная износостойкость по сравнению с узлами на подшипниковых

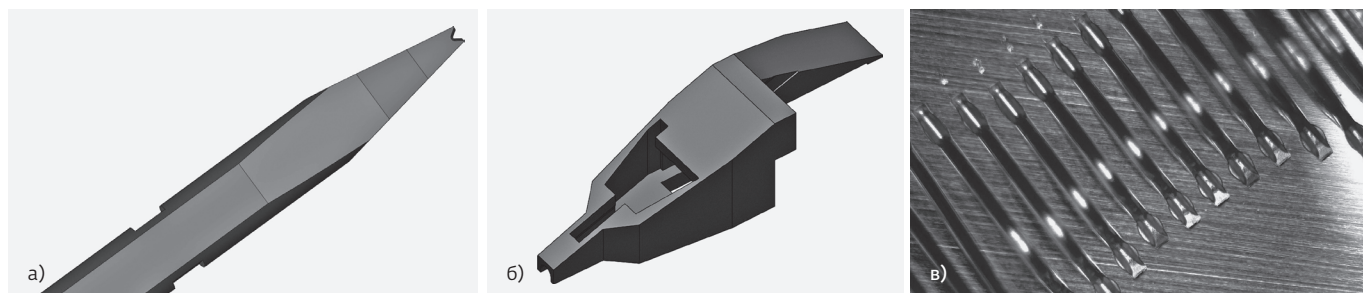


Рис. 3. Сварка проводников повышенного сечения: а – рабочий торец сварочного инструмента; б – пластиковая направляющая для проволоки; в – получаемое соединение

опорах, что делает их вариантом, привлекательным для применения в системах УЗС. Однако у пружинной подвески есть и недостаток: зависимость усилия в зоне сварки от величины перебега СВГ после момента контактирования с местом присоединения, за счет которого обеспечивается необходимая деформация проводника. Для компенсации этого недостатка специалистами ОАО «Планар-СО» разработан алгоритм компенсации изменения сварочного усилия, введенный в контур управления актуатором сварочной нагрузки, выполненным на базе катушки в магнитном поле. Алгоритм позволил скомпенсировать неконтролируемые изменения сварочного усилия, вносимые пружинной подвеской, величина которых достигает 60–80 г, что для заданного усилия, например, 300 г (усилие для присоединения проволоки диаметром 250 мкм) составляет порядка 20%.

Важное значение для качества сварного соединения имеет форма торца сварочного наконечника. В последнее время для УЗС проводников повышенного сечения широко используется инструмент с V-образным (V-groove type) профилем рабочего торца без капиллярного отверстия под проволоку (рис. 3а). Проволока подается под торец

с помощью специальной пластиковой направляющей, надеваемой на инструмент или закрепленной на отдельном держателе (рис. 3б). Аналогичные направляющие используются и для ленточных выводов. Практические испытания такого инструмента на разработанной автоматической установке ЭМ-4341 показали, что сварные соединения достигают высокой прочности в достаточно широком окне рабочих параметров, в частности, времени сварки. Тестирование прочности крючком на отрыв показывало значения усилий, сравнимые с разрывным усилием проволоки. Это объясняется образованием в месте сварного соединения ребра жесткости на верхней стороне проволоки (рис. 3в).

Ленточные выводы могут служить хорошей альтернативой проволоочным проводникам, монтируемым параллельно для обеспечения необходимого тока. Большая площадь образуемых сварных соединений способствует надежности сборки изделий, при этом ленточный вывод более пластичен и меньше подвергается напряжениям под действием тепловых нагрузок, поскольку имеет малую толщину и поэтому более гибок. Кроме того, ленточные выводы в высокочастотных применениях создают меньшую индуктивность, чем группы проволоочных выводов.

Для присоединения ленточных выводов в разработанную сварочную систему устанавливается инструмент с рабочим торцом, изображенным на рис. 4, и пластиковая направляющая под необходимый типоразмер ленты.

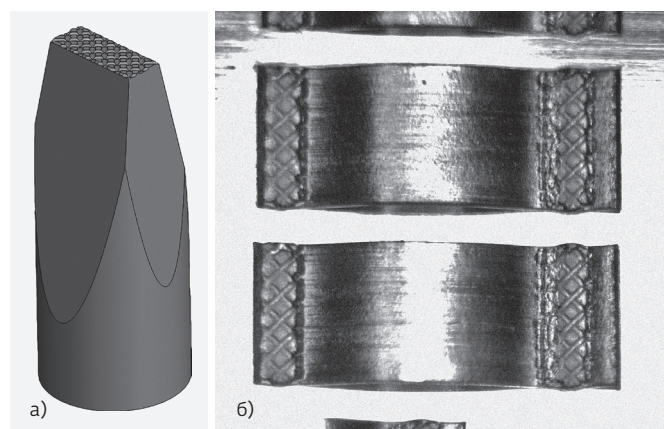


Рис. 4. Сварка ленты: а – типовой рабочий торец сварочного инструмента под ленту; б – получаемое соединение

ИСПЫТАНИЯ КАЧЕСТВА СВАРКИ

Отдельным направлением исследований, сопровождавших работу по созданию УЗ-системы установки ЭМ-4341, было изучение информации по методам и результатам тестирования сварных межсоединений в приборах силовой микроэлектроники по материалам профильных источников.

Основными дефектами проволоочного монтажа является «отлип» сварного соединения. Выявление возможности появления такого отказа во время эксплуатации изделий производится при помощи двух основных видов

испытаний: теста тянущим усилием зацепленным крючком – так называемый pull test – и сдвигового воздействия на сварную точку – shear test. Именно так пока испытывается внутрикорпусной монтаж на большинстве предприятий отечественной микроэлектронной промышленности. Однако специфика эксплуатации силовых приборов требует введения в цикл испытаний более жестких видов тестирования.

Работа микроэлектронных устройств часто происходит в режимах, вызывающих их длительный нагрев. Выше уже было сказано, что самым слабым звеном в таких условиях являются именно сварные соединения. Падение их качества при нагреве подтверждается, например, результатами испытаний, приведенными в [1]: установлено, что при выдержке приборов с проволочными соединениями «шарик-клин» золотой проволокой 25 мкм к алюминиевым площадкам кристалла при температуре 200 °С в течение 1000 часов сдвиговое усилие первого соединения шариком встык упало с 80 до 40 г, в то время как усилие при тесте прочности петли на отрыв крючком осталось практически неизменным (~12 г). Падение прочности объясняется ростом интерметаллида Al-Au и возможным образованием пустот Киркендалла*.

Что касается работы в условиях переменных тепловых нагрузок, сопровождающихся развитием в соединениях эффекта термической усталости, то практический интерес представляют, например, исследования, описанные в [3]. В них сделан важный вывод о том, что ленточные выводы при термоциклировании в 2,3 раза надежнее, чем проволочные, и в 1,4 раза надежнее при прогоне на предельных электрических параметрах. Значение функции Вейбулла 63,2%** достигало для ленточных выводов порядка 11 000 циклов, а для проволочных – порядка 7 900 циклов. В эксперименте использовалась алюминиевая проволока диаметром 500 мкм и лента шириной 1 500 мкм и толщиной 200 мкм; такой ленточный вывод заменяет два проводника круглого сечения диаметром 500 мкм.

* Пустоты Киркендалла – пустоты вблизи межфазных границ, образующиеся в связи с различными скоростями взаимной диффузии в разнородных твердых телах.

** Функция Вейбулла $F(t)$ описывается следующим соотношением [3]:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta},$$

где t – время до отказа прибора; η – характеристика времени жизни при значении $F(t) = 63,2\%$; β – параметр формы наклона (параметр Вейбулла). Значение функции Вейбулла 63,2% как критерия надежности закреплено в международном стандарте, оно определяет время, за которое выходит из строя 63,2% испытуемых изделий.

Приведенные данные показывают, насколько серьезные выводы могут быть сделаны из испытаний по методам термоциклирования и прогона выборочных изделий на предельных параметрах. Они, как и другие результаты проведенной поисковой работы, будут использованы на следующих этапах исследований, проводимых в ОАО «Планар», в ходе которых планируется, во-первых, определить необходимый комплекс испытаний для обеспечения максимально достоверной проверки качества сварки, получаемого на производимых предприятием установках, и, во-вторых, подготовить технологические рекомендации для заказчиков этого оборудования.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ЭМ-4341 И ЕЕ СВАРОЧНАЯ СИСТЕМА

Сварочная технологическая система автоматической установки ЭМ-4341 состоит из сварочной головки и прецизионного координатного привода, перемещающего ее по координатам X, Y, Z и φ (угол поворота), и УЗГ. Внешний вид СВГ показан на рис. 5.

В СВГ используется сварочный инструмент длиной 63,5 мм фирмы SPT (Швейцария), обеспечивающий глубокий доступ в рабочую зону. Инструмент установлен заподлицо с верхней кромкой торца волновода. Программируемый ультразвуковой безударный резак позволяет отделить проволоку от последнего сварного соединения

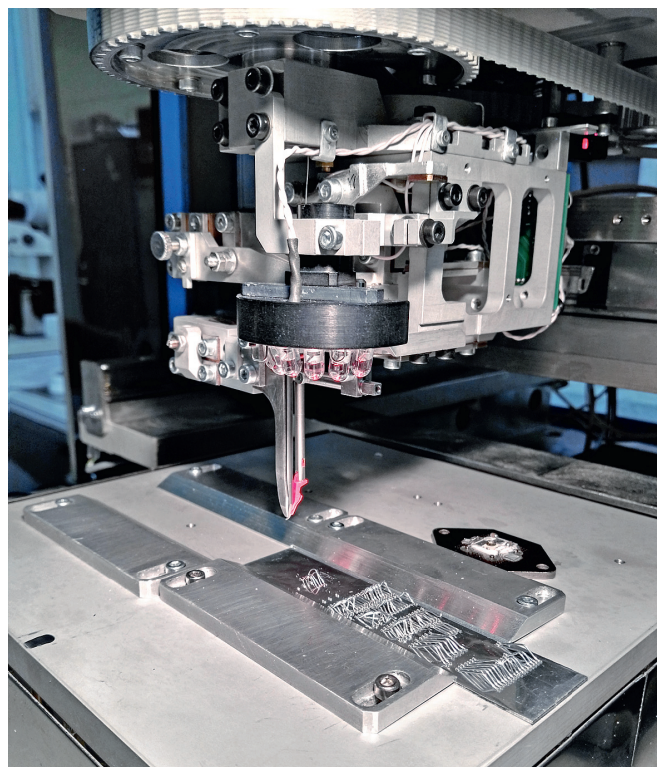


Рис. 5. Сварочная головка установки ЭМ-4341

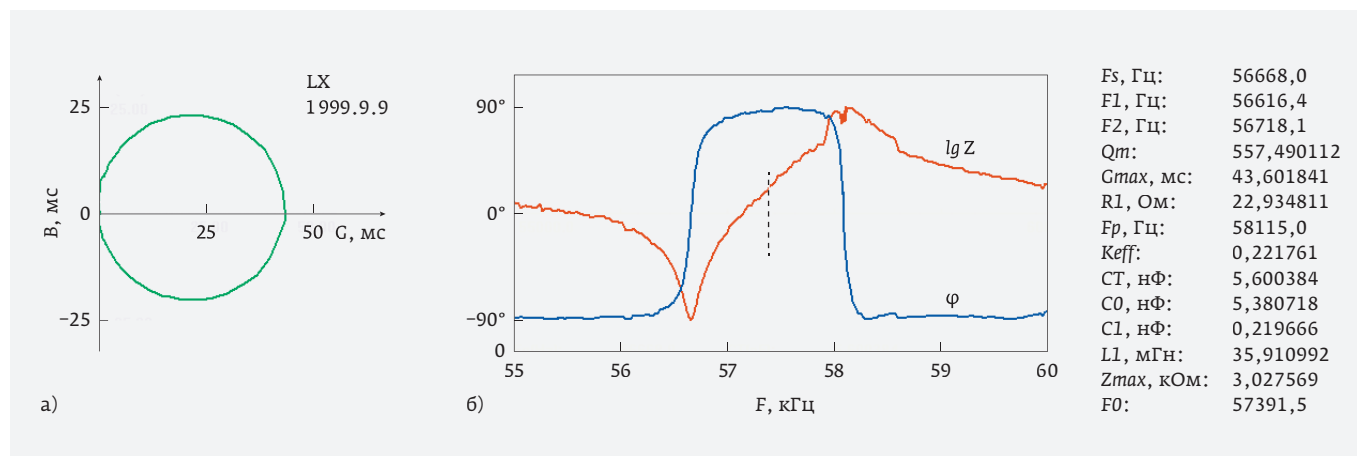


Рис. 6. Параметры ультразвуковой системы установки ЭМ-4341: а – круговая проводимость; б – амплитудно-частотная (красная линия) и фазочастотная (синяя линия) характеристики



Рис. 7. Автоматическая установка УЗ-микросварки ЭМ-4341

без повреждения структуры прибора. Сборка проводилась на подложках с алюминиевой и никелевой металлизацией, которая является стандартной для приборов силовой электроники. Резонансная частота ультразвука – 56,7 кГц. Параметры ультразвуковой системы показаны на рис. 6, а внешний вид автоматической установки ЭМ-4341 на рис. 7.

Основные технические характеристики установки ЭМ-4341 сведены в табл. 1.

Из рис. 6 видно, что в диапазоне 55–60 кГц наблюдается одна резонансная частота 56,7 кГц с импедансом УЗП на этой частоте, равным 22,9 Ом. Круговая диаграмма комплексного импеданса представляет собой окружность, что

Таблица 1. Основные характеристики автоматической установки ЭМ-4341

Способ и метод присоединения	Ультразвуковая сварка методом «клин – клин»
Рабочее поле, мм	200 × 200
Разновысотность уровней сварки, мм	4
Типоразмеры выводов	Проволока Al диаметром от 0,1 до 0,5 мм; Лента Al (0,075–0,120) × (0,5–1) мм (толщина × ширина)
Воспроизводимость координатной системы по X, Y, Z, мм	0,003
Угол подачи проволоки, град.	80–90

подтверждает отсутствие побочных резонансов в области основного резонанса. Добротность УЗП с установленным сварочным инструментом длиной 63,5 мм, равная 557, свидетельствует о хорошем согласовании УЗ-системы.

Оценка качества межсоединений, выполняемых установкой ЭМ-4341 (проволока АОЦПоМ-300А диаметром 300 мкм) проводилась на двух опытных партиях приборов заказчика. В первой партии использовалось никелевое гальваническое покрытие, осажденное по традиционной технологии на постоянном токе и без блескообразующих добавок; высота микронеровностей поверхности, измеренная с помощью цифрового профилометра Сейтроник ПШ8-1, составила 2,2–3,2 мкм. В приборах второй партии покрытие выполнялось тем же металлом, но по более совершенной технологии, и обладало лучшими характеристиками.

Поскольку прочность соединений во многом зависит от качества покрытия контактных площадок внешних выводов прибора и его основания, испытания по опытной приварке межсоединений в приборах первой партии ожидаемо показали неудовлетворительные результаты. Формирование перемычек проведено без сбоев, внешний вид сварных соединений соответствовал требованиям, однако разрывные усилия микровыводов (контактная площадка платы – вывод прибора, контактная площадка транзистора (диода) – вывод, вывод – вывод) зафиксированы на уровне 20–80 г при технологических требованиях не менее 120 г. Разрушение межсоединений происходило в результате отслоения сварной точки на выводах и поверхности основания без разрыва проволоки.

Испытания на второй партии приборов в тех же режимах сварки, что и для первой партии, показали хорошие результаты. Приварка проведена без сбоев, разрывные усилия межсоединений (контактная площадка платы – вывод, контактная площадка транзистора (диода) – вывод, ножка – ножка) зафиксированы на уровне 300–400 г. Разрыв происходил по телу проволоки, сварные точки при этом не разрушались.

Такой различный результат приварки соединений очевидно вызван разницей покрытия приборов первой и второй партий.

ВЫВОДЫ

1. Разработана ультразвуковая технологическая система для присоединения проводников повышенного сечения в изделиях силовой электроники, которая отличается стабилизацией сварочного усилия за счет компенсации влияния плоскопараллельных пластин подвески сварочной головки и безударной отрезкой проволоки с применением ультразвуковых колебаний к резаку.
2. Подтверждена совместимость инструмента, имеющего рабочий торец с V-образной канавкой,

с ультразвуковой системой установки ЭМ-4341. Инструмент в ее составе сокращает время сварки и при этом обеспечивает высокую прочность сварных соединений за счет формирования ребра жесткости на вершине проволоки и минимизации образования микротрещин в переходе сварная точка – проволока.

3. Установлена в ходе испытаний на изделиях заказчика эффективность реализованных в установке технических решений, обеспечивших превышение разрывного усилия сварного соединения на 150–230% по сравнению с уровнем, заданным технологическими требованиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Harmann G. G.** Wire Bonding in Microelectronics. – USA, NY: McGraw Hill, 3-d edition, 2010. 446 p.
2. **Достанко А. П. [др.]**. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые. – Минск: Бестпринт, 2009. 202 с.
3. The Importance of Interconnection Technologies: Reliability of Power Electronic Packages / S. Jacques // <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69611>, 2017, P. 185–201.
4. **Белоус А. С., Солодуха В. А., Шведов С. В.** Основы конструирования высокоскоростных электронных устройств. Краткий курс «белой магии». – М., Техносфера, 2017. 872 с.
5. Материалы для производства микросхем и полупроводниковых приборов. Проволока, ленты для микросварки // <http://ostec-materials.ru/materials/spm>.
6. Conductor fusing and gapping for bond wires / Chen K. C. [and ets.] // Progress in Electromagnetics Research. 2013. Vol. 31. P. 199–214.
7. **Шмаков М.** Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 5. С. 60–66.
8. Study of 6 mil Cu Wire Replacing 10–15 mil Al Wire for Maximizing Wire-Bonding Process on Power ICs / Jiang Y. [and ets.] // IEEE Transaction on Electronics Packaging Manufacturing, 2010. V. 33, N. 2. P. 135–142.
9. Which Frequency is Best for Wirebonding? Technical Note 2015/01/www.fkdelvotec.com/fileadmin/media_fuk/documente/160809E_TN15_01_Frequency.pdf.
10. **Ланин В. Л. [и др.]**. Монтаж ленточными перемычками мощных полупроводниковых приборов // Компоненты и технологии. 2009. № 1. С. 120–123.
11. **Ланин В. Л., Петухов И. Б.** Измерение амплитуды вибраций в технологических системах // Технологии в электронной промышленности. 2015. № 4. С. 78–83.
12. **Петухов И. Б., Ланин В. Л.** Диагностика ультразвуковых колебательных систем в установках микросварки // Технологии в электронной промышленности. 2016. № 4. С. 66–68.