

Активация процессов ультразвуковой микросварки изделий электроники

Для повышения качества и воспроизводимости свойств микросварных соединений в изделиях электроники разработаны устройства и активированные процессы ультразвуковой микросварки. Представленная информация будет полезна специалистам, работающим в области сборки изделий микроэлектроники.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.unibel.by

Свойства покрытий, определяющие качество сварных соединений

Микромонтажные соединения в изделиях электроники должны обеспечивать надежную электрическую связь траверсов корпуса с контактными площадками кристалла. Среди различных методов проволочный микромонтаж остается в условиях серийного производства одним из основных, так как он удобен, прост, универсален, а стоимость оборудования относительно невелика. Затраты на операцию присоединения проволочных выводов составляют значительную часть общей стоимости, поэтому потребность в автоматизации этого процесса весьма велика и продолжает расти с увеличением степени интеграции изделий из-за увеличения количества контактных площадок кристалла и внешних выводов корпуса.

Среди основных методов подсоединения проволочных выводов, таких как термокомпрессионная сварка (ТКС), термовзвучная сварка (ТЗС), ультразвуковая сварка (УЗС), сварка расщепленным электродом, сварка косвенным импульсным нагревом,

наиболее широкое распространение получили методы ТКС и ТЗС с использованием золотой проволоки и УЗС для алюминиевой проволоки диаметром 20–60 мкм [1]. Основные характеристики указанных методов, применяемых в серийном производстве БИС, приведены в таблице 1.

Процесс УЗ-микросварки сопровождается введением механических колебаний УЗ-частоты в зону контакта, что приводит к пластической деформации проволочного вывода, разрушению и удалению оксидных пленок с созданием атомно-чистых ювенильных поверхностей, интенсифицирует процесс образования активных центров при формировании микросварного соединения без большой деформации проволоки и значительного нагрева. При ТЗ-микросварке соединения формируют в результате совместного действия УЗ-энергии, усилия нагружения инструмента и температуры нагрева до 200–220 °С, что повышает воспроизводимость качества соединений, устраняет критичность к колебаниям свойств соединяемых материалов [2].

Сравнительный анализ качества микросварных соединений показал, что наибольший вклад в развитие дефектов контактного узла в виде локальных полей упругих напряжений вносит метод ТЗС золотой проволоки с ограниченным нагревом кристалла (200 °С), при этом ширина поля напряжений по глубине 25 мкм составляет до 200 мкм. При ТЗС инструмент в холодном состоянии в момент касания с подложкой отводит тепло и снижает температуру в зоне сварки на 40–50 °С. В условиях серийного производства это обстоятельство вынуждает технологов увеличивать при ТЗС или давление на инструмент, или температуру нагрева кристалла, или мощность УЗ-генератора. Однако повышение температуры стола ограничивается, например, свойствами клея. Увеличение же амплитуды колебаний инструмента и давления на инструмент приводит к росту остаточных механических напряжений в областях кристалла, прилегающих к контактным площадкам.

На надежность микросварных соединений влияют физико-механические свойства материала контактных площадок, геометрическая форма инструмента, активация зоны контакта при сварке. Акустические условия в зоне УЗ-сварки зависят от морфологии покрытий контактных площадок. Важное значение имеют такие характеристики покрытий контактных пло-

Таблица 1. Методы присоединения проволочных выводов в микроэлектронике

Сварка	Характеристики процесса	Материал контактных площадок и корпуса	Материал проволоки		Тип соединения (кристалл-корпус)	
			рекомендуемый	допускаемый	рекомендуемый	допускаемый
Термокомпрессионная	Температура 290–350 °С	Al, Au, Ag	Au	–	Встык-внахлестку	Внахлестку
	Усилие 0,4–2 Н			Al	Внахлестку	Встык-внахлестку
	Время 0,05–0,5 с			Cu	Встык-внахлестку	Внахлестку
Термовзвучная	Температура 225–250 °С	Al, Au, Ag	Au	Cu	Встык-внахлестку	Встык-внахлестку
	Частота 66 ± 6 кГц					
	Амплитуда 0,5 мкм					
	Усилие 0,2–1 Н					
Ультразвучная	Частота 66 ± 6 кГц	Al, Au, Ag, Ni, ковар, фени и др.	Al	Au, Cu	Внахлестку	Встык-внахлестку
	Амплитуда 0,2–1 мкм					
	Усилие 0,2–1 Н					
	Время 0,02–0,1 с					
Расщепленным электродом	Энергия 1,6–7,7 Дж	Au, Ni, Ag, Al, Ti	Au, Ag, Cu, Ni	Сплавы на основе Au и Ag	Плоские ленточные выводы	Внахлестку
	Усилие 0,4–2,2 Н					
	Время 0,02–4,0 с					
Косвенным импульсным нагревом	Температура 200–450 °С	Au, Ni, Ag, Al, Ti	Au, Ag, Al	Сплавы на основе Au и Ag	Плоские ленточные выводы	Внахлестку
	Усилие 0,4–3,0 Н					
	Время 0,01–2,0 с					

щадок, как величина зерна, пористость, концентрация неметаллических примесей, микрогеометрия поверхности. Для образования прочного и надежного микросварного соединения требуется поверхность покрытия контактных площадок с малой высотой микронеровностей и насколько возможно меньшим значением внутренних напряжений в покрытии.

Получение надежных микросварных соединений алюминиевых проволочных выводов с контактными площадками кристаллов и корпусов интегральных схем может быть достигнуто путем решения взаимосвязанных проблем: обеспечения заданного микрорельефа и требуемых физико-механических свойств покрытия, а также активации процесса ультразвуковой сварки проволочных выводов.

Качество ультразвуковой микросварки может быть повышено благодаря фотохимическим и термохимическим реакциям на поверхности алюминиевой пленки, инициируемым при обработке импульсным оптическим излучением в среде осушенного воздуха и аргона. Изменение микрорельефа поверхностей и структуры материалов, наличие оксидных и адсорбированных пленок приводит к дестабилизации процессов микросварки, ухудшению качества и надежности сварных соединений, снижению производительности операции микросварки. Таким образом, качество микросварных соединений определяется как физико-химическими свойствами соединяемых поверхностей, так и методами активации процессов микросварки.

Методы активации процесса УЗ-микросварки

Обработка электромагнитным излучением в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах длин волн существенно влияет на физико-химические процессы на поверхности материалов, находящихся в твердой фазе. Обработка поверхности тонких алюминиевых пленок импульсным оптическим излучением оказывает определенное влияние на механические характеристики соединений, полученных УЗС [3]. Осажденные в вакууме алюминиевые пленки перед микросваркой подвергались облучению четырех ксеноновых ламп ИНП-16/250А в среде осушенного воздуха и аргона для удаления поверхностных органических загрязнений и термообработки. Длительность импульса излучения составля-

ла 30 мкс, а длина волны — 0,6 мкм. Степень удаления органических загрязнений контролировалась на установке УКУС-1 с точностью 2° по краевому углу смачивания исследуемой поверхности каплей деионизованной воды. Количество органических загрязнений рассчитывали по тарифовочному графику зависимости величины краевого угла смачивания от концентрации эталонных органических загрязнений, нанесенных с помощью метода взвешивания на поверхность кремниевых подложек с алюминиевой металлизацией. В качестве эталонного органического загрязнения выбрано вакуумное масло ВМ-6.

Алюминиевая проволока диаметром 50 мкм с когезионной прочностью на разрыв 0,22 Н подвергалась предварительной очистке в УЗ-ванне с частотой колебаний 45 кГц и мощностью УЗ-генератора 470 Вт. УЗ-микросварка проводилась на установке с резонансной частотой 75 кГц. Прочность сварных соединений оценивалась методом отрыва алюминиевого проводника под углом 45° к подложке. Микрорельеф и структуру пленок алюминия исследовали на электронном микроскопе УЭМВ-100 К. Толщину окисла на поверхности алюминиевой пленки измеряли на лазерном эллипсометрическом микроскопе ЛЭМ-2.

В среде осушенного воздуха при увеличении плотности потока энергии E излучения импульсных ксеноновых ламп ИНП-16/250А от 0,1 до 0,3 МДж/м² величина концентрации органических загрязнений на поверхности алюминиевых пленок уменьшается с 4×10^{-5} до 7×10^{-7} кг/м² (рис. 1а). Связано это с инициированием фотохимических реакций, приводящих к очистке поверхности от органических загрязнений под действием электромагнитного излучения УФ и видимого диапазона. Фотохимический механизм реакций, протекающих на поверхности, подтверждается тем, что температура нагрева алюминиевой пленки не превышала 160 °С, а также тем, что при облучении пленки в среде аргона (вместо осушенного воздуха) эффективность очистки была ниже в среднем на 70%. Это объясняется отсутствием кислорода в среде, что исключает возможность образования озона и атомарного кислорода под действием УФ-излучения, которые стимулируют фотохимические реакции десорбции поверхностных органических загрязнений.

При увеличении E от 0,3 до 0,5 МДж/м² качество очистки алюминиевой пленки от орга-

нических загрязнений в среде осушенного воздуха значительно ухудшается ввиду термического разложения органических загрязнений под действием ИК-излучения.

Механическая прочность сварных соединений контактной пары А1-А1 при увеличении плотности потока энергии электромагнитного излучения от 0,1 до 0,3 МДж/м² повышается от 0,13 до 0,15 Н (то есть на 15%), что связано с очисткой поверхности от органических загрязнений под действием электромагнитного излучения (рис. 1б). Уменьшение F при дальнейшем возрастании E объясняется ростом естественного окисла на поверхности алюминиевой пленки и снижением качества очистки поверхности от органических загрязнений.

Для повышения прочности и воспроизводимости межсоединений в ИМС применены способы активации УЗ-микросварки путем пропускания импульса постоянного тока в момент сварки либо инфракрасным (ИК) излучением. Активация импульсами ИК-излучения интенсивностью $(2-5) \times 10^4$ Вт/м² позволяет осуществить термозвуковую сварку соединений, снижает до минимума эффект проскальзывания проволочного вывода и приводит к увеличению фактической площади соединения. Разработан процесс УЗ-микросварки, включающий приложение к соединяемым элементам внешнего статического давления, подачу в зону сварки УЗ-колебаний и нагрев элементов импульсами некогерентного ИК-излучения в течение цикла сварки всех выводов ИМС [4]. Схема устройства (рис. 2) содержит систему крепления 3, пьезоэлектрический преобразователь 4, волновод 5, сварочный капилляр 6, генератор УЗ-колебаний 7, блоки питания 8 и управления 9, источник ИК-излучения 10.

При сварке проволочного вывода 2 с контактной площадкой 1 ИМС внешнее статическое давление прилагали к сварочному капилляру для деформации вывода в процессе сварки. Проволочный вывод и контактные площадки нагревали импульсами ИК-излучения от ИК-лампы, закрепленной в фокусе параболического рефлектора, при амплитудах напряжений 20-30 В. Формирование амплитуд и длительности импульсов, а также управление процессом УЗС осуществлялось по программе.

Пределы регулирования температурно-временных параметров устройства зависят от качества оптической системы, типа лампы, материала рефлектора. Применение линзового кварцевого конденсора для лампы

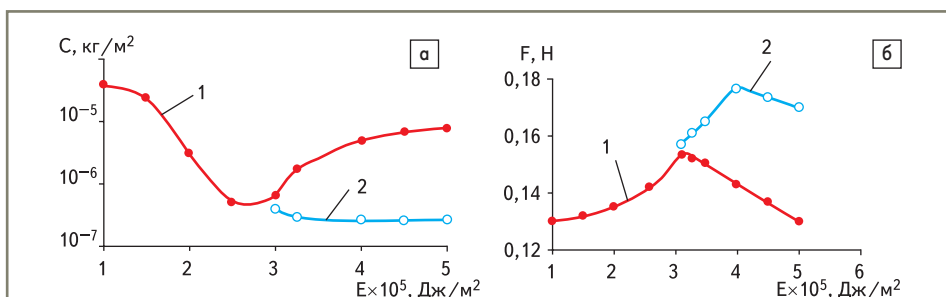


Рис. 1. Зависимость: а) концентраций органических загрязнений на поверхности алюминиевых пленок; б) механической прочности микросварных соединений от плотности потока энергии излучения в среде осушенного воздуха (1) и в среде аргона (2)

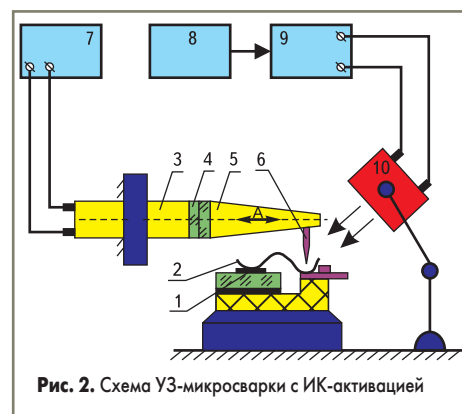
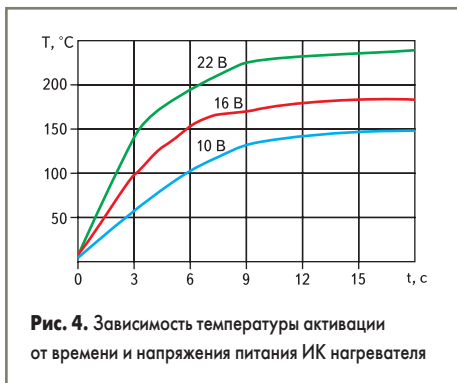


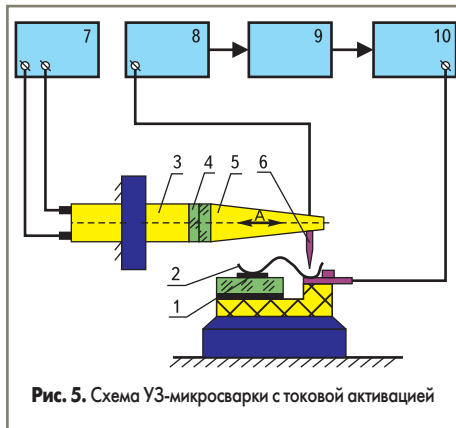
Рис. 2. Схема УЗ-микросварки с ИК-активацией



КГМ мощностью 150 Вт повысило температуру в центре фокального пятна почти в два раза, и она достигла 400 °С (рис. 3). Скорость роста температуры на начальном участке зависит от напряжения питания ИК-лампы, так, при 10 В она равна 20 °С/с, при 16 В — 30 °С/с, при 22 В — 50 °С/с. С увеличением времени активации скорость нарастания уменьшается, и после 15 с она не превышала 5 °С/с (рис. 4).

Для повышения качества и надежности микросварных соединений в процессе УЗ-микросварки корпусов ИМС, не содержащих драгоценных металлов, пропускали электрический ток через оба соединяемых элемента в направлении, обеспечивающем электроперенос диффузионно-подвижного металла в соединении [5]. Реализация предложенного способа осуществлена по схеме, приведенной на рис. 5. Схема устройства содержит систему крепления 3, пьезоэлектрический преобразователь 4, волновод 5, сварочный капилляр 6, генератор УЗ-колебаний 7, блоки питания 8, управления 9, устройство токовой активации 10.

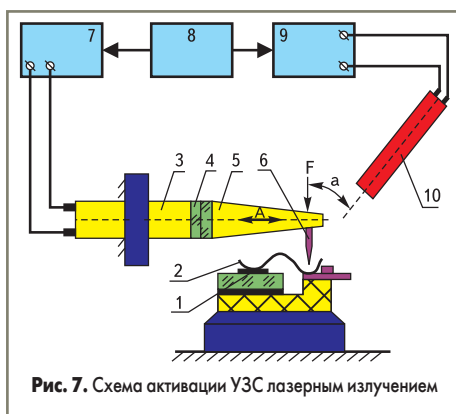
При микросварке алюминиевой проволоки 2 к контактной площадке 1 корпуса ИМС один из полюсов блока токовой активации подавался на акустический трансформатор УЗ технологической системы, а другой подключался к выводной рамке. Внешний вид устройства токовой активации и микропроволочных соединений приведен на рис. 6. При токовой активации процесса УЗ-микросварки прочность контактных соединений увеличивается до 12–15 сН при производительности 14 000–15 000 соед./ч. Длительность импульса тока составляла 30–60 мс. Поскольку в соединении Al-Ni алюминий обладает большим коэффициентом диффузии, чем никель, то создание



постоянного электрического тока через соединение стимулирует процесс диффузионного взаимодействия в процессе микросварки [6].

Лазерная активация соединений до температуры, не превышающей температуру рекристаллизации соединяемых материалов, усиливает диффузионное взаимодействие материалов проволоки и контактной площадки в процессе сварки, что увеличивает прочность микросварных соединений и повышает надежность изделий.

При сварке проволочного вывода 2 с контактной площадкой 1 внешнее статическое давление F прилагают к сварочному капилляру 6 для деформации вывода в процессе сварки (рис. 7). Ультразвуковые колебания от генератора 7 через систему крепления 3 подаются на пьезоэлектрический преобразователь 4, возбуждая в волноводе 5 продольные механические колебания. Подогрев проволочного вывода и контактной площадки осуществляют импульсами лазерного излучения от оптического квантового генератора 9. В качестве источника оптического излучения применен квантовый генератор на алюмо-иттриевом гранате с неодимом с длиной волны 1,06 мкм, длитель-



ностью импульсов 0,2 мс и частотой следования 1–50 Гц. Для накачки активного элемента используется ИК-лампа мощностью 2 кВт. Лазерный луч с помощью оптической системы 10 фокусируется в пятно и направляется под углом к вертикали в зону сварки, которая проходит через ось сварочного капилляра. Управление работой УЗ-генератора по перестраиваемой программе и оптического квантового генератора осуществляется блоком управления 8 [7].

Подогрев соединяемых элементов в момент сварки импульсами лазерного излучения в диапазоне 0,5–1,06 мкм, с частотой следования 20–30 Гц и энергией импульса 0,75–1,5 Дж, формируемого при амплитудах напряжения источника питания до 900 В, снижает до минимума эффект проскальзывания проволочного вывода, увеличивает его пластичность и степень деформации, что приводит к повышению фактической площади контакта вывода с контактной площадкой.

Длина волны излучения 1,06 мкм выбирается из соображений большего поглощения излучения материалом контактной площадки. Использование излучения газового лазера на CO₂ с длиной волны 10,6 мкм неэффективно ввиду высокого коэффициента отражения излучения.

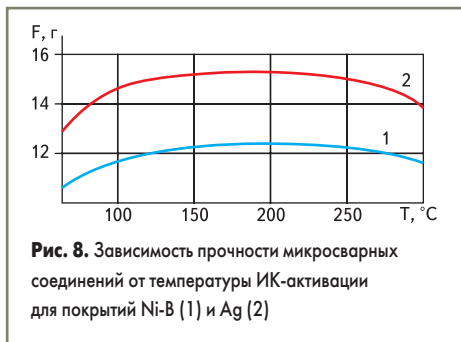
Выбор энергии импульсов 0,75–1,5 Дж и частоты 20–30 Гц обусловлен необходимостью обеспечения средней мощности в диапазоне 15–30 Вт и достижения оптимальной температуры нагрева соединяемых элементов. При данных параметрах температура 220 °С при диаметре пятна излучения до 1 мм достигается за 0,1 с. При увеличении мощности качество соединений ухудшается из-за значительного утончения проволоки, а при уменьшении — нагрев недостаточен для увеличения ее пластичности.

Выбор угла наклона луча излучения 30–45° к вертикали в зону сварки обусловлен необходимостью эффективного нагрева контактной площадки в процессе сварки. При угле меньше 30° часть лазерного излучения будет экранирована сварочным капилляром. При угле больше 45° пятно нагрева увеличится, а средняя мощность уменьшится.

Свойства микросварных соединений

Алюминиевую проволоку марки А999К09 ЯеО 021.139.ТУ толщиной 35 мкм разваривали на контактные площадки кристалла и траверсы корпуса с гальваническим покрытием 3–5 мкм. В качестве покрытий применялись Ni-V и Ag. Разварку вели на полуавтомате ЭМ-4020 при мощности УЗ-колебаний 0,1–0,3 Вт, частоте 66 кГц, времени сварки 0,15–0,25 с, внешней статической нагрузке 20–40 сН. Прочность соединения на отрыв измеряли на установке 12МПО-1 с цифровой фиксацией результатов при скорости нагружения до 10 сН/с и точности измерения ±0,1 сН.

Исследованы зависимости прочности микросварных соединений, сформированных УЗ-микросваркой по гальваническим покрытиям Ni-V и Ag контактных площадок ленточного но-



сителя, от температуры ИК-излучения (рис. 8). Прочность микросварных соединений увеличивается при росте температуры ИК-активации и достигает максимума при 200 °С, так как при повышении температуры увеличивается степень обжата выводов на 15–20%. При дальнейшем увеличении температуры ИК-активации происходит значительное утончение микропровода вследствие пластической деформации вплоть до ее разрыва, и поэтому прочность соединения уменьшается. Прочность микросварных соединений по покрытию Ag значительно выше, чем по покрытию Ni-B, так как Ni-B характеризуется более высокой микротвердостью.

С ростом величины тока прочность микросварных соединений увеличивается и достигает максимума при 20–30 мА. При дальнейшем увеличении тока происходит пережигание микропровода, что приводит к уменьшению прочности соединения. Гистограммы прочности соединений по покрытию Ni-B при различных методах активации приведены на рис. 9.

Анализ гистограмм прочности показал, что нагрев ИК-излучением увеличил прочность соединений на 20%, а токовая активация — на 15%. Воспроизводимость результатов и их однородность выше при ИК-активации.

При активации УЗ-микросварки энергию лазерного излучения варьировали в пределах

Таблица 2. Параметры микросварных соединений

Энергия излучения, Дж	Прочность соединений на отрыв, сН	
	Ni-B	Ag
0,60	14,2	16,3
0,75	16,4	18,9
0,90	16,7	19,6
1,05	16,8	20,0
1,20	16,5	19,4
1,35	16,3	19,3
1,50	15,9	18,9
1,65	13,8	15,7

0,75–1,5 Дж, а частоту следования выбирали равной 25 Гц (табл. 2).

Параметры микросварных соединений для различных методов активации приведены в таблице 3.

Анализ полученных данных показывает, что активация импульсами тока увеличивает степень обжата на 5–10%, а ИК и лазерным излучением — на 15–20%.

Заключение

Качество микросварных соединений в значительной степени зависит от физико-механических свойств материалов покрытий контактных площадок и методов активации. Применение активированных процессов УЗ-микросварки позволяет получать более стабильные по качеству микросварные соединения с различными типами покрытий контактных площадок. Это создает возможность применения покрытий на основе сплавов никеля с повышенной износо- и коррозионной стойкостью взамен золочения, а также применять локальное серебрение с меньшей толщиной, что обеспечивает экономию благородных металлов и уменьшает себестоимость изготовления изделий.

Таблица 3. Параметры микросварных соединений для различных видов активации

Вид активации сварки	Ширина сварной точки, мкм	Степень обжата по высоте	Средняя прочность соединения, г
УЗС	80	0,72	10,9
УЗС + токовая	75	0,77	12,4
УЗС + ИК 150 °С	73	0,86	12,8
УЗС + ИК 200 °С	75	0,88	13,2
УЗС + ИК 250 °С	80	0,93	13,5
УЗС + лазер	80	0,92	13,0

Литература

1. Емельянов В. А. Технология микромонтажа интегральных схем. Минск: Белорусская наука, 2002.
2. Онегин Е. Е., Зенькович В. А., Битно Л. Г. Автоматическая сборка ИС. Минск: Высшая школа, 1990.
3. Буйко Л. Д., Дударчик А. И., Мужиченко О. Г. Улучшение качества ультразвуковой микросварки с помощью обработки импульсным оптическим излучением // Электронная промышленность. 1986. Вып. 4(152).
4. Ланин В. Л., Кожух Е. И. Активация процесса микросварки соединений в ИМС // Известия Белорусской инженерной академии. 1998. № 2(6)/2.
5. Ланин В. Л., Хмыль А. А. Устройство токовой активации ультразвуковой микросварки // Сварочное производство. 1993. № 5.
6. Ланин В. Л., Хмыль А. А. Свариваемость гальванических покрытий для изделий электроники // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 5.
7. Емельянов В. А., Ланин В. Л., Кожух Е. И. Способ термовзвучковой микросварки. Пат. 4216. Беларусь. МКИ В23К 28/02. 2001.

