В.В. Зенин А.В. Рягузов

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СБОРКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие

Воронеж 2005

Воронежский государственный
технический университет

В.В. Зенин А.В. Рягузов

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СБОРКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Утверждено редакционно-издательским
советом университета в качестве
учебного пособия

Воронеж 2005

УДК 621.3.049.77.001

Зенин В.В., Рягузов А.В. Конструктивно-технологические аспекты сборки полупроводниковых изделий: Учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. 353 с.

В учебном пособии рассматривается влияние конструктивно-технологических факторов на основные сборочные операции в технологии производства полупроводниковых изделий: монтаж кристаллов и присоединение внутренних выводов. Приведены сведения о влиянии физико-механических свойств материалов внутренних выводов и конструкции сварочного инструмента на качество микросоединений. Рассмотрены методы и устройства оценки адгезии пленок к подложке, особенности пайки полупроводниковых изделий бессвинцовыми припоями.

Издание соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 210200 «Проектирование и технология электронных средств» и специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника».

Учебное пособие подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе MS Word и содержится в файле Кон.-тех.асп.сбор.ППИ.doc.

Табл. 47. Ил. 121. Библиогр.: 33 назв.

Рецензенты: кафедра физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета (зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. Е.Н. Бормонтов);
д-р техн. наук, проф. Б.К. Петров

© Зенин В.В., Рягузов А.В., 2005
© Оформление. ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 9

Глава 1. Металлические материалы для формирования внутренних соединений 11
1.1. Микронная алюминиевая проволока 13
1.2. Влияние свойств проволоки и ее подготовки к сварке на качество соединений СПП 15

Глава 2. Инструмент для сборочных операций ППИ 18
2.1. Технологические особенности изготовления инструмента 22
2.2. Влияние конструкции инструмента на качество микросоединений 23
2.3. Схватывание инструмента с выводами при монтаже 26
2.4. Инструмент для сварки внутренних выводов СПП 29
2.5. Инструмент для монтажа выводов и кристаллов 35

Глава 3. Методы и устройства для оценки адгезии пленок к подложкам 37
3.1. Неразрушающие методы 38
3.2. Разрушающие методы 42
3.3. Влияние технологических факторов на адгезионную прочность пленок с подложкой 54
3.4. Контроль адгезии в микросварных соединениях 62
3.5. Устройство для экспресс-контроля адгезии пленок к подложкам 66
3.6. Устройства для оценки адгезионной прочности локальных пленочных площадок с подложкой 71

Глава 4. Монтаж полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов 78
4.1. Пайка кристаллов 79
4.1.1. Оборудование для монтажа кристаллов 89
4.2. Групповая термоимпульсная пайка кристаллов 92
4.3. Оценка смачиваемости и растекания припоя по паяемой поверхности 97
4.4. Заполнение припоем капиллярного зазора между кристаллом и корпусом при пайке 108
4.5. Контроль качества паяных соединений 114

4.6. Посадка на клей 117
4.6.1. Оборудование для клеевых соединений 126

Глава 5. Бессвинцовая пайка в технологии производства ППИ 128
5.1. Недостатки Pb-Sn припоев 128
5.2. Экологические аспекты проблемы бессвинцовой пайки изделий микроэлектроники 133
5.2.1. Нормативные требования к размещению твердых бытовых и токсичных промышленных отходов 135
5.2.2. Токсикологическая оценка металлов, входящих в состав припоев и покрытий для бессвинцовой пайки 137
5.2.3. Экологическая оценка припоев ПОС40 (40Sn/60Pb) и бессвинцового 95,5Sn/4Ag/0,5Cu 141
5.3. Покрытия для бессвинцовой пайки 144
5.3.1. Цинковое покрытие 145
5.3.2. Олово – висмутовое покрытие 146
5.3.3. Оловянное покрытие 151
5.3.4. Никелевое покрытие 152
5.3.5. Сплав никель – олово 154
5.3.6. Серебряное покрытие 155
5.4. Бессвинцовые припои в технологии производства ППИ 157
5.4.1. Индиевые припои 159
5.4.2. Висмутовые припои 160
5.4.3. Припои на цинковой основе 161
5.4.4. Припои на основе кадмия 161
5.4.5. Припои на основе олова 162
5.5. Пайка кристаллов к основаниям корпусов ППИ 164
5.5.1. Пайка кристаллов ППИ на основания корпусов с образованием эвтектики Si-Au 168
5.5.1.1. Свойства золота 168
5.5.1.2. Подготовка золотой фольги и позолоченных корпусов ППИ к сборочным операциям 169
5.5.1.3. Остаточные механические напряжения в кристаллах при эвтектической пайке Si-Au 172

5.5.1.4. Новый способ подготовки золотой прокладки к пайке 174
5.5.2. Пайка кристаллов ППИ на основания корпусов с образованием эвтектики Sn-Zn ... 175
5.5.2.1. Возможные варианты пайки кристаллов на эвтектику Sn-Zn 177
5.5.3. Металлическая система для монтажа полупроводникового кристалла к корпусу 179
5.6. Пайка золота в изделиях микроэлектроники оловянно-индиевыми припоями 182
5.6.1. Исследование растворения золотой проволоки в жидкой фазе припоя ПОИн50 184
5.6.2. Исследование растворения золотой проволоки в твердой фазе припоя ПОИн50 ... 187
5.6.3. Взаимодействие припоя ПОИн50 с золотым технологическим покрытием ППИ ... 191

Глава 6. Проволочный монтаж в производстве ППИ 197
6.1. Способы присоединения проволочных выводов 200
6.1.1. Термокомпрессионная микросварка 201
6.1.2. Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН) 207
6.1.3. Ультразвуковая микросварка 208
6.1.3.1. Расчет концентраторов для установок ультразвуковой микросварки 209
6.1.4. Односторонняя контактная сварка 215
6.1.5. Пайка электродных выводов 216
6.1.5.1. Оборудование для присоединения проволочных выводов 217
6.2. Влияние состава алюминиевой металлизации на качество микросварных соединений Al-Al 221
6.2.1. Повышение качества микросоединений, выполненных УЗС 221
6.2.2. Повышение качества микросоединений, выполненных ТКС 226
6.3. Микросварные соединения алюминиевой проволоки с алюминиевым гальваническим покрытием корпусов изделий электронной техники 229

6.3.1. Алюминиевые покрытия, полученные электролитическим методом 230
6.3.2. Влияние свойств покрытия на качество соединений с алюминиевой проволокой при термокомпрессионной сварке 240
6.3.3. Коррозионная стойкость микросоединений $Al_п$-$Al_г$ 246
6.4. Исследование микросварных соединений алюминиевой проволоки с золотым гальваническим покрытием корпусов изделий электронной техники 249
6.4.1. Микросварные соединения Al-Au 250
6.4.2. Термоэлектротренировка микросварных контактов Al-Au. 254
6.4.3. Повышение коррозионной стойкости микросоединений Al-Au. 258
6.5. Микросварные соединения алюминиевой проволоки в корпусах ППИ с покрытиями из никеля и его сплавов 261
6.5.1. Микросварные соединения к корпусам с покрытиями Ni и его сплавами 262
6.5.2. Стойкость микросварных соединений Al-Ni к температурным воздействиям и под токовой нагрузкой. 267
6.5.3. Свариваемость алюминиевой проволоки с никель-бор покрытием при термообработке. 270
6.6. Оптимизация режима ультразвуковой сварки алюминиевой проволоки с серебряным гальваническим покрытием корпусных деталей СПП 274
6.6.1. Серебряное покрытие 275
6.6.2. Подготовка корпусов с серебряным покрытием к сборочным операциям 277
6.6.3. Выбор оптимального режима УЗС соединения Al-Ag 281
6.6.4. Тепловые эффекты в зоне соединения Al-Ag 288
6.7. Выбор оптимальных режимов сварки внутренних микросоединений датчиков газов 291

Глава 7. Групповой монтаж в технологии производства ППИ 299
7.1. Пайка полупроводниковых кристаллов с объемными выводами к основаниям корпусов методом «flip-chip» 300
7.1.1. Изготовление шариков припоя и размещение их на кристалле 300
7.1.2. Изготовление столбиковых припойных выводов 303
7.1.3. Формирование шариковых выводов оплавлением проволоки 313
7.1.4. Пайка кристаллов со столбиковыми выводами на контактные площадки 317
7.2. Сборка ППИ с паучковыми выводами 320
7.2.1. Расчет напряжений в микросоединениях, сформированных ультразвуковой микросваркой паучковых выводов к кристаллам ИС 321
7.2.2. Особенности монтажа внутренних выводов БИС и СБИС 326

Глава 8. Контроль качества внутренних соединений ППИ 336
8.1. Разработка методики оценки прочности микросоединений в изделиях силовой электроники 336
8.1. Оценка прочности микросоединений в ППИ 338
8.2. Контроль прочности микросоединений БИС и СБИС 344

Заключение 350

Библиографический список 351

Введение

Достижения интегральной электроники, которая в настоящее время используется практически во всех областях науки и техники, обусловлены повышением степени интеграции элементов на кристалле, увеличением быстродействия, уменьшением потребляемой мощности и повышением надежности микросхем.

Надежность полупроводниковых изделий (ППИ) тесно связана с технологией производства и, в особенности, с операциями получения контактных соединений. Одной из наиболее распространенных причин отказов, связанных с процессом производства, является нарушение микросоединений кристалла с корпусом и внутренних выводов с контактными площадками кристалла и корпуса. По данным отечественной и зарубежной литературы от 35 до 60 % всех отказов в радиоэлектронной аппаратуре приходится на долю микросоединений.

Развитие технологии производства интегральных схем (ИС) осуществляется в направлении уменьшения размеров приборов и увеличения плотности упаковки, что вызывает необходимость уменьшения ширины металлических пленок, используемых в качестве межсоединений. Однако от ширины пленочной металлизации зависит среднее время наработки на отказ, обусловленное электродиффузией. С уменьшением ширины пленок снижается и среднее время наработки до отказа приборов. В процессе эксплуатации ППИ имеют место отказы, связанные с деградацией микросоединений внутренних выводов.

Поэтому при разработке новых приборов, а также при оценке работоспособности существующих конструкций необходимо учитывать влияние условий изготовления и эксплуатации на структуру и свойства микроконтактов, особенно в случае наличия биметаллических пар. Электрическая и механическая стабильность биметаллических пар во многом определяется интерметаллическими соединениями, образующимися за счет взаимной диффузии различных металлов при повышенной температуре.

Следует отметить, что широкое внедрение автоматизированного оборудования и новых методов сборки сдерживается из-за недостаточной изученности конструктивно-технологических факторов, влияющих на прочность и надежность микросоединений и снижающих производительность сборочного оборудования. На качество микросоединений оказывают влияние не только правильный выбор способов и режимов монтажа, но и таких параметров, как структура пленок и адгезионная прочность их с подложкой, физико-механические свойства материалов выводов и конструкция сварочного инструмента. Известно, что проволока микронных размеров имеет нестабильность геометрических размеров и механических свойств; это является одной из причин низкой воспроизводимости качества внутренних микросоединений.

Вопросы дальнейшего совершенствования оборудования и технологии сборки остаются в центре внимания разработчиков и изготовителей современных ППИ. Повышение производительности и надежности сборки самым тесным образом связано с конструкцией микросварочного инструмента. Современные высокопроизводительные сборочные автоматы требуют оснащения износостойким, дешевым и надежным инструментом.

Обеспечение качества микросоединений в ППИ в процессе их разработки и серийного производства возможно путем исследований влияний конструктивно-технологических факторов на формирование сварных и паяных микросоединений.

В некоторых разделах учебного пособия использованы материалы статей, авторских свидетельств СССР и патентов Российской Федерации, опубликованные в соавторстве с к.т.н. Бокаревым Д.И., д.т.н. Горловым М.И., к.т.н. Колычевым А.И., к.т.н. Осенковым В.Н., к.т.н. Сегалом Ю.Е. и к.х.н. Спиридоновым Б.А., которым авторы выражают глубокую благодарность.

Глава 1. Металлические материалы для формирования внутренних соединений

В качестве материала перемычек между кристаллом и корпусом в ППИ применяют алюминий, золото и др. металлы. Применение алюминиевой проволоки позволяет использовать при монтаже микросоединений ультразвуковой метод сварки.

Известно, что проволоку микронных размеров получают методом волочения через алмазные фильтры или гидростатическим прессованием – гидроэкструзией. При сборке силовых полупроводниковых приборов (СПП) используется проволока из алюминия диаметром 0,25 мм и более.

Наиболее важными механическими свойствами привариваемой проволоки являются прочность и относительное удлинение. Следует отметить, что эти свойства могут изменяться в довольно широких пределах для каждой партии и даже для отдельных катушек одной партии проволоки. Для стабилизации свойств проволоки микронных размеров ее подвергают отжигу перед монтажом. Целью отжига является снижение механической прочности и повышение пластичности проволоки.

Механические свойства проволоки влияют не только на прочность микросоединений, но и на надежность контактов и ППИ в целом. Прочность алюминиевой проволоки влияет на целостность оксида SiO_2 под сварным контактом полупроводникового кристалла. Известно, что после ультразвуковой сварки изменяется сопротивление между проволочным выводом и подложкой, т. е. через пленку SiO_2. В приборах, в которых используется проволока с высокой прочностью на разрыв сопротивление утечки значительно выше, чем при сварке приборов отожженной проволокой.

Неиспользованная проволока с течением времени может менять свои свойства. Это обусловлено релаксацией напряжений от холодной обработки, образующейся при волочении проволоки. Ослабление напряжений обычно вызывает удлинение проволоки, но если релаксация металла неоднородна, длина проволоки может уменьшаться. Чтобы свести к минимуму из-

менение свойств долго не использованной проволоки, обычно рекомендуется хранить её при комнатной температуре не более 6 месяцев.

Релаксация напряжений в проволоке может изменять прочность сварного соединения. Наибольшую деградацию испытывает проволока, подвергнутая холодной обработке, отожженная проволока изменяется в меньшей степени.

При решении вопроса о надежности микросоединений в ППИ, наряду с отработкой режимов монтажа, следует учитывать и такой фактор, как подготовка соединяемых элементов к сварке или пайке. Наличие органических загрязнений на поверхности проволоки и пленки действует как барьер, препятствующий осуществлению взаимодиффузии между проволокой и пленкой при сварке. Исследования с применением метода Оже-спектроскопии термокомпрессионных соединений показали, что причины появления «пурпурной чумы» самым тесным образом связаны с загрязнениями поверхности, к которой присоединяется проволока.

На поверхности алюминиевой проволоки всегда присутствует слой оксида. Методом Оже-спектроскопии исследована поверхность алюминиевой проволоки и установлено, что слой гидрата окиси алюминия толщиной около 1нм не препятствует образованию качественного соединения с контактными площадками ППИ. Однако при толщине оксидов на поверхности проволоки 100 нм и более получить качественное сварное соединение не удается.

Проволока, подлежащая сварке должна быть гладкой и чистой. При УЗС поверхностные пленки и загрязнения интенсивно вытесняются из зоны сварки, но не полностью. Поэтому проволоку необходимо очищать от смазки, отпечатков пальцев, водяных капель, монооксида кремния и других включений, загрязняющих контактные площадки кристалла и корпуса при сборке, тем самым, ослабляя сварное соединение. Кроме того, нарушается свободная подача проволоки через отверстие микросварочного инструмента.

К сожалению, вопросам влияния очистки проволоки и пленочной металлизации перед операцией присоединения выводов на надежность микросоединений уделяется недостаточное внимание. Обычно в полупроводниковой промышленности используется способ «мокрой» химической очистки, заключающийся в частичном стравливании металлической поверхности или растворении загрязнений. Оксиды металлов удаляются химическим травлением, а органические загрязнения перед термокомпрессионной сваркой рекомендуется удалять ультрафиолетовым облучением. Травление золотых проволоки и пленки перед сваркой в растворе (H_2O:HF:HNO_3) с концентрацией (10:1:1) приводит к увеличению прочности соединений проволока – пленка. Кроме того, данный раствор не изменяет геометрических размеров проволоки и морфологии ее поверхности.

Таким образом, при сборке ППИ силовой электроники конструктор и технолог должны уделять серьезное внимание подготовке проволоки к сварке.

1.1. Микронная алюминиевая проволока

Свойства алюминиевой проволоки приведены в табл. 1.1.

Табл. 1.1. Микронная алюминиевая проволока

Материал, марка	Диаметр, мкм	Состояние поставки	Временное сопротивление разрыву, мПа	Относительное удлинение, %	Удельное электросопротивл. Ом·м, не более	Назначение
	27	Твердое	300-400	1-6	$3{,}5\cdot10^{-8}$	
		Мягкое	200-310	2-6		
	30	Твердое	300-400	1-6	$3{,}5\cdot10^{-8}$	
		Мягкое	200-300	2-6		
Проволока микронная из Al-Si сплава (АК 0,9П)	35	Твердое	300-400	2-6	$3{,}5\cdot10^{-8}$	Для микросварки полупроводниковых приборов и ИС
		Мягкое	200-300	4-6		
	40	Твердое	300-400	2-6	$3{,}5\cdot10^{-8}$	
		Мягкое	200-300	4-6		
	50	Твердое	300-400	1-6	$3{,}5\cdot10^{-8}$	
		Мягкое	200-300	1-6		
	60; 80; 100; 150; 200; 250; 300; 400;		220-300 200-300	2-12 2-12	$3{,}5\cdot10^{-8}$	

	500					
Проволока прецизионная из микролегированного алюминиевого сплава (АОЦПоМ)	200-400		44-66	5-25	$3{,}0\cdot10^{-8}$	Для сборки мощн полупроводников приборов и ИС

Применение микронной алюминиевой проволоки, наряду с экономией золота, позволяет организовать производство особо надежных ИС и ПП приборов. Имеется также оборудование и технология для производства проволоки толщиной 0,1-1,0 мм из цветных металлов и сплавов или биметаллических материалов (например, медь – ковар), используемых для выводов мощных транзисторов.

В табл. 1.2 и 1.3 приведены основные параметры прецизионных плющеных и многослойных лент.

Табл. 1.2. Прецизионные плющеные ленты

Материал	Размеры лент, мм		Предельное отклонение, мм		Временное сопротивл. разрыву, мПа	Относительное удлинение, %	Число перегибов	Назначение
	толщина	ширина	по толщине	по ширине				
Плющеная лента из молибдена	0,1-1,6	0,2-2,8	±(0,005-0,04)	±(0,005-0,007)	70-80	7-15	6-8	Предназначены для деталей электровакуумных приборов (межсоединения в кинескопе)
Плющеная лета из стали нержавеющей	0,8-0,33	1,00-2,00	±(0,005-0,01)	±(0,05-0,07)	60-70	57-70		

Возможно изготовление плющеной ленты из других материалов, в том числе из припойных типа ПОС10 и др.

Табл. 1.3. Многослойные металлические ленты

Материал	Толщина × ширина ленты, мм	Толщина покрытия, мкм	Ширина покрытия, мм
Лента биметаллическая на основе меди с полосчатым покрытием серебром (медь – серебро)	0,6×44; 0,6×51 0,8×20; 0,8×32 0,8×33; 0,6×26	210 300 400	3 5 5,5
Лента биметаллическая на основе сплава с полосчатым алюминиевым покрытием (нейзильбер – алюминий)	0,21×20 0,21×32 0,15×32	6±2 6±2 4±2	4,8±0,3; 6,5±0,3 3,2±0,3 6,5±0,3

	0,28×28	8±2	6,5±0,3
Лента биметаллическая бронза – алюминий (бронза – алюминий)	0,3×30	9±2	9±0,3
Лента плакированная сплав – медь – сплав с алюминиевым покрытием (ФМФА)	0,30×32 0,30×50 0,35×22 0,40×32 0,50×33	6±2 6±2 11±4 7±2 9+2	6 12 7 6; 4,4 6
Лента биметаллическая сплав – медь (ковар – медь)	0,21×95	29	–
Лента биметаллическая медь – сплав Fe-Ni (МФ)	0,5×70	38±3	–
Лента плакированная медь – сплав Fe-Ni – медь (МФМ)	0,5×70 0,5×110 0,8×110	12±3	–
Лента плакированная, припой – медь-припой (ПМП)	0,1×27	25±8	.–
Лента плакированная никель – сплав Fe-Ni (НФН)	(0,15-0,28) × (28-66)	13-25	–
Лента плакированная медь – сталь – никель (МЖН)	0,3×80 0,35×80	–40±8 –50±10	–
Лента плакированная медь – сплав – медь – припой (НФМП)	0,24×60	12±5 (для никеля) 80±30; –20 (для припоя)	–
Лента плакированная никель – латунь – никель – припой (НЛНП)	0,25×31,0 0,30×31,0 0,30×47,2 0,40×43,8	20±7 20±8 22±7 11±4 22±7 11±4 30±10 15±5	–
Лента биметаллическая на основе сплава с полосчатым алюминиевым покрытием (ФА)	(0,21-0,4) × (20-66)	6±2	7
Лента плакированная никель – сплав – никель с полосчатым алюминиевым покрытием (НФНА)	(0,21-0,4) × (20-66)	6±2	7

1.2. Влияние свойств проволоки и ее подготовки к сварке на качество соединений СПП

Основные свойства алюминиевой проволоки в производстве СПП приведены в табл. 1.4.

Табл. 1.4. Физико-механические свойства алюминиевой проволоки

Свойства проволоки	Проволока прецизионная из микролегированного алюминиевого сплава (АОЦПоМ)

Диаметр, мм	0,2-0,4
Временное сопротивление разрыву, МПа	44-66
Относительное удлинение, %	5-25
Удельное электросопротивление, Ом·м, не более	$3{,}0 \cdot 10^{-8}$

Для оценки влияния физико-механических свойств проволоки на качество микросварных соединений, выполненных ультразвуковой сваркой, использовали алюминиевую проволоку марки А995 диаметром 250 мкм, отожженную в вакууме при температурах 300; 350; 400; 450; 500 ºС, и проволоку марки АОЦПоМ, отожженную при температуре 200-220 ºС. Было разварено по 60 соединений внахлестку на корпусе диодов Шоттки проволокой, отожженной при данных температурах. Разварку выводов осуществляли ультразвуковой сваркой на режимах, обеспечивающих получение максимальной прочности соединений. Прочность сварных соединений определяли натяжением вывода до разрушения с последующим контролем характера разрушения.

По результатам испытаний построено интегральное распределение прочности микросварных соединений, представленное на рис. 1.1. Анализ разрушений сварных соединений показал, что большинство соединений разрушаются по проволоке. На некоторых образцах наблюдался отрыв соединений в зоне перехода проволоки в сварное соединение (так называемой «шейке»). Максимальную прочность имеют соединения, как видно из рис. 1.1, разваренные проволокой, отожженной при 300 ºС. Следует отметить, что соединения, разваренные данной проволокой, имеют существенный разброс по прочности.

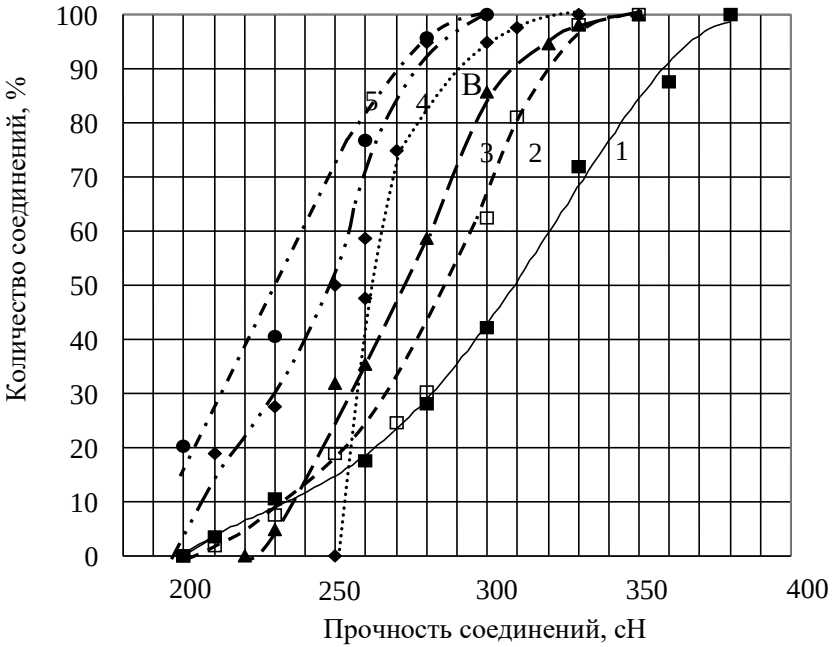


Рис. 1.1. Интегральные распределения прочности микросварных соединений алюминиевой проволоки марки А995 диаметром 250 мкм с никелевой металлизацией корпусов ППИ при различных температурах отжига проволоки, ºС: 1 – 300; 2 – 350; 3 – 400; 4 – 450; 5 – 500 (6 – проволока АОЦПоМ, отожженная при температуре 200 – 220 ºС)

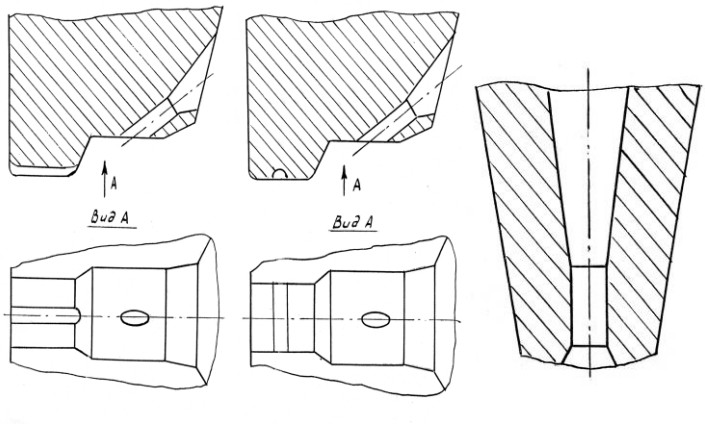
С увеличением температуры отжига проволоки разброс значений прочности соединений уменьшается. Наибольшая стабильность прочностных характеристик микросварных соединений наблюдается при сварке проволокой марки АОЦПоМ, отожженной при температуре 200-220 ºС.

Глава 2. Инструмент для сборочных операций ППИ

Повышение производительности сборочных операций самым тесным образом связано с материалом и конструкцией микросварочного инструмента. Современные высокопроизводительные сборочные автоматы требуют оснащения высокостойким, дешевым и надежным инструментом.

К микросварочному инструменту предъявляются следующие основные требования: обеспечение концентрации энергии в зоне сварки; возможность визуального контроля процесса сборки прибора; высокая механическая прочность; высокая износостойкость; удобство в эксплуатации.

Каждый способ монтажа предъявляет к рабочему инструменту свои требования в зависимости от соединяемых материалов. При термокомпрессионной и ультразвуковой сварке широко применяются капилляры с центральным или боковым отверстием. Рабочий торец может быть с плоской, поперечной или фиксирующей канавкой. Конструкции инструментов для монтажа межсоединений в изделиях электронной техники приведены на рис. 2.1.



а) б) в)

Рис. 2.1. Инструмент для присоединения электродных выводов; а – для ультразвуковой сварки внахлестку; б – для термокомпрессионной сварки внахлестку; в – для термокомпрессионной сварки встык с образованием шарика

При формировании шарика в процессе проволочной сборки на конце проволоки при возникновении электрической дуги наблюдается осаждение мелких капель металла на торце капилляра. Данные покрытия уменьшают возможность осаждения металла на рабочую поверхность сварочного инструмента. Предложена конструкция керамического капилляра, на рабочую поверхность которого нанесено покрытие из оксидов Al или Si толщиной 22-30 нм.

Для сборки полупроводниковых приборов ТКС проволокой диаметром 0,010-0,030 мм разработана конструкция сварочного инструмента. Повышение прочности и надежности сварных соединений достигаются за счет формы рабочей площадки капилляра в виде двух цилиндрических полостей. Верхняя полость имеет диаметр на 0,003-0,008 мм больше диаметра проволоки, нижняя – на 0,005-0,01 мм больше диаметра проволоки, а высота нижней полости составляет 0,01-0,05 мм.

Разработана конструкция инструмента для термозвуковой сварки кристаллов ИС, имеющих контактные площадки размером 75×75 мкм и шагом 90 мкм, золотой проволокой диаметром 0,025 мм встык. Нижний конец инструмента заострен на 30 ° и имеет рабочую часть выпуклой формы. Капилляр для протяжки проволоки заканчивается полостью, имеющей диаметр несколько меньше диаметра оплавленного шарика. Полость образована двумя или тремя поверхностями с различной конусностью (от 15 до 90 °), что позволяет несмотря на изменения диаметра шарика, получать стабильные по размерам сварные соединения на кристалле.

Для образования микросоединений широко используется инструмент из твердых сплавов типа ВК. Следует отметить, что этот сплав не обеспечивает достаточно высокой стойкости при монтаже проволочных соединений. Для изготовления микросварочного инструмента широко применяется керамика и сталь. Керамический материал на основе Al_2O_3 обладает высокой твердостью и не имеет адгезии с золотом. Стойкость стального инструмента можно повысить в результате упрочнения его по-

верхности различными методами химико-термической обработки.

Износостойкость рубинового инструмента значительно выше инструмента из твердого сплава. На термокомпрессионных установках инструмент из рубина обеспечивает 300-350 тыс. сварных соединений, а инструмент из твердого сплава – 140-150 тыс. сварных соединений.

Каждый способ монтажа предъявляет к инструменту свои требования в зависимости от соединяемых материалов. При микросварке широко применяются капилляры с центральным или боковым отверстием. При разработке инструмента с боковым отверстием для автоматических сварочных установок необходимо учитывать условие гарантированного совмещения проволоки с рабочим пазом инструмента и ограничения на ее свободную протяжку. Опытным путем найдены оптимальные соотношения между размерами рабочих элементов инструмента и диаметром привариваемой проволоки, на базе которых предложена конструкция инструмента для автоматической микросварки.

Площадь физического контакта проволочных выводов с контактными площадками при сварке может быть увеличена за счет изменения формы торца микросварочного инструмента. Установлено, что при УЗС инструментом с V-образным пазом на торце при одной и той же степени деформации алюминиевой проволоки усилие осадки будет больше, чем для инструмента с плоским торцом. Это приводит к активации контактных поверхностей и увеличению площади физического контакта в зоне проволока – пленка, а, следовательно, и к повышению прочности сварных соединений.

Рекомендуется проводить сварку при усилии нагружения инструмента при сварке ($F_{св.}$) меньше оптимального сварочного давления ($F_{св.опт.}$). При сварочном давлении $F_{св.} > F_{св.опт.}$ возможно снижение прочности соединения. При усилиях $F_{св.} \leq F_{св.опт.}$ получают качественные соединения с деформацией алюминиевой проволоки 30-50 %. Эти режимы обеспечивают максималь-

ную прочность сварных соединений при высокой производительности процесса монтажа.

Одним из основных показателей, характеризующих качество проволочного монтажа, является прочность проволочной перемычки на растяжение, которая зависит от площади зон взаимодействия материалов в сварном соединении и от состояния участка перехода проволоки из сварного соединения в вывод, т. е. от прочности «шейки» вывода. Поэтому при выборе режимов микросварки необходимо определять оптимальную степень деформации микропроволоки, при которой не происходит чрезмерного ослабления «шейки». На прочность «шейки» большое влияние оказывают размеры и чистота поверхности капиллярного отверстия, через которое протягивают проволоку в процессе формирования перемычки, т. к. трение проволоки в отверстии сварочного инструмента может ослаблять прочность перемычки.

Известно, что максимальная сила трения возникает после сварки на кристалле в начальный момент перемещения инструмента на позицию сварки на траверсе или корпусе. Эта сила не разрушает микросварное соединение, если создаваемое усилие при протягивании проволоки через капиллярное отверстие меньше заданного значения прочности «шейки» вывода. Зная минимальное усилие отрыва для данного сечения проволоки, можно подобрать такое сечение капиллярного отверстия микросварочного инструмента, в котором сила трения при протягивании проволоки не создает усилий отрыва больше допустимых значений. При этом прочность проволочной перемычки должна регистрироваться с помощью специальных датчиков.

Следует отметить, что перечисленные выше конструкции микросварочных инструментов используются в установках для сборки маломощных ППИ, в которых перемычка между кристаллом и траверсами корпуса формируется проволокой диаметром до 0,06 мм.

2.1. Технологические особенности изготовления инструмента

Дня монтажа межсоединений в полупроводниковых приборах и микросборках применяется инструмент из металлокерамических твердых сплавов, керамики, стали и других материалов. Наиболее сложной технологической операцией при изготовлении инструмента является поручение отверстий диаметром 0,015 мм и более для подачи проволоки в зону сварки.

При изготовлении твердосплавного микросварочного инструмента капиллярные отверстия диаметром 0,015-0,1 мм можно получать методом литья твердого сплава в металлическую форму. Полученные отверстия при этом не требуют дополнительной обработки. Специально разработанное оборудование обеспечивает требуемую точность геометрических размеров. Получение отверстий малых диаметров в изделиях из твердого сплава возможно методом порошковой металлургии.

Для размерной обработки отверстий в сварочном инструменте применяется электроискровой, прошивочный станок модели 04ЭП-10М, с помощью которого изготавливают отверстия диаметром 0,015-0,5 мм со скоростью прошивки 0,5-1,5 мм/мин. Точность обработки на данном станке составляет ±0,002 мм, а шероховатость обработанной поверхности R_a = 0,1-0,4 мкм.

Прошивку отверстий малых диаметров в твердосплавном инструменте для микросварки можно осуществлять электрохимическим методом проволочным катодом. Определенную роль в повышении производительности размерной электрохимической обработки играет магнитная обработка электролита. Скорость анодного растворения сплавов ВК2 и ВК20 в хлоридно-щелочном электролите, подвергнутом магнитной обработке, возрастает на 25-28 %.

При разработке инструмента с боковым отверстием для автоматических сварочных установок необходимо учитывать гарантированное совмещение проволоки с рабочим пазом инструмента и ограничение на ее свободную протяжку. Опытным путем найдены оптимальные соотношения привариваемой прово-

локи, на базе которых предложена конструкция инструмента для автоматической микросварки.

В процессе микросварки необходима периодическая очистка капиллярного инструмента от различного рода загрязнений. Своевременная и качественная очистка микросварочного инструмента способна значительно продлить срок его службы.

Из всех существующих методов очистки капиллярных инструментов считают перспективным способ очистки в низковязких органических растворителях при комнатной температуре на приспособлении с концентрацией ультразвуковых колебаний непосредственно в капиллярном отверстии. Выход годных инструментов с центральным отверстием составляет около 95 %, а производительность труда на операциях очистки повышается в 3-5 раз за счет применения групповой обработки капилляров.

Для очистки керамических капиллярных инструментов диаметром 0,02-0,07 мм рекомендуется состав на основе серной кислоты и перекиси водорода с добавлением хлорфторзамещенного углеводорода и антистатика. В этом случае капиллярные инструменты загружаются в приспособление для групповой обработки и помещаются в ванну с указанным составом при температуре 50-70 °С при воздействии ультразвука.

2.2. Влияние конструкции инструмента на качество микросоединений

На качество микросоединений при ультразвуковой сварке оказывают существенное влияние диаметр и длина инструмента, а также место его закрепления в ультразвуковой сварочной головке.

На прочность и другие параметры соединений алюминиевой проволоки с окисленным кремнием или кварцем влияют как усилия нагружения на сварочный инструмент, так и амплитуда ультразвуковых колебаний. Максимальная прочность соединений при ультразвуковой сварке алюминиевой проволоки диаметром 0,04 мм с окисленным кремнием или кварцем достигает-

ся при усилии нагружения на инструмент 0,3-0,35 Н с амплитудой колебаний 1-1,25 мкм.

Амплитуду колебаний микросварочного инструмента при сварке можно измерять с помощью полупроводниковых тензодатчиков, которые наклеиваются вблизи места крепления рабочего инструмента на полуволновой концентратор акустической системы. Регистрация мгновенных значений амплитуды колебаний сварочного инструмента дает необходимую информацию о процессе формирования сварного соединения.

Измерение амплитуды и контроль характера вибраций рабочего инструмента в установках ультразвуковой микросварки можно осуществлять с помощью бесконтактных виброметров.

Площадь физического контакта проволочных выводов с контактными площадками при сварке может быть увеличена за счет изменения формы торца микросварочного инструмента. Установлено, что при ультразвуковой сварке инструментом с V-образным пазом на торце при одной и той же степени деформации алюминиевой проволоки усилие осадки будет больше, чем при ультразвуковой сварке инструмента с плоским торцом. Это приводит к активации контактных поверхностей, к увеличению площади физического контакта, а, следовательно, и к повышению прочности сварных соединений проволочных выводов.

Конструкции инструментов для УЗС представлены на рис. 2.2.

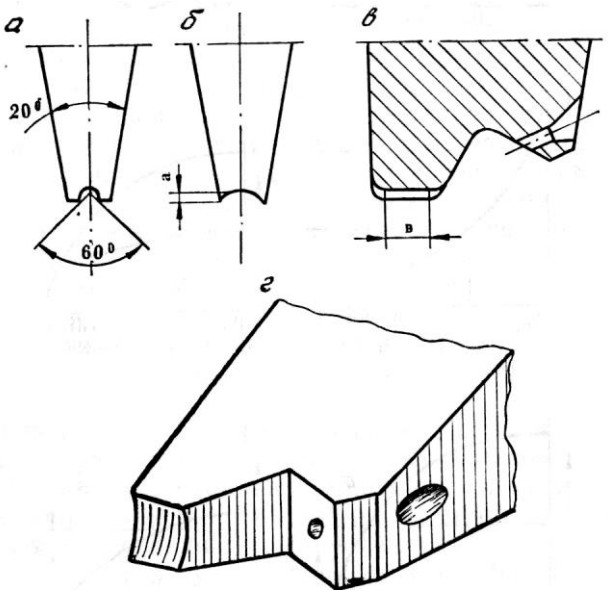


Рис. 2.2. Конструкция сварного инструмента для УЗС: а – с продольной канавкой; б – с продольным углублением; в – профиль инструмента; г – вид рабочей части инструмента

Для получения качественного соединения рекомендуется производить сварку при усилии нагружения инструмента $Q_{св} \leq Q_{св.опт.}$. При сварочном давлении $Q_{св}$ больше оптимального $Q_{св.опт.}$ возможно снижение прочности соединения. При усилии $Q_{св} \leq Q_{св.опт.}$ обеспечивается высокая производительность процесса монтажа с получением качественных соединений при деформации алюминиевой проволоки 30-50 %.

Присоединение выводов к контактным площадкам импульсным методом широко используется в микроэлектронике. Основные достоинства этого метода: локализация температуры в ограниченной области, кратковременность и стабильность процесса монтажа и возможность соединения многих металлов. Рекомендуется для образования соединений с максимальной механической прочностью повышать сварочное напряжение до 0,08 В при увеличении контактных площадок электрода от 0,08 до 0,4 мм и зазоре между электродами от 0,01 до 0,03 мм. Дав-

ление сварочного электрода должно составлять от 0,15 до 0,5 Н в зависимости от диаметра присоединяемой проволоки. Геометрические размеры рабочей части электрода рассчитываются с учетом диаметра привариваемой проволоки и величины контактных площадок.

В процессе импульсной сварки на рабочей поверхности электродов из металлокерамических твердых сплавов типа ВК образуется оксидная пленка. После 5500-7000 сварных соединений необходимо разрушать эту пленку механическим путем.

В электронной промышленности для точечной микросварки иногда применяются специальные устройства – «карандаши». Конструкция устройства позволяет устанавливать необходимую величину давления при автоматическом включении тока по достижении этого давления. С помощью этого устройства проводится сварка разнотолшинных материалов и металлов с различными теплофизическими свойствами.

Для беспроволочной сборки ИС групповым способом с целью выравнивания тепловых режимов по площади кристалла в рабочей части сварочного инструмента выполняют фигурный вырез на глубину не менее 0,6 мм. При монтаже таким инструментом отвод тепла в местах соединения лепестковых выводов с контактными площадками кристалла ИС происходит с различной интенсивностью в зависимости от количества контактных площадок и схемы расположения их на кристалле. Прочность соединений при сварке инструментом с вырезом в рабочей части более стабильна, чем при сварке инструментом с плоским торцом.

2.3. Схватывание инструмента с выводами при монтаже

В процессе присоединения внутренних выводов к контактным площадкам ППИ термокомпрессионной или ультразвуковой сваркой наблюдается схватывание (смачивание) выводов с инструментом. В некоторых случаях оно бывает настолько ин-

тенсивным, что при подъеме инструмента поднимается и вывод, отрываясь от контактной площадки.

Установлено, что интенсивность схватывания между инструментом и алюминиевым выводом с увеличением времени выдержки возрастает неодинаково для различных марок твердого сплава и при различных температурах. Так, для инструмента из сплава ВК2 удельная сила схватывания при температурах 350-400 °С в 3-5 раз меньше, чем для инструмента из сплава ВК9 (рис. 2.3). Этот фактор зависит от состава материала инструментов.

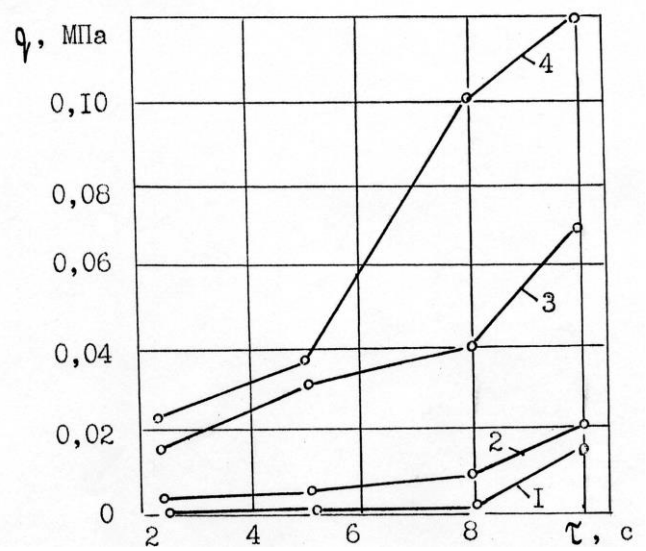


Рис. 2.3. Зависимость удельной силы схватывания от времени выдержки для различных сплавов: ВК2 при температурах 350 °С (1) и 400 °С (2); ВК9 при 350 °С (3) и 400 °С (4)

Структура металлокерамического твердого сплава представляет собой как бы два вставленных один в другой (или переплетающихся между собой) скелета: карбидный и кобальтовый, что экспериментально подтверждается полным удалением кобальта из сплава путем продолжительного кипячения в соляной кислоте. Наличие в твердых сплавах резко различных по своим свойствам фаз – твердой и хрупкой карбидной и относи-

тельно мягкой и пластичной кобальтовой, которые могут быть разъединены, – позволяет рассматривать их при изучении вопросов контактирования инструмента со свариваемым материалом как независимые составляющие.

Карбид вольфрама имеет высокую температуру плавления, большую твердость и образует твердые растворы эвтектики и химические соединения с некоторыми металлами в области температур выше 1250 °С, При температуре ниже указанной соединений карбида вольфрама с металлами не образуется.

По своим физико-химическим свойствам кобальт существенно отличается от карбида вольфрама. Он мягче, имеет более низкую температуру плавления, взаимодействует со многими металлами при низких и высоких температурах. Кобальт образует твердые растворы эвтектики и химические соединения с широким кругом металлов.

Таким образом, физико-механические свойства материала инструмента существенно влияют на качество микросварных соединений и должны приниматься во внимание при разработке сварочных устройств. В качестве материала инструмента для термокомпрессионной сварки алюминиевых выводов рекомендуется использовать твердые сплавы с меньшим содержанием кобальта.

При ультразвуковой сварке алюминиевой проволоки с алюминиевой металлизацией хорошо зарекомендовал себя инструмент из карбида вольфрама, содержащий 0,5 % Со. Степень схватываемости такого инструмента с алюминием на 1 тыс. сварных соединений в 20 раз ниже, чем у применяемого материала ВК6М.

Для уменьшения адгезии инструмента с присоединяемыми выводами рекомендуется рабочую часть инструмента покрывать специальными сплавами. Например, нанесение на инструмент из сплава ВК6М защитного покрытия из карбида титана и оксида циркония увеличивает срок его службы в 2-3 раза.

2.4. Инструмент для сварки внутренних выводов СПП

Возросший уровень цен на энергоносители и резкое увеличение энергоемкости внутреннего валового продукта активизировали разработку и производство изделий силовой энергосберегающей бытовой и промышленной аппаратуры.

СПП в составе модулей обеспечивают коммутацию токов свыше 1000 А и напряжений до 5,5 кВ, при этом размеры чипов достигают площади 2,6 см^2 (16×16 мм).

Все это предъявляет повышенные требования к технологии производства, особенно к монтажно-сборочным операциям в СПП. При решении вопроса о надежности соединений в СПП, наряду с выбором оптимальных способов и режимов монтажа необходимо учитывать качество металлизации контактных площадок кристаллов и корпусов, присоединяемой проволоки, материала и конструкции сварочного инструмента.

В СПП при УЗС выводов используется алюминиевая проволока диаметром 0,25 мм и более. Соединения должны иметь плавный переход сварного соединения в проволоку, «без шейки», так как повышенное напряженное состояние данного участка соединения приводит к увеличению электрического сопротивления контактов под токовой нагрузкой и, естественно, к снижению надежности СПП.

Для УЗС проволочных выводов в СПП разработана конструкция сварочного инструмента. Инструмент для УЗС (рис. 2.4) имеет рабочую площадку 1 с продольной канавкой 2, поперечное сечение которой имеет форму равнобочной трапеции с размерами в нижнем основании 1,0d, в верхнем – 0,75d и высотой 0,6d, где d – диаметр привариваемой проволоки. При этом радиус закругления R_1 на передней кромке рабочей площадки инструмента равен радиусу изгиба проволоки при сварке на корпусе, а радиус закругления R_2 – соответствует радиусу изгиба проволоки при подаче ее через капиллярное отверстие в зону сварки на кристалле.

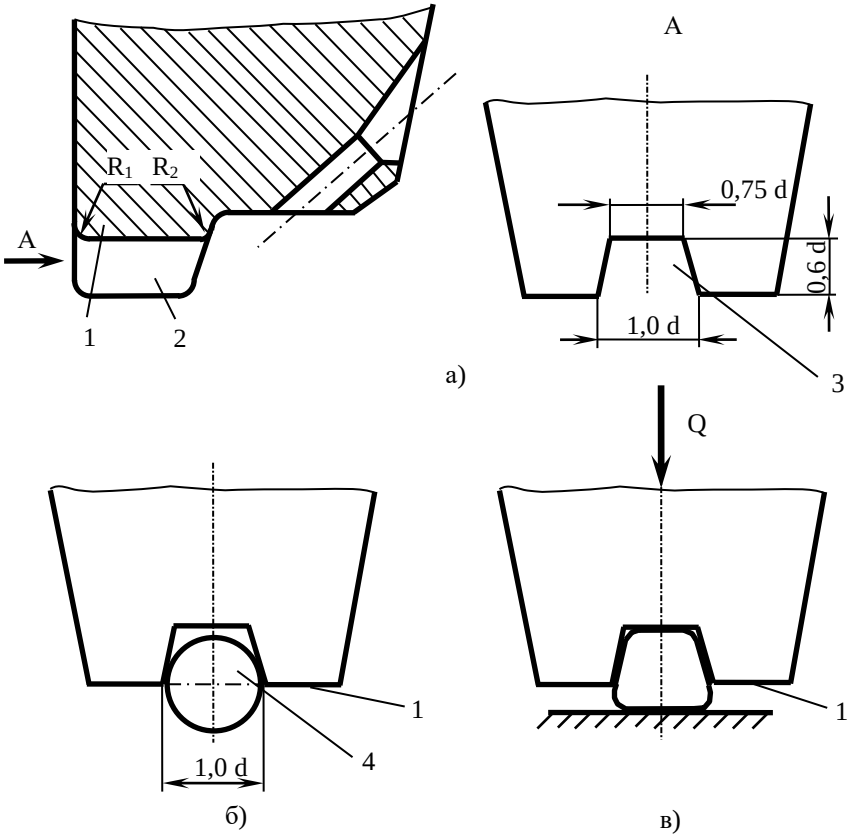


Рис. 2.4. Инструмент для УЗС проволочных выводов СПП: а – рабочий торец инструмента в разрезе; б – положение проволоки в канавке инструмента перед сваркой; в – положение проволоки в канавке инструмента после сварки: 1 – рабочая площадка; 2 – продольная канавка, 3 – поперечное сечение канавки; 4 – привариваемая проволока; Q – давление инструмента при сварке

Ширина канавки на рабочей площадке инструмента в нижнем основании, равная диаметру привариваемой проволоки, обеспечивает центрирование проволоки относительно контактной площадки при сварке. Глубина канавки, равная 0,6 диаметра проволоки, ограничивает деформацию проволоки при сварке и практически исключает ее заклинивание в канавке инструмента после сварки.

Радиусы закругления R_1 на передней кромке рабочей площадки инструмента и R_2 на задней кромке – позволяют формировать плавный переход от сварного соединения к недеформированному сечению проволоки, т.е. получать сварные соединения без «шейки». Радиус R_1 зависит от формы перемычки проволоки между кристаллом и корпусом, а радиус R_2 – от упругих свойств проволоки и угла наклона капиллярного отверстия инструмента.

Схема присоединения проволочных выводов в диодах Шоттки в корпусе ТО-220 представлена на рис. 2.5.

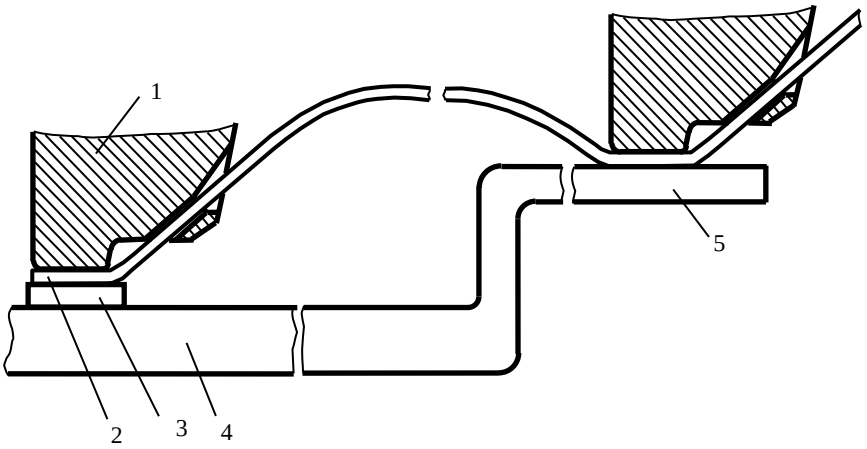


Рис. 2.5. Схема формирования проволочной перемычки между кристаллом и корпусом диодов Шоттки: 1 – сварочный инструмент; 2 – привариваемая проволока; 3 – кристалл; 4 – корпус; 5 – траверса корпуса

Использование разработанной конструкции инструмента для УЗС по сравнению с существующими конструкциями имеет следующие преимущества: обеспечивает напряженное состояние в проволоке в зоне сварки близкое к всестороннему сжатию; способствует минимальной деформации привариваемой проволоки в зоне сварки; создает плавный переход от сварного соединения к недеформированному сечению проволоки.

Для соединений между кристаллом и траверсами корпуса СПП, как было отмечено выше, целесообразно использовать проволоку диаметром 0,4-0,5 мм. Для УЗС проволоки данных размеров требуются повышенные мощность ультразвукового генератора и давление сварочного инструмента. Кроме того, использование проволоки приводит к неравномерной прочности сварного соединения по площади взаимодействия проволоки с контактной площадкой кристалла или корпуса. Наибольшая площадь контактирования проволоки с пленкой характерна для центральной области проволоки.

«Жесткие режимы» УЗС, особенно на кристалле, приводят к ухудшению электрических параметров СПП. Поэтому для обеспечения заданной мощности, подаваемой на СПП между кристаллом и траверсами корпуса формируют по 2 или 3 перемычки из проволоки диаметром 0,25 мм. Данная технология приводит к повышению себестоимости выпускаемых СПП.

Анализ способов и технологии монтажа внутренних соединений в СПП показал, что целесообразно использовать ленточные выводы вместо проволочных. Например, проволока диаметром 0,4 мм соответствует ленте с поперечным сечением 0,2×0,6 мм.

В связи с вышеизложенным, разработана конструкция инструмента для сварки ленточных выводов к контактным площадкам СПП. Инструмент для сварки (рис. 2.6) представляет собой цилиндрический стержень 1 с боковым отверстием 2 прямоугольной формы, на конусном торце которого имеется рабочая площадка 3 с продольной канавкой 4 высотой до 0,8 а и шириной до 1,2 б, где “а” – толщина, а “б” – ширина привариваемого вывода.

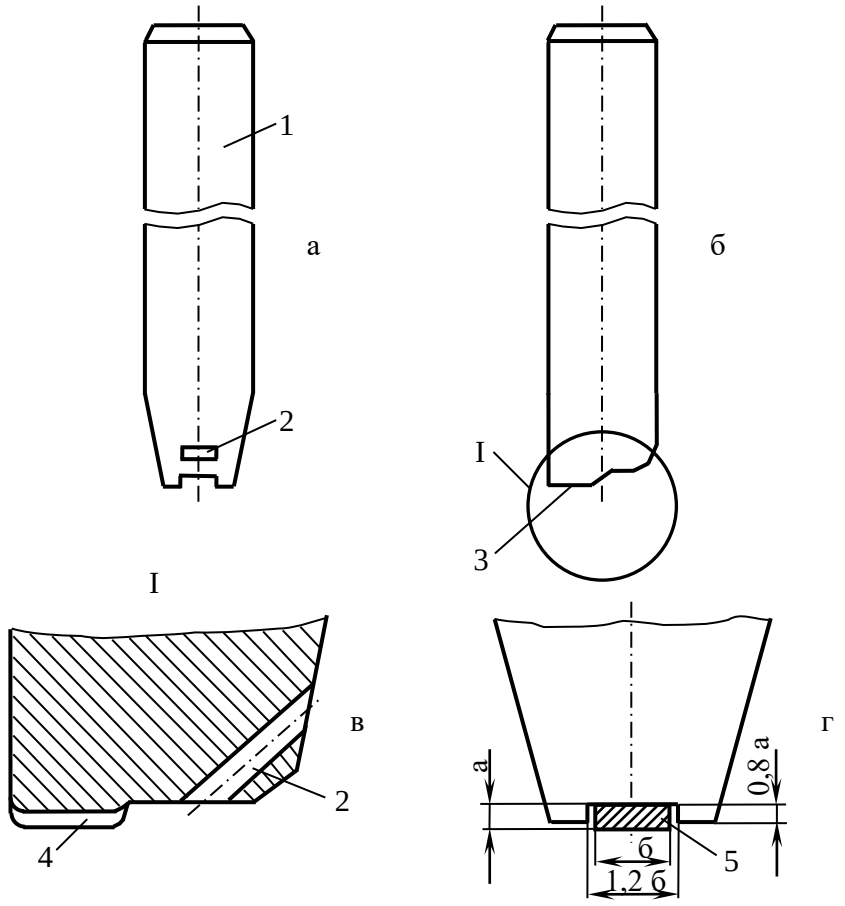


Рис. 2.6. Инструмент для сварки ленточных выводов СПП: а – вид со стороны подачи ленточного вывода; б – вид сбоку; в – рабочая площадка в разрезе; г – положение ленты в канавке инструмента перед сваркой: 1 – корпус инструмента; 2 – боковое отверстие; 3 – рабочая площадка; 4 – продольная канавка; 5 – привариваемая лента

Ширина канавки на рабочей площадке инструмента, составляющая до 1,2 ширины привариваемого вывода, обеспечивает центрирование вывода относительной контактной площадки при сварке.

Высота канавки, составляющая до 0,8 толщины вывода, обеспечивает необходимую деформацию вывода при сварке и исключает контактирование выступов инструмента с контактной площадкой.

Боковое отверстие для подачи привариваемого вывода, выполненное в виде прямоугольника обеспечивает перемещение вывода в зону сварки.

Инструмент работает следующим образом.

Привариваемая лента толщиной “а” и шириной “б” пропускается через боковое отверстие 2 инструмента таким образом, при котором конец ее располагается в пазу 4 рабочей площадки 3 и совмещается с контактной площадкой на кристалле. После сварки на кристалле инструмент перемещается вверх к сварке на корпусе.

При этом вывод протаскивается через боковое отверстие 2, деформируясь и образуя петлю. При небольшом превышении размеров отверстия 2 относительно размеров вывода происходит надрыв сварного соединения на кристалле. При значительном превышении надрывы исключаются, но ухудшается точность совмещения вывода относительно рабочей площадки инструмента и контактной площадкой на траверсе корпуса.

Выполнение бокового отверстия в форме прямоугольника с заданными размерами улучшает прохождение привариваемой ленты через отверстие, исключает надрывы сварного соединения при подъеме инструмента вверх после образования сварного соединения на кристалле и повышает точность подачи вывода под рабочую площадку инструмента к месту сварки на корпусе.

При сварке на кристалле или корпусе инструмент, имеющий продольную канавку на рабочей площадке высотой до 0,8 а и шириной до 1,2 б, где “а” – толщина, а “б” – ширина привариваемого вывода, обеспечивает центрирование вывода относительно контактной площадки и минимальную его деформацию, а также исключает контактирование выступов инструмента с контактной площадкой при сварке.

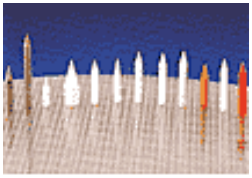
Сварка инструментом с продольной канавкой на рабочей площадке обеспечивает равномерную прочность сварного со-

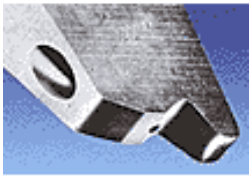
единения по всей площади взаимодействия ленточного вывода с контактной площадкой кристалла или корпуса.

Таким образом, использование предлагаемого инструмента для сварки по сравнению с существующими конструкциями имеет следующие преимущества: возможность сварки ленточных выводов; способствует минимальной деформации привариваемого вывода в зоне сварки; получение равномерной прочности сварных соединений по всей площади взаимодействия вывода с контактной площадкой кристалла или корпуса; исключает контактирование выступов инструмента с контактной площадкой при сварке.

Следует отметить, что использование данной конструкции инструмента для сварки ленточных выводов возможно на установке, которая обеспечивает получение качественных сварных соединений, особенно на кристаллах СПП. Для этой цели необходимо использование специального способа сварки, позволяющего разрушать и удалять оксидные пленки с соединяемых поверхностей, а также обеспечивать необходимую пластичность материалов в зоне сварного соединения.

2.5. Инструмент для монтажа выводов и кристаллов





Назначение:

1. Инструмент для монтажа выводов: присоединение золотой и алюминиевой проволоки или лент методом ультразвуковой, термозвуковой и термокомпрессионной сварки.

2. Инструмент для монтажа кристаллов: посадка кристаллов на эвтектику, клей и мягкие припои.

Основные технические характеристики

Диаметр проволоки, толщина ленты	от 0,012 до 0,8 мм
Размеры кристаллов	от 0,3×0,3 до 20×20 мм
Материал инструмента	карбид, вольфрама, рубин, нихром, керамика

Примечание: разработка и производство ОКБТЭМ-СО (г. Минск, Республика Беларусь)

Глава 3. Методы и устройства для оценки адгезии пленок к подложкам

Надежность работы различных устройств с пленочными элементами (ИС, микросборки, устройства на поверхностных акустических волнах и др.) помимо функциональных параметров пленок и подложек зависят от прочности адгезии пленок к подложкам.

Известно, что кристаллы ППИ имеют на своей поверхности десятки и сотни пленочных контактных площадок. Причем эти пленки имеют различную площадь и всевозможную конфигурацию. Для экспресс-контроля необходимы такие установки, которые позволили бы за короткое время дать оценку адгезионной прочности всех пленочных контактных площадок, расположенных на данной подложке.

В производстве многих ППИ последовательно наносят пленки различных материалов на подложку, т. е. используют многослойные тонкопленочные структуры. Адгезия пленок между собой, а также пленок с подложкой является основным параметром, определяющим качество изделий и их надежность. На адгезионную прочность пленок с подложкой влияют остаточные напряжения, пограничные слои, геометрия и физические параметры адгезива и подложки.

Для повышения качества ППИ необходимо оценивать адгезию пленок с подложкой на всех этапах технологического процесса производства: образования пленок, фотолитографии для получения заданной топологии рисунка, наращивания слоя проводника и монтажа кристаллов и внутренних выводов. Выбор оптимальных параметров производства тонкопленочных изделий осложняется отсутствием достаточно совершенной методики измерения адгезионной прочности.

Адгезия* – это связь или взаимодействие между поверхностями двух разнородных контактируемых тел. Различают адге-

* Не рекомендуется отождествлять понятие адгезии с адгезионной прочностью. При отрыве пленок определяется величина ад-

зию частиц и жидкости к твердым поверхностям и адгезию пленок и покрытий. Существует принципиальное отличие адгезии пленок от адгезии частиц и жидкости. Адгезия пленок количественно определяется методами, основанными на отрыве пленок. Усилие, необходимое для отрыва пленок, тратится не только на преодоление адгезии, но и на другие побочные явления. Таким образом, истинную адгезию пленки с подложкой существующими методами практически невозможно определить. Кроме того, величина адгезии не поддается точному расчету.

Мерой адгезионной прочности σ (Па) является удельное значение силы, измеренное при отрыве пленок

$$\sigma = P / S,$$

где P – сила, измеренная при отрыве (Н); S – площадь разрушенного контакта (мм^2).

Методы определения адгезионной прочности пленок с подложкой разделяются на две группы: разрушающие и неразрушающие. Следует отметить, что результаты оценки адгезионной прочности, полученные различными методами, в некоторых случаях имеют противоречивые результаты. В каждом конкретном случае нужно выбирать свои, наиболее приемлемые методы определения адгезионной прочности.

3.1. Неразрушающие методы

Проблема выбора оптимальных параметров производства тонкопленочных изделий осложняется отсутствием достаточно совершенной методики измерения адгезионной прочности. Измерение адгезионной прочности неразрушающими методами основано на корреляции между адгезионной прочностью пленки с подложкой и некоторыми физическими свойствами адгезионного соединения (электросопротивление, электроемкость, по-

---

гезионной прочности, которая не равна адгезии. Адгезионная прочность – это величина, измеряемая при нарушении связи между пленкой и подложкой

глощение и др.). Неразрушающие методы контроля в настоящее время мало применяются в промышленности из-за невысокой точности и неоднозначной зависимости силы сцепления от контролируемой физической величины. Разработка надежных методов неразрушающего контроля является особенно актуальной для всех отраслей промышленности, выпускающих изделия электронной техники. К основным методам неразрушающего контроля относят следующие: ультразвуковой, фотометрический, рентгеновский и метод измерения емкости.

Для измерения адгезии тонких пленок к подложке в системе подложка-пленка ультразвуковым методом возбуждают механические колебания ультразвуковой частоты до момента отделения пленки от подложки. С целью уменьшения погрешности измерения горизонтальные механические колебания ультразвуковой частоты прикладывают к пленке через прижатый металлический проводник. В данном случае при увеличении амплитуды возбужденных колебаний ультразвуковой частоты пленка захватывается металлическим проводником, в результате чего проводник и пленка перемещаются относительно поверхности подложки. Для реализации этого способа можно использовать промышленные установки для ультразвуковой микросварки проволочных проводников.

Известен неразрушающий способ измерения прочности сцепления тонких металлических слоев посредством акустического анализа. Способ отличается тем, что поверхностный бесконтактный нагрев осуществляется специальным элементом, который излучает акустический сигнал. При данной температуре элемента меньшая прочность сцепления вызывает появление более раннего и сильного звукового излучения. Используя калибровочные данные, рассчитывают по сумме импульсов и температуре элемента фактическую прочность сцепления пленки с подложкой.

Известен способ оценки адгезии пленки к подложке, при котором пленку освещают сначала в недеформированном, а затем в деформированном состоянии, и по изменению оптических свойств одного из элементов адгезионного соединения судят об

ацгезии пленки к подложке. С целью расширения вида исследуемых материалов пленку можно освещать светом с изменяющейся длиной волны.

Для определения степени адгезии электропроводящих покрытий на электропроводящем основании разработано устройство, которое снабжено высокочастотным нагревателем и измерителем температуры в зоне контроля. Контролируемый участок пленки с подложкой нагревают и одновременно возбуждают вихревые токи. В момент нарушения сцепления пленки с подложкой за счет сил Лоренца покрытие начинает колебаться, что фиксируется с помощью пьезоэлектрического преобразователя. Температура в зоне контроля измеряется в момент возникновения колебаний и служит количественной характеристикой степени адгезии пленки с подложкой.

Для определения адгезии проводящих или полупроводниковых пленок к подложкам разработано устройство (рис. 3.1), позволяющее проводить неразрушающий контроль. При испытании адгезионной прочности через исследуемый элемент подают электрический ток и производится регистрация низкочастотных флуктуаций напряжения детектором 5 и фильтром низких частот 6. Компенсация напряжения до нулевого значения осуществляется блоком 7. При воздействии лазерного луча на исследуемую пленку с подложкой пороговым элементов 9 производится регистрация превышения сигналов порогового уровня, пропорционального интенсивности низкочастотных флуктуаций, предшествующей нарушению адгезии. Блоком 10 производится отключение лазера 11 и фиксация значения энергии луча, соответствующего величине адгезии. Контроль низкочастотных флуктуаций и их изменение при воздействии усилий, нарушающих адгезию, позволяет определить не только момент нарушения адгезии, но и момент, предшествующий отрыву.

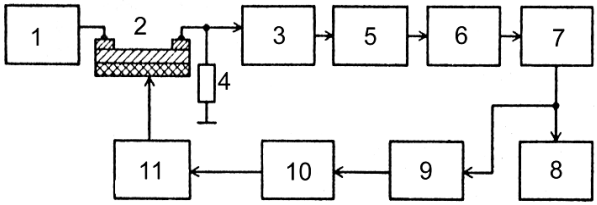


Рис. 3.1. Схема устройства для определения адгезии: 1 – источник постоянного напряжения; 2 – пленка с подложкой; 3 – низкочастотный широкополосный усилитель; 4 – балластная нагрузка; 5 – детектор; 6 – фильтр низкой частоты; 7 – блок первоначальной компенсации; 8 – индикатор; 9 – пороговый элемент; 10 – блок контроля; 11 – лазер

Известно устройство для испытания на адгезию токопроводящих пленок на диэлектрической подложке (рис. 3.2), которое содержит источник напряжения 1, электростатический зонд 2, привод осевого перемещения 3, держатель 4 для размещения подложки 5 с пленкой 6. Контроль адгезии осуществляется системой 7, представляющей собой измеритель электрической емкости между пленкой и зондом. Основным элементом данного устройства является электростатический зонд 2 в виде металлического стержня с отполированной до 14 класса чистоты рабочей поверхностью. При этом поверхность зонда покрывается оксидами металлов, например Al_2O_3, Ta_2O_5, TiO_2.

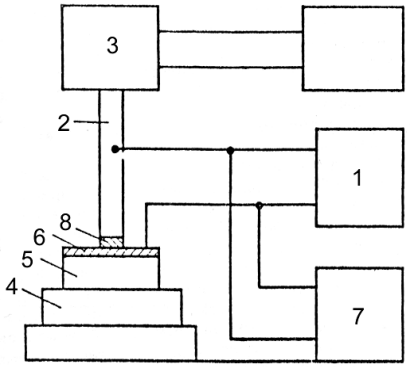


Рис. 3.2. Схема устройства для испытания на адгезию токопроводящих пленок на диэлектрической подложке

Принцип работы устройства заключается в создании электростатического поля, под действием которого возникают пондемоторные силы прижатия зонда к токопроводящей пленке. Если силы прижатия зонда к пленке превышают силу сцепления (адгезии) пленки с подложкой, то в результате приложения усилия отрыва произойдет отслоение пленки от подложки. Использование измерителя емкости в качестве контрольного устройства за отрывом пленки позволяет по шкале прибора фиксировать момент отрыва.

3.2. Разрушающие методы

К разрушающим методам контроля адгезионной прочности пленки с подложкой можно отнести следующие: нормального отрыва и отслаивания, скрайбирования, вдавливания специального индентора, воздействия электрического и магнитного полей, лазерный, а также центрифугирования, вибрации, истирания, многократного изгиба, термический и электрохимический.

Наиболее широкое распространение для производственных и экспериментальных целей получили следующие методы измерения адгезионной прочности пленок: нормального отрыва и отслаивания, а также скрайбирования.

Метод нормального отрыва является основным при оценке адгезионной прочности пленок. Различают две разновидности отрыва: метод одновременного отрыва, при котором сила отрыва направлена перпендикулярно к площади пленки, и метод последовательного отрыва (метод отслаивания), при котором сила отрыва направлена под углом к поверхности пленки. Отрыв обычно осуществляют с помощью штыря, цилиндра или проволоки, которые соответствующим образом прикрепляются к поверхности пленки.

Для определения адгезионной прочности хрупких покрытий толщиной до 150 мкм разработан способ, когда в подложке выполняют отверстие, в котором размещают штифт заподлицо с поверхностью подложки, а затем наносят на их общий торец ис-

пытуемое покрытие. Адгезионную прочность покрытия определяют по величине отрывающей нагрузки от штифта и по площади отрыва покрытия. Причем измеряют площадь боковой конической поверхности, образовавшейся в покрытии при отрыве.

Известны способ и устройство для определения адгезионной способности пленки, при этом на задней поверхности подложки, покрытой тонкой пленкой, вытравлено отверстие. Образец закрепляется на подложке микрозонда, при этом кончик стержня совмещается с центром пленки. С помощью специального привода стержень прижимают к пленке. Момент отрыва пленки определяется нагрузочным устройством. При этом с помощью микроскопа измеряется радиус круговой части пленки, оторванной от материала подложки.

В некоторых случаях для измерения адгезионной прочности многослойного материала на поверхности покрытия размещают форму, в которую заливают припой для формирования держателя. Цилиндрический участок отливки захватывают цангой прибора и прикладывают растягивающее усилие в направлении, перпендикулярном к этим слоям.

Разработан способ испытания прочности связи покрытия с подложкой, при котором подложка устанавливается неподвижно в заданном направлении. Затем к покрытию с помощью специального захвата прикладывают возрастающее усилие, измеряя величину этого усилия и возникающую в результате этого деформацию. Испытание прекращают в том случае, когда скорость деформации в функции возрастающего усилия начинает уменьшаться.

Для определения прочности на отрыв контактных площадок печатной платы разработано специальное приспособление, которое можно устанавливать на разрывную машину модели РМУ – 0,05.

Известен способ контроля адгезии пленки к подложке, по которому в пленке создают решетку надрезов рабочим инструментом и по площади или количеству отслоившихся ячеек пленки оценивают адгезию. Для увеличения достоверности контроля решетку надрезов можно создавать методом ультразвукового

резания, используя при этом инструмент с решетчатой формой рабочей поверхности концентратора.

Для сокращения времени при испытании группы пленок используют трафарет, с помощью которого наносят на подложку несколько одинаковых, рядом расположенных пленок. Пленки могут иметь форму круга, квадрата, элементов микросхем и т. п. Затем подложку с нанесенными на нее пленками погружают в активную жидкую среду и определяют время отслаивания заданного количества пленок. Объективным показателем качества адгезии считается время отслоения половины одновременно испытуемых пленок от их общего количества.

Сцепление пленки с подложкой также определяют путем отделения наклеенной на поверхность пленки клейкой полосы. С помощью специального устройства клейкая полоса отрывается через промежуточно включенный динамометр под определенным углом к поверхности пленки и фиксируется усилие, показанное динамометром.

Адгезию между изоляционными и металлическими слоями в различных приборах на полупроводниковых кристаллах осуществляют с помощью специального измерительного участка. Измерительный участок, имеющий размеры кристалла, может быть сформирован совместно с рабочим кристаллом на пластине. В процессе испытания на отслаивание под углом 90° слои испытательного участка последовательно отделяют вдоль непрерывной поверхности раздела.

Для оценки прочности сцепления гальванических покрытий применяют также метод нагрева согласно ГОСТ 9.302-79. Адгезию никелевых покрытий на сплавах меди контролируют по вспучиванию пленок или отслаиванию после нагрева до 250 °С и последующего охлаждения на воздухе. Установлено, что нагрев до такой температуры с охлаждением на воздухе не всегда выявляет покрытия с низкой прочностью сцепления. Для этих целей рекомендуется использовать более высокие температуры нагрева и скорости охлаждения.

Вдавливание индентора иногда осуществляют в пластичный металлический материал на некотором расстоянии от края

пленки. Отпечаток формуют таким образом, чтобы в результате смещения основной материал образовывал выпуклость на краю пленки. Прочность сцепления характеризует состояние покрытия на этом утолщении.

Для повышения точности и наглядности при определении начала образования трещины в покрытии в последнее можно вдавливать два индентора с различной конусностью.

Для оценки адгезии тонких металлических пленок на стекле, кварце и других прозрачных материалах методом царапаний закругленной иглой разработана специальная приставка к микроскопу МИМ-8М. Данное устройство (рис. 3.3) позволяет вести микроскопическое наблюдение зоны царапаний со стороны прозрачной подложки в процессе испытания. Испытания на пленках меди и алюминия, нанесенных термическим испарением на стекла, показали большую точность в определении нагрузки при отслаивании покрытий. Следует отметить, что данная методика неприменима для оценки адгезии между отдельными слоями при многослойной металлизации.

При определении адгезионной прочности пленок с подложкой методом царапаний необходимо учитывать промежуточный слой загрязнений между пленкой и подложкой. Данный слой существенно ослабляет сопротивляемость системы пленка – подложка внешним нагрузкам. Например, при исследовании адгезионной прочности серебряных пленок, нанесенных на корундовые подложки, наличие на границе раздела промежуточного слоя загрязнений приводит к искажению количественной информации о степени адгезионного взаимодействия системы. Рекомендуется перед напылением пленок проводить обработку подложек в тлеющем разряде, что приводит к заметному снижению уровня поверхностных загрязнений подложки.

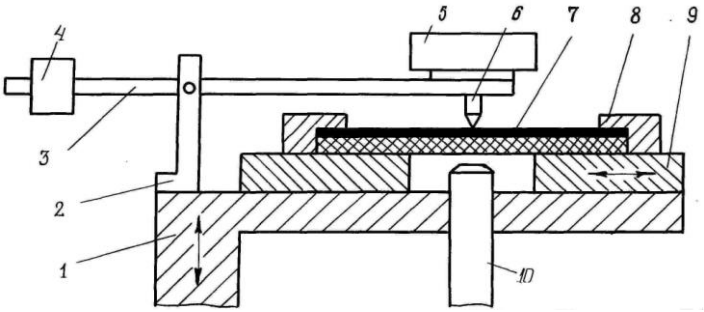


Рис. 3.3. Схема приставки к металлографическому микроскопу МИМ-8М для наблюдения следов царапаний в процессе испытания: 1 – основание столика микроскопа; 2 – стойка; 3 – коромысло; 4 – противовес; 5 – груз; 6 – игла; 7 – образец; 8 – держатель образца; 9 – столик микроскопа; 10 – объектив

Для измерения адгезии тонких пленок к ситалловым подложкам методом царапаний иглой разработана специальная установка. Адгезия определяется путем автоматического измерения критической нагрузки, необходимой для получения чистого следа на подложке. Погрешность при измерении адгезии не превышает 10 %.

Для контроля адгезионных свойств покрытий методом царапания разработан прибор, особенностью которого является то, что поперечное сечение острия царапающего элемента образует острый угол с направлением его перемещения, а его осевая линия наклонена в этом направлении.

Известен способ определения адгезионной прочности коммутационных сплавов с термоэлементами, при котором через соединение пропускают электрический ток таких величины и направления, чтобы вследствие эффекта Пельтье соединение нагревалось или охлаждалось до требуемой температуры. При каждом значении температуры к одной из сторон соединения прикладывают отрывающую нагрузку, в результате чего получают зависимость адгезионной прочности покрытия от температуры. Это позволяет определять адгезионную прочность коммутационных сплавов с термоэлементами при режимах эксплуатации изделий (рис. 3.4).

Для контроля адгезии пленки к подложке фиксируют измерение в момент отрыва ее электросопротивления на участке длиной не более 10 мм. В качестве отрывного элемента используется электрод с диэлектрическим покрытием на поверхности, предназначенной для контактирования с пленкой, а его крепление к пленке осуществляется путем подключения электрода к одному полюсу источника постоянного тока, а исследуемой пленки – к другому (рис. 3.5).

Известен способ определения адгезии металлических пленок к диэлектрическому основанию, при котором через пленку пропускают ток, при этом основание с пленкой находится в зоне действия магнитного поля. Зафиксировав величину тока и напряженность магнитного поля в момент отрыва пленки от подложки, расчетным путем определяют величину адгезии.

Снизить трудоемкость определения адгезионной прочности токопроводящих покрытий к подложкам можно путем размещения подложки с покрытием между двумя электродами в поле действия электрического разряда. По величине пятна разрушенного покрытия судят об адгезионной прочности пленок. Особенностью данного способа является то, что подложку размещают в вакуумной камере, корпус которой используют в качестве положительного электрода, а покрытие электрически соединяют с отрицательным электродом. В качестве воздействующего на покрытие разряда используют электродуговой разряд.

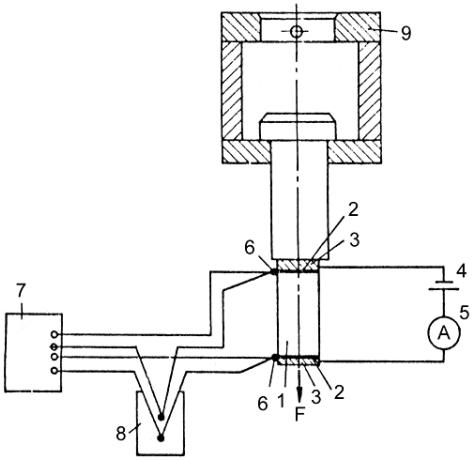


Рис. 3.4. Схема для определения адгезионной прочности покрытия: 1 – подложка; 2 – коммутационный сплав; 3 – медные пластины; 4 – источник постоянного тока; 5 – амперметр; 6 – термопара; 7 – вольтметр; 8 – сосуд Дьюара; 9 – захват разрывной машины

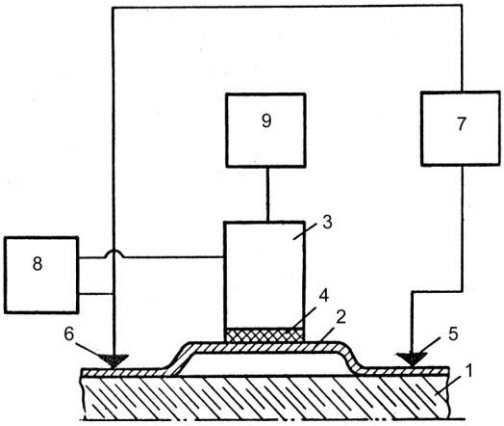


Рис. 3.5. Схема измерения адгезии металлической пленки к диэлектрической подложке: 1 – диэлектрическая подложка; 2 – металлическая пленка; 3 – электростатический зонд; 4 – оксидный слой; 5, 6 – прижимные контакты; 7 – микрометр; 8 – источник напряжения; 9 – динамометр

Разработана установка для определения электроадгезионной прочности сцепления токопроводящих покрытий с полупроводниковыми подложками (рис. 3.6). Регистрирующее

устройство показывает электроадгезионную прочность токопроводящего покрытия с полупроводниковой подложкой в зависимости от величины приложенного напряжения.

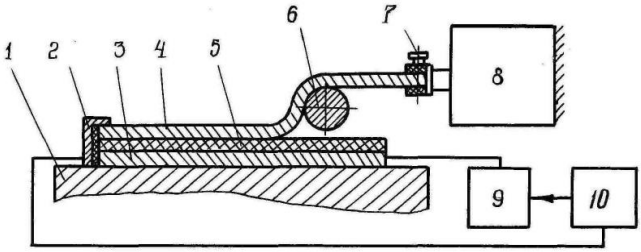


Рис. 3.6. Установка для определения прочности сцепления покрытия с подложкой: 1 – основание; 2 – съемный электрод; 3 – электрод; 4 – покрытие; 5 – полупроводниковая подложка; 6 – ролик; 7 – зажим; 8 – регистрирующее устройство; 9 – коммутатор; 10 – источник электрического напряжения

Для определения адгезии тонких проводящих пленок известен способ, по которому между покрытием на подложке и дополнительным электродом, расположенным на расстоянии, исключающем электрический пробой между ними, прикладывают возрастающее по амплитуде напряжение. Об адгезии судят по величине напряженности электрического поля между электродами в момент отрыва токопроводящего покрытия от подложки.

Адгезию электропроводящей пленки к диэлектрической подложке определяют также путем размещения с противоположной стороны диэлектрической подложки контрольного электрода. Между пленкой и электродом прикладывают переменное электрическое напряжение, повышая амплитуду от нуля до напряжения ионизации. Величина ионизации зависит от неоднородности переходного слоя между металлической пленкой и диэлектрической подложкой, т. е. от качества адгезии. На рис. 3.7 представлена схема реализации данного способа. В качестве электрода можно использовать электролит, смачивающий подложку. Исследования, проведенные на образцах ситалла с напыленными на них металлическими покрытиями, показали возможность использования данного способа в технологии производства изделий электронной техники.

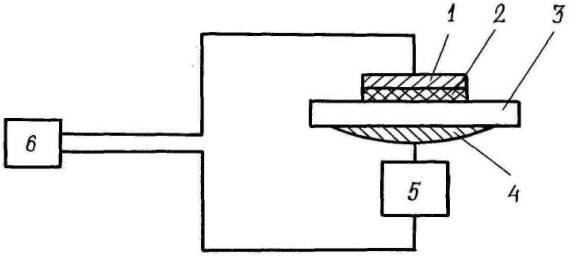


Рис. 3.7. Устройство для определения адгезии электропроводящей пленки к диэлектрической подложке: 1 – пленка; 2 – переходной слой; 3 – подложка; 4 – электрод; 5 – измеритель ионизации; 6 – источник питания

Известен способ контроля адгезии тонких металлических пленок к диэлектрической подложке, при котором подложку с пленкой размещают в электромагнитном поле сверхвысокой частоты. При этом способе используется разница волновых сопротивлений металлической пленки и диэлектрической подложки. Электромагнитная волна, пройдя пленку, отражается от поверхности диэлектрической подложки, в результате чего на границе раздела металл – диэлектрик возникают пондеромоторные силы, которые и отрывают пленку от подложки. Частота электромагнитного поля варьируется в пределах 0,6-40000 ГГц. Адгезию тонкой металлической пленки к диэлектрической подложке определяют в момент отрыва по величине напряженности электромагнитного поля.

В других случаях диэлектрическую подложку с пленкой располагают в электромагнитном поле сверхвысокой частоты таким образом, чтобы поверхность пленки находилась со стороны источника электромагнитного поля. Между источником поля и пленкой размещают поглотитель мощности электромагнитного поля (например дистиллированную воду) и прикладывают к источнику электромагнитного поля постоянное напряжение сверхвысокой частоты. Уменьшают объем поглотителя вследствие испарения воды до тех пор, пока не произойдет отслоение пленки. Измерением объема поглотителя мощности электромагнитного поля в момент отслоения пленки от подложки опреде-

ляют адгезионную прочность сцепления металлической пленки с диэлектрической подложкой.

С целью повышения точности контроля качества адгезии покрытий с подложками размещают исследуемые образцы в зоне действия полей токов высокой частоты и ультразвуковых колебаний и нагревают локальные участки соединения пленки с подложкой. При взаимодействии электромагнитной волны с ультразвуковой волной в соединении проявляется эффект магнитострикции. При соответствующих режимах происходит механическое разрушение слоя покрытия (трещинообразование, отслоение или вспучивание). Соединение покрытие-подложка считается годным в случае отсутствия на поверхности покрытия вышеуказанных дефектов.

Повысить точность определения адгезии металлических пленок к поверхности подложки, выполненной из оптически прозрачного материала, можно с помощью специально разработанного устройства. Для этого подложку с пленкой помещают в ванну с гиротропной жидкостью, возбуждают в этой жидкости ультразвуковые колебания концентратором до возникновения в металлической пленке зон разрушения. Появление и характер зон разрушения регистрируют при помощи потока поляризованного излучения от источника, проходящего через подложку, зоны разрушения пленки и гиротропную жидкость и падающего на зеркальную поверхность концентратора. Для определения сил сцепления металлической пленки с полимерной подложкой разработана специальная установка, состоящая из трех блоков: акустического, гидравлического и регистрационного. Интенсивные ультразвуковые колебания, проходя через жидкость, вызывают кавитационные явления большой разрушительной силы, которые и отрывают пленку от подложки. Величину адгезии рассчитывают по числу кавитационных пузырей в единице объема, давлению, создаваемому пузырями при их захлопывании, и количеству снятого с пленки металла.

Для контроля адгезии металлической пленки к диэлектрической подложке в пленке выполняют сквозные прорези по спирали с непрерывно уменьшающимся шагом до отделения пленки

от подложки. С целью повышения точности определения адгезии прорези необходимо наносить по логарифмической сходящейся или расходящейся спирали, начало и конец которой переходят в окружности. Адгезию контролируют измерением емкости или электросопротивления участка пленки между окружностями.

Используется метод определения адгезии тонкой пленки к подложке, в котором используется импульсное излучение (сфокусированный электронный или лазерный луч), направляемое на подложку со стороны пленки до ее расплавления. В этом случае величину адгезии определяют по размерам оплавленной зоны, т. к. между размером оплавленной зоны и адгезией пленки с подложкой существует тесная корреляционная связь. На рис. 3.8 показана зависимость площади оплавления пленок алюминия электронным лучом диаметром 0,5 мм с энергией 5·10 Вт/см в импульсе длительностью 1 мс от ее адгезии к подложке.

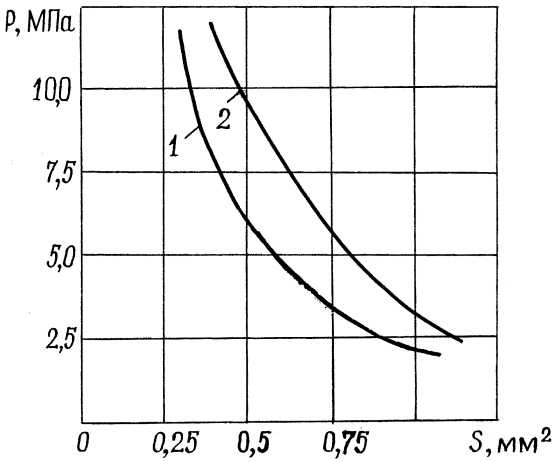


Рис. 3.8. Взаимосвязь площади оплавленной зоны пленки алюминия с ее адгезией к подложке из кремния (1) и моноокиси кремния (2)

С целью повышения точности при контроле вакуумнонапыленных пленок Cr, Cu, Au и др. нагрузку создают путем сканирования непрерывным лучом лазера, имеющим плотность

мощности от 10^5 до 10^6 Вт/см^2 и скорость сканирования, равную скорости распространения звука в материале пленки.

Для ускорения контроля адгезии пленок к подложке на участках протяженностью не более 100 мкм воздействуют на пленку с помощью не менее двух одинаковых источников разрушения в виде лазеров. Причем источники разрушения располагают один от другого на расстоянии l, определяемом из условия

$$l \geq \sqrt{\alpha t},$$

где α – коэффициент теплопроводности материала подложки; t – длительность воздействия источников разрушения.

При размещении источников разрушения на расстоянии l меньше указанного пленка расплавляется при наложении импульсов один на другой из-за отсутствия достаточного теплоотвода в материал подложки. Для количественной оценки величины адгезии сравнивают минимальные расстояния, при которых разрушается область пленки между двумя оплавленными зонами.

Прочность сцепления пленки с подложкой можно определять по коэффициенту отражения теплового потока от поверхности покрытия. Для этого на поверхность покрытия воздействуют тепловым потоком, например лучом лазера. Сравнивают коэффициент отражения с таким же коэффициентом, измеренным на эталонном соединении, и по результатам сравнения судят о степени адгезии пленки с подложкой. Качество сцепления пленки с подложкой тем лучше, чем больше величина коэффициента отражения теплового потока от поверхности покрытия контролируемого соединения совпадает с величиной коэффициента отражения теплового потока эталонного образца. Разработан образец для определения прочности сцепления покрытия с подложкой при отслаивании, условия изготовления которого позволяют приблизиться к технологии монтажа ИС с планарными выводами на печатной плате. В этом случае на поверхности подложки формируют ряд параллельных полосок покрытия разной ширины. Затем поверхность покрытия сканируют лазерным лучом и формируют строчную развертку лазерного луча. Адге-

зионную прочность определяют по тепловому воздействию в данных участках пленок.

3.3. Влияние технологических факторов на адгезионную прочность пленок с подложкой

Известно, что напряженное состояние в пленках может изменить адгезионную прочность. Внутренние механические макронапряжения в тонких пленках делятся на собственные и термические. Собственные напряжения появляются в процессе формирования пленок, а термические возникают из-за различия в температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР пленки и подложки.

Напряжения в металлических пленках можно исследовать по формуле Стоуни:

$$\sigma = \frac{1}{6} \cdot \frac{E}{1-\gamma} \cdot \frac{d^2}{t} \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right),$$

где E – модуль Юнга кремниевых подложек; d – толщина подложки; γ – коэффициент Пуассона подложки; t – толщина металлического покрытия; R_1 и R_2 – радиусы кривизны подложки до и после осаждения металлического покрытия.

Подложка изгибается, если пленка в напряженном состоянии осаждается на тонкую подложку. Поверхность пленки окажется вогнутой в случае растягивающих напряжений, а сжимающие напряжения придают пленке выпуклый вид. Растягивающие напряжения считают положительными, сжимающие – отрицательными.

Если напряжения в пленке не вызывают деформации подложки, то термические напряжения в сплошной металлической пленке определяют по формуле

$$\sigma_T = \frac{E}{1-\mu} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_1 - T_2),$$

где E, μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона металлической пленки; α_1 и α_2 – термические коэффициенты линейного

расширения соответственно металлической пленки и подложки; T_1 – температура осаждения; T_2 – рабочая температура.

Для измерения внутренних напряжений в тонких пленках существуют различные методы. Наиболее широко применяются механические методы, основанные на измерении деформации в пленке и подложке, вызванной внутренними напряжениями, а также методы рентгеновской или электронной дифракции.

Определена зависимость внутренних механических макронапряжений в пленках алюминия различной толщины. Величина напряжений σ вычислялась по формуле Стоуни с учетом коэффициента Пуассона

$$\sigma = \frac{E_s h_s^2 \delta}{3(1-\mu_s) l_s^2 h_f},$$

где E_S и μ_S – модуль Юнга и коэффициент Пуассона для подложки; l_s и h_s – длина и толщина подложки; δ – отклонение свободного конца подложки; h_f – толщина пленки.

Алюминиевые пленки наносились на пластины размером 60×4×0,15 мм из покровных стекол. Макронапряжения в пленках определялись по изгибу консольно закрепленной пластины. На рис. 3.9 представлены зависимости величины макронапряжений в конденсате от толщины пленки алюминия. Макронапряжения имеют максимум при толщине пленки алюминия 100-130 нм.

Для исследований соединений с близкими ТКЛР материалов покрытия и подложки разработан способ определения качества адгезии. При этом соединение подложка – покрытие нагревают и выдерживают при максимальной температуре нагрева. Затем воздействуют на соединение охлаждающей жидкостью в виде капель на один и тот же участок со стороны покрытия. При контактировании капли с пленкой на данном участке возникают дополнительные термические напряжения, которые приводят к нарушению адгезии пленки с подложкой. О качестве сцепления покрытия с подложкой судят по числу капель, приводящих к отслоению или нарушению сплошности покрытия.

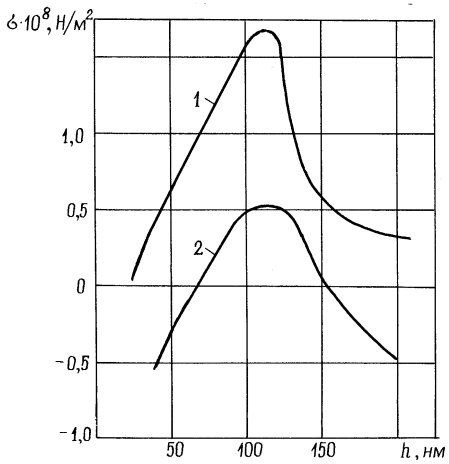


Рис. 3.9. Зависимость величины макронапряжений в конденсате от толщины пленки алюминия (скорость напыления 4 нм/с): 1 – ТС = 373 К; 2 – ТС = 298 К

С целью сохранения свойств материала покрытия при испытании натурных деталей разработан следующий способ. В покрытие имплантируют ионы, идентичные по химическому составу материалу покрытия. В результате имплантации ионов через поры покрытия в пленках возникают внутренние напряжения. При соответствующей дозе облучения внутренние напряжения превышают прочность сцепления покрытия с основой, что приводит к отрыву пленки от подложки. О прочности сцепления судят по дозе облучения ионами.

Основными технологическими факторами, влияющими на качество адгезии пленок, являются: обработка подложек перед нанесением, температура подложек, скорость нанесения пленки и ее толщина, атмосфера остаточных газов в вакуумной камере в процессе нанесения.

На прочность сцепления металлических пленок с подложкой существенное влияние оказывает способ обработки поверхности подложки перед нанесением пленок. Проведено сравнительное экспериментальное исследование влияния различных способов подготовки поверхности боросиликатных стекол на адгезию к ним вакуумных конденсатов индия (рис. 3.10). Плен-

ки индия наносились термическим способом. Их толщина составляла в среднем 0,3 мкм. Адгезия измерялась методом отрыва штифтов, которые приклеивались к пленке эпоксидной смолой. Делается вывод, что адгезия пленок индия к ювенильной поверхности стекол определяется в основном силами Ван-дер-Ваальса. При обработке стекла в газовом пламени и в тлеющем разряде увеличение адгезии связано с модификацией поверхности.

Ультразвуковые колебания, вводимые в подложку в процессе вакуумного напыления тонких металлических пленок алюминия, меди, серебра, влияют на адгезию к стеклянным подложкам. Напыление пленок проводили при комнатной температуре подложек без дополнительного нагрева при давлении в вакуумной камере $130 \cdot 10^{-5}$ Па. Мощность ультразвуковых колебаний, вводимых в подложку, составляла 0,14; 0,35; 0,67 Вт/см^2. Установлено, что адгезия пленок к подложке возрастает с увеличением мощности ультразвуковых колебаний. Отмечается, что ультразвуковые колебания в неодинаковой степени увеличивают адгезию разных материалов. Например, при мощности колебаний 0,67 Вт/см^2 адгезионная прочность пленок серебра увеличилась по сравнению с адгезионной прочностью этих пленок, полученных в обычных условиях, примерно в 2 раза, пленок меди в 5 раз, пленок алюминия в 10 раз. При получении пленок алюминия применение ультразвуковых колебаний может исключить операцию нанесения подслоя хрома, используемого для увеличения прочности сцепления пленок.

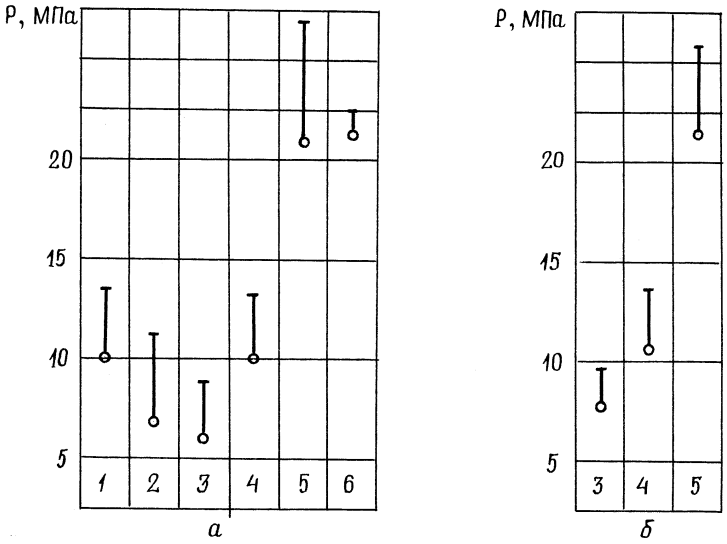


Рис. 3.10. Диаграммы результатов измерения адгезии пленок индия к стеклу С49-2(а) и предметному стеклу (б) в зависимости от способа обработки поверхности: 1 – скол в парах напыляемого металла; 2 – скол на воздухе: 3 – промывка спиртом; 4 – газопламенная обработка; 5 – обработка в тлеющем разряде (для С49-2 – скол на воздухе); 6 – обработка в тлеющем разряде (скол в вакууме)

На адгезию металлических пленок к диэлектрическим подложкам в значительной степени влияет ионизирующее излучение. Известна зависимость адгезионной прочности пленок серебра и меди толщиной 25-110 нм, нанесенных на стеклянные и монокристаллические рубиновые подложки испарением в вакууме, от дозы облучения. Пленки облучались пучком электронов энергией $16 \cdot 10^{-13}$ Дж или протонов энергией $56 \cdot 10^{-16}$ и $1{,}6 \cdot 10^{-13}$ Дж. Установлено, что облучение электронами до дозы $2{,}4 \cdot 10^{-12}$ эл/см^2 приводит к уменьшению адгезии почти в два раза, а облучение максимальной дозой $5 \cdot 10^{15}$ эл/см^2 не приводит к дальнейшему уменьшению адгезии. С увеличением толщины пленок наблюдается тенденция к уменьшению адгезионной прочности пленок с подложками.

Адгезия тонких пленок к подложкам существенным образом зависит от материала и толщины подслоя. В современных

ГИС в качестве подложек часто используется ситалл, а контактные проводящие дорожки изготавливаются из меди. В качестве подслоя между подложкой и медной пленкой наибольшее распространение получил ванадий. Исследовалось влияние времени напыления (толщины) подслоя ванадия на адгезию пленки меди к ситаллу. На основании полученных результатов определено оптимальное время напыления подслоя ванадия 35-45 с. При этом толщина подслоя ванадия составляет 5-10 нм с удельным поверхностным сопротивлением ρ = 2 кОм/□. Уменьшение адгезии медной пленки к ситаллу при большом времени напыления ванадия объясняется загрязнением паров ванадия молибденом из молибденовых тиглей.

Адгезионная прочность медных пленок к полиимидной ленте зависит от материала подслоя и видов обработки ленты перед напылением пленок. Наибольшая величина адгезии нанесенных пленок меди с подслоем хрома наблюдалась на полиимидной ленте, обработанной горячей хромовой смесью на основе серной кислоты. Адгезионная прочность пленок меди к полиимидной ленте в 4-6 раз выше для структуры с подслоем титана по сравнению с подслоем меди.

Рассмотрена адгезия пленок меди с подслоем хрома, нанесенных методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме на подложки из керамики 22ХС. Подложку перед загрузкой в вакуумную камеру обрабатывали в концентрированной хромовой смеси и промывали в дистиллированной воде с последующей сушкой в термошкафу.

Установлено, что четко выраженной зависимости адгезии от толщины подслоя хрома в интервале 0,08-0,3 мкм не обнаружено (рис. 3.11). В то же время адгезионная прочность медных пленок с подслоем хрома при повышении температуры подложки улучшается. Наибольшего значения адгезия достигает при температуре керамики 22ХС 570-620 К.

Повысить адгезию пленок серебра к кварцу, а также к стеклам К8 и ЛК5 возможно за счет нанесения на подложку подслоя пленки двуокиси кремния с последующей термообработкой посеребренных поверхностей. Обработка поверхностей

деталей из кварца и стекла ЛК5 перед химическим серебрением 0,2 %-ным раствором хлористого палладия с последующим увеличением температуры прогрева в 3-4 раза повышает адгезию пленок серебра.

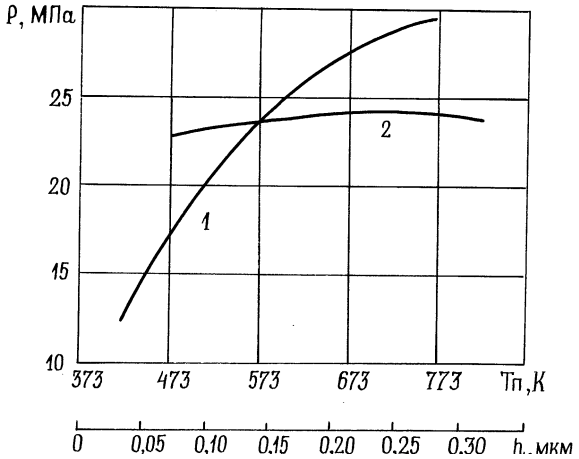


Рис. 3.11. Зависимость адгезии подслоя хрома к керамике 22ХС от температуры подложки (1) и толщины подслоя хрома (2)

В некоторых приборах электронной техники широко применяются щелочно-галоидные кристаллы (ЩГК) NaF, LiF, NaCl, KCl, KBr, KJ, а также инфракраснопрозрачные кристаллы на основе таллия Tl, TlJ, TlCl. Металлические пленки наносятся термическим испарением в вакууме со скоростью напыления металла 4 нм/с при температуре подложки, близкой к комнатной. Толщина пленок составляла 0,5 мкм. Адгезионная прочность пленок определялась методом нормального отрыва пленки от подложки. Данные по адгезионной прочности системы металлическая пленка – кристаллическая подложка представлены в табл. 3.1 и 3.2. Адгезионную прочность пленки алюминия к кристаллам NaCl, KCl, KBr, KJ измерить не удалось, так как происходило отслаивание конденсата алюминия от подложки сразу же после извлечения образцов из вакуумной камеры.

Табл. 3.1. Адгезионная прочность системы металл – ЩГК, МПа

металл	NaF		LiF		NaCl	
	вакуум	воздух	вакуум	воздух	вакуум	воздух
Cu	6	5,5	9	4	6	4
Ag	–	5	6	4	5	4
Au	–	–	5	4	4	2
Al	–	14	18	11	отслоение пленки	
Jn	11	6,5	11	13	вырыв	8
Sn	5	5	4	5	5	5
Pb	–	–	4	3	4	4

Табл. 3.2. Адгезионная прочность системы металл – (TlBr – TlJ), МПа

металл	вакуум (срез)	воздух	
		срез	полировка
Cu	24	5	10
Ag	27	10	10
Au	27	8	10
Zn	13	6	–
Cd	36	10	10
Al	отслаивание	отслаивание	отслаивание
Jn	18	14	13
Sn	6	–	–
Pb	29	–	–
Ni	22	10	16
Co	22	10	10
Fe	23	12	17
Cr	14	–	отслаивание
Ti	18	–	13
Mn	химическая реакция		
Mg			

Для всех металлов, кроме алюминия, и подложек разрушение происходило по границе металлической пленки с оксидной подложкой. Для пленок алюминия разрушение происходило по клею и лишь в некоторых случаях наблюдался частичный адгезионный отрыв пленки от кварца.

3.4. Контроль адгезии в микросварных соединениях

При микросварке выводов к пленкам соединение материалов происходит на активных центрах поверхности твердого тела, которыми являются микровыступы и дефекты кристаллической решетки. Поэтому соединение образуется в тонком поверхностном слое за счет хемосорбционной связи, которая является частным случаем адгезии материалов.

Для контроля качества адгезии материалов в микросварном соединении проводников с плоскими площадками разработан способ, заключающийся в приложении разрушающего механического усилия отрыва путем натяжения за проводник с последующим анализом характера разрушения под микроскопом. При разрушающем испытании микросварных соединений проволоки с контактной площадкой на кристалле или корпусе ППИ возможны различные виды разрушений, наиболее характерными из которых являются: отслоение деформированного участка проволоки от контактной площадки; вырыв части пленки вместе с деформированной проволокой; частичный отрыв деформированной проволоки от поверхности контактной площадки; обрыв по утоньшению в месте максимальной деформации проволоки; обрыв по проволоке. При разрушениях с отслаиванием проволоки на поверхности пленок алюминия видны характерные линии сдвига, а на поверхности золотого покрытия – зоны объемного взаимодействия проволоки с пленкой.

В данном разделе рассматривается адгезия проволочного вывода с контактной площадкой ППИ после образования сварного соединения.

Известен способ контроля адгезии материалов в микросварном соединении, заключающийся в том, что к сварному соединению прикладывают калиброванную механическую нагрузку отрыва путем натяжения за проводник и регистрируют изменение падения электрического напряжения на сварном соединении. Полученные данные сравнивают с результатами эталонных

образцов. К основному недостатку данного способа относится высокая трудоемкость при определении адгезии, так как требуется последовательное закрепление каждого микропровода в зажиме перед натяжением. Ввиду микронных размеров выводов эксперименты проводятся с использованием микроскопа и прецизионной системы манипулирования.

Повысить точность контроля адгезии в микросварных соединениях с одновременным снижением трудоемкости процесса возможно, используя известные способы. Например, нагрузку прикладывают путем обволакивания сварного соединения материалом, адгезия которого к последнему соизмерима с адгезией материалов в сварном соединении, и ТКЛР α находится в пределах $3\alpha_1 < \alpha < 10\alpha_1$, где α_1 – меньший из ТКЛР материалов сварного соединения. Обработанные таким образом сварные соединения подвергают термообработке при температуре выше 223 К, но не превышающей температуру выгорания обволакивающего материала. Лучше всего обволакивание проводить материалом на эпоксидной основе. Адгезию материалов в микросварном соединении определяют путем регистрации падения электрического напряжения на контролируемом соединении по сравнению с эталонным образцом.

Следует отметить, что данный способ может быть использован только для сравнительной оценки адгезии материалов в микросварных соединениях, полученных на разных сварочных установках или при различных режимах сварки. Это объясняется тем, что при нанесении обволакивающего материала изменяется конструкция изделия и, кроме того, обволакивающие материалы изменяют свои свойства при длительной работе приборов.

Известно, что в реальном микросварном соединении отношение площади зоны адгезии (соединения) материалов к площади зоны деформации присоединяемого проводника составляет не более 0,6 и адгезия материалов происходит по вершинам деформированных микронеровностей, т. е. более 40 % площади деформированной части проводника составляют поры

и пятна – «непровары» (места контакта элементов сварного соединения, в которых они не имеют адгезии).

В процессе изготовления микроэлектронных устройств и их работы (хранения) происходит конденсация влаги на элементах сварного соединения, а за счет капиллярного эффекта адсорбированная влага попадает в поры микросварного соединения. Так как при сварке происходит разрушение оксидных пленок на соединяемых поверхностях и затруднен доступ кислорода в объем сварного соединения, то на поверхности микропор образуется тонкая и неплотная оксидная пленка. Поэтому попадание атмосферной влаги в микропоры приводит к коррозии микросварных соединений, особенно в случае контактирования материалов, имеющих большую разность электрохимических потенциалов.

Для обеспечения высокой надежности микроэлектронных устройств целесообразно проведение 100 %-ного контроля микросварных соединений по площади и прочности соединения (адгезии) материалов в сварном соединении. Причем необходим оперативный метод контроля, не разрушающий микросварных соединений и не изменяющий конструкции микроэлектронных устройств (недопустимо введение в конструкцию покрытия органических материалов, так как они склонны к старению при температурных обработках).

Контроль контактов в процессе изготовления микроэлектронных устройств при одновременном повышении надежности микросварных соединений можно проводить, применяя способ, при котором поры контролируемого соединения заполняют деионизованной водой, удельное сопротивление которой не ниже 3 МОм·см, затем охлаждают образец до замерзания последней, а после замера образец нагревают до 353-363 К и выдерживают до полного удаления рабочего материала из пор микросварного соединения. Дополнительным отличием способа является охлаждение при температуре 259-262 К, контрольный замер после нагрева до 269-272 К, а также выдержка при температуре 353-363 К в течение 30-60 мин. При замерзании воды, находящейся в порах микросварного соединения, происходит изменение объе-

ма вещества, что создает механическое напряжение отрыва, разъединяющее непроваренные части элементов сварного соединения. Удельное сопротивление воды выше 3 МОм·см позволяет вносить минимальную погрешность, легко учитываемую при замерах падения напряжения, а контактирование сварного соединения с такой средой не вызывает электрохимического разрушения последнего.

Выдержка при температуре 353-363 К в течение 30-60 мин позволяет получить надежную оксидную пленку на поверхности микропор и полностью удалить из них деионизованную воду. Время выдержки зависит от размеров микросварного соединения. Охлаждением до 262 К и последующим нагревом до 272 К создают механическое напряжение отрыва за счет разницы в ТКЛР материалов сварного соединения и льда.

Нанесение воды осуществляют методом пульверизации или дозатором, причем объем наносимой пленки рассчитывают, исходя из условия получения на поверхности слоя толщиной 0,5-1,2 от толщины деформированной части проводника. За счет капиллярного эффекта вода заполняет поры микросварного соединения, а для лучшего проникновения в микропоры проводят, например, опрессовку при давлении $(1,5\text{-}3)\cdot 10^5$ Па воздуха или азота. Для этой цели могут быть также использованы метод наложения ультразвуковых колебаний и другие известные методы заполнения микрокапилляров.

Выбранные интервалы температуры обусловлены высокой точностью поддержания температуры в проходных камерах печи без значительного усложнения конструкции и увеличения времени замера напряжения в контактах.

При необходимости увеличения механических напряжений в непроваренных частях сварного соединения используют изменение температуры перед замером или в процессе него до 269-272 К, в этом случае несколько увеличивается время замера. Информация о результатах замеров выводится на экран дисплея. Полученные изменения падения напряжения сравниваются со значениями, полученными на эталонных образцах, на основании чего прибор считается годным или бракуется. При замерах учи-

тывается погрешность, вносимая проводимостью деионизованной воды. По результатам замеров может оцениваться как площадь, так и прочность адгезии материалов в сварном соединении. После замеров образцы помещают в термокамеру с системой вытяжки и подачи осушенного нагретого кислорода. Температура нагрева составляет 353-363 К, а время выдержки 30-35 мин. Время термообработки подбирается опытным путем, исходя из условия полного удаления паров воды из пор микросварных соединений. Например, для соединений алюминиевых проводников диаметром 30-40 мкм оно составляет не менее 20 мин. В процессе испарения влаги с поверхности и, особенно, из пор микросварного соединения происходит увеличение толщины оксидной пленки алюминия до 0,3-0,5 мкм, которая надежно защищает поверхность микропор от электрохимического разрушения в процессе эксплуатации из-за попадания атмосферной влаги. Выдержка при более низких температурах значительно уменьшает рост толщины оксидной пленки, а нагрев до более высокой температуры значительно увеличивает испарение (из-за кипения в капиллярах), что также не позволяет получить максимальную толщину оксидной пленки, то есть температура нагрева выбирается опытным путем, исходя из условия получения максимальной толщины оксидной пленки в микропорах сварного соединения.

Преимущество способа перед известными заключается в том, что он позволяет проводить 100 %-ный оперативный контроль адгезии в микросварных соединениях ППИ при одновременном повышении коррозионной стойкости микросварных соединений.

3.5. Устройство для экспресс-контроля адгезии пленок к подложкам

Обзор литературы по адгезионной прочности пленок с подложками показал, что в настоящее время в промышленности

нет достаточно совершенных способов и установок контроля адгезии пленок.

Рассмотрим некоторые способы контроля адгезионной прочности пленок. Широко используется в производстве метод отрыва пленки от подложки.

К основным недостаткам данного метода следует отнести следующие:

• трудоемкость контроля адгезионной прочности пленки к подложке, особенно к подложке с большим количеством пленочных площадок различной площади и конфигурации;

• сложность проведения отрыва строго одновременно по всей площади контакта, так как при неодновременном отрыве возникают дополнительные напряжения в граничной области, искажающие результаты измерений;

• погрешность измерений адгезионной прочности из-за дефектности слоя припоя или клея, находящегося между присоединенным образцом и пленкой;

• уменьшение измеряемого значения адгезии при возникновении термических напряжений в пленке и подложке после проведения процессов присоединения штыря, цилиндра или проволоки;

• влияние состава припоя или клея на изменение значения адгезионной прочности в процессе старения паяных или клеевых соединений;

• зависимость адгезионной прочности от угла приложения силы отрыва;

• влияние давления окружающей среды, а также кислорода либо паров воды на работу отслаивания пленки от подложки;

• сложность приготовления пленочных образцов для определения адгезионной прочности, так как дефекты на поверхности пленки (пылинки, микрокапли испаряемого металла) могут привести к разрыву пленки во время испытания на отрыв;

Для контроля адгезии тонких металлических пленок к диэлектрической подложке часто используют электромагнитные методы. Например, подложку с пленкой размещают в электромагнитном поле заданной частоты и увеличивают его напря-

женность до отслоения пленки. При этом частоту электромагнитного поля задают 50 Гц, а через металлическую пленку пропускают электрический ток. В других случаях электромагнитное поле может быть сверхвысокой частоты.

Недостатком данного способа является низкая точность контроля адгезии, поскольку при пропускании через металлическую пленку электрического тока последняя нагревается, а в случае исключения пропускания тока через пленку электромагнитное поле не обеспечивает возникновения достаточной отрывающей силы для отрыва пленки от подложки. Кроме того, наличие переменного электромагнитного поля ведет к тому, что на металлическую пленку действует знакопеременная сила, так как вектор переменного электромагнитного поля периодически меняет свое направление, и, в зависимости от направления вектора, сила будет либо отрывать металлическую пленку от подложки, либо вдавливать ее в подложку. При значительной величине напряженности электромагнитного поля возможно деформирование и растрескивание подслоя пленки, что будет вносить неточность в определение адгезионных характеристик. Но основным недостатком является необходимость применения токоподводящих контактов к металлической пленке для пропускания по ней тока. При контроле адгезии малых металлических площадок на подложках токоподводящие контакты должны вплотную располагаться на пленке, что ведет к их воздействию (давлению) на пленку, искажая адгезионную картину.

Использование переменного электромагнитного поля сверхвысокой частоты создает в любой точке пространства (как в металлическом покрытии, так и в диэлектрической подложке) вихревое электрическое поле независимо от того, находится ли в этой точке проводник или нет, что ведет к разогреву материала диэлектрической подложки и возможному ее разрушению. Кроме того, из-за разных коэффициентов термического расширения материала подложки и пленки при разогреве в сильном электромагнитном поле возникает отрыв пленки от подложки вследствие возникновения термических напряжений.

Другие методы контроля адгезии (нагрев электронным лучом или лазером, царапание иглой, вдавливание в пленку индентора) возможны на отдельных участках пленки. Эти методы являются разрушающими и могут быть использованы только на опытных образцах при отработке технологии получения пленочных покрытий. Они не пригодны для оценки адгезионной прочности пленок на готовых изделиях.

Нами разработано специальное устройство (рис. 3.12), которое работает следующим образом. Исследуемые подложки 23 располагаются на верхней части вакуумной камеры 21 над отверстиями 22, затем из камеры откачивается воздух и подложки плотно прижимаются к вакуумной камере. С компрессорного блока 19 через сопло 18 на место контакта пленки 24 с подложкой 23 под избыточным давлением поступает узконаправленная воздушная струя, которая создает отрывное усилие пленки от подложки. Скорость истечения воздушной струи задается таким образом, чтобы, обеспечить надлежащий уровень контроля адгезионной прочности контактного слоя подложка – пленка без его разрушения. Затем с манипулятора 8 поступает электрическое напряжение на двигатель реверсивной червячной передачи 5. В результате этого подвижная каретка 4, перемещается на линейном подшипнике 3 по направляющим 2 относительно исследуемых подложек 23. При этом сопло 18 проходит над каждой пленочной площадкой 24, отрывая ее от подложки за счет воздействия потока воздуха.

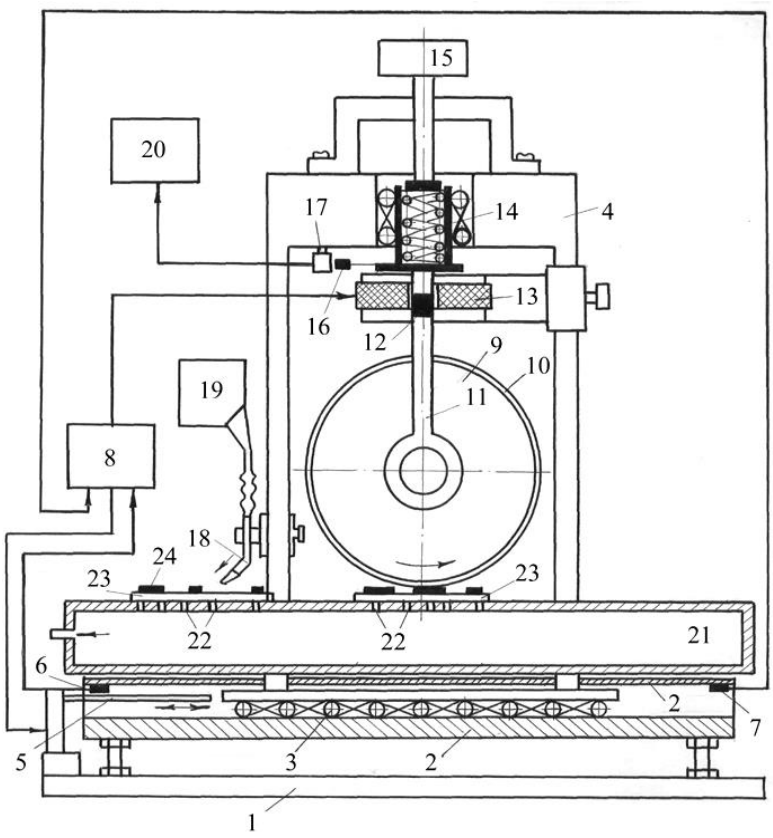


Рис. 3.12. Схема устройства для экспресс-контроля адгезии пленок к подложкам: 1 – основание; 2 – направляющие; 3 – подшипник; 4 – каретка; 5 – червячная передача; 6 и 7 – переключатели реверса; 8 – манипулятор; 9 – ролик; 10 – липкая масса; 11 – опорная вилка; 12 – сердечник; 13 – электромагнит; 14 – пружина; 15 – винт; 16 – оптическая шторка; 17 – фоторегистрирующий преобразователь; 18 – сопло; 19 – компрессорный блок; 20 – блок фиксации перемещения; 21 – вакуумная камера; 22 – отверстия; 23 – подложки; 24 – пленочные площадки

При движении каретки над соплом по исследуемым подложкам и пленочным площадкам прокатывается контрольный ролик 9, на поверхности которого находится липкая масса 10. Отслоившиеся пленочные площадки прилипают к липкой массе контрольного ролика и отрываются. Усилие прижатия контрольного ролика осуществляется сжатием микрометрического

винта 15 тарированной пружины 14, передающимся на контрольный ролик при помощи опорной вилки 11. После того как подвижная каретка пройдет над последней подложкой, она замыкает концевой переключатель реверса 6 и 7, электрический сигнал с которого поступает на манипулятор вертикального перемещения 8, откуда усиленный электрический сигнал поступает на обмотку тягового электромагнита 13. Сердечник 12, жестко закрепленный на опорной вилке 11, втягивается в электромагнит, поднимая контрольный ролик над исследуемой подложкой. Одновременно электрический сигнал с манипулятора поступает на двигатель реверсивной червячной передачи, и каретка начинает перемещаться в обратном направлении до срабатывания концевого переключателя реверса. Электрический сигнал с этого концевого переключателя поступает на манипулятор, который отключает действие электромагнита, при этом контрольный ролик вновь под действием тарированной пружины прижимается к новой партии подложек, и каретка идет в обратном направлении. Все операции после этого вновь повторяются. Контроль прижатия ролика осуществляется при помощи оптической шторки 16 фоторегистрирующего преобразователя 17 и электронного блока-фиксации перемещения 20.

3.6. Устройства для оценки адгезионной прочности локальных пленочных площадок с подложкой

Известно, что кристаллы ППИ имеют на своей поверхности десятки и сотни пленочных контактных площадок. Причем эти пленки имеют различную площадь и всевозможную конфигурацию. Для экспресс-контроля необходимы такие установки, которые позволили бы за короткое время дать оценку адгезионной прочности всех пленочных контактных площадок, расположенных на данной подложке.

Нами разработано устройство для контроля адгезионной прочности локальных пленочных площадок с подложкой. На

рис. 3.13 показан общий вид крепления подложки с пленочными площадками, а на рис. 3.14 – схема устройства.

Устройство работает следующим образом. Исследуемая подложка 1 с пленочными площадками 5 помещается на столе крепления 11 и прижимается к столу электромагнитами 10. С помощью несущего кронштейна 23 и основания 8 соосно с исследуемой подложкой 1 над ней располагается матрица вакуумной головки 2, вакуумные отсеки 4 которой находятся над каждой пленочной площадкой 5. После этого на электромагниты 16 системы перемещения вакуумной головки подается напряжение, в результате чего магнитная пластина 15 притягивается к сердечникам электромагнитов и обеспечивается прижатие матрицы вакуумной головки 2 к исследуемой подложке 1.

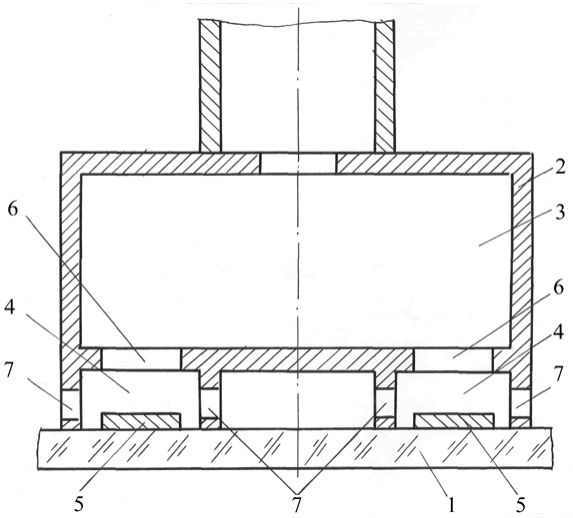


Рис. 3.13. Схема крепления подложки с пленочными площадками: 1 – подложка; 2 – матрица вакуумной головки; 3 – вакуумная камера; 4 – вакуумные отсеки; 5 – пленочные площадки; 6 – калиброванные отверстия; 7 – дросселирующие пазы

Перемещение пластины и прижатие матрицы фиксируется при помощи фоторегистрирующего преобразователя 17, оптическая шторка 18 которого перемещается вместе с магнитной пластиной 15. Сигнал с выхода этого фоторегистрирующего преоб-

разователя поступает на вход усилителя мощности 19, где усиливается и поступает на обмотку электромагнитного клапана 20 и реле времени 21. Электромагнитный клапан 20 срабатывает и открывает вакуумную магистраль: вакуумный насос 25, вакуумную демпфирующую емкость 24, электромагнитный клапан 20, штуцер вакуумной головки 14, общую вакуумную камеру 3. Через систему калиброванных отверстий 6 и дросселирующих пазов 7 воздушный поток отсасывается из системы вакуумных отсеков 4.

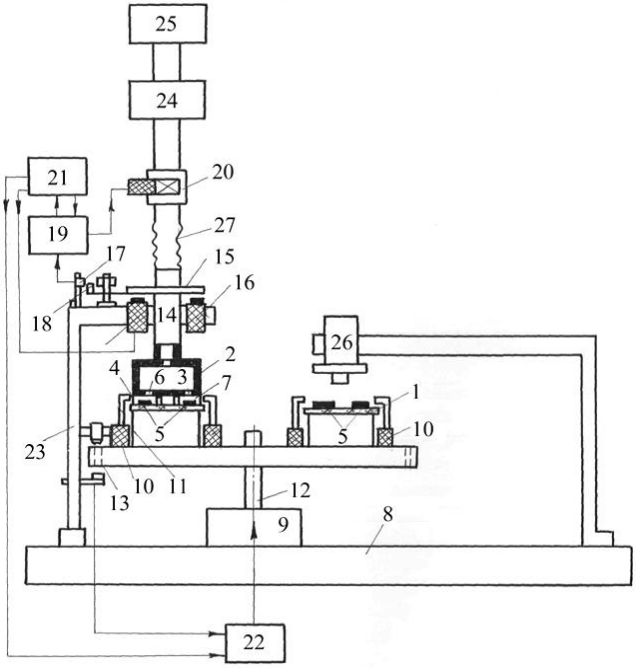


Рис. 3.14. Схема устройства для контроля адгезионной прочности локальных пленочных площадок с подложкой: 1 – подложка; 2 – матрица вакуумной головки; 3 – вакуумная камера; 4 – вакуумные отсеки; 5 – пленочные площадки; 6 – калибровочные отверстия; 7 – дросселирующие пазы; 8 – основание; 9 – исполнительный механизм; 10 – электромагниты; 11 – стол; 12 – вал; 13 – фотопреобразователь; 14 – штуцер вакуумной головки; 15 – магнитная пластина; 16 – электромагнит; 17 – фоторегистрирующий преобразователь; 18 – оптическая шторка; 19 – усилитель мощности; 20 – электромагнитный клапан; 21 – реле времени; 22 – блок совпадений; 23 – несущий кронштейн; 24 – демпфирующая емкость; 25 – вакуумный насос; 26 – микроскоп; 27 – сильфон

За счет возникающего в отсеках разряжения воздушный поток начинает поступать из окружающей среды через дросселирующие пазы 7 внутрь отсеков и, встречая на пути пленочные покрытия, стремится оторвать их от подложки, на которую они нанесены. Размеры дросселирующих пазов зависят от геометрических размеров пленочных площадок. Чем толще напыленная пленка, тем выше может быть дросселирующий паз. Усилие отрыва зависит, кроме размеров дросселирующего паза, от глубины образования вакуума в вакуумной магистрали. Чем глубже вакуум и интенсивнее отсос, тем больше скорость истечения воздушного потока через дросселирующие пазы, тем больше значение усилия отрыва пленки от подложки.

Через определенное время, задаваемое на реле времени, сигнал подается снова на усилитель мощности 19, где усиливается и поступает на электромагнитный клапан 20, который перекрывает вакуумную магистраль. Одновременно с реле времени 21 подается сигнал на снятие напряжения с обмоток электромагнитов 16 системы перемещения вакуумной головки и на блок совпадений 22. В результате этого под действием сжимающей силы растянутого сильфона 27 матрица вакуумной головки 2 отходит от подложки 1. При приходе электрических сигналов на блок совпадения 22 одновременно с реле времени 21 и фоторегистрирующего преобразователя углового положения стола 13 с выхода блока совпадения подается электрический сигнал на исполнительный механизм 9 углового положения стола крепления, который жестко закреплен на валу 12 исполнительного механизма. В результате стол поворачивается на определенный угол, который задается на исполнительном механизме и зависит от числа подложек, закрепленных на столе.

После этого поворота подложка помещается под микроскопом 26, где визуально регистрируются вздутия и отслоения пленок от подложки.

Затем все операции повторяются сначала, при этом синхронизация работы всей установки задается режимом работы реле времени 21.

Для определения величины адгезионной прочности пленки к подложке разработано специальное устройство, схема которого приведена на рис. 3.15. Исследуемую подложку с нанесенными на нее пленочными площадками крепят в кронштейнах 6. Кронштейны через шток 3 соединены с основанием 1.

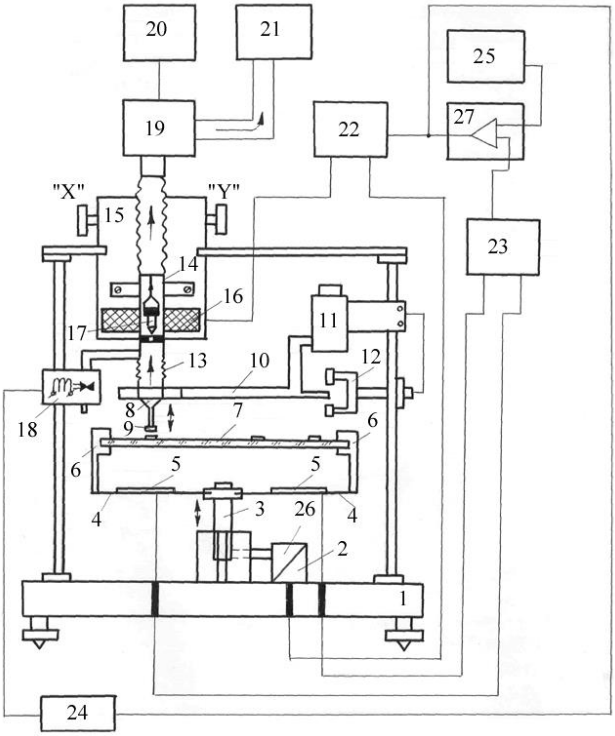


Рис. 3.15. Структурная схема устройства для определения величины адгезионной прочности пленки к подложке: 1 – основание; 2 – исполнительный механизм; 3 – шток; 4 – упругие элементы; 5 – тензодатчики; 6 – кронштейны; 7 – подложка с пленочными площадками; 8 – вакуумный присос; 9 – вакуумная подушка; 10 – рычаг; 11 – механизм вертикального перемещения; 12 – концевой выключатель; 13 – сильфон; 14 – неподвижная часть вакуумного присоса; 15 – двухкоординатный позиционер «X-Y»; 16 – индуктивный датчик момента прижима присоса; 17 – подвижный цилиндр; 18 – электромагнитный клапан; 19 – вакуумная емкость; 20 – вакуумметр; 21 – вакуумный насос; 22 и 24 – усилители мощности; 23 – усилитель; 25 – задатчик механических напряжений; 26 – реверс; 27 – блок измерения величины адгезии

С помощью двухкоординатного позиционера «X-Y» 15 перемещают вакуумный присос 8 до совмещения подвижной части вакуумного присоса с исследуемой пленочной площадкой на подложке 7. Затем при помощи механизма вертикального перемещения 11 перемещают подвижную часть вакуумного присоса до соприкосновения вакуумной подушки 9 с исследуемой пленочной площадкой. Это вызывает уменьшение потока воздуха, всасываемого в сопло вакуумной подушки вакуумного присоса. Одновременно происходит перемещение подвижного цилиндра 17 индуктивного датчика фиксации момента прижима 16 внутри неподвижной части вакуумного присоса 14 к обмотке индуктивного датчика фиксации момента прижима подвижной части вакуумного присоса. После прижима вакуумной подушки к исследуемой пленочной площадке происходит отключение механизма вертикального перемещения 11 подвижной части вакуумного присоса вследствие соприкосновения рычага 10 с концевыми выключателями 12 ограничителя перемещения. Электрический сигнал с индуктивного датчика фиксации момента прижима 16 усиливается усилителем мощности 22 и поступает на исполнительный механизм вертикального перемещения подложки 2, который перемещает вниз шток 3. Это способствует отрыву подложки от присоса вакуумной подушки, изгибу упругих элементов 4 и деформации тензодатчиков 5. Электрический сигнал с тензодатчиков усиливается усилителем 23 и поступает на первый вход компаратора блока измерения величины адгезии 27. На второй вход компаратора поступает электрический сигнал, соответствующий заданной величине силы отрыва вакуумной подушки от пленки на подложке. Исполнительный механизм 2 перемещает шток 3 вниз до тех пор, пока увеличивающийся в результате деформации упругих элементов электрический сигнал с тензодатчика 5 не достигнет величины сигнала, поступающего с задатчика на второй вход компаратора. Как только эти сигналы сравняются на выходе компаратора появляется электрический импульс, поступающий на электромагнитный клапан 18 через усилитель мощности 24. Электромагнитный клапан

срабатывает и соединяет внутреннюю полость вакуумного присоса с атмосферой, в результате чего под действием силы упругого сильфона 13 вакуумная подушка 9 отходит от пленки на подложке. Воздушный поток, протекающий через сопло вакуумной подушки, увеличивается, перемещая вверх подвижный цилиндр 17 индуктивного датчика фиксации момента прижима 16. При этом сигнал с датчика через усилитель мощности поступает на обмотку блока реверса 26 исполнительного механизма перемещения по вертикали исследуемой подложки до выхода подложки в первоначальное положение. После чего с помощью двухкоординатного позиционера «X-Y» и механизма вертикального перемещения совмещают вакуумный присос с новой пленочной площадкой, и все операции повторяются снова. Задатчиком механических напряжений 25 можно выставить любое значение напряжения на одном из входов компаратора. Чем больше это значение, тем больше должен быть сигнал на другом входе компаратора, поступающий сюда с тензодатчиков 5, а это достигается при большем деформировании упругих элементов 4, следовательно большем перемещении вниз штока 3. Все это ведет к увеличению силы отрыва вакуумной подушки 9 от исследуемой подложки. Таким образом, задавая задатчиком определенный порог напряжения, соответствующий определенной силе отрыва вакуумной подушки от подложки, можно проверить все пленочные площадки на адгезионную прочность без их отрыва от подложки. Задатчиком можно задать такую величину напряжения, которая соответствует отрыву самой пленочной площадки от исследуемой подложки. Глубина вакуума контролируется вакуумметром 20 в демпфирующей вакуумной емкости 19, где заданная глубина вакуума достигается с помощью вакуумного насоса 21.

Глава 4. Монтаж полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов

В технологии производства ППИ наиболее трудоемкими являются сборочные операции. Из общей стоимости изготовления ИС на монтажно-сборочные работы приходится около 65 %. Эти затраты являются вполне обоснованными, так как от качества выполнения этих работ во многом зависит эксплуатационная надежность готовых изделий.

В электронной промышленности для присоединения полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов применяют различные способы: пайку припоями и эвтектическими сплавами, приклеивание токопроводящими клеями, крепление кристаллов с помощью легкоплавких или тугоплавких стекол.

Совершенствование существующих, а также разработка новых способов и технологий монтажа кристаллов к основаниям корпусов постоянно находятся в центре внимания разработчиков ППИ. Соединения кристаллов с основаниями корпусов должны обеспечивать заданную механическую прочность, отвод тепла, стойкость к ударам и вибрациям. В тоже время одним из основных условий является экономическая сторона данной технологической операции: снижение трудоемкости и повышение качества.

Выбор способа монтажа полупроводниковых кристаллов во многом зависит от требований, предъявляемых к соединению кристалл-корпус, а также от вида микросварки, применяемой для крепления выводов на кристалле, и режимов герметизации микроприборов. В зоне паяных соединений должны отсутствовать трещины и отслоения покрытия, непропаяные участки.

Одной из основных трудностей, связанных с эксплуатацией автоматических установок для проволочного монтажа, является посадка кристалла в корпус. В полуавтоматических установках операцию коррекции неточности посадки кристалла в корпус выполняет оператор, а пересчет программы позиционирования – ЭВМ.

Независимо от способов крепления кристаллов ППИ на подложки или основания корпусов должно быть обеспечено заданное расположение контактных площадок кристалла относительно контактных площадок корпуса (основания). Погрешность совмещения не должна превышать 25 мкм. Поэтому установку кристалла выполняют с помощью манипулятора, а контроль точности совмещения осуществляют при помощи микроскопа с высоким разрешением.

При монтаже кристалла в корпус на клей, эвтектику или с помощью припоев возможно образование пустот, что ухудшает отвод тепла от кристалла, а тепловое воздействие оказывает влияние на электрические параметры ППИ. Кроме того, снижается механическая прочность контактного соединения, в приконтактных областях кристалла возникают внутренние напряжения, которые могут привести к катастрофическим отказам из-за появления со временем микротрещин в кристалле.

При разработках по созданию новых композиционных материалов, покрытий и припоев для монтажа кристаллов в корпуса, альтернативных золото – кремниевой эвтектике, необходимо проведение исследований физических процессов, приводящих к разрушению кристаллов большой площади. Диагностика технологического процесса сборки БИС, основанная на тензометрическом методе и статистической теории прочности, позволяет с достаточной степенью вероятности предсказать предел прочности для кристаллов БИС различной площади и установить оптимальные значения механических напряжений БИС в корпусе.

4.1. Пайка кристаллов

Пайка широко используется в технологии производства ППИ. На операции пайки (монтаж кристаллов, присоединение внутренних выводов, герметизация) приходится более 25 % общей трудоемкости сборочных операций.

Особенности пайки полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов. Качество сборочно-монтажных операций

существенно зависит от подготовки поверхности металла корпуса ИС, заключающееся в получении микрорельефа с малой высотой микронеровностей. Установлено, что структура и морфология поверхности исходного металла и покрытия претерпевают существенные изменения на различных технологических операциях изготовления корпуса ИС. Средняя высота микронеровностей поверхности металла основы (ковара) в исходном состоянии составляет 0,4-0,52 мкм, а на заключительной операции гальванического никелирования корпуса – 1,9-2,7 мкм. Снизить величину микронеровностей покрытий до 0,9 мкм можно применением химической полировки материала основы перед нанесением блестящих никелевых покрытий, осаждающихся в нестационарных режимах электролиза из сернокислого электролита с блескообразователями. Кроме того, применение химической полировки металла основы (ковара) перед нанесением блестящих никелевых покрытий позволяет снизить внутренние напряжения с 200-400 до 45-56 МПа.

При сборке кристаллов больших размеров появляются проблемы, связанные как с увеличением размеров соединения кристалл-корпус, так и невозможностью обеспечить высокое качество и надежность монтажа кристаллов с помощью традиционных процессов присоединения кристаллов. Основными трудностями получения качественных паяных соединений являются неплоскостности монтажных площадок, достигающих у металлокерамических корпусов 50 мкм.

Для компенсации неплоскостности основания корпуса при монтаже кристаллов методом контактно-реактивной пайки на золото-кремниевую эвтектику используют прокладки из золотой фольги или сплава золота с кремнием. Толщина фольги обычно составляет 16 или 20 мкм, а площадь колеблется от 60 до 100 % площади кристалла.

При контактно-реактивной пайке с образованием эвтектики золото – кремний получаемое соединение обладает наименьшим тепловым сопротивлением контакта кристалл-кристаллодержатель и имеет максимальную механическую прочность. Качество паяного шва зависит от высоты и количе-

ства микронеровностей на поверхности кристалла и корпуса, а также от толщины золотого покрытия. В корпусах ИС высота микронеровностей поверхности основания достигает 6 мкм. Класс чистоты коллекторной стороны кристалла значительно выше, поэтому фактическая площадь физического контакта определяется классом чистоты поверхности корпуса.

При пайке кристаллов больших размеров на эвтектику золото-кремний в кристаллах возникают остаточные механические напряжения, возникающие из-за различия коэффициентов термического расширения кремния и материала корпуса и высокой температуры процесса. Эти напряжения при определенных условиях могут привести к растрескиванию кристаллов при воздействии механических и тепловых нагрузок в процессе испытаний и эксплуатации.

С увеличением размеров кристалла механические напряжения возрастают. Например, для кристаллов размером 3,3×7,2 мм максимальные напряжения достигают 90-100 МПа, а для кристаллов 4,7×9,1 мм – 100-120 МПа.

Одной из причин разрушения кристаллов являются пустоты в зоне соединения кристалла с основанием корпуса. Наличие пустот резко снижает прочность кристаллов и приводит к их разрушению при напряжениях значительно ниже расчетных. Особенно опасны краевые пустоты, которые вызывают разрушения кристаллов в большинстве случаев (95-98 %). Теоретическими расчетами доказано, что с увеличением размеров кристаллов напряжения растут, а следовательно, опасность разрушения от краевых пустот возрастает.

В процессе сборки и испытаний ППИ механические напряжения изделий изменяются в пределах 15 %. Отклонение этих значений вызывает разрушение БИС при напряжениях гораздо ниже расчетных и разработчику потребуется устранять конструктивно-технологические недоработки изделия.

При выборе состава припоя и разработке процесса пайки следует стремиться к созданию паяного соединения с оптимальными фазовым составом, структурой и толщиной переходного слоя на соединяемых поверхностях. Изменять толщину пере-

ходного слоя можно введением в припой добавок металлов, которые имеют большое химическое сродство к адгезионно – активному компоненту припоя.

Сопротивление паяных соединений усталостному разрушению, т. е. их долговечность можно повысить за счет уменьшения разницы ТКЛР соединяемых элементов. Например, для повышения долговечности соединений кремниевого кристалла размером 6,6×6,6 мм с корпусом мощного транзистора (ТО-3) предлагается следующее сочетание материалов Si-Pb-Mo-Cu-сталь.

Оценку долговечности паяных соединений в ППИ, например, транзисторах, можно провести, зная количество циклов до разрушения соединений и пластическую деформацию за один цикл. Однако в действительности число циклов до разрушения паяных соединений зависит от конструктивно-технологических параметров и изменяется в широких пределах. Поэтому истинную долговечность паяных соединений необходимо определять экспериментальным путем для конкретной конструкции изделия. В некоторых случаях используются ускоренные испытания (температурные, коррозионные, под токовой нагрузкой и др.).

Проблема обеспечения качества пайки кристаллов к основаниям корпусов усугубляется с увеличением площади кристаллов БИС. Площадь кристаллов, особенно в запоминающих и микропроцессорных устройствах уже в 1991 году составляла 128 мм^2 и это увеличение происходит ежегодно. Доля отказов ИС 3-5 степени интеграции по причине разрушения кристаллов составила на входном контроле 267,2 изделий, а при испытаниях и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры – 127,6 изделий на миллион поставленных.

Следует отметить, что повышение качества паяных соединений можно прогнозировать уже на стадии проектирования вследствие продуманного и обоснованного выбора покрытий корпусов и кристаллов под пайку. Следующий этап, на котором возможно повышение надежности паяных соединений – разработка технологической документации, где играют роль выбор оптимальных для данного типа изделия технологии получения

покрытий, способов и режимов пайки. На стадии серийного производства неизбежно загрязнение различными примесями припоев, покрытий корпусов и коллекторной стороны кристаллов, что не всегда бывает связано с отклонениями от разработанной технологии, но может носить и объективный характер. Выбор способа пайки кристаллов зависит от конструктивных особенностей ППИ, их электрических и тепловых характеристик, типа корпусов и других показателей.

При креплении полупроводникового кристалла эвтектической пайкой на поверхность корпуса или подложки в заданном месте наносится пленка золота толщиной в несколько микрометров, на которую помещается кристалл. После этого подложка с кристаллом разогревается до температуры, превышающей температуру эвтектики кремний-золото. При нагреве и некотором давлении на кристалл происходит взаимное растворение кремния и золота с образованием эвтектического сплава в зоне соединения. В случае, когда толщина золотой пленки недостаточна между основанием корпуса и кристаллом помещают прокладку эвтектического сплава толщиной 10-20 мкм. Процесс сборки данным способом проводят в защитной среде.

Расчеты минимально необходимой толщины золотого покрытия t_{Au} в зависимости от максимальной высоты микронеровностей $t_{выст.}$ на поверхности кристаллодержателя показали, что для получения качественного паяного шва необходимо соблюдать следующее условие: $t_{Au} \geq 0{,}79\ t_{выст}$.

Установлено, что использование контактно-реактивной пайки дает положительный результат в случае присоединения кристалла к детали корпуса – золоченому коваровому донышку, прошедшему все стадии технологической обработки при толщине золотого покрытия не менее 6 мкм.

При пайке кристаллов на позолоченную поверхность корпусов прочность паяных соединений на отрыв уменьшается из-за охрупчивания припоя присутствующим в нем золотом. При увеличении толщины золотого покрытия (по подслою химического никеля) прочность паяных соединений падает на 66 % от исходной.

Таким образом, применять под пайку детали с золотым покрытием нужно с определенным сомнением. На границе припой – золотое покрытие детали появляются хрупкие участки, разрушающиеся при эксплуатации изделий. Появление таких дефектов надо постоянно иметь в виду и стараться устранять их соответствующими конструкторскими и технологическими приемами.

Нами проведены исследования монтажа кристаллов БИС с использованием припоя на основе цинка. Оценивалось качество соединений кристалла с основанием корпуса по следующим критериям: площадь смачивания обратной стороны кристалла, прочность соединения «кристалл – корпус» на сдвиг, величина и распределение остаточных механических напряжений, возникающих в кристалле, устойчивость к длительному воздействию температуры (150 ºС) и циклическому изменению температуры в диапазоне от 150 ºС до минус 60 ºС. Рассматривались две группы кристаллов: без подготовки и с предварительным травлением обратной стороны пластины с последующим напылением алюминия толщиной 0,7-1,2 мкм. При пайке кристаллов дополнительно использовались прокладки из припойной фольги того же состава толщиной 20 и 80 мкм и площадью, составляющей 80 % от площади кристалла.

Оценка смачиваемости обратной стороны кристаллов припоем Zn-Al-Ge показывает, что наилучшие результаты монтажа кристаллов достигаются в случае предварительного нанесения на обратную сторону пластины алюминиевого покрытия толщиной около 1 мкм.

Исследования защитных покрытий корпусов КТ-4 при температуре пайки 440±5 ºС показали, что наилучшей термостойкостью обладают покрытия никеля с добавками от 2 до 8 % рения. Другие покрытия окисляются при более низких температурах и расходе защитного газа свыше 50 л/ч.

Покрытия из палладия и его сплавов не растворяются в процессе пайки и хорошо смачиваются припоями при пайке. Например, для гальванического покрытия сплавом Pd-In толщиной 6 мкм паяемость сохраняется при термообработке до 620 ºС,

что позволяет использовать сплавы палладия в качестве паяемых покрытий для изделий силовой электроники.

В качестве покрытия под монтажные операции в некоторых приборах применяют серебро. Данный металл используется в качестве конечного покрытия коллекторной поверхности кристалла и корпуса. На пластину с кристаллами серебро наносят напылением, а на корпуса гальваническим способом. При этом серебряное покрытие на корпуса наносят локально на участки под пайку кристаллов и разварку внутренних выводов.

Серебряные покрытия существенно снижают паяемость при естественном старении под действием окружающей атмосферы. В чистом воздухе на серебре имеются оксидные пленки толщиной 10-20 нм. В атмосферных условиях на поверхности образуется труднорастворимое соединение сульфид серебра (Ag_2S).

Технологам известно, что нельзя применять подслой серебра под покрытия золотом, палладием и родием, а использовать под данные покрытия подслой никеля. Подслой никеля обеспечивает получение покрытий с заданными характеристиками, хотя и требует надлежащей организации техпроцесса, обеспечивающего квалифицированным персоналом.

В производстве диодов Шоттки в качестве барьерных металлов применяют Al, Ni, Pt, Pd, Ti, Va, W, Mo и силициды этих металлов. Из перечисленных металлов, при одинаковых требованиях к электрическим характеристикам на прибор, рекомендуется применять Mo, который имеет хорошую адгезию к кремнию и SiO_2 и близкий к кремнию ТКЛР. В процессе исследований и испытаний установлено, что использование на планарной стороне кристаллов диодов Шоттки пленочной металлизации Mo-Ni-$Ni_{хим}$-Sn обеспечивает изготовление изделий высокой надежности. При этом кристаллы диода Шоттки с применением в качестве барьерного металла Mo должны изготавливаться с применением LOCOS-технологии.

Для соединения кремниевых кристаллов с медным основанием корпусов мощных транзисторов применяются композиционные припои системы свинец – никель. Введение в зазор меж-

ду кристаллом и теплоотводом никелевой губчатой прокладки толщиной 0,1-0,2 мм и пористостью 65-80 %, пропитываемой в процессе пайки свинцово-содержащим припоем, повышает термическую стабильность и термоциклостойкость паяного контакта. Рекомендуется использовать свинцовые припои, армированные никелевой губкой, в конструкциях типа кремний – медь, кремний – медь – сталь.

При пайке кристаллов мощных транзисторов достаточно трудно обеспечить получение качественного соединения без пор и пустот. С целью исключения этих дефектов процесс пайки кристалла к основанию корпуса предлагается вести в вакууме, а после расплавления припоя впускать под колпак воздух.

Для увеличения площади спая между кристаллом и корпусом на верхней плоскости корпуса формируют V-образные канавки глубиной 25-75 мкм, располагаемые друг от друга на расстоянии 0,25-1 мм. В случае использования корпусов с канавками необходимо при пайке корпус или кристалл подвергать воздействию ультразвуковых или низкочастотных колебаний. Механические колебания должны быть направлены вдоль канавок. В противном случае при пайке кристаллов больших размеров V-образные канавки являются очагами непропаев (рис. 4.1).

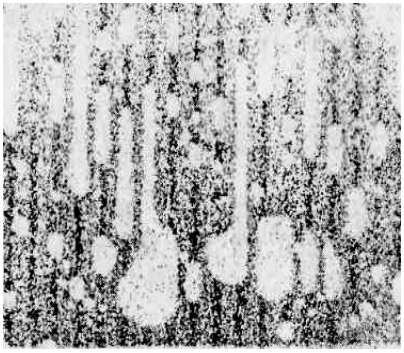


Рис. 4.1. Рентгенограмма паяного соединения кристалла с корпусом с V-образными канавками. Размер кристалла 5,1×5,6 мм.

При пайке кристаллов размеров менее 3×3 мм используют как ультразвуковые, так и низкочастотные колебания, а при пайке кристаллов больших размеров применяются в основном низкочастотные колебания с амплитудой до 0,5-0,8 мм.

Пайка в вакууме имеет ряд преимуществ. Она обеспечивает образование боле плотных и прочных швов, чем пайка в

инертных и активных газовых средах, в результате дегазации жидкого припоя.

Качество пайки кристалла с основанием корпуса во многом зависит от места расположения припоя перед пайкой. Возможно традиционное расположение прокладки припоя непосредственно под кристаллом, однако в процессе пайки оксидные пленки и загрязнения на поверхности прокладки при расплавлении остаются в зоне шва, что ухудшает смачиваемость припоем поверхности кристалла и основания корпуса, нарушает сплошность шва, а это, в свою очередь, приводит к ухудшению теплопроводности шва и снижению надежности ППИ.

Для улучшения смачивания припоем паяемой поверхности кристалла и основания корпуса широко используют капиллярный эффект заполнения зазора припоем в процессе пайки кристалла. Перед пайкой в непосредственном касании одной из боковых граней кристалла располагается навеска припоя в виде шарика (рис. 4.2). Детали фиксируются относительно корпуса специальной кассетой. Кассету со сборками помещают в печь, где при температуре пайки происходит расплавление припоя, который за счет капиллярных сил заполняет микрозазор между коллекторной стороной кристалла и корпусом, смачивает эти поверхности и при кристаллизации образуется паяный шов. Характерной особенностью этого процесса является то, что оксидные пленки и загрязнения остаются за пределами паяного шва – в месте первоначального расположения навески припоя.

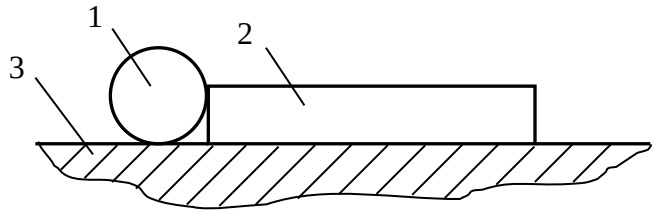


Рис. 4.2. Схема напайки кристалла на никелированное основание с использованием капиллярного эффекта: 1 – навеска припоя; 2 – кристалл; 3 – основание

К недостаткам указанного способа следует отнести температуру нагрева при пайке значительно выше температуры плавления припоя с целью разрушения оксидной пленки припоя и обеспечения его капиллярного течения. Кроме того, при пайке кристаллов больших размеров, особенно в ППИ для силовой электроники, невозможно получить площадь спая равную площади кристалла. Из-за неполного смачивания соединяемых поверхностей в паяном шве образуются непропаи, которые снижают мощность рассеивания приборов.

Известен способ изготовления ППИ, по которому к подложке присоединяют кристалл с помощью припоя, который расплавляется между подложкой и полупроводниковым кристаллом. При этом над подложкой устанавливают кожух, который соединен с устройством для понижения давления. С помощью кожуха над нагревателем, на который устанавливают подложку, создают пониженное давление и заполняют кожух газообразным азотом или водородом.

В технологии производства ППИ широко используют пайку кремниевого кристалла с использованием никелевых (или медных) пористых сред (рис. 4.3).

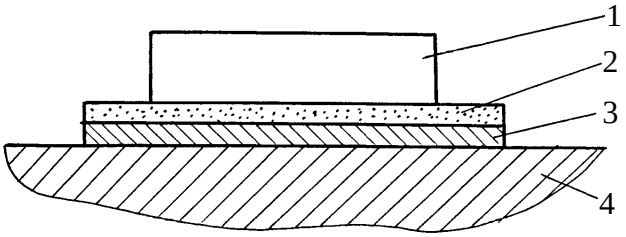


Рис. 4.3. Пайка кристалла с использованием пористых сред: 1 – кристалл; 2 – пористая металлическая прокладка; 3 – свинцовый припой; 4 – основание корпуса

Объем навески припоя определяется расчетным путем с учетом пористости фильтрующего элемента, его размеров и уточняется экспериментальными исследованиями.

Пайка кристаллов мощных транзисторов на мягкий припой более предпочтительна, нежели эвтектическая контактно-реактивная, так как в жестких эвтектических швах, особенно при пайке кристаллов больших размеров, могут возникать внутренние напряжения, приводящие к разрушению кристалла. В паяных соединениях кристаллов, образованных мягкими припоями, внутренние напряжения частично релаксируются и разрушения кристаллов даже при циклических испытаниях не наблюдаются.

4.1.1. Оборудование для монтажа кристаллов

Ниже приведены технические характеристики оборудования для присоединения кристаллов. Данное оборудование разработано и изготовлено в ОКБТЭМ-СО (г. Минск, Республика Беларусь).

ЭМ-4025АМ – полуавтомат присоединения кристаллов

Назначение:

• монтаж полупроводниковых кристаллов и компонентов методом эвтектической пайки, на клей и припой при сборке ИС, ГИС, диодных и транзисторных матриц, СВЧ-приборов и других многокристальных приборов.

Особенности:

• 8-ми инструментальная револьверная головка;
• рабочий стол с двумя зонами нагрева;
• два газовых паяльника;
• «мягкое» касание по координате Z;
• программирование технологических параметров для каждого кристалла;

• возможность комплектования установки 10-ю питателями для блистер-лент и линейным устройством подачи корпусов/подложек.

Основные технические характеристики

Кинематическая производительность	2000 кристаллов/час
Размеры присоединяемых кристаллов	от 0,4×0,4 до 20×20 мм
Диаметр полупроводниковой пластины	100 мм
Рабочее поле перемещения координатного стола	400×200 мм
Температура нагрева рабочего стола	от 150 до 450°С
Потребляемая мощность	0,6 кВт
Габаритные размеры	790×750×500 мм
Масса	80 кг

ЭМ-4085-14М – автомат присоединения кристаллов

Назначение:

• монтаж кристаллов мощных транзисторов на мягкий припой в корпуса ТО-220 или ТО-218.

Особенности:

• полная автоматизация всех операций, включая подачу выводных рамок, выбор годных кристаллов с полупроводниковой пластины и присоединение кристаллов;

• возможность подачи выводных рамок по схеме «стопка-магазин» или «магазин-магазин»;

• линейный шаговый привод на воздушной подушке;

• подача формир-газа в рабочую зону.

Основные технические характеристики

Производительность (в зависимости от размеров кристаллов)	800-2500 кристаллов/час
Размеры кристаллов	от 1×1 до 8×8мм
Максимальный диаметр обрабатываемых пластин	150 мм

Погрешность присоединения кристаллов:	
• по координатам X,Y	± 0,15 мм
• по углу	± 5°
Потребляемая мощность, не более:	
• при выходе на рабочий режим	9,2 кВт
• в рабочем режиме	3,6 кВт
Габаритные размеры	1650×940×1870 мм
Масса	600 кг

ЭМ-4105-6М – автомат присоединения кристаллов

Назначение:

• присоединение кристаллов методом эвтектической пайки к отрезкам корпусов транзисторов.

Особенности:

• линейный шаговый привод на воздушной подушке;

• система технического зрения и устройство визуального контроля присоединяемых кристаллов с выводом изображения на экран монитора;

• устройство автоматической загрузки;

• устройство нанесения клея (по требованию).

Основные технические характеристики

Время цикла	0,7 с/кристалл
Максимальный диаметр обрабатываемых пластин	100 мм
Размер присоединяемых кристаллов	от 0,36×0,36 до 3,0×3,0 мм
Погрешность присоединения:	
• по координатам X,Y	± 0,1 мм
• по углу	± 5°
Потребляемая мощность, не более	2 кВт
Габаритные размеры	1250×740×1740 мм
Масса	500 кг

4.2. Групповая термоимпульсная пайка кристаллов

Анализ способов пайки кристаллов к основаниям корпусов показал, что они имеют определенные недостатки: требуют использования дорогостоящего оборудования; не обеспечивают высокого качества паяных швов, особенно при сборке кристаллов больших размеров; используется высокая температура нагрева.

Нами разработан способ групповой термоимпульсной пайки полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов типа ТО-218, ТО-220 и ТО-247. Применение данного способа позволит повысить надежность ППИ за счет снижения температуры нагрева при пайке поверхности кристалла со структурами, улучшить смачивание припоем соединяемых поверхностей и повысить производительность сборочных операций за счет групповой пайки кристаллов к основаниям корпусов.

Способ сборки ППИ реализуется по схеме, представленной на рис. 4.4. На основании 1, соединенным с вакуумным насосом, закреплена вакуумная присоска 2, в ячейках которой фиксируются коллекторной поверхностью вверх полупроводниковые кристаллы 3 с припоем 4 на паяемой поверхности. На кристаллах размещается выводная рамка пластмассового корпуса на 10 кадров 5. U-образные электроды 6

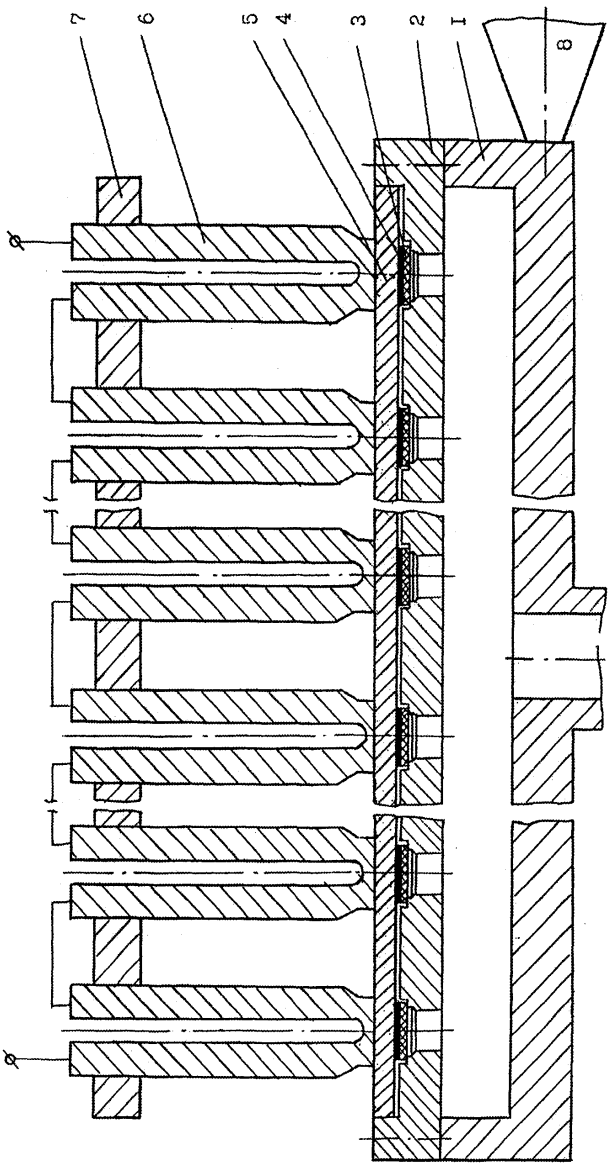


Рис. 4.4. Схема групповой термоимпульсной пайки полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов: 1 –основание; 2 – вакуумная присоска; 3 – кристаллы; 4 – припой; 5 – выводная рамка; 6 – U-образные электроды; 7 – кронштейн; 8 – ультразвуковой концентратор

жестко закреплены в кронштейне 7, электрически последовательно соединены друг с другом и расположены дифференцировано над каждым кристаллом. На рис. 4.5. показана схема пайки одного кристалла. Для равномерного нагрева всей площади кристалла при пайке размеры рабочей площадки U-образного электрода должны быть на 0,6-1,0 мм больше каждой из сторон кристалла.

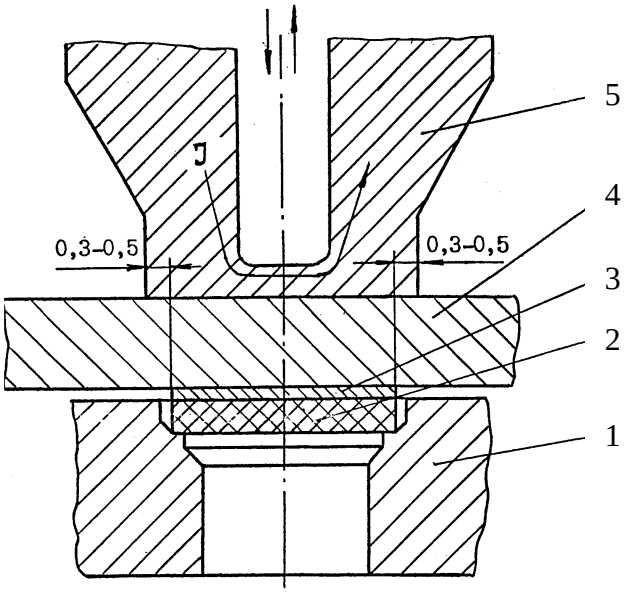


Рис. 4.5. Схема пайки одного кристалла: 1 – вакуумная присоска; 2 – кристалл; 3 – припой; 4 – выводная рамка; 5 – U-образный электрод

При пайке кронштейн с U-образными электродами прижимает выводную рамку к кристаллам. Через электроды пропускается импульс тока. Тепло от рабочей площадки электрода передается корпусу и далее кристаллу, разогревая припой до температуры пайки. В момент расплавления припоя вакуумную присоску с кристаллами подвергают воздействию ультразвуковых колебаний в направлении параллельном паяному шву от ультразвукового концентратора 8 (рис. 4.4). Это способствует разру-

шению оксидных пленок и улучшению смачивания припоем соединяемых поверхностей кристалла и основания корпуса. Давление на каждый кристалл осуществляется массой корпуса прибора и кронштейна с U-образными электродами. Через заданное время отключается ток и после кристаллизации припоя образуется качественное паяное соединение.

Так как при импульсной пайке происходит нагрев кристалла через корпус, то коллекторная поверхность кристалла нагревается до температуры пайки, а противоположная поверхность кристалла со структурами имеет температуру нагрева значительно ниже, чем коллекторная. Этот фактор способствует повышению надежности ППИ.

При сборке ППИ предлагаемым способом очень важно знать температуру на рабочей поверхности инструмента (U-образного электрода). Эта температура зависит не только от подаваемого напряжения на электроды, но и от физико-механических свойств материала, из которого они изготовлены. Существенное влияние на нагрев рабочей площадки электрода оказывает толщина перемычки паза U-образного электрода. Существуют различные способы расчета температуры на поверхности деталей при прохождении через них электрического тока. Следует отметить, что эти способы достаточно трудоемкие, а что особенно важно, не обеспечивают необходимой точности. В производстве ППИ на сборочных операциях используется достаточно простая методика определения температуры рабочей поверхности инструмента при импульсном нагреве. Эта температура зависит от подаваемого напряжения и времени прохождения импульса тока. Продолжительность подачи импульса тока задается по электронному реле времени. Для определения температуры на рабочей поверхности инструмента для термоимпульсной пайки кристаллов нужно строить номограмму (рис. 4.5), которую используют для настройки температурных режимов пайки.

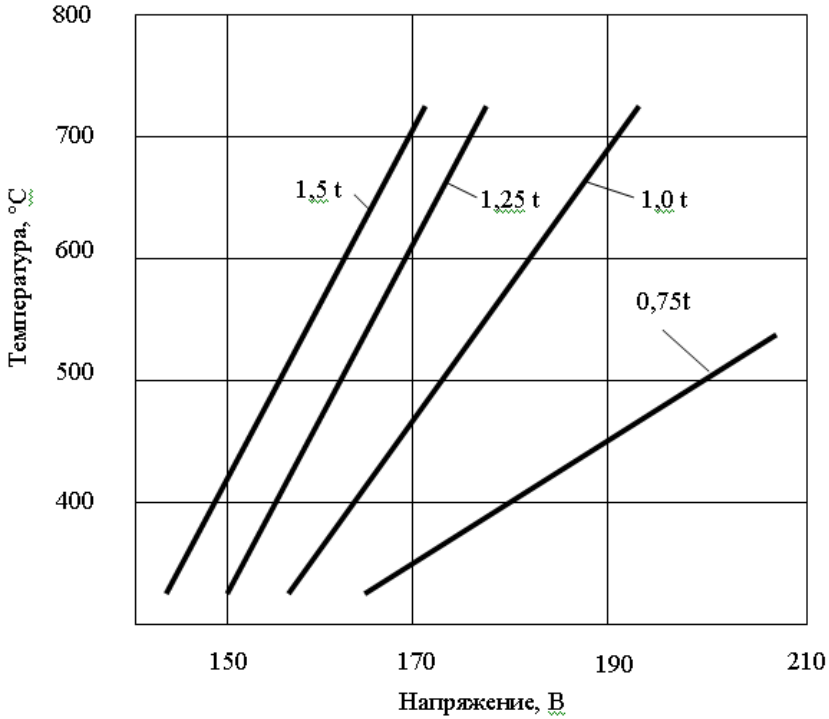


Рис. 4.5. Номограмма для определения температуры на рабочей поверхности инструмента при термоимпульсной пайке кристаллов: 0,75t-1,5t – время нагрева, с

Для равномерного давления U-образных электродов на соединяемые элементы необходимо обеспечить параллельность рабочей площадки электродов и поверхностей оснований корпусов и кристаллов.

Таким образом, разработанный способ групповой термоимпульсной пайки кристаллов к основаниям корпусов обладает следующими особенностями: позволяет проводить пайку кристаллов к основаниям корпусов на воздухе; улучшает смачивание припоем соединяемых поверхностей кристалла и основания корпуса; повышает надежность ППИ за счет снижения температуры нагрева при пайке поверхности кристалла со структурами.

4.3. Оценка смачиваемости и растекания припоя по паяемой поверхности

О качестве пайки судят по способности покрытий при режимах пайки смачиваться припоем. Смачиваемость – это первая стадия физико-химического взаимодействия припоя с паяемой поверхностью изделия. В тоже время следует помнить, что смачиваемость покрытий припоем относится к технологическим факторам, позволяющим проводить экспресс-анализ пайки, как способа соединения элементов. Эксплуатационным параметром, позволяющим прогнозировать длительность хранения и эксплуатации изделий в заданных условиях, является прочность паяных соединений.

Известно, что смачиваемость и растекание припоя непосредственно связаны с краевым углом смачивания θ (рис. 4.6). Этот угол между поверхностями припоя и паяемым материалом на практике используется для оценки режимов и условий пайки.

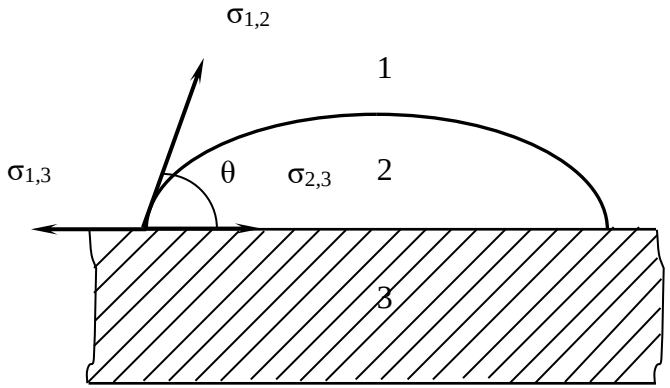


Рис. 4.6. Схема расположения векторов сил поверхностного натяжения капли припоя на поверхности твердого тела: 1 – окружающая среда; 2 – припой; 3 – твердое тело

Равновесие капли припоя на паяемой поверхности выражается в виде равновесия векторов сил поверхностного натяжения в точке на границе трех фаз

$$\sigma_{1,3} = \sigma_{2,3} + \sigma_{1,2} \cos \theta, \qquad (1)$$

где $\sigma_{1,3}$ – поверхностное натяжение между твердым телом и газовой средой, действующее на каплю по периметру ее основания; $\sigma_{2,3}$ – поверхностное натяжение припоя на границе с твердым телом; $\sigma_{1,2}$ – поверхностное натяжение припоя на границе с окружающей средой.

Из выражения (1) следует, что

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}.$$

Cos θ, характеризующий способность припоя смачивать паяемую поверхность называется коэффициентом смачивания. Таким образом, зная краевой угол смачивания θ, определяют качество смачивания припоя поверхности твердого тела.

Растекание расплавленного припоя по паяемой поверхности определяется соотношением сил адгезии припоя к поверхности и когезии, характеризуемой силами связи между частицами припоя. Известно, что работа адгезии A_a определяется свободной поверхностной энергией в случае отделения припоя от основного материала

$$A_a = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3}$$

Отсюда следует, что при полном смачивании (θ=0) $A_a = 2\sigma_{1,2}$. Когда краевой угол смачивания не равен нулю: $A_a = \sigma_{1,2}(1+\cos\theta)$.

Таким образом расплавленный припой растекаться по паяемой поверхности будет в том случае, если $A_a \geq A_к$. Разность между ними называют коэффициентом растекания: $К = A_a - A_к$.

Коэффициент растекания К находится в прямой зависимости от краевого угла смачивания, т.е. полное растекание будет только при полном смачивании, т. е. при cos θ=1.

Для выбора оптимального типа припоя, способа обработки поверхности паяемого материала и режимов пайки необходимо проведение исследований смачиваемости припоев в комплексе

условий с одновременным приближением их к производственным.

Исследование смачиваемости можно осуществлять по методу «лежащей капли». В этом случае для определения величины краевого угла θ пользуются промежуточной величиной-коэффициентом растекаемости $К_р$, который рассчитывается по формуле

$$K_{ð} = \frac{Ä - Í}{Ä} 100\%,$$

где Д – диаметр сферической капли припоя, мм; Н – высота капли после ее растекания по подложке, мм;

Величину Д для сферической капли определяют из выражения

$$Д = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot Р}{\pi \cdot \gamma}},$$

где Р – вес исследуемой навески припоя, г; γ – удельный вес припоя, г/см^3.

Величину Н с достаточной точностью определяют с помощью индикатора замером высоты капли припоя, застывшей на подложке после расплавления. Для измерения высоты капли припоя после растекания разработан прибор, в основу которого положен принцип бесконтактного измерения с помощью индуктивного преобразователя.

Зная $К_р$, с помощью графика определяют соответствующее значение краевых углов θ.

Оценку паяемости покрытий по растеканию дозы припоя можно провести по методу, изложенному в ГОСТе 9.302-79. В этом случае коэффициент растекания припоя определяют по формуле

$$К_р = S_р/S_о,$$

где $S_р$ – площадь, занятая припоем после расплавления и растекания, мм^2; $S_о$ – площадь, занятая дозой припоя в исходном состоянии, мм^2.

По данному ГОСТу исследуемая доза припоя имеет следующие размеры: диаметр 8 мм и толщину 0,3 мм.

Для практического использования разработана следующая шкала растекаемости припоя по паяемой поверхности в зависимости от краевого угла смачивания (табл. 4.1).

Табл. 4.1. Оценка смачивания поверхности припоем

Краевой угол смачивания θ, град	Качество смачивания	Коэффициент растекаемости $К_р$, %
> 70	Очень плохое	> 60
70-55	Плохое, удовлетворительное	60-70
55-40	Достаточное	70-80
40-30	Хорошее	80-85
30-20	Очень хорошее	85-90
20-10	Отличное	90-95
10-0	Идеальное	95-100

При анализе качества паяных соединений полупроводникового кристалла с корпусом ППИ дозу припоя для исследований можно выбирать исходя их задаваемого объема припоя в паяном шве.

На рис. 4.7. показаны виды растекания припоя ПОС40 по различным покрытиям после нагрева в вакууме (10^{-1} Па) в течение 3 минут при температуре 280 ºС.

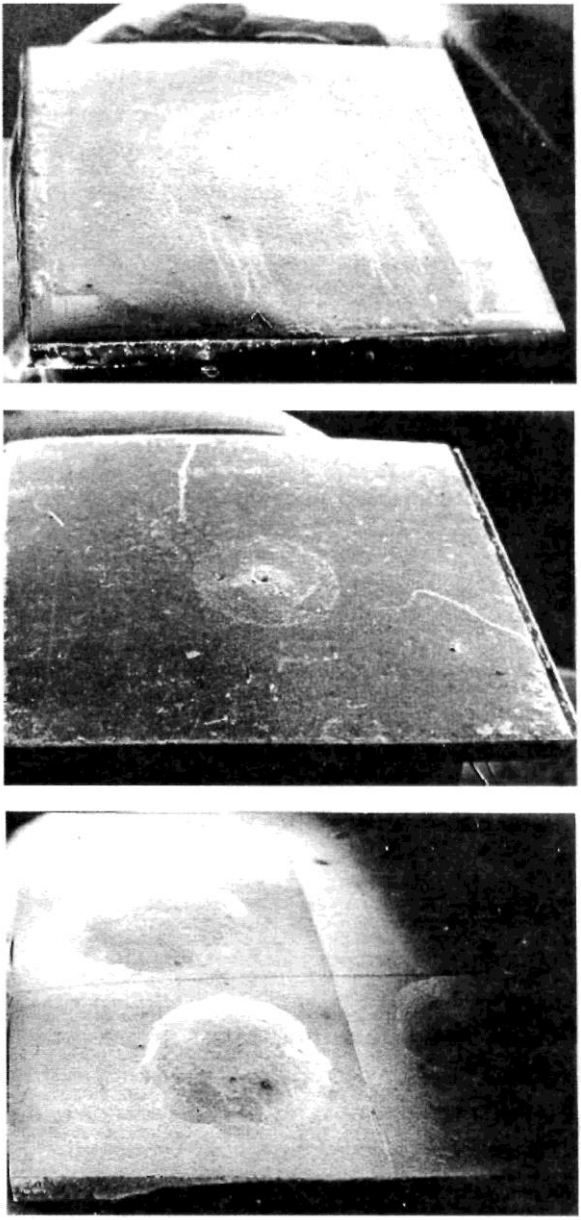


Рис. 4.7. Внешний вид растекания шарика припоя ПОС40 диаметром 1 мм по различным покрытиям: а – золотому; б – гальваническому никелю; в – никель – бор. Увеличение: 20× (а, б), 10× (в)

На фотографиях видно, что припой ПОС40 отлично смачивает золотое и никелевое и хорошо никель – бор покрытия.

Процесс смачивания является контактным металлургическим процессом взаимодействия припоя с поверхностью паяемого материала. Развитие этого процесса зависит как от состояния поверхности контактирующих материалов, характера развивающихся в их контакте процессов взаимодействия, так и режима пайки.

Скорость течения припоя по паяемой поверхности можно определять по способу, при котором припой помещают между излучающим и принимающим волноводами ультразвуковых колебаний. По относительному изменению энергии колебаний в единицу времени судят о скорости течения припоя по паяемой поверхности.

Определение смачивающей способности расплавов металлов возможно с помощью устройства, содержащего вертикально установленные пластины из исследуемого материала (металла) с температурой плавления выше температуры плавления расплава. При этом с целью проведения экспресс-анализа, пластины расположены под углом одна к другой. Собранные таким образом пластины помещаются основанием в емкость с исследуемым расплавом металла. После затвердевания отделяют исследуемый металл от наружных стенок пластины, а пластины разрезают по основанию. Поверхность, оставшаяся после разреза, шлифуется, полируется, травится и т. д. На месте разреза испытуемый материал образует картину зависимости высоты поднятия припоя по толщине щели, образованной пластинами.

Управлять площадью растекания припоя по поверхности твердого тела можно, используя способ, при котором твердое тело с припоем размещают в постоянном магнитном поле и подают электрический ток. С целью получения требуемой площади растекания припоя и увеличения прочности паяных соединений электрический ток пропускают через твердое тело с припоем в направлении, перпендикулярном направлению внешнего магнитного поля.

Для проведения исследований по затеканию припоя в переменный зазор в условиях невесомости и знакопеременных нагрузок можно использовать составной образец, который представляет собой две вставленные одна в другую трубы, при этом на наружной поверхности внутренней трубы выполнена проточка, эксцентричная относительно посадочных диаметров труб, с эксцентриситетом, равным половине максимального исследуемого капиллярного зазора. Наружная труба герметично соединена с внутренней трубой по посадочным соосным поверхностям, а емкость для припоя выполнена в трубе у основания эксцентричной проточки.

После размещения припоя в канавке внутренней трубы эта труба вставляется в наружную трубу. Затем детали обезгаживаются в вакууме или продуваются нейтрально-восстановительным газом и герметично завариваются по краям. Нагрев до температуры плавления припоя проводится в любых условиях (в невесомости, при знакопеременных нагрузках и т. д.). Исследования затекания припоя в капиллярный зазор в различных условиях проводят с помощью металлографического анализа паяных соединений.

Известна конструкция образца для исследования процесса заполнения капиллярных зазоров припоем, содержащая две прилегающие одна к другой пластины, на контактирующей поверхности одной из которых выполнены каналы, причем с целью подавления эффекта повышения капиллярного давления в углах каналов (по краям) выполнены углубления.

Смачиваемость паяемого материала расплавленным припоем, находящимся в динамическом состоянии (при пайке погружением или волной припоя), более правильно оценивать не по углу смачивания или площади растекания, а по силе, действующей на образец при его погружении и смачивании припоем. При пайке погружением или волной припоя (особенно при поверхностном монтаже компонентов), важнейшей характеристикой является скорость смачивания. Для этих целей широко используются испытания по методу силового баланса на приборе менискографе по методике ИСО.

Существуют различные способы оценки смачиваемости припоев. Например, известен способ, при котором погружение образца в расплав припоя осуществляется со скоростью, превышающей скорость смачивания. С помощью датчиков регистрируется изменение силы, действующей на образец во времени. Высота мениска определяется выражением

$$h = \sqrt{\frac{2\sigma}{g\rho}(1-\sin\theta)},$$

где σ – поверхностное натяжение; ρ – плотность; θ – краевой угол; g – ускорение свободного падения.

Оценку паяемости определяют также по изменению величины усилия смачивания при погружении образца в ванну с жидким припоем. Такая оценка паяемости является наиболее объективной, особенно при использовании процесса пайки в радиоэлектронике, например, при изготовлении ИС. Для этих целей разработаны специализированные установки, позволяющие преобразовывать усилия смачивания в электрический сигнал, который автоматически регистрируется электронным самописцем в виде диаграммы. Расшифровка диаграмм позволяет определить следующие временные характеристики: прогрев образца в расплавленном припое до начала смачивания, полное смачивание и общее время смачивания. Кроме того, определяется усилие выталкивания (дисмачивания) образца, погруженного в расплавленный припой, и усилие вытягивания образца с момента начала и до завершения процесса смачивания. Разработанная оценка паяемости, как отмечают авторы данной работы, является наиболее объективной и позволяет значительно снизить трудоемкость при выполнении экспериментальных работ.

Для определения скорости, а также площади смачивания припоем металлических поверхностей, диэлектриков и полупроводников разработано специальное устройство, с помощью которого возможно исследование смачивания поверхности припоем в динамике, а не по методу «лежащей капли».

Устройство для исследования смачивания поверхности припоем содержит основание 1 с токоподводами 2, соединен-

ными внешними концами с приборами контроля электрической цепи 3 (рис. 4.8). Токоподводы 2, представляющие собой планарно расположенную лучевую систему дорожек изолированных слоем диэлектрика 6 от материала основания, имеют толщину 0,001-0,006 мм и ширину 0,02-0,1 мм. Токоподводы наносят на основание напылением, гальваническим или другим известным способом. При ширине токоподвода 0,02-0,1 мм исключается погрешность затекания исследуемого припоя по токоподводам, т.е. опережающее течение припоя по токоподводам в сравнении с материалом основания, т. к. в данном случае преобладающими являются силы поверхностного натяжения расплавленного припоя. Меньшая ширина токоподводов 2 практически сложно выполнима с малым процентом разброса (допуском). Конкретные размеры поперечного сечения токоподводов выбирают в зависимости от необходимой точности контроля, при этом важным параметром является постоянство сечения токоподводов 2 по всей длине.

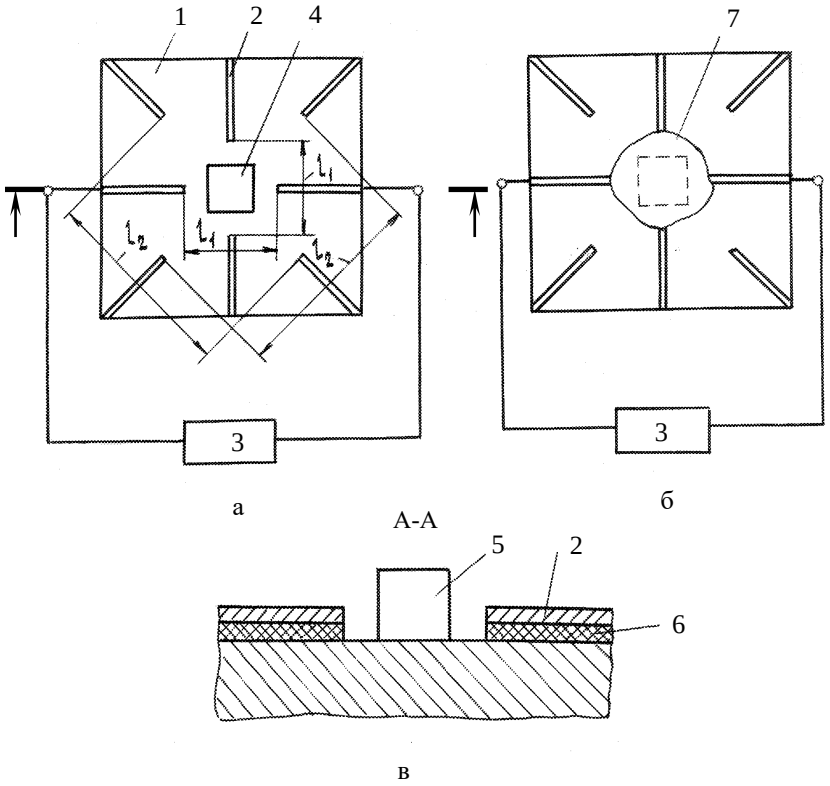


Рис. 4.8. Схема устройства для исследования смачиваемости поверхности припоем: а – расположение токоподводов на основании; б – начало расплавления припоя; в – размещение припоя перед нагревом: 1 – основание; 2 – токоподводы; 3 – прибор контроля электрической цепи; 4 – площадка для размещения исследуемого припоя; 5 – кубик исследуемого припоя; 6 – диэлектрическая пленка; 7 – капля расплавленного припоя

В центре основания имеется площадка 4 для размещения исследуемого припоя 5. Площадка представляет собой квадрат размером 4×4 мм, а для определения площади растекания используется навеска припоя объемом 64,0 мм^3, по форме близкая к кубу.

Токоподводы на исследуемой подложке располагаются попарно на одной линии с центром площадки 4 с изменяющимися расстояниями между внутренними концами, которые сим-

метричны относительно того же центра. Расстояния l_1, l_2, …, l_n между внутренними концами пар токоподводов изменяются (увеличиваются) по определенному закону, например, линейному или логарифмическому. Например, расстояние между концами пар токоподводов увеличивается по линейному закону через 1 мм, а расстояние l_1 между ближайшими токоподводами составляет 6мм.

Для исследования смачивания припоем основания из диэлектрика металл токоподводов должен иметь температуру плавления не менее чем на 50-100 ºС выше температуры плавления припоя. При исследовании смачивания припоем основания из металла токоподводы наносят на основание через диэлектрическую пленку 6, в этом случае токоподводы выполняются из того же материала, что и основание.

Исследования смачивания и капиллярного течения припоя по подложке проводят следующим образом. На площадке, в центре основания, размещают кубик припоя, совмещая ребра нижней грани куба с границами площадки, при этом оси симметрии нижней грани куба проходят через центр площадки. Внешние концы токоподводов основания соединяют через коммутирующее устройство с приборами контроля электрической цепи, например, включающими измеритель электрических сигналов с устройством для вывода информации на печатающее устройство или дисплей.

Затем основание нагревают до температуры расплавления припоя, используя при этом высокоточный регулятор температуры. При растекании капли припоя по основанию происходит замыкание токоподводов, которое фиксируется измерителем. Измеритель переключается поочередно на пары токоподводов в последовательности, соответствующей увеличению расстояния между внутренними концами токоподводов, и контролирует также падение напряжения между токоподводами. Переключение измерителя, фиксация времени появления контакта между токоподводами производится от ЭВМ.

Данные по фактической температуре основания и ее изменению снимаются с помощью быстродействующего измерителя

температуры, соединенного с основанием при помощи термопары и подключенного также к ЭВМ.

Таким образом, ЭВМ получает данные о времени замыкания соответствующих пар токоподводов, по которым определяют площадь и скорость растекания припоев. Данные с ЭВМ можно подавать на графопостроитель и получать при этом информацию о площади и скорости растекания припоев в виде графиков временной зависимости. По данным с ЭВМ по падению напряжения между соответствующими парами токоподводов в зависимости от площади и скорости растекания можно определять изменение электрической проводимости припоев при смачивании исследуемой поверхности. Зависимость изменения проводимости припоев при смачивании может быть также получена в виде графиков с помощью графопостроителя.

Разработанное устройство позволяет проводить эксперименты в вакууме, в потоке защитных или восстановительных газов: водороде, азоте, аргоне, формир-газе и т. д.

Таким образом, для отработки технологических процессов пайки ППИ, особенно кристаллов к корпусам или герметизации приборов, необходимо в первую очередь провести оценку смачиваемости и растекания припоя по паяемым поверхностям. Это своего рода экспресс-анализ, позволяющий правильно выбирать оптимальный способ и режимы получения качественных паяных соединений.

4.4. Заполнение припоем капиллярного зазора между кристаллом и корпусом при пайке

Экспериментальным исследованиями установлено, что прямой зависимости между растеканием и течением припоя в зазоре нет. Некоторые припои хорошо растекаются по поверхности, но не затекают в капиллярный зазор и наоборот. Это связано с процессами взаимодействия расплавленного припоя с паяемым металлом. Известно, что в капиллярном зазоре жидкий припой интенсивно насыщается компонентами паяемого метал-

ла, что изменяет поверхностное натяжение расплава. На различие в процессах растекания припоя по поверхности и течение в зазоре может влиять наличие в расплаве отдельных кристаллов и кристаллических образований. При размерах в расплаве, превышающих величину капиллярного зазора, течение припоя в зазоре не будет.

Механизм смачивания припоем связан или с взаимодействием их парообразной фазы с паяемым металлом или поверхностной диффузией расплавленного припоя. Растекание припоя при смачивании, как правило, происходит в две стадии. Первая стадия соответствует быстрому растеканию припоя под действием сил поверхностного натяжения. На первой стадии жидкий припой растекается с краевым углом смачивания, близким к нулю. Эта стадия продолжается доли секунды, форма капли припоя соответствует схеме равновесия жидкого металла на идеально гладкой твердой поверхности.

Вторая стадия происходит тогда, когда от жидкой капли припоя растекаются потоки жидкого металла по границам зерен паяемой поверхности (рис. 4.9).

Рис. 4.9. Внешний вид припоев на границе с покрытием (химическое никелирование) после нагрева в водороде при температуре 390±20 ºС в течение 3 мин: а – ПОС40; б – ПОС61; в – ПСр2,5

Так как металлы, входящие в состав припоев, имеют различное давление насыщенного пара при температуре пайки, то, по всей видимости, при смачивании имеют место оба указанных механизма.

Рассмотрим перемещение жидкого припоя в горизонтальном капиллярном зазоре (рис. 4.10). При ограниченном смачивании припоем поверхности капиллярное давление в зазоре выражается через краевой угол смачивания

$$P_k = \frac{2\sigma_{1,2}\cos\theta}{h}, \qquad (1)$$

где $\sigma_{1,2}$ – поверхностное натяжение между припоем и газовой средой; h – величина зазора; θ – краевой угол смачивания.

В предположении ламинарного течения припоя в зазоре (согласно Пуазейлю жидкость у стенок покоится, т. е. $U = 0$ при $y = h/2$) имеет место параболическое распределение скорости потока припоя по толщине. Для средней скорости потока

$$\frac{dl}{dt} = \frac{h}{12\eta}\frac{P_k}{l}, \qquad (2)$$

где l – длина заполненного зазора; h – величина зазора; η – вязкость жидкости.

Интегрируя выражение (2), получим время заполнения припоем горизонтального зазора длиной l:

$$t = \frac{3\eta l^2}{h\cos\theta\sigma_{1,2}} = \frac{6\eta l^2}{hK_p}, \qquad (3)$$

где $К_р$ – энергетический коэффициент растекания:

$$K_p = \sigma_{1,3} - \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3}. \qquad (4)$$

$К_р$ – зависит от соотношения сил адгезии припоя с паяемой поверхностью сил когезии между частицами припоя. Растекание происходит при $K_p > 0$ и интенсифицируется с увеличением положительного его значения.

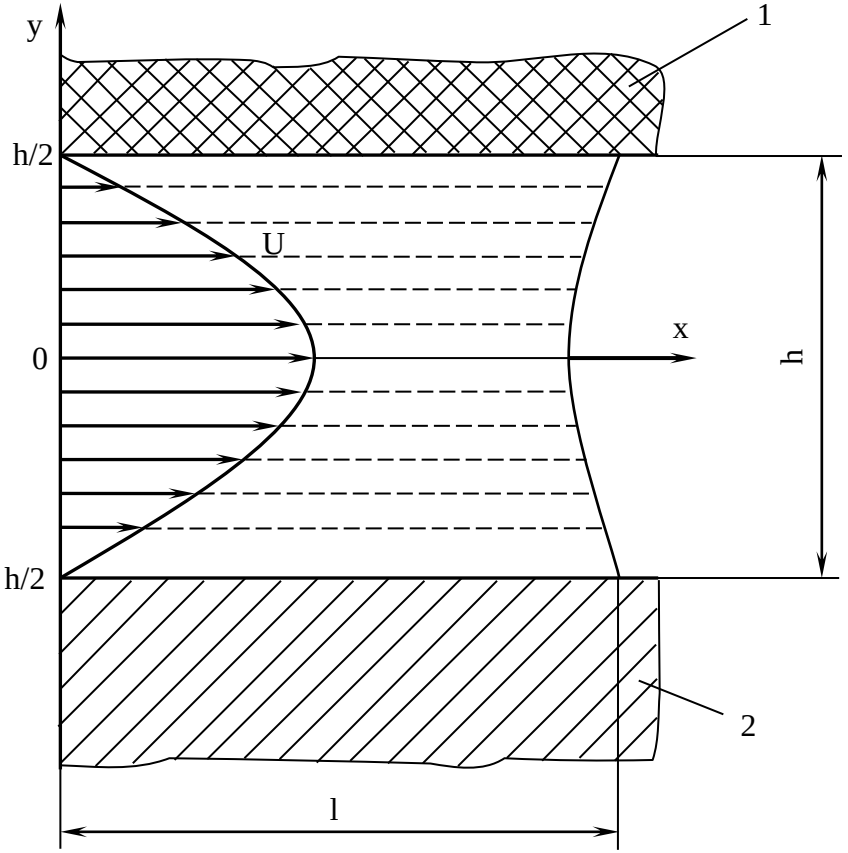


Рис. 4.10. Схема для расчета времени заполнения горизонтального капиллярного зазора h при пайке кристалла к корпусу: 1 – кристалл; 2 – корпус

Выражение (3) справедливо для динамической теории течения расплавов. Согласно этой теории, скорость течения расплавленного припоя зависит от длины шва и величины зазора, разности давлений на входе и выходе из зазора, а также от вязкости припоя. Динамическая теория исходит из условия непрерывного течения в капиллярном зазоре припоя, не учитывая наличия взаимодействия припоя с металлами паяемых поверхностей. Поэтому и время заполнения капиллярного зазора, и

глубина затекания припоя в зазор значительно отличаются от результатов, получаемых экспериментально.

Поэтому для определения фактического времени заполнения припоем соединительного зазора при пайке кристалла к корпусу необходима разработка специального способа и установки для реализации этого способа, позволяющих контролировать данный параметр в реальных условиях.

Пример конкретного применения расчета. Время заполнения капиллярного зазора припоем ПОС40 при пайке кристалла к корпусу ТО-220 при изготовлении транзисторов КТ8232А1. Размер кремниевого кристалла 5,1×5,6 мм. Покрытия паяемых поверхностей: коллекторной стороны кристалла – напыленное серебро, а корпуса химический никель.

Исходные данные для расчета: поверхностное натяжение припоя ПОС40 $\sigma_ж$ ($474 \cdot 10^{-5}$ Н/см); динамическая вязкость припоя ПОС40 при температуре 280 ºС η (0,0229);

Величину зазора h выбираем в интервале от 0,05 до 0,2 мм.

Для расчетов удобнее пользоваться формулой $t = \frac{3\eta l^2}{h \cos\theta \sigma_{ж}}$, т. к. угол растекания припоя θ легко определяется при экспериментальных исследованиях.

Эксперименты показали, что припой ПОС40 идеально растекается по паяемым поверхностям кристалла и корпуса (рис. 4.7). Поэтому берем $\theta = 0$ º.

Подставляя в выражение (3) известные значения, определяем время заполнения зазора припоем ПОС40 при пайке кристалла к корпусу (рис. 4.11).

Согласно рис. 4.11 время заполнения зазора между кристаллом и корпусом полностью смачивающих соединяющих поверхностей, составляет сотые доли секунды.

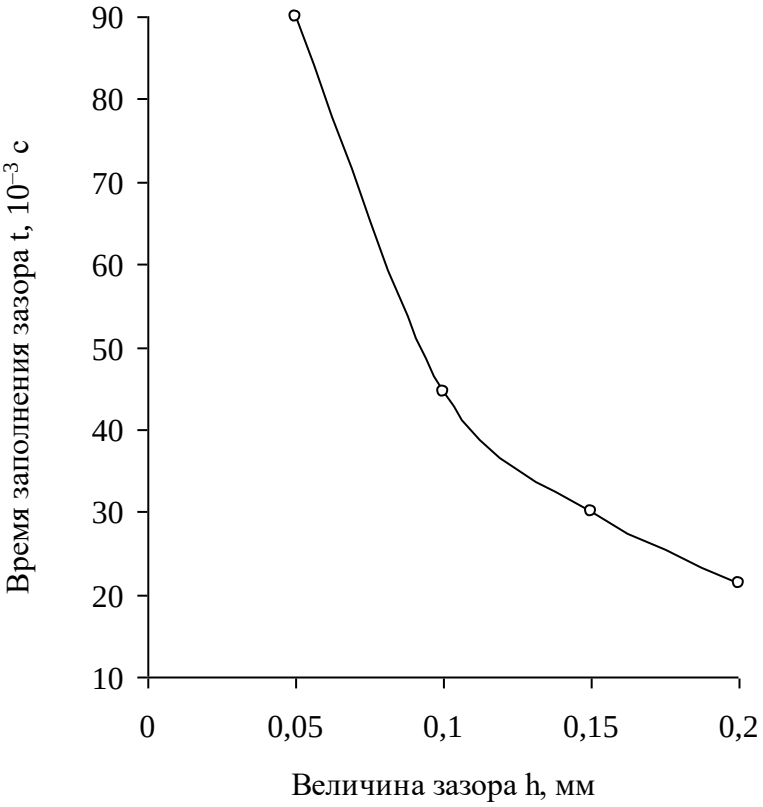


Рис. 4.11. зависимость времени заполнения горизонтального капиллярного зазора при пайке припоем ПОС40 кристалла к корпусу ТО-220 транзисторов КТ8232А1 от величины зазора

Из данных расчетов следует, что в реальных условиях время заполнения соединительного зазора зависит от технологии подготовки соединяемых поверхностей и припоя под пайку, а также от металлургического взаимодействия припоя с контактируемыми поверхностями в процессе пайки.

Таким образом, время пайки кристаллов к корпусам ППИ можно существенно сократить, применяя импульсный нагрев соединяемых элементов. А для интенсификации процессов вза-

имодействия припоя с поверхностями кристалла и корпуса необходимо подвергать одну из соединяемых деталей воздействию ультразвуковых или низкочастотных колебаний.

4.5. Контроль качества паяных соединений

Проблема неразрушающего объективного метода контроля качества паяных соединений и оценки их механической прочности, электро- и теплопроводности является актуальной в настоящее время в производстве ППИ.

Качество паяных соединений контролируют различными методами, например, с помощью холестерических жидких кристаллов – веществ, изменяющих свой цвет под воздействием температуры. Участки изменения цвета соответствуют расположению дефектов монтажа полупроводникового кристалла. После испытаний жидкий кристалл удаляется с поверхности – стирается или прополаскивается в этиловом спирте.

Обнаружение дефектов монтажа кристаллов пайкой возможно с помощью инфракрасного излучения. Направляя на исследуемую поверхность радиометр, можно на телевизионном экране наблюдать термограмму. Характер дефектов и место их расположения определяют сравнением термограммы с эталонным образцом.

В технологии производства ППИ при оценке качества монтажа кристалла к основанию корпуса иногда используют разрушающий метод, заключающийся в том, что кристалл с помощью специального приспособления механически отделяют от монтажной поверхности кристалла (рис. 4.12). При этом определяют прочность соединения кристалла с поверхностью, также исследуют состояние поверхности коллекторной стороны кристалла и монтажной площадки корпуса на предмет наличия пор, зон объемного взаимодействия контактируемых участков.

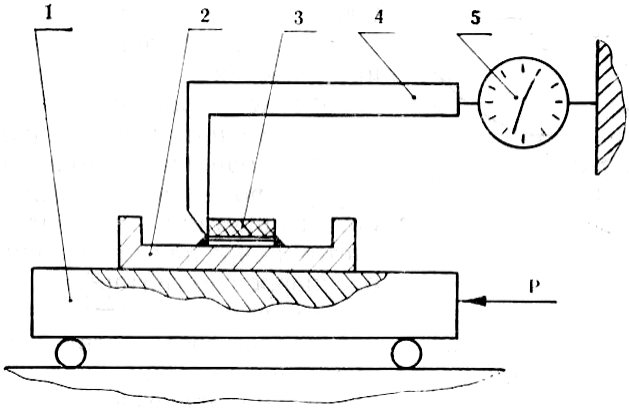


Рис. 4.12. Схема контроля прочности присоединения кристалла: 1 – кристалл; 2 – корпус прибора; 3 – подвижная каретка; 4 – зацеп; 5 – динамометр

При отработке новой технологии пайки кристаллов к основаниям корпусов необходимо проводить исследования качества паяных соединений по поперечным шлифам. Под микроскопом при необходимом увеличении можно зафиксировать не только наличие непропаев и различных включений в паяном шве, но и оценить качество адгезии пленочной металлизации с кристаллом и основанием корпуса.

Следует отметить, что разрушающий метод имеет следующие недостатки: происходит разрушение прибора, занимает много времени и не дает количественной оценки качества соединения кристалла с монтажной площадкой корпуса.

К неразрушающим методам, широко используемым в практике, можно отнести рентгенографическое исследование и проверку теплового сопротивления. Рентгеновские методы осуществляются с помощью рентгеноскопии (наблюдение теневого рентгеновского изображения на экране) и рентгенографии (получение теневого изображения на рентгеновской пленке). Обработанная рентгеновская пленка с изображением контролируемых участков изделий называется рентгенограммой. Высокоточное рентгеновское оборудование дорого и поэтому малодоступно небольшим предприятием в качестве повседневного рабочего инструмента контроля качества. Этот метод целесооб-

разно использовать на этапе разработки технологии сборки новых изделий или на стадии серийного производства с целью управляемости технологическим процессом пайки кристаллов к основаниям корпусов.

Определение теплового сопротивления является одним из методов контроля правильности выбора конструкции или технологического процесса изготовления ППИ. Известно, что одной из наиболее существенных причин отказов СПП является повышенное тепловое сопротивление кристалл-корпус, приводящее к выходу приборов из строя вследствие теплового пробоя. Например, простое увеличение на 10 ºС рабочей температуры может привести к увеличению в два раза тока смещения транзистора и к уменьшению в два раза среднего срока службы чувствительного операционного усилителя.

При изготовлении СПП качество монтажа кристаллов проверяют, измеряя тепловое сопротивление между кристаллом и корпусом и сравнивают его с тепловым сопротивлением эталонного образца. Разница значений более 20 % свидетельствует о низком качестве пайки (наличие воздушных прослоек, оксидных пленок, непропаи и т. п.). Повышение теплового сопротивления кристалл – корпус обусловлено, в основном, низким качеством присоединения кристалла. Участки локального повышения температуры кристалла могут привести к отказу, так как развитие теплового пробоя способствует ускорению протекания диффузионных процессов на границе раздела металлическая пленка – полупроводник.

В последние годы при пайке кристаллов к основаниям корпусов стремятся получить площадь спая не менее 95 % от площади кристалла. Этот вопрос является дискуссионным, т. к. некоторые ППИ могут быть годными по электрическим параметрам, в том числе и по мощности рассеивания, но имеющие площадь спая до 80 % от площади кристалла.

Нами установлено, что четкой зависимости температуры нагрева кристалла от площади спая нет. Анализ рентгенограмм показал, что качество паяных соединений кристаллов с основаниями корпусов зависит от способов пайки. Исследования пока-

зали, что непропаи в паяных швах, полученных при одних и тех же режимах пайки, могут быть на различных участках: в центре кристалла, по углам, периметру и т. п. Поэтому оценку качества пайки кристалла к основанию корпуса целесообразно осуществлять путем замера теплового сопротивления с одновременным анализом рентгенограмм паяных швов исследуемых приборов. Это необходимо проводить при отработке новой технологии пайки кристаллов и установлении критериев качества для серийного производства ППИ.

Зависимость надежности ППИ от качества пайки кристаллов к основаниям требует специальных исследований.

4.6. Посадка на клей

По механическим свойствам клеевые соединения в ряде случаев не уступают, а иногда и превосходят паяные и сварные соединения. Клеевая прослойка виброустойчива, поглощает напряжения, возникающие при соединении материалов с различными ТКЛР.

Основные требования, предъявляемые к клеевым соединениям: механическая прочность, высокая адгезионная способность (не менее 2-3 МПа) и стабильность электроизоляционных свойств в интервале рабочих температур (удельное объемное сопротивление не менее 10^{14} Ом·см, $\operatorname{tg}\delta \le 10^{-3}$). Кроме того, газовыделения клеевого шва в герметизированных объемах при температурах эксплуатации не должны содержать агрессивные компоненты, вступающие в реакцию с элементами кристалла.

Для крепления элементов ППИ применяются проводящие эпоксидные клеи с серебряным наполнителем, вулканизирующиеся в течение короткого времени при температуре не выше 150 °С. Эти клеи обеспечивают высокую механическую и термоциклическую прочность соединений. Основным недостатком проводящих клеев с серебряным наполнителем является миграция серебра, если между клеевой прослойкой и каким-либо расположенным вблизи проводником имеется разность потенциа-

лов. Ионы серебра в таких условиях мигрируют в направлении катода (проводника), создавая проводящие мостики. Подавить это явление можно заменив серебро золотом или сплавом серебро – палладий.

Разработана технология для посадки кристаллов размером более 1,6×1,6 мм с помощью клея ВК-32-200 в условиях автоматизированной сборки. При посадке кристаллов на клей ВК-32-200 необходимо учитывать следующее:

• клей должен выдавливаться из-под кристалла по всему периметру;

• непараллельность плоскостей присоединения кристалла и контактной площадки не должна превышать 0,05 мм (между гранями);

• максимальный размер отпечатка должен соответствовать образованию буртика клея, высота которого не должна превышать 50 % толщины кристалла;

• размер отпечатка клея должен быть больше размера кристалла не менее чем на 0,15 мм на каждой стороне.

Посадку кристалла можно осуществлять на установке ЭМ-438М. Перед посадкой на керамическую подложку кристаллодержатель предварительно нагревается в течение 30 с при температуре 100±10 °С. Для всех типоразмеров кристаллов время присоединения составляло 0,6 с, время вибрации – 0,2 с, причем вибрация включается через 0,1 с, после опускания инструмента. Затем осуществляется полимеризация готового клеевого соединения в следующих режимах: T = 60 °С – 0,5 ч, T = 80 °С – 0,5 ч, T = 180±10 °С – 2 ч.

Оптимальные режимы дозирования и посадки кристаллов размерами 1,6×1,6; 2,5×3,5 и 5,2×5,8 мм приведены в табл. 4.2.

Табл. 4.2. Оптимальные режимы дозирования клея ВК-32-200 и присоединения кристаллов

Размер кристалла, мм	Кристаллодержатель	Режим дозирования на УДП-1		Режим присоединения ЭМ-438М	
		τ, с	масса	давление ин-	темпера

			дозы, мг	струмента, Н	столи Т±10
2,5×3,5	Керамика	0,06	0,37	5,0	100
5,2×5,8	Керамика	0,08	0,52	–	–
5,2×5,8	Керамика	0,16	2,2	6,0	100

При термокомпрессионной разварке выводов на кристалл, посаженный на клей ВК-32-200, прочность клеевого соединения снижается всего на 50 %, т. е. не ниже прочности, требуемой технологическим процессом.

Максимальная прочность клеевого соединения будет в том случае, если вся его поверхность будет полностью смочена клеящим веществом. На практике полностью заполнить клеем все неровности поверхности не удается. Этому препятствует воздух, уплотняемый в замкнутом пространстве в неровностях: его давление уравновешивается внешним давлением, что препятствует проникновению клея в глубь неровностей.

Глубину заполнения клеем неровностей поверхности, имеющих коническую форму, можно определить по формуле

$$h = H\left(1 - \frac{P_H}{P}\right) + \frac{2\lambda}{P}\sqrt{\frac{P_H}{P}},$$

где H – средняя глубина норы; P – внешнее давление; P_H – начальное давление воздуха в порах; λ – поверхностное натяжение на межфазной границе клей – воздух.

Ассортимент применяемых клеев и компаундов (для приклейки) широк, но чаще всего применяют эпоксиды, полиуретаны, силиконы.

К достоинствам эпоксидных клеев относятся:

• высокая поверхностная активность и хорошее смачивание широкого ассортимента материалов;

• способность отверждаться при низком давлении;

• высокая когезионная прочность отвержденного клея;

• отсутствие летучих компонентов, что предотвращает опасность усадки при отверждении и улучшает санитарно-гигиенические условия работы;

• низкие внутренние напряжения в клеевом соединении;

• высокая стойкость к ползучести;

• возможность модификации различными полимерами, наполнителями и др.

В зависимости от способа отверждения, типа клея и соединяемых материалов прочность стандартных клеевых соединений при сдвиге составляет от 10 до 35 МПа и более.

Эпоксидные клеи подразделяют в зависимости от процесса отверждения на две группы: 1) клеи холодного отверждения и 2) клеи, отверждающиеся при нагревании. Они способны работать при температурах, не превышающих 150 °С. Однако благодаря введению разработанных в последнее время термостойких смол и отвердителей максимальную рабочую температуру эпоксидных композиций удается повысить до 300 °С и выше. Чаще всего в качестве добавок, модифицирующих термостойкость клея, применяют кремнийорганические полимеры. Существенное влияние на термостойкость эпоксидных клеев оказывает отвердитель. Высокой термовлагостойкостью, механической прочностью обладают композиции с титаносодержащими отвердителями.

Характеристики клеящим материалов приведены в табл. 4.3 и 4.4.

Табл. 4.3. Характеристика клеящих материалов

Наименование характеристики	Значение характеристики		
	Эпоксиды	Силиконы	Полиуретаны
Максимальная рабочая температура, К	398	573	398
ТКЛР $\times 10^6$, $К^{-1}$	40-90	200-290	100-200
Теплопроводность, Вт/(м·К): без наполнителя с наполнителем	 0,6-0,8 0,82,2	 9,6-1,0 1,0-2,5	 0,6-0,8
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см (298 К, влажность 50 %)	10^{14}-10^{16}	10^{15}-10^{17}	10^{14}-10^{16}
Диэлектрическая проница-	3,5-4	3,5-4,2	3,5-4,0

емость (без наполнителя)			
Электрическая прочность (кратковременная) при 296 К, В/мм	80-90	70-80	100-120
Угол диэлектрических потерь при 296 К и частоте 100 МГц	0,002-0,05	0,001-0,007	0,015-0,07
Адсорбция воды за 24 ч, %	0,08-0,15	0,04-0,08	0,02-0,15
Поглощение паров воды при 313 К (при 90%-ной влажности), 10^3 (г·мм)/мм^2	2,2-3,6	88-125	2,8-6,0

Табл. 4.4. Основные характеристики некоторых эпоксидных клеев отечественного производства

Марка	Основные компоненты	Режим отверждения			Разрушающее напряжение клеевого соединения алюминия при 20 °С, МПа	
		давление, МПа	температура, °С	время, ч	при сдвиге	при равномерном отрыве
К-153	Эпоксидная смола ЭД-20, ПЭПА (ГМДА, сложные амины), МГФ-9 (тиокол) и цемент	0,05-0,5	18-25	8	20,5	13,6-25
ВК-9	Эпоксидная смола ЭД-20, полиамид ПО-300, ускоритель АГМ-3 (АДЭ-8) и асбест измельченный	0,01-0,05	20	18-24	15-23	20
Д-Э, Л-4	Эпоксидная смола ЭД-16, ИЩА, смола Э-40, ПЭПА (ГИДА), дибутилфталат	0,01-0,3	18-25	24	6-9	13-25
УП-5-233	Эпоксидный олигомер, каучук	контактное	18-25	2	24,5	53,1
ЭК-4	Эпоксидная смола ЭД-20, триэтаноламин, дибутилфталат, поливинилбутираль, глинозем	контактное	100	10	–	–
УП-5-183-1	Смола УП-563, отвердитель УП-0621	контактное	60	16		–
Т-111	Эпоксикремнийорганичесяая	0,05-0,2	120	–	20	–

	смола Т-111, отвердитель и наполнитель					
К-400	Эпоксикремнийорганическая смола Т-111, полиамид Л-20 и окись хрома или нитрид бора	0,03-0,1	20 80 100	48 4 3	20-32	–
ТКМ-75	Эпоксикремнийорганический олигомер ТК-75, малеиновый ангидрид и нитрид бора	0,01-0,02	200	3	24,5	–

Теплопроводящие электроизоляционные клеи служат для отвода тепла от активных элементов. К числу технологических требований, предъявляемых к таким клеям относятся: стабильная во времени вязкость, достаточная жизнеспособность, возможность нанесения на склеиваемые поверхности способом автоматизированного переноса, высокая адгезия к подложкам и полупроводниковым кристаллам в определенном интервале температур. Этим требованиям удовлетворяют клеи марок КЖТ-2 и КЖТ-8, представляющие собой композиции на основе эпоксидных связующих с отвердителями соответственно ангидридного и аминного типов (табл. 4.5). В качестве наполнителей используются карбиды металлов.

Табл. 4.5. Физико-механические и диэлектрические свойства клеев

Параметр	Значение параметра клея		
	КЖТ-2	КЖТ-8	ВК-9
Жизнеспособность, ч	24	4	2; 5
Режим полимеризации (К/ч)	433/6	353/20	303/24
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	1,5	0,7	0,9
Прочность клеевых соединений алюминия при сдвиге, МПа	5,2	5	–
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	$7 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	–

Теплофизические характеристики некоторых клеев приведены в табл. 4.6.

Табл. 4.6. Теплофизические характеристики некоторых клеев отечественного производства

Марка	Адгезив	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Диэлектрическая проницаемость на частоте 10^6 Гц	Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^6 Гц при 20 °С	Удельное объемное сопротивление при 20 °С, Ом·м	Предел прочности при сдвиге [x)], МПа
1	2	3	4	5	6	7
БФ-4	Фенолформальдегидная смола	0,2	4,1	0,023	$5 \cdot 10^{13}$	7-8
БФР-4	То же	0,2	4,0	0,025	$2 \cdot 10^{14}$	10-15
К-400	Эпоксидно-кремнийорганическая смола с наполнителем из нитрида бора	0,5-0,66	4,2	0,020	$3 \cdot 10^{13}$	16-22
ПДИ-ЗАК без наполнителя	Полиуретан с эпоксидной смолой	0,2	3,3	0,025	–	–
ПДИ-ЗАК с нитридом бора	То же	0,6-1,2	4,2	0,01	$2 \cdot 10^{12}$	3-6
Эпоксидный пластифицированный клей	Смесь эпоксидных смол	0,2	4,6	0,014	$1 \cdot 10^{12}$	3-6
Герметик УТ-34	Тиокол с эпоксидной смолой	0,25-0,3	16 (f = 10^3 Гц)	0,08	$1 \cdot 10^{8}$	8-20
Эластосил 11-01	Кремнийорганическая смола	0,6-0,7	4,2	0,02	$5 \cdot 10^{12}$	2,5-3
ВТ25-200	Модифицированная эпоксидная смола	0,4-0,7	3,9	0,008	$8{,}4 \cdot 10^{12}$	4-7
ПУ-2	Полиуретановая смола	0,2	3,8	0,01	$1{,}5 \cdot 10^{13}$	2-8

[x)] В зависимости от склеиваемых материалов

Некоторые марки теплопроводных клеев приведены в табл. 4.7.

Табл. 4.7. Теплопроводные клеи

Марка	Наполнитель	Количество наполнителя на 100 масс. частей смолы, масс. часть	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
Д-9	Кварц молотый	100	0,261
ВК-9	Пудра алюминиевая ПАБ-4	10	0,5-0,7
ВК-9	Асбест	5	0,3-0,4
ВК-9	Нитрид бора	60	0,9-1,0
ПУ-2	Портландцемент	2.5	0,221
К-400	Нитрид бора	60	0,66
Мастика			
ЛН	Двуокись титана	30	0,65
ЭЗК-4	Нитрид бора	120	1,5-1,7
ВТ 25-200	То же	60	0,7
К-5М	То же	–	2,2
ТКЛ-2	То же	–	1,6
ТК1-150	То же	–	2,2

Качество клеевого соединения зависит как от подбора клея применительно к соединяемым материалам, так и от процесса склеивания. Технологический процесс склеивания включает следующие основные стадии: подготовку поверхности соединяемых деталей, приготовление клея, нанесение клея, монтаж соединения и отверждение. Способы подготовки поверхности соединяемых деталей под склеивание (очистка растворителями, ультразвуковая очистка, промывка в дистиллированной воде и т. д.) хорошо известны специалистам по сборке ППИ. Выбор конкретного способа подготовки поверхности зависит от соединяемых материалов.

Операции по приготовлению клея и его отверждению определяются рецептурой клея. Важной операцией технологического процесса, от которой во многом зависит качество и свойства клеевого слоя, является его нанесение. Существенную роль играет толщина клеевого слоя, которую стремятся довести

до минимально допустимой величины. Увеличение толщины клеевого слоя уменьшает механическую прочность шва, ухудшает съем тепла с поверхности феррита. В СВЧ приборах наличие излишнего клея может увеличивать потери энергии, уменьшать электрическую прочность. Выбор способа нанесения клея определяется размерами склеиваемых поверхностей, масштабами производства и видом клея.

В процессе приклейки кристаллов ППИ в них возникают внутренние механические напряжения. Если пренебречь деформацией изгиба, возникающей при склейке, то для расчета напряжений, возникающих в приклеиваемом кристалле, используется выражение

$$\sigma = \frac{E_1\{E_2 h_2[(a_1 - a_2)(T - T_c) + W] + E_3 h_3[(a_1 - a_2)(T - T_c)]\}}{E_1 h_1 + E_2 h_2 + E_3 h_3}$$

где α_1, α_2, α_3 – ТКЛР материалов кристалла, клея и посадочного места соответственно; E_1, E_2, E_3 – модули упругости тех же материалов; T_c – температура стеклования клея; T – рабочая температура; W – химическая усадка клея при полимеризации; h_1, h_2, h_3 – толщины кристалла, клея и платы.

Для клея ВК-9 (h_2 = 100 мкм, E_2 = 5 ГПа, $\alpha_2 = 50 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$), используемого для приклеивания кремниевого кристалла (h_1 = 500 мкм) и коварового основания корпуса (h_3 = 370 мкм, E_3 = 117,6 ГПа, $\alpha_3 = 5 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$), значение σ лежит в пределах 50-60 МПа.

Клеевая прослойка между поверхностями соединенных деталей, обладающая меньшей по сравнению с металлами теплопроводностью, создает сопротивление тепловому потоку, величина которого, зависит от толщины прослойки. Последняя определяется размером частиц наполнителя, дозировкой и давлением при склеивании. Получение тонкого клеевого шва обеспечивается применением мелкодисперсного наполнителя с размером частиц 2-7 мкм.

При автоматизированной сборке микросхем толщина клеевого шва составляет 40-60 мкм, что создает тепловое сопротив-

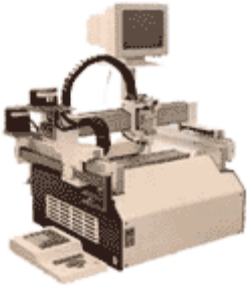
ление 7,2 К/Вт, которое увеличивается в 1,5 раза, если толщина клеевого шва возрастает до 100-120 мкм.

Клеевым соединениям присущ ряд общих недостатков. Прежде всего, это недостаточная в ряде случаев механическая прочность, что объясняется возникновением слабого пограничного слоя. Основные причины образования такого слоя: нарушение технологии склеивания и неправильный подбор материалов; неравномерность клеевого слоя по толщине; концентрация напряжений в соединении из-за наличия пустот; скрытые дефекты в склеиваемых материалах (полости, трещины и т. д.). Потеря прочности может произойти также под влиянием факторов внешней среды: проникновение в клеевой шов влаги, агрессивных веществ; механические и температурные воздействия.

К другим недостаткам клеевых соединений и процесса склеивания следует отнести: снижение прочности во времени; чувствительность к циклическим изменениям температуры, которая особенно ощутима при склеивании материалов с большой разницей в значениях ТКЛР; длительность процесса склеивания.

4.6.1. Оборудование для клеевых соединений

ЭМ-3172 – автомат нанесения клея



Назначение:

• нанесение клея или паяльной пасты методом капельного дозирования на поверхность печатной платы для поверхностного монтажа чип-компонентов. Может эксплуатироваться автономно или в комплекте с автоматом монтажа чип-компонентов ЭМ-4425.

Особенности:

• ручная установка печатных плат на одно-

местный стол, имеющий базирующие штыри или упор;
• автоматическая подача печатных плат в рабочую зону и базирование при установке стола транспортера;
• ручное совмещение при помощи лазерной указки и электронного манипулятора.

Основные технические характеристики

Время цикла нанесения одной клеевой точки, не более	0,5 с
Размер печатной платы	от 50×50 до 250×350 мм
Потребляемая мощность	0,4 кВт
Габаритные размеры	600×650×850 мм
Масса	50 кг

Примечание: разработка и производство ОКБТЭМ-СО (г. Минск, Республика Беларусь)

Глава 5. Бессвинцовая пайка в технологии производства ППИ

На протяжении нескольких десятилетий пайка свинцовыми припоями широко применяется в производстве дискретных ППИ, микросборок, гибридных ИС, при монтаже компонентов на печатные платы и т. п. Это связано с хорошими техническими характеристиками классического припоя ПОС61 и, в первую очередь, низкой температурой плавления (183 ºС). В тоже время, следует отметить, что оловянно-свинцовые припои имеют ряд существенных недостатков.

5.1. Недостатки Pb-Sn припоев

Свинец на воздухе окисляется и покрывается синевато-серой оксидной пленкой (PbO или PbO_2). Поэтому свинцовые предметы не имеют металлического блеска. Свинец корродирует в разбавленной азотной кислоте в некоторых аэрированных разбавленных органических кислотах (в частности, уксусной и муравьиной). Возможна значительная коррозия металла при контакте со свежезаготовленной древесиной определенных пород (например, дугласовой пихтой или дубом), которая медленно выделяет летучие кислоты. Не вызывает подобных разрушений выдержанный кедр.

Свинец стоек в морской воде. Однако скорость коррозии в аэрированной дистиллированной воде велика (около 9 г/м^2·сут). Свинец стоек в атмосфере, особенно в промышленной, в которой на нем образуется защитная пленка $PbSO_4$. Следует отметить, что скорость коррозии свинца в земле в присутствии органических кислот выше, чем стали. В почвах с высоким содержанием сульфатов скорость коррозии низкая. Если Pb испытывает периодическое нагревы и охлаждения, то вследствие высокого коэффициента термического расширения может возникать межкристаллическое растрескивание.

Оловянно-свинцовые припои имеют следующие недостатки:

1. Низкая температура плавления (<190 ºС). Поэтому они не могут применяться при сборке кремниевых ППИ, допускающих высокую температуру нагрева (диоды при $U_{обр} \leq 1600$ В имеют предельную температуру 190 ºС, биполярные транзисторы 200 ºС).

В производстве СПП при пайке кристаллов к основаниям корпусов используются припои с температурой плавления свыше 250 ºС.

2. Высокая температура нагрева при капиллярной пайке кристаллов большой площади к основаниям корпусов. Например, при пайке припоем ПОС40 в виде шариков, чтобы разрушить оксидную пленку на поверхности шариков и обеспечить течение припоя в зазоре между кристаллом и основанием корпуса, требуется температура нагрева 390±20 ºС (пайка в водородной печи).

3. Интенсивное растворение золота (покрытия и проволоки) как в жидкой фазе при пайке Sn-Pb припоями, так и в твердой фазе в режиме эксплуатации изделий.

Известно, что в припое ПОС61 растворяются все металлические покрытия за исключением сплава олово-никель. При температуре 250 ºС скорость растворения золота в припое ПОС61 составляет около 4 мкм/с (по некоторым данным – до 1 мкм/с). При растворении золота в припое образуются интерметаллические соединения золота с оловом трех типов – AuSn, $AuSn_2$, $AuSn_4$ и бинарный сплав со свинцом $AuPb_2$. На прочность слоя припоя оказывают влияние в основном хрупкие дендриты $AuPb_2$ и игольчатые кристаллы $AuSn_4$. Механическая прочность паяных соединений существенно снижается при повышении температуры и очень резко с увеличением толщины покрытия.

Максимальная прочность паяных соединений на сдвиг наблюдается при содержании золота в припое около 4 %. При содержании золота в припое более 4 % его ударная вязкость резко падает. Этот фактор нужно учитывать при перепайке позолоченных СВЧ и ГИС плат на металлические основания с использованием припоя ПОС61 (даже при толщине золотого по-

крытия 2-3 мкм). Хорошая паяемость наблюдается по золотым покрытиям толщиной не более 1,3 мкм, а плохая – по толстослойным покрытиям. В тоже время известно, что на прочность паяного соединения влияет не только толщина золотого покрытия, но и состав припоя и температура пайки (температура расплава припоя).

Исследования растворения золотой проволоки в жидких низкотемпературных припоях проводились в ряде работ. Рассматривались две принципиально различные методики оценки растворения: с помощью металлографических шлифов и взвешиванием образцов. Например, золотую проволоку диаметров 1 мм, предварительно смоченную раствором канифоли, в течение 15 с погружали в расплавленные припой на глубину 20 мм, а затем с такой же скоростью извлекали из ванны. Взвешиванием определяли количество золота, перешедшего в расплав припоя. Растворение золотой проволоки диаметром 0,5 мм исследовали также с помощью металлографических шлифов поперечных сечений. Предварительно проволоку длинной 38 мм погружали в расплав припоя на глубину 25 мм. Шлифы сечений проволоки изготавливались после выдержки образцов в припое в течение 10-120 с интервалом 10 с.

Данные методики не применимы для исследований микросоединений в ППИ, так как в данном случае используется золотая проволока диаметром 0,04 мм, а время пайки в зависимости от состава припоя от 1 до 3 с.

Вопросы формирования надежных контактов с использованием золотой проволоки и низкотемпературных припоев еще полностью не решены. Если и удалось, в частности, получить прочные паяные соединения с помощью индиевых припоев, то нельзя не учитывать то, что процессы старения протекают в этих соединениях с большей скоростью, чем при использовании оловянно-свинцовых припоев. Поэтому при решении применять тот или иной припой необходимо учитывать конструкционное особенности ППИ и их условия эксплуатации. Знание процессов взаимодействия золотой проволоки с различными припоями как

при пайке, тое и при эксплуатации ППИ в конечном итоге определяет долговечность и надежность контактных соединений.

В производстве ГИС и микросборок для монтажа золотой проволокой диаметром 0,04 мм широко применяются припои ПОС61, ПОС61М, ПСрОС3-58, ПОИ50 и ПОСК50-18. При пайке золотой проволоки к контактным площадкам ГИС вышеуказанными припоями наблюдались дефекты паяных контактов как на стадии производства, так и на этапе эксплуатации. Исследования показали, что отказы на стадии монтажа связаны с растворением золотой проволоки в жидкой фазе припоя (при пайке), а на этапе эксплуатации – в твердой фаза (при воздействии повышенных температур).

Для исследования растворения золотой проволоки в жидкой фазе припоя использовалась специально разработанная установка, позволяющая изменять время контактирования проволоки с жидким припоем от 0,2 до 10 с. Скорость растворения золота определялась по уменьшению диаметра сердцевины проволоки, не затронутой реакцией. Растворение золотой проволоки оценивалось по шлифам поперечных сечений с точностью до 1 мкм.

Установлено растворение золотой проволоки при низкотемпературной пайке от температуры и времени пайки. Из рис. 5.1 видно, чем меньше температура расплава, тем меньше растворение золотой проволоки в припое. В связи с этим, рекомендовано при монтаже ГИС золотой проволокой пайку проводить при температуре не выше 10 °С от температуры плавления припоя.

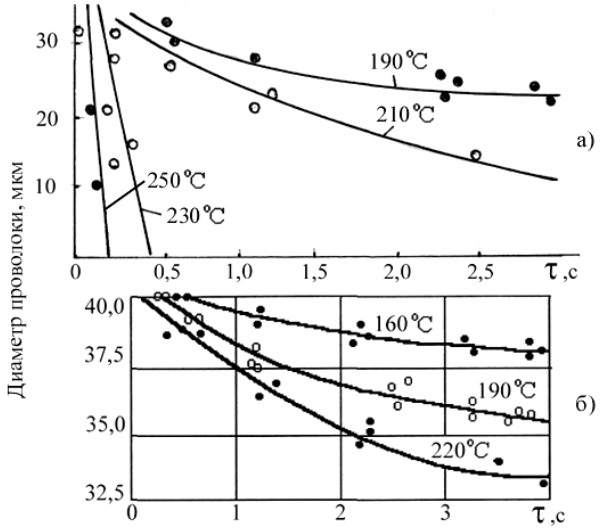


Рис. 5.1. Растворение золотой проволоки диаметром 40 мкм от времени выдержки в припоях ПОС61 (а) и ПОИ50 (б) при различных температурах расплава

Экспериментальным путем нами установлено растворение золотой проволоки диаметром 40 мкм от времени выдержки в твердой фазе (температура 100 °С) низкотемпературных припоев (рис. 5.2). Полное растворение проволоки произошло через 60 ч испытаний в припое ПОСК50-18 и через 540 ч – в припое ПОИ50. Наименьшей растворимостью обладает золотая проволока в контакте с Sn-Pb припоями с добавкой серебра: за 600 ч выдержки в припое ПСрОС3-58 диаметр проволоки уменьшился до 18 мкм.

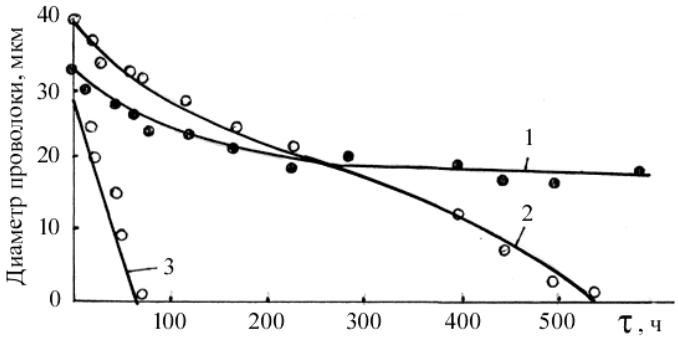


Рис. 5.2. Растворение золотой проволоки диаметром 40 мкм от времени выдержки при температуре 100 °С для различных припоев: 1 – ПСрОС3-58; 2 – ПОИ50; 3 – ПОСК50-18

Для уменьшения растворения золотой проволоки как в жидкой, так и в твердой фазах припоя используют способ пайки сопротивлением, позволяющий гарантировать дозированное погружение в припой золотой проволоки при пайке.

5.2. Экологические аспекты проблемы бессвинцовой пайки изделий микроэлектроники

В последние годы пайке бессвинцовыми припоями в производстве изделий микроэлектроники уделяют пристальное внимание специалисты, работающие в этой области. Это связано с призывом экологов к запрету использования свинца в электронной аппаратуре. По их мнению, размещение на полигонах (свалках) отслуживших свой срок изделий, содержащих свинец в припое, радиоэлектронной промышленности ухудшает экологическую ситуацию.

Почему акцентируется внимание только на свинце? Разве другие ингредиенты, входящие в состав отходов производств всех уровней, не ухудшают экологию?

В настоящее время разработка способов монтажа ППИ методом пайки низкотемпературными припоями без свинца является основной экологической проблемой микроэлектроники.

Сейчас нет законодательных ограничений по использованию свинца, но фирмы-производители электронной аппаратуры интенсивно ведут разработку технологических процессов пайки ППИ припоями, не содержащими свинец. Этой проблеме были посвящен симпозиумы, проведенные в 1999 г (Германия), 2002 г (США), 2005 г (Канада).

В Японии принят закон об обязательной утилизации припоев из лома ППИ. Многие японские производители электронных изделий уже работают с припоями без свинца.

В законе Российской Федерации «Об охране окружающей среды» (статья 58) записано, что участки территории РФ, где в результате хозяйственной или иной деятельности происходят устойчивые отрицательные изменения в окружающей среде, угрожающие здоровью населения, состоянию естественных экологических систем, генетическим фондам растений и животных, объявляются зонами чрезвычайной экологической ситуации.

Киотский протокол – важнейшее экологическое международное соглашение, ратифицированное 118 государствами, предлагает индустриально развитым странам поэтапно сократить выбросы парниковых газов в атмосферу.

РФ подписала Киотский протокол еще в 1997 году, однако только в октябре 2004 года Государственная дума РФ его ратифицировала.

Газета «Бумеранг» (№ 10, 2004) отмечала, что ратификация Киотского протокола может принести РФ до 20 млрд USD в течение следующих 10 лет за счет механизма торговли квотами на выбросы. Это обусловлено тем, что в РФ количество выбросов парниковых газов меньше разрешенного уровня на 25 процентов. Поэтому излишек квоты РФ может продать странам, которые по разным причинам не могут пока сократить свои выбросы до разрешенного уровня.

5.2.1. Нормативные требования к размещению твердых бытовых и токсичных промышленных отходов

В связи с возникшей полемикой об ухудшении экологии, якобы вызванной свинецсодержащими изделиями радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), необходимо подробно проанализировать существующие в РФ законодательные акты по утилизации и размещению твердых бытовых отходов (ТБО), в том числе содержащие свинец. На наш взгляд, заслуживают внимание особенности функционирования полигонов для размещения ТБО.

Любая деятельность человека, исключающая вредное воздействие на окружающую среду, есть экологическая безопасность. Уже многие годы деятельность человека, связанная с загрязнением окружающей среды, регулируется нормативными документами.

Для контроля, поступающих на полигон ТБО, существует контрольно-пропускной пункт, в состав которого входят мастер-химик и эколог. Оценка отходов производится глазомерно по объему, массе, составу и регистрируется в специальном журнале.

Система регистрации отходов и их номенклатура осуществляется в соответствии с директивой Совета ЕвроСоюза № 1999/31/ЕС от 26 апреля 1999 г.

Классификационный каталог отходов – это перечень отходов, систематизированных по совокупности приоритетных признаков: происхождению, агрегатному и физическому состоянию, опасным свойствам, степени вредного воздействия на окружающую природную среду.

За аналог принята система регистрации отходов, реализованная в проекте «Экологически чистый полигон захоронения ТБО для г. Москвы». Проект разработан при участии агентства по охране окружающей среды Дании.

В отдельных случаях допускается (СанПиН 2.1.7.1322-03. Минздрав РФ. М., 2003. Прил. 1) размещение промышленных отходов совместно с бытовыми – это отдельные виды пластиков, вырубка резины, древесные отходы, лоскут хромовый, отбель-

ная* земля, активированный уголь, кожезаменители. Перечень отходов приведен в табл. 5.1.

Табл. 5.1. Морфологический состав твердых бытовых отходов

№ п/п	Состав ТБО	В % по массе
1	Пищевые и растительные отходы	35
2	Бумага, картон и т. п.	18
3	Черные металлы	4
4	Цветные металлы	0,7
5	Текстиль	5,3
6	Стекло	6,8
7	Пластмасса (высокой плотности)	2
8	Полимерная пленка	4
9	Кожа, резина	1,5
10	Дерево	1,5
11	Камни, керамика, штукатурка	1,5
12	Кости	0,5
13	Полимерные материалы	6
14	Прочие отходы	13,2

Эксплуатация полигона должна находится под постоянным контролем инженеров-экологов. При необходимости проведения мониторинговых исследований подключаются специализированные организации. Отчеты с данными по контролю в любое время должны быть доступны соответствующим экологическим службам.

Особенно строгое регулирование осуществляется по отношению к токсичным промышленным отходам. Для этой цели сооружаются специальные полигоны по обезвреживанию, переработке и захоронению токсичных промышленных отходов в соответствии с требованиями СНиП 2.01.28-85 (Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию «Центральный институт типового проектирования» Госстроя СССР, 1990).

Захоронение токсичных, химических и биологически-опасных отходов на полигоне запрещено. Отходы этого типа

* Отбельная земля – отходы пищевой промышленности

должны собираться отдельно, обезвреживаться перед захоронением на полигоне или сжигаться. Известны, виды токсичных промышленных отходов, размещение которых на полигонах ТБО недопустимо (СанПиН 2.1.7.1322-03. Минздрав РФ. М., 2003. Прил. 2). К их числу относятся отходы, содержащие следующие материалы: ртуть, шестивалентный хром, кобальт, цинк, медь, никель, кадмий, свинец, бром, соли тяжелых металлов, а также некоторые неорганические (серная кислота и др.) и органические (фенол и др.) вещества.

Наиболее близко к изделиям радиоэлектроники можно отнести группу под кодом 353 000 00 00 000 – лом и отходы цветных металлов, содержащие алюминий, свинец, медь, цинк, никель, олово, титан, хром.

В подгруппу под кодом 353 102 00 01 010 относят:

- лом и отходы, содержащие свинец;
- лом свинца несортированный;
- лом свинца в кусковой форме незагрязненный;
- отходы, содержащие свинец (в том числе пыль и/или опилки свинца), несортированные;
- отходы, содержащие свинец в кусковой форме;
- опилки свинцовые незагрязненные;
- пыль (порошок) свинца незагрязненная;
- скрап свинцовый незагрязненный;
- стружка свинцовая незагрязненная;
- свинцовые пластины отработанных аккумуляторов;
- кабель медно-жильный освинцованный, потерявший потребительские свойства.

Дальнейшее совершенствование нормативных документов в области обращения с отходами осуществляется согласно федеральному классификационному каталогу.

5.2.2. Токсикологическая оценка металлов, входящих в состав припоев и покрытий для бессвинцовой пайки

К наиболее токсичным металлам относятся ртуть, кадмий,

свинец, мышьяк. Они не являются ни жизненно необходимыми, ни благотворными, но даже в малых дозах приводят к нарушению нормальных метаболических* функций организма. Объединенная комиссия ВОЗ по пищевому кодексу (Codex Alimentarius) включила ртуть, кадмий, свинец, мышьяк, медь, стронций, цинк и железо в число компонентов, содержание которых контролируется при международной торговле продуктами питания. Медико-биологическими требованиями СанПиН 2.3.2.560-96 определены критерии «опасности» следующих металлов: свинец, кадмий, ртуть, медь, цинк, олово, железо.

Анализ припоев и паяемых покрытий в производстве изделий радиоэлектроники показал, что в их состав входят в основном следующие металлы: Bi, Jn, Cd, Co, Cu, Ni, Sn, Ag, Sb, P, Zn. Свойства данных металлов с точки зрения безопасности жизнедеятельности приведены в табл. 5.2.

Табл. 5.2. Токсикологические свойства металлов

Висмут	Предельно-допустимая концентрация в рабочей зоне ($ПДК_{р.з.}$) для Bi и его неорганических соединений – 0,5 мг/м^3. Его органические производные действуют на почки и в меньшей степени на печень. Так как висмут и его соединения не вызывают отравлений при работе с ними, его рассматривают как наименее токсичный тяжелый металл, используемый в промышленности в настоящее время.
Индий и его соединения	Растворимые соединения индия влияют на центральную нервную систему (ЦНС), белковый обмен. Хронические отравления: боли в суставах и костях, разрушение зубов, нервные и желудочно-кишечные расстройства, сердечные боли, общая слабость. $ПДК_{р.з.}$ для индия оксида – 4 мг/м^3. Защита: респираторы от пыли.
Кадмий	По своим химическим и физическим свойствам кадмий имеет большое сходство с цинком и вместе с ним встречается в природе. Вдыхание соединений кадмия при концентрации его в воздухе выше 1 мг/м^3 в течение 8 ч (а при более высоких концентраций и в течение более короткого промежутка времени), может привести к химической пневмонии, а в тяжелых случа-

* Метаболизм – совокупность химических реакций, протекающих в живых клетках и обеспечивающих организм веществами и энергией для его жизнедеятельности

	ях вызывает отек легких. Потребление напитков, содержащих примесь кадмия в концентрациях превышающих 15 мг/л, ведет к появлению симптомов пищевого отравления. Источником загрязнения пищи могут быть посуда с глазурью, содержащей кадмий, а также кадмиевые припои. Полагают, что возможным следствием длительного воздействия кадмия при концентрациях в воздухе, превосходящих 0,1 мг/м^3, является эмфизема легких. Вызванная кадмиевая эмфизема легких может снижать трудоспособность, быть причиной инвалидности и сокращать продолжительность жизни. При длительном воздействии низких концентраций в первую очередь поражаются почки. Следует подчеркнуть, что поражение почек, вызванное кадмием, носит необратимый характер и состояние может ухудшаться, даже если воздействие кадмия прекращается. Важнейшие источники отравления кадмием – питание и курение. ПДК$_{р.з.}$ для кадмия и его неорганических соединений: 0,05 мг/м^3 – максимальная разовая, 0,01 мг/м^3 – среднесменная.
Кобальт и его соединения	Влияют на сердечно – сосудистую систему, расширяют сосуды, избирательно поражают сердечную мышцу, активизируют ряд ферментов, регулируют тканевое дыхание. ПДК$_{р.з.}$ для кобальта и его неорганических соединений: 0,05 мг/м^3 – максимально разовая, 0,01 мг/м^3 – среднесменная. Необходима защита органов дыхания от аэрозолей, спецодежда, защищающая от пыли.
Медь	Чистая медь безопасна при попадании в желудок. Она жизненно необходима, с пищей человек ежедневно получает до 5 мг меди в виде ее соединений, из которых усваивается около 5 %. Для водорослей, грибков, бактерий медь является сильным ядом, так как она в кислой среде образует следовые количества ионов меди. ПДК$_{р.з.}$ – 1 мг/м^3 максимально разовая.
Никель и его соединения	Тетракарбонил никеля выделяется при курении сигарет (2,9 мг на сигарету), раздражает глубокие дыхательные пути (ПДК$_{р.з.}$ – 0,0005 мг/м^3). Соединения никеля могут вызывать аллергию (например, сплавы никеля в ювелирных украшениях). ПДК$_{р.з.}$ (в пересчете на никель) для оксидов и сульфидов – 0,5 мг/м^3; солей в виде гидроаэрозоля – 0,005 мг/м^3.
Олово и его соединения	Металлическое олово практически нетоксично. Токсичны неорганические соединения (ПДК – 2 мг/м^3) и очень ядовиты большинство органических соединений (ПДК – около 0,1 мг/м^3 в перерасчете на олово) и SnH_4 (судорожный яд). В относительно больших количествах неорганических соедине-

	ний олово содержится в консервированных продуктах (ПДК для продуктов питания – 250 мг/кг); в сельскохозяйственных продуктах от 0,05 до 2 мг/кг.
Серебро и его соединения	Серебро (металл) нетоксично, однако при многолетней работе с серебром и его солями серебро отлагается в соединительной ткани и, накопляясь, придает им своеобразную серо – зеленую окраску (аргирия). У работающих с пылью AgBr и Ag_2S – жалобы на кашель, першение в горле. $ПДК_{р.з.}$: для серебра – 1 мг/м^3, для неорганических соединений серебра – 0,5 мг/м^3. Зашита: респираторы, спецодежда из бумажной ткани. Пожарная опасность: сереброорганические соединения при комнатной температуре взрываются. Серебро не горит.
Сурьма	При действии паров $SbCl_2$ раздражение слизистых глаз, помутнение роговицы; попадание сурьмы в желудок вызывает металлический вкус во рту, слезотечение, рвоту, боли в животе; сурьмяная пыль при длительном вдыхании может вызывать заболевание легких; при плавке сурьмы ее пыль вызывает раздражение кожи, покраснение и появление гнойников. ПДК для пыли сурьмы металлической: 0,5 мг/м^3 – максимальная разовая и 0,2 мг/м^3 – среднесменная. Защита: респираторы, очки, спецодежда из плотной ткани.
Фосфор	Существует в трех аллотропических модификациях: белый (или желтый), красный и черный. Острая интоксикация белым фосфором является очень тяжелым заболеванием, которое может возникнуть при попадании этого вещества внутрь. Фосфор самопроизвольно загорается на воздухе, что приводит к пожарам и взрывам. Кусочки белого фосфора вызывают тяжелые ожоги при попадании на кожу. В связи с опасностью самовозгорания белого фосфора на воздухе его необходимо постоянно хранить под водой. Нужно обеспечить соответствующую местную и общую вентиляцию на рабочих местах, где имеются даже небольшие количества фосфора. Предотвращение системной интоксикации (и повреждение костей) у людей, имеющих дело с белым фосфором при его производстве или использовании, осуществляют предотвращением или снижением уровня воздействия паров, которые выделяют белый фосфор. $ПДК_{р.з.}$ – 0,03 мг/м^3. Защита: противогаз. $T_{самовоспл.}$ 44 °С. Склонен к тепловому самовозгоранию. Средства тушения: вода, пена, порошок ПФ. Красный фосфор вызывает тяжелые заболевания кожи. $T_{самовоспл.}$ 305 °С; предел воспламенения (ПВ) – 14 г/м^3. Примесь 5 % (масс.) желтого фосфора повышает $T_{самовоспл.}$ красного фосфора до 360 °С; красный фосфор, содержащий 5 % желтого фосфора, самовоспламеня-

	ется на воздухе. Средства тушения: вода со смачивателями, пена, порошок ПВ.
Цинк	Жизненно необходимый элемент для людей, животных и растений. Дневная норма поступления в организм 10-15 мг. Цинк нетоксичен. Вредности связаны с вдыханием соединений цинка. Так, оксид цинка вызывает повышение температуры, боли в суставах и мышцах, озноб, кашель. Хромат цинка – канцероген. $ПДК_{р.з.}$ для цинка, (мг/л): 0,1 (Япония); 5 (Россия) и 2 (ФРГ). $ПДК_{р.з.}$ для оксида цинка – 0,5 мг/м^3. $Т_{самовоспл.}$: аэрогеля 310 °С, аэровзвеси 600 °С. Склонен к химическому самовозгоранию в мелкораздробленном и влажном состоянии. Средства тушения: порошок ПГС-М, объемное тушение.

5.2.3. Экологическая оценка припоев ПОС40 (40Sn/60Pb) и бессвинцового 95,5Sn/4Ag/0,5Cu

Свинец представляет собой яд, накапливающийся на протяжении многих лет в тканях организма. Согласно данным австралийских служб по охране здоровья рабочих, 30 % попадающего на человека свинца адсорбируется кожными покровами, а 70 % оседает в легких. Внешними симптомами отравления являются головные боли и боли в суставах, однако оно вызывает и скрытые, более серьезные последствия в виде поражений почек и нервной системы, бесплодия и врожденных пороков.

ПДК для свинца и его неорганических соединений приняты: для атмосферного воздуха ($ПДК_{а.в.}$) – 0,003 мг/м^3, для рабочей зоны ($ПДК_{р.з}$) – 0,01 мг/м^3, для питьевой воды ($ПДК_{п.в.}$) – 0,03 мг/л.

Допустимые максимально разовые концентрации загрязняющих веществ (ЗВ): для оксида олова (в пересчете на олово) $ПДК_{р.з.}$ – 2 мг/м^3, $ПДК_{а.в.}$ – 0,02 мг/м^3; для меди $ПДК_{р.з.}$ – 1 мг/м^3, $ПДК_{а.в.}$ – 0,002 мг/м^3; для серебра $ПДК_{р.з.}$ – 1 г/м^3, $ПДК_{а.в.}$ – не регламентируется.

Сравним параметры выделений и выбросов на рабочем месте на участке пайки ППИ электропаяльником с применением припоев ПОС40 (олово 40 %, остальное – свинец) и припоя 95,5Sn/4Ag/0,5Cu.

При пайке электропаяльником мощностью 20-60 Вт припоем ПОС40 выделяются: свинец и его соединения 0,005 мг/с; оксид олова 0,0033 мг/с.

При пайке в тех же условиях припоем 95,5Sn/4Ag/0,5Cu выделяется оксид олова 0,012 мг/с. Выделениями ЗВ – серебра и меди – пренебрегаем в виду их малости.

Предположим, что процесс пайки осуществляется в помещении объемом 10 $м^3$ на одно рабочее место под местной вытяжкой с параметрами источника загрязнения атмосферы (ИЗА) и общеобменной вентиляции: диаметр трубы – 0,4 м; линейная скорость потока воздуха в трубе – 3 м/с; объемная скорость потока воздуха в трубе – 0,38 $м^3/с$; эффективность местного отсоса – 0,9; эффективность общеобменной вентиляции – 0,5.

Санитарно-гигиеническая оценка использования припоев ПОС40 и 95,5Sn/4Ag/0,5Cu проведена для рабочей зоны (РЗ), где остаются 10 % ЗВ, которые могут накапливаться в помещении в течение смены.

Концентрация ЗВ в рабочей зоне ($Q_{р.з.}$) определяется как произведение максимально-разовых выделений ЗВ (q), коэффициента «чистого» времени работы паяльником (0,5), доли ЗВ, выделяемой в помещение (0,1), эффективности общеобменной вентиляции (0,5), времени выделений (1 смена, 8 часов, 28 800 с), отнесенное к объему помещения (10 $м^3$):

$$Q_{р.з.} = q \cdot 0,5 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 28\,800 / 10, \text{ мг/м}^3.$$

Экологическая оценка применения тех же припоев проведена на ИЗА ($Q_{а.в.}$), на котором выбрасывается 90 % ЗВ и определяется как произведение максимально-разовых выделений ЗВ (q), коэффициента «чистого» времени работы паяльником (0,5), доли ЗВ, выбрасываемых в атмосферный воздух (0,9), отнесенное к объемной скорости потока воздуха в трубе (0,38 $м^3/с$):

$$Q_{а.в.} = q \cdot 0,5 \cdot 0,9 / 0,38, \text{ мг/м}^3.$$

Результаты расчета приведены в табл. 5.3.

Табл. 5.3. Концентрации ЗВ и ИЗА при пайке различными припоями

Припой	Загрязняющие вещества	Рабочая зона	Источники загрязнения атмосферы

		мг/м^3	доля ПДК	мг/м^3	доля ПДК
ПОС40	Свинец и его соединения	0,36	36	0,0059	5,90
	Олова оксид	0,24	0,12	0,0039	0,20
95,5Sn/4Ag/0,5Cu	Олова оксид	0,86	0,43	0,0143	0,71

Сравнительный анализ применения припоев ПОС40 и 95,5Sn/4Ag/0,5Cu показал экологическую безопасность использования в производстве бессвинцовых припоев. Применение припоя, содержащего свинец, при тех же условиях организации рабочего места на участке пайки не удается достичь допустимых уровней ПДК ЗВ как в рабочей зоне, так и на выбросе ИЗА.

Таким образом, утилизация узлов радиоэлектронной аппаратуры должна производиться на специализированных предприятиях. Поэтому вопросы попадания в почву и подземные воды свинца из аппаратуры, содержащей данный металл, являются дискуссионными и требуют дополнительных всесторонних исследований специалистов различного профиля совместно с экологами.

Результаты анализа концентрации загрязняющих веществ в почве в районе полигона ТБО и в населенном пункте (на расстоянии 1,5 км от полигона) показывают, что содержание тяжелых металлов и микроэлементов не превышает нормы ПДК (по данным исследований сотрудников ЗАО НПФ «Овен»). В тоже время следует отметить повышенную концентрацию цинка, кадмия, железа (общ.), свинца и хрома в самом населенном пункте по сравнению с полигоном ТБО.

Превышение ПДК свинца в окружающей среде связано, в первую очередь, с выбросом предприятий, выплавляющих свинец и производящих свинцовые припои, а также с выхлопными газами бензиновых автомобилей.

Отравление растений тяжелыми металлами происходит за счет выпадения токсичных металлов из атмосферы на поверхность листьев. По этому признаку лидирующее положение занимают кадмий и свинец.

При использовании свинцовых припоев источником за-

грязнения атмосферы свинцом является операция пайки в производстве изделий микроэлектроники (дискретные ППИ, печатные платы и т. д.). Уменьшить концентрацию свинца в рабочей зоне и выбросы в атмосферу при пайке свинцовыми припоями возможно за счет установления специальных фильтров очистки.

5.3. Покрытия для бессвинцовой пайки

При решении вопроса о надежности паяных соединений, наряду с выбором оптимальных способов и режимов пайки, необходимо учитывать состав и свойства паяемых покрытий. К покрытиям предъявляются следующие основные требования

• они должны обеспечивать хорошую паяемость с полупроводниковыми кристаллами и свариваемость с внутренними выводами;

• сохранять способность к пайке и сварке при заданном сроке хранения; обеспечивать антикоррозионную защиту;

• не подвергаться иглообразованию при хранении и разрушению при температурах сборки, испытании и эксплуатации.

• обеспечивать минимальное переходное электрическое сопротивление;

• быть устойчивыми к тепловому удару при монтаже приборов на печатные платы пайкой, к химическим реагентам, используемым в процессе сборки;

• обеспечивать адгезию компаунда при герметизации прибора опрессовкой полимером.

В США, начиная с 2004 г. запрещено использование свинца в паяемых покрытиях. В качестве заменителей Sn-Pb покрытий используются следующие металлы и сплавы: чистое Sn, Sn-Bi, Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Ni, а также наносимые химическим путем Ag, многослойные Ni-Pd-Au, Ni-P/Au и Ni/Au покрытия. Для печатных плат с высокой плотностью элементов рекомендовано использовать Sn/Cu покрытие, осаждаемое из электролита состава, (г/л): 40Sn/0,5Cu (в виде метансульфоната), метан-

сульфоновая кислота 200, органическая добавка 40 мл/л. Режимы осаждения: $J_к$ = 16-24 А/дм^2, Т = 35-42 °С, τ = 1 мин.

Плавящееся покрытие из не менее двух слоев металлов, при расплавлении образующих эвтектический припой наносят на паяемую поверхность. Толщина покрытия 1-20 мкм. Рекомендуется наносить следующие сочетания металлов: 82,5Au/17,5Ni, 55Cu/45Sn и 79Au/17Cu/4Cd.

Анализ паяных поверхностей полупроводниковых кристаллов и оснований корпусов показал, что для пайки бессвинцовыми припоями в первую очередь необходимо проанализировать следующие покрытия: цинковое, никелевое, никель – олово, серебряное, оловянное, цинк – олово и олово – висмут.

5.3.1. Цинковое покрытие

Цинк принадлежит к электроотрицательной группе металлов; его стандартный потенциал минус 0,763 В. Реагирует цинк с H_2S и сернистыми соединениями, образуя сернистый цинк. В сухом воздухе Zn почти не изменяется. Во влажном воздухе и в воде, содержащей CO_2 и O_2, он покрывается пленкой, состоящей из $ZnCO_3$, которая защищает металл от дальнейшего разрушения. В условиях тропиков цинковое покрытие нестойко. Особо значительна скорость коррозии Zn в атмосфере промышленного города. Солевые пленки на цинке отличаются хорошей растворимостью, легко смываются влагой. Защитные свойства Zn покрытия определяются его толщиной и равномерностью осаждения.

Цинкование производят в простых (кислых, сернокислых, хлористых, борфтористоводородных) и сложных комплексных (цианистых, цинкатных, пирофосфатных, аммиакатных, аминокомплексных с различными органическими аддендами и др.) электролитах. В простых электролитах на катодный процесс при осаждении Zn оказывает влияние кислотность электролита. Практически применяют электролиты цинкования с pH 4-5. Органические вещества, вводимые в кислые электролиты цинкова-

ния в качестве добавок, улучшают структуру, внешний вид покрытий и равномерность распределения его на катодной поверхности.

Аноды для цинкования в кислых электролитах изготовляют, как правило, из чистого электролитического Zn (99,8-99,9 % Zn), который может содержать менее 0,03 % Pb; 0,02 Cd; 0,002 % Cu; 0,007 % Fe и 0,001 % Sn.

В качестве покрытий обратной поверхности кристаллов и оснований корпусов под пайку бессвинцовыми припоями заслуживает внимания осаждение сплава Zn-Sn. Данный сплав улучшает паяемость деталей в большей степени, чем Zn покрытия и несколько повышает их коррозионную стойкость. Основной состав электролита следующий, (г/л): ZnO (20-25), NaOH (100-120), станнат натрия (0,4-0,5). Режимы осаждения: T = 25-30 °C; $J_к$ = 1-1,5 А/дм^2; аноды из цинка с присадкой 0,2-0,3 Sn.

Цинк во влажном воздухе покрывается пленкой, состоящей из карбоната цинка, тогда как в сухом воздухе цинк изменяется незначительно. Солевые пленки на цинке отличаются хорошей растворимостью, легко смываются влагой.

5.3.2. Олово – висмутовое покрытие

В технологии производства ППИ на сборочных операциях широко используется сплав олово-висмут как в виде покрытий, так и в виде припоев.

Покрытие сплавом Sn-Bi в некоторых случаях применяют вместо серебра. При соответствующих режимах электролиза покрытия сплавом Sn-Bi получают с мелкозернистой структурой и пониженной твердостью. Блестящие покрытия сплавов Sn-Bi наносятся на корпуса ППИ из меди и других металлов. Состав электролита (г/л): сернокислое олово 30-45; сернокислый висмут 0,5-1; серная кислота 120-140; смачиватель ОС-20 4-5; формалин (40 %) 5-10 (мл/л); лимеда Sn-2 5-10 (мл/л); температура электролита 18-25 ºС; РН раствора 1-2; скорость осаждения 0,2-

0,6 мкм/м при плотности тока 1,5-3 А/дм^2. Отношение поверхности катода к поверхности анода 1:1.

Покрытия сплавом Sn-Bi обладают высокой коррозионной стойкостью. Блестящие покрытия сплавом Sn-Bi имеют высокую коррозионную стойкость в камере морского тумана в течение 7 суток, в камере влаги в течение 10 и 30 суток. Коррозионная стойкость оценивалась визуальным подсчетом мест коррозионных поражений по десятибалльной системе (табл. 5.4).

Табл. 5.4. Коррозионная стойкость покрытия Sn-Bi (в баллах)

Тип покрытия	Морской туман, 7 суток		Влага, 10 суток		Влага, 30 суток	
	Подслой меди	Подслой никеля	Подслой меди	Подслой никеля	Подслой меди	Подслой никеля
Sn-Bi блестящее (15 мкм)	8,6	9,1	9,2	9,9	7,7	7,9

Коррозионная стойкость покрытий сплавом Sn-Bi зависит от состава сплава, толщины, структуры и пористости осадков. Большей коррозионной стойкостью обладают покрытия с содержанием 0,4-0,9 % Bi. Рекомендуется применять для ППИ сложной конструкции из разнородных материалов покрытия толщиной 9-12 мкм, а для тропического варианта – толщиной 18-21 мкм. При этом на стальные и латунные детали предварительно наносят подслой меди толщиной 4-6 мкм.

Покрытие составом Sn-Bi толщиной 9-12 мкм используется для коррозионной защиты деталей из меди и медных сплавов в жестких условиях эксплуатации.

Для защиты проводников печатных плат вместо серебрения применяется сплав Sn-Bi. Исследования показали, что в течение продолжительного времени сохраняется качественная пайка и исключается механическая и химическая зачистка проводников после травления.

Проводились исследования паяемости трех видов покрытий: оловянного, оловянно-свинцового и покрытия олово-висмут, нанесенных на медь и латунь по подслою никеля и меди. Установлено, что подслой никеля способствует сохранению паяемости всех видов покрытий, чем подслой меди. Внешний вид оловянных и оловянно-свинцовых покрытий после 6-7 месяцев хранения ухудшился. При этом произошло потемнение покрытий и появились очаги коррозии. Внешний вид покрытий олово-висмут с подслоем никеля практически не изменился после годового складского хранения.

Для осаждения покрытий сплавом Sn-Bi разработано большое количество электролитов. Покрытия данными сплавами могут осаждаться в виде матовых или блестящих осадков. Для широкого использования в производстве изделий микроэлектроники для осаждения сплава Sn-Bi рекомендуются электролиты с добавкой ОС-20 или двумя добавками ДДДМ и ОС-20, позволяющие получать светлые, мелкозернистые, плотные осадки.

В сплавах системы Sn-Bi с увеличением доли висмута в олове прочность припоя возрастает, а пластичность снижается при одинаковых условиях. Припои Sn-Bi с массовой долей висмута 52-58 % имеют прочность 53-56 МПа. Такая концентрация висмута способствует измельчению структуры олова и задерживает рост зерен при длительной выдержке при повышенных температурах.

Припои на основе системы Sn-Bi с содержанием висмута 30-40 % имеют низкую пластичность. По этой причине из таких припоев получить ленту толщиной 0,05-0,2 мм без трещин при прокатке не удается.

Температурный коэффициент линейного расширения эвтектического припоя (58Bi/42Sn) при температуре плавления составляет $16{,}2 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$. При этом электрическая проводимость оставляет всего 4,5 % от электрической проводимости меди. Таким образом, данный припой целесообразно применять для пайки согласованных соединений с повышенной прочностью, но работающих при температуре не выше 80 ºС.

В качестве припоя используется сплав тройной системы олово – индий – висмут. Эвтектический сплав (16,3Sn/54,02Bi/29,68In) имеет температуру плавления 81 ºС.

Для герметизации корпусов ППИ пайкой без флюса используют припойную прокладку, содержащую 99-99,5 % Sn и 0,5-1,0 % Bi. При этом основание корпуса и крышки покрыты золотом, а нагрев осуществляется струей горячего инертного газа. Особенностью данного способа герметизации является то, что золотом покрывается часть крышки, входящая в зону шва. Это не только приводит к экономии золота, но и исключает растекание припоя по внешней и внутренней поверхности крышки. Толщина золотого покрытия на крышке составляет 1,5-2 мкм.

При сборке ППИ в металлокерамических корпусах возможна пайка без припойной прокладки за счет слоя припоя Sn-Bi, нанесенного на крышку. В данном случае слой припоя наносится в виде рамки или валика только по краю внутренней поверхности крышки. Толщина его должна быть не менее 0,15 мм. На основание корпуса тоже в виде кольца нанесено золото. Герметизация осуществляется струей нагретого газа, при этом слой припоя на крышке плавится, смачивает золото и герметизирует корпус без использования флюса.

Выбор метода подачи и оптимальной толщины припоя для соединения кристалла с ножкой. Исследовались два метода подачи припоя: использование припоя в виде прокладки и нанесение припоя на коллекторную сторону кристалла.

При первом методе припой прокатывается до определенной толщины, затем вырубаются прокладки заданной геометрической формы, которые закладываются под кристалл при сборке в кассету. Достоинством данного метода является то, что облуживание ножки и присоединение кристалла выполняется за один процесс. По второму методу сборка производится без прокладки. В этом случае на коллекторной стороне пластины гальванически осаждается слой припоя Sn-Bi. Применение этого метода упрощает процесс сборки, кроме того, имеется возможность наносить покрытия любой толщины. Однако требуются допол-

нительные операции по защите активной стороны пластины перед облуживанием.

При первом методе подачи припоя для пайки кристалла материалом для прокладок служил припой ПОС-40. Исследовались прокладки различной толщины – от 20 до 90 мкм. При каждом значении толщины напаивалось по 20 кристаллов. Качество их присоединения к ножке оценивалось по выходу годных приборов при замере мощности рассеивания после сборки приборов. Для монтажа использовались облуженные выводы с толщиной припоя 9-10 мкм. Выход годных приборов зависит от толщины прокладки припоя (рис. 5.3): если она составляет 40 мкм, то выход – максимальный (85 %), при толщине 90 мкм он уменьшается до 50 %. Это объясняется тем, что более толстый слой припоя под кристаллом ухудшает теплопроводность прибора при работе.

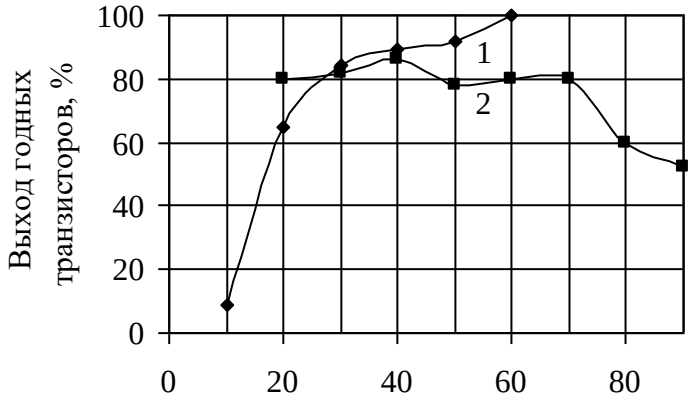


Рис. 5.3. Влияние толщины и методов подачи припоя на качество соединений кристалла с ножкой: 1 – гальваническое облуживание коллекторной стороны кристалла; 2 – использование припоя в виде прокладок

При нанесении припоя на коллекторную сторону пластины активная область должна быть защищена. Методом гальванического лужения наносилось покрытие из сплава Sn-Bi. Скорость осаждения составляла 0,75 мкм/мин при плотности тока 1 А/дм^2.

Толщина гальванического покрытия изменялась от 10 до 60 мкм через 10 мкм. Для каждого значения толщины покрытия изготавливалось по одной пластине. После разрезки пластин на кристаллы последние проверялись по электрическим параметрам и внешнему виду. Качество присоединения, как и в первом случае, оценивалось по выходу годных приборов при замере мощности рассеивания (рис. 5.3). Выход годных приборов изменяется от 64 % при толщине припоя 20 мкм до 100 % при толщине 60 мкм. При толщине припоя 50-60 мкм наблюдается наиболее равномерное его растекание по поверхности кристалла и ножки.

Таким образом, оптимальным методом подачи припоя под кристалл является гальваническое облуживание коллекторной стороны кристалла.

5.3.3. Оловянное покрытие

Некоторые зарубежные компании (например, Molex) считают, что лучшей заменой сплаву Pb-Sn является покрытие контактов печатных плат чистым оловом. Известно, что олово обладает химической устойчивостью и инертностью, а также высокой способностью к пайке. В то же время следует отметить, что олово обладает и недостатками: при воздействии низкой температуры возможно превращение β-олова, кристаллизующегося в тетрагональной системе и имеющего плотность 7,29 г/см^3, в α-олово, имеющего кубическую решетку с плотностью 5,77 г/см^3. Данное превращение сопровождается изменением объема и переходом контактного металла в порошкообразное состояние, которое называют «оловянной чумой». Кроме того, при хранении деталей и изделий, покрытых оловом, способность к пайке существенно снижается, что вызывает определенные трудности при сборке изделий на поточных линиях. Особо важно отметить, что даже белая модификация олова после двухлетнего хранения на 60 % теряет прочность спая. Покрытия из чистого олова обладают склонностью к образованию на поверхно-

сти нитевидных кристаллов («усов»), что ограничивает их применение для сборки.

С целью устранения недостатков, присущих оловянным покрытиям, проводят электрохимическое легирование олова другими металлами (никель, висмут, цинк, кобальт, сурьма и др.). Эти сплавы лишены недостатков, которыми обладает чистое олово, а, кроме того, имеют определенные преимущества: сохраняют паяемость, повышенную коррозионную стойкость и другие специальные свойства.

Олово и его сплавы осаждаются в виде блестящих электролитических покрытий только в том случае, если в раствор при электролизе вводят специальные поверхностно-активные или коллоидные добавки, называемые блескообразующими. Органические соединения, добавляемые в электролиты, повышают катодную поляризацию, сближают потенциалы осаждаемых металлов, улучшают мелкокристалличность покрытия, его паяемость, увеличивают блеск и рассеивающую способность, повышают качество покрытия и стабильность работы электролита.

5.3.4. Никелевое покрытие

Покрытия корпусов ППИ никелем и его сплавами широко используются в электронной промышленности. Основным недостатком никелевых покрытий является низкая теплостойкость, поэтому они применимы только при низкотемпературном монтаже элементов или при пайке в защитной среде. Для повышения теплостойкости никелевые покрытия легируют тугоплавкими металлами Co, W, Mo, Re и B. Практическое применение нашли никелевые покрытия, легированные до 1 % B. Легирование никеля бором существенно повышает температурную стойкость сплава даже при малой концентрации бора, а микротвердость и хрупкость покрытия уменьшаются путем отжига.

Основной целью никелирования является защита основного металла от коррозии и повышение поверхностной твердости. Для покрытия корпусов приборов (в случае пайки кристаллов в

защитной среде) используется химическое никелирование. Химические никелевые покрытия намного тверже электрохимических. Повышенная твердость покрытий во многом зависит от содержания фосфора в осажденных никелевых сплавах и режимов осаждения.

Химическое никелирование осуществляется на медные корпуса из следующего раствора, (г/л): никель двухлористый (20), натрий фосфорноватистокислый (25), кислота аминоуксусная (15), натрий уксуснокислый (10). Время осаждения покрытия толщиной 4 мкм составляет 40-50 мин при температуре раствора 82-85 °С.

Свойства покрытий существенным образом зависят от подготовки медных корпусов к операции никелирования. Авторами исследованы покрытия, которые наносились на медные основания корпусов без полирования и с предварительным электрохимическим полированием поверхности. Анализ микроструктуры никелевых покрытий медных корпусов показал, что на полированной медной основе структура покрытий более мелкозернистая, чем на неполированной.

Для повышения блеска, снижения внутренних напряжений в никелевых покрытиях и интенсификации процесса никелирования используют специальный электролит. Электролит состоит, (г/л): сернокислый никель (150-250), сернокислый магний (20-60), сернокислый натрий (5-15), борная кислота (25-35), бензолсульфамид (0,1-0,8), 2,2′-дипиридил (0,005-0,01), триэтил-α-метилнафтилам-монит хлорид (0,002-0,02). Электроосаждение ведут при 40-55 °С, плотности тока 1-20 А/дм^2 и pH 4,0-5,5.

Вводимый в состав электролита бензолсульфамид способствует снижению внутренних напряжений, переводя их из напряжений растяжения в напряжения сжатия. Кроме того, повышается рассеивающая способность электролита. Введение в состав электролита бензолсульфамида положительно сказывается на качестве и свойствах покрытий, которые становятся более плотными, блестящими и не отслаиваются от подложки при деформации. Повышение содержания бензолсульфамида более

0,8 г/л приводит к росту внутренних напряжений сжатия, а его снижение до 0,1 г/л вызывает хрупкость покрытий.

5.3.5. Сплав никель – олово

Гальванические покрытия паяемых поверхностей кристалла и основания корпуса при сборке должны обладать не только хорошей смачиваемостью, но и высокой коррозионной стойкостью. Этим требованиям в полной мере отвечают сплавы никеля с оловом (Ni-Sn).

При осаждении сплава Ni-Sn необходимо строго соблюдать условия электроосаждения: температуру электролиза, соотношение концентраций компонентов электролита, плотность тока.

Для осаждения сплава Ni-Sn существует несколько типов электролитов. Наиболее широкое применение в промышленности получили фторидхлоридные электролиты как наиболее стабильные в работе и позволяющие получать покрытия с относительно высокими защитно-декоративными свойствами. Широко используется электролит следующего состава, (г/л): хлористый никель (200), хлористое олово (40), фтористый аммоний (60), ОС-20 (5). Температура электролита составляет 50 °С, а в качестве анода используется сплав никель – олово (30-50 % Ni).

Для нанесения сплавов Ni-Sn рекомендуется использовать электролит следующего состава, (г/л): хлористый никель (250-300), хлористое олово (40-50), фтористый аммоний (40-80), хлористый аммоний (60-100), 2, 4, 6-три-(морфолинометил)-фенол (0,05-0,2). Особенностью данного электролита является следующее: введение 2, 4, 6-три-(морфолинометил)-фенол обеспечивает повышение блеска и коррозионной стойкости покрытий.

С целью снижения внутренних напряжений и повышения защитно-декоративных свойств покрытий Ni-Sn электролит дополнительно содержит полиэтиленполиамин и N-ацетонитрилморфолина гидрохлорид при следующем соотношении компонентов, (г/л): хлористый никель (200-300), хло-

ристое олово (40-50), фтористый аммоний (30-60), фтористый натрий (20-30), полиэтиленполиамид (2-30 мл/л), N-ацетонитрилморфолина гидрохлорид (0,03-0,15).

Исследования микроструктуры и химического состава поверхности покрытий из сплава 35Ni/65Sn, полученных из электролитов с добавкой ОС-20, показали следующие результаты: при температуре 50 °С получаются крупнокристаллические покрытия, в которых массовая доля олова составляет 99,8 %. Отжиг покрытий в вакууме, соответствующий режимам пайки кристаллов к основаниям корпусов, приводит к увеличению массовой доли никеля в поверхностном слое до 8 %. Покрытия после отжига получаются более плотными с включениями неправильной формы.

Объясняется это тем, что при температуре пайки электролитический сплав Ni-Sn переходит в интерметаллические соединения Ni_3Sn_2 и Ni_3Sn_4, что способствует обогащению поверхностного слоя никелем. Кроме того, повышенное содержание никеля в поверхностном слое данного покрытия, очевидно, обусловлено различной сублимацией компонентов сплава, которая в большей степени присуща Sn.

5.3.6. Серебряное покрытие

Для создания покрытий с высокой электропроводностью и стабильной величиной переходного сопротивления в местах контактов используется серебрение. Например, в производстве СПП серебро используется в качестве металлизации кристалла под пайку. В этом случае осуществляется напыление пленки серебра на пластину с кристаллами.

Серебряное покрытие формируется напылением в вакууме с применением методов магнетронного распыления серебряной мишени или термическим испарением серебра из тигля электронным лучом. Более предпочтительным является метод магнетронного распыления, который обеспечивает высокие адгезионные свойства напыляемой пленки. Этим методом получают

качественные покрытия толщиной до 2 мкм с высокой производительностью, что является важным фактором в условиях серийного производства.

Для формирования металлизации методом магнетронного распыления используются промышленные вакуумные установки непрерывного действия. Процесс напыления проводится при рабочем давлении газа (аргона) p = (0,5-1,0) Па при мощности магнетрона до 4 кВт. Для улучшения адгезионных свойств напыляемой пленки поверхность пластин подвергается бомбардировке ионами Ar^+. Ионная очистка осуществляется в том же рабочем объеме (камере), что и процесс напыления.

Нанесение серебряного покрытия на корпуса проводят гальваническим способом только на участки под пайку кристаллов и разварку внутренних выводов. Серебряные покрытия, полученные из обычных электролитов, характеризуются малой твердостью и незначительной износостойкостью. Для улучшения этих параметров в электролит для серебрения вводят соли никеля или кобальта, что приводит к повышению твердости покрытия в 1,5, а износостойкости – почти в 3 раза.

Корпуса для СПП изготавливают в основном из холоднокатаной листовой меди. На поверхности таких листов присутствует наклепанный слой. Авторами данной работы проводились исследования серебряных покрытий, которые наносились на медные корпуса без полирования и с предварительным электрохимическим полированием поверхности. Анализировались серебро гальваническое и серебро с подслоем никеля. Установлено, что серебряные покрытия на полированной медной основе имеют мелкозернистую структуру, характеризуются более низкой микротвердостью. Эти свойства необходимо учитывать при пайке кристаллов и присоединении внутренних выводов к корпусам с серебряным покрытием.

На медные корпуса серебряное покрытие толщиной 5-6 мкм наносят на подслой химического никеля. Для получения блестящих серебряных покрытий в широком диапазоне плотностей тока при высокой скорости осаждения металла разработан технологический процесс, состоящий из следующих операций:

проводят электрохимическое обезжиривание на катоде в электролите, (г/л): NaOH (10-59), Na_2CO_3 (20-30), Na_3PO_4 (30-50), Na_2SiO_3 (3-5), ОП-10 (2-3) при Т = 80-90 °С, D_k = 2-10 А/дм^2, U = 5-12 В, τ = 10-15 мин; затем промывают в горячей и холодной проточной воде и проводят процесс химического травления в растворе: HNO_3 (1 л), H_2SO_4 (1 л), NaCl (4-10 г/л) при Т = 20-25 °С, τ = 2-3 с; промывают в холодной воде, после чего процесс травления повторяется 2-3 раза.

Химическое декапирование проводят в растворе: HCl (50-100 мл/л), H_2O (900-950 мл) при Т = 20-25 °С, τ = 0,5 мин, промывают в холодной воде. Электролитическое серебрение проводят в электролите, (г/л): Ag_2NO_3 (10-45), $K_2Fe(CH)_6 \cdot 3H_2O$ (50-150), K_2CO_3 (15-30) при Т = 20-25 °С. Параметры импульсного тока: амплитудная плотность 5-8 А/дм^2, частота 0,5-40 Гц, скважность 4-20. Параметры ультразвуковой обработки: интенсивность в импульсе 0,1-0,5 Вт/см, частота 15-80 кГц, частота посылок импульсов 0,5-40 Гц, затем идет процесс промывки деталей.

Снижение качества операций пайки кристаллов и присоединения внутренних выводов к серебряному покрытию происходит из-за наличия сульфидной пленки Ag_2S на поверхности. Для очистки серебряных покрытий применяют различные методы: механические, химические и электрохимические. Однако данные способы не предотвращают процесса повторного образования Ag_2S.

5.4. Бессвинцовые припои в технологии производства ППИ

В качестве бессвинцовых припоев рассматриваются сплавы на основе олова с добавлением в него Ag, Cu, Bi, Zn и других металлов. С точки зрения надежности считаются оптимальными сплавы Sn-Ag и Sn-Ag-Cu (95-96,6Sn/2,5-4,1Ag/0,9Cu). Эти припои рекомендуются многими исследователями для первоочередного изучения и внедрения. Основной их недостаток при пайке элементов на печатные платы: сравнительно высокая тем-

пература плавления около 220 ºС, негативно влияющая на сами ППИ и на плату. Снизить температуру плавления этих припоев можно, добавляя в них Bi, Zn и другие металлы. Рассматриваются варианты введения в составы Sn-Bi или Sn-Zn элементов, улучшающих технологические свойства данных припоев.

Хорошие результаты показал сплав 95,5Sn/4Ag/0,5Cu: высокая температура плавления (217 °С) делает его идеальным для пайки изделий, работающих при температуре ≤ 175 °С; при некоторых испытаниях он показал лучшую стойкость к переменным температурам, чем Sn-Ag припой.

Для пайки без свинца могут использоваться сплавы олова с медью, серебром, висмутом, индием, цинком. Сплав олова с висмутом с малым содержанием олова не намного дороже свинцового сплава, однако имеет низкую температуру плавления (138 °С).

Известен сплав для соединения элементов ППИ с получением повышенной стойкости к термической усталости: 81-92Sn/3-6Ag/0,1-2Cu.

Удовлетворительные результаты получены при использовании покрытий из Sn-Bi, Sn-Cu, Sn-Ag, Sn и Sn-Zn. Контактные шарики из Sn-Ag-Cu – сплава обеспечивают повышенную циклическую прочность по сравнению с Sn-Pb припоями. При сборке кристаллов больших размеров значительная разница в термических коэффициентах расширения между Si, медной рамкой и пластмассовым заполнителем приводит к появлению значительных напряжений и к разрушению пластмассы. Образование трещин по поверхности контакта между соединением и заливочной массой вызывается влажностью.

В качестве припоев рекомендуется использовать трех- и четырехкомпонентные сплавы: 55-60Ag/25-30Cu/20-26Zn; 44-48Ag/32-36Cu/18-22Sn; 15-20Ag/28-32Cu/51-54Cd; 40-45Ag/12-15Cu/29-33Cd/9-11Zn; 63-68Ag/12-16Cu/11-15Sn/6-9Zn. Однако из-за высокой температуры плавления данные припои на сборочных операциях ППИ, по всей видимости, не найдут широкого применения.

Высокими механическими свойствами обладает припой: 2-4Ag/0,5-2Zn/2-3Bi/Sn-остальное.

Для пайки ИС предложен Sn-Ag припой: 3-4Ag/2-6Bi/2-6Jn/Sn-остальное.

Для массового производства ППИ отдается предпочтение Sn-Ag-Cu–припоям, например, сплаву 95,5Sn/3,8Ag/0,7Cu с температурой плавления 217 °С. По своей надежности паяные соединения, выполненные этим припоем, не уступают свинцовистому припою 62Sn/36Pb/2Ag.

Припои, не содержащие свинец, представляют собой эвтектические сплавы типа олово – висмут, олово – индий, висмут – индий и др.

Ниже приведены (по данным отечественной научно-технической информации) составы и температуры плавления бессвинцовых припоев, которые могут быть использованы при пайке полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов и внутренних выводов к контактным площадкам кристалла и корпуса.

5.4.1. Индиевые припои

Эти припои обладают стойкостью к окислению, электро- и теплопроводны. В электронной технике применяются при пайке вакуумных соединений, стеклянных и кварцевых изделий (табл. 5.5).

Благодаря высокой пластичности индиевых припоев и хорошей смачивающей способности их металлов и неметаллических материалов они могут использоваться при пайке материалов с различными коэффициентами линейного расширения.

Табл. 5.5. Состав и температура плавления индиевых припоев

Состав припоя, %	Температура плавления, °С	Назначение
99In/lCu	153	
97In/3Zn	143	
95In/5Al	151	

74In/26Cd	123	Пайка германиевых элементов
66In/34Bi	72	Пайка полупроводниковых материалов
52In/48Sn	120	Пайка стекла без флюса методом натирания
74In/24,25Cd/1,75Zn	116	
52,2In/46Sn/1,8Zn	108	
27In/73Cd	123	
97In/3Ag	141	
44,2Jn/46,8Sn/9Tl	117	

5.4.2. Висмутовые припои

Припои на основе висмута недостаточно пластичны, имеют малую прочность и склонны к трещинообразованию. Висмутовые припои находят широкое применение (из-за низкой температуры плавления) при пайке автоматически действующих противопожарных установок и плавких предохранителей. Пайка этими припоями осуществляется с применением специальных флюсов. В некоторых случаях паяемые поверхности перед пайкой подвергаются лужению (табл. 5.6).

Табл. 5.6. Состав и температура плавления висмутовых припоев

Состав припоя, %	Температура плавления, °С
60Bi/40Cd	144
54Bi/26Sn/20Cd	103
58Bi/25Sn/17In	79
58Bi/17Sn/25In	79
61,2Bi/32,6Sn/6,2Tl	128
60Bi/30Cd/10Tl	123
56Bi/36,5In/7,5Tl	100
55,3Bi/15,8Sn/10,9Cd/18Tl	100
57Bi/43Sn	139
60Bi/40Sn	150
70Bi/30Sn	175
80Bi/20Sn	200
90Bi/10Sn	240

5.4.3. Припои на цинковой основе

Сплавы системы цинк – олово имеют высокую прочность и пластичность только при содержании более 30 % Sn. Припои на основе цинка характеризуются низкой пластичностью и прочностью, плохой растекаемостью и затеканием в зазор. Пластичность припоев можно повысить введением в них серебра (1-5 %) и меди (2-3 %), растекаемость – введением кадмия и олова. Цинковые припои в основном применяются для пайки алюминия и его сплавов (табл. 5.7).

Табл. 5.7. Состав и температура плавления припоев на цинковой основе

Состав припоя, %	Температура плавления, °С
40Zn/11,5Al/8,5Cu/40Cd	310
45Zn/13,5Al/10Cu/31,5Cd	340
50Zn/25Cd/25Sn	300
60Zn/40Cd	330, $\sigma_в$ = 35 МПа*

*Предел прочности припоя при растяжении

5.4.4. Припои на основе кадмия

В качестве припоев, как правило, используют двойные или многокомпонентные сплавы кадмия с цинком, серебром, оловом, магнием, никелем и индием.

Сплавы кадмия с серебром и цинком применяют для пайки меди, алюминия и других металлов. Припои кадмия с добавкой олова имеют сравнительно низкую температуру плавления, иногда их используют для пайки алюминия ультразвуком. Добавка до 0,5% индия позволяет применять некоторые кадмиевые припои при пайке без флюса. Припои на основе кадмия обладают достаточной прочностью и большим относительным удлинением (табл. 5.8).

Табл. 5.8. Состав и температура плавления припоев на основе кадмия

Состав припоя, %	Температура плавления, °С
65Cd/30Zn/5Sn	294

57,7Cd/3,8Zn/38,5Sn (П150А)	150
51,5Cd/3,5Zn/45Sn	170
50Cd/20Zn/30Sn	277
75-83Cd/17-25Zn	280
65-70Cd/30-35Zn	310
50,5Cd/33Zn/9,5Al/7Cu	260
40Cd/40Zn/12Al/8Cu	310
79Cd/16Zn/5Ag	285
82,6Cd/17,4Zn	266
60Cd/40Zn	310
48,5-50,5Cd/32-34Zn/9,5Sn/7Al	260

5.4.5. Припои на основе олова

Данные припои уже широко применяют при пайке радиотехнической и электронной аппаратуры, работающей в различных климатических условиях. Двойные оловянно-цинковые припои находят широкое применение для низкотемпературной пайки изделий из алюминиевых и магниевых сплавов. Присадка цинка до 7 % в олово снижает температуру плавления сплава до 199 °С Добавки кадмия снижают температуру плавления оловянно-цинкового припоя. Резко снижают температуру плавления оловянных припоев добавки индия и таллия. Для улучшения технологических свойств и повышения надежности паяных соединений в оловянно-цинковые припои иногда вводят небольшие добавки серебра и алюминия. Составы припоев на основе олова приведены в табл. 5.9.

Табл. 5.9. Состав и температура плавления припоев на основе олова

Состав припоя, %	Температура плавления, °С
90Sn/10Zn	210, $\sigma_в$ = 60 МПа
80Sn/20Zn	280, $\sigma_в$ = 70 МПа
70Sn/30Zn	315
60Sn/40Zn	345, $\sigma_в$ = 80 МПа
66,5Sn/2,5Zn/31Cd	165
57Sn/18Zn/25Cd	190
55Sn/25Zn/20Cd	250

46,8Sn/44,2In/9Tl	117
66,5Sn/31Cd/2,5Zn	163
67,75Sn/32,25Cd	177
91Sn/9Zn	199
70-80Sn/20-30Zn/l-2Ag	280
79Sn/21Bi	210
70Sn/30Bi	190
60Sn/40Bi	170
50Sn/50Bi	150
83-86Sn/7,5-8,5Ag/6-8Sb (ВПр6)	250
90,8-93,2Sn/4,5-5,5Ag/0,8-1,2Sb/1,5-2,5Cu (ВПр9)	240

Припои ВПр6 и ВПр9 могут применяться без всякой защиты при работе во всех климатических условиях.

При выборе способов, режимов пайки и типов припоев, применяемых при монтаже полупроводниковых приборов и ИС необходимо знать условия их эксплуатации. Значения предельных температур различных классов ППИ приведены в табл. 5.10.

Большое разнообразие типов полупроводниковых приборов и ИС в сущности отличаются размерами корпуса, кристалла и величинами электрических параметров.

Табл. 5.10. Температуры нагрева приборов

Диоды при:	T °C
$U_{обр} \leq 1600$В	190
$U_{обр} \leq 2800$В	175
$U_{обр} \leq 4000$В	150
Стабилитроны	140
Тиристоры:	
лавинные	140
нелавинные	125
быстродействующие	110
симисторы	125
Транзисторы:	
биполярные кремниевые	200
биполярные германиевые	85-100
полевые МДП	150
полевые с управляющим переходом	25-175

Оптопары:	100-120
приборы с зарядовой связью	110-140

При изготовлении ППИ с низкой себестоимостью должны использоваться групповые методы сборки в прецизионных кассетах. Основной способ монтажа кристаллов к основанию корпусов – это пайка в конвейерных водородных печах или в вакууме.

Применение бессвинцовых припоев и покрытий естественно приведет к изменению технологии пайки и в целом сборочных процессов. Потребуется корректировка режимов пайки и, как следствие, доработка технологического оборудования. Необходимо проведение комплексных испытаний бессвинцовых паяных соединений на прочность, тепловое сопротивление, коррозионную стойкость, совместимость с материалами и покрытиями обратной стороны кристаллов и оснований корпусов ППИ.

5.5. Пайка кристаллов к основаниям корпусов ППИ

Существуют различные способы монтажа полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов. Качество пайки кристалла с основанием корпуса во многом зависит от месторасположения припоя перед пайкой. Возможно традиционное размещение прокладки припоя непосредственно под кристаллом, однако в процессе пайки оксидные пленки и загрязнения на поверхности прокладки при расплавлении остаются в зоне шва, что ухудшает смачиваемость припоем поверхности кристалла и основания корпуса, нарушает сплошность шва, а это, в свою очередь, приводит к ухудшению теплопроводности шва и снижению надежности ППИ.

Для улучшения смачивания припоем паяемой поверхности кристалла и основания корпуса широко используется капиллярный эффект заполнения зазора припоем в процессе пайки кристалла. Перед пайкой в непосредственном касании одной из боковых граней кристалла располагается навеска припоя в виде

одного или двух шариков (в зависимости от пощади кристалла). Детали фиксируются относительно корпуса 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, и при кристаллизации образуя паяный шов. Характерной особенностью этого процесса является то, что 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 припоя. Это необходимо для разрушения оксидной пленки припоя и обеспечения его капиллярного течения. Кроме того, при пайке кристаллов больших размеров, особенно в ППИ для силовой электроники, невозможно получить площадь спая, равную площади кристалла. Из-за неполного смачивания соединяемых поверхностей в паяном шве образуются непропаи (в основном на участке кристалла противоположном месту расположения навески припоя).

Для увеличения площади спая между кристаллом и корпусом на верхней плоскости корпуса формируют V-образные канавки глубиной 25-75 мкм, располагаемые друг от друга на расстоянии 0,25-1 мкм. В случае использования корпусов с канавками необходимо при пайке корпус или кристалл подвергать воздействию ультразвуковых или низкочастотных колебаний. Механические колебания должны быть направлены вдоль канавок. В противном случае при пайке кристаллов больших размеров V-образные канавки являются очагами непропаев.

При пайке кристаллов размером менее 3×3 мм используют как ультразвуковые, так и низкочастотные колебания, а при пайке кристаллов больших размеров применяются в основном низкочастотные колебания с амплитудой до 0,5-0,8 мм.

Для контактно-реактивной низкотемпературной пайки бессвинцовыми припоями фирма Resma (Freiberg, Германия) выпускает пасту на основе композиционного припоя. В комбина-

ции порошков нескольких припоев с реактивной присадкой при расплавлении протекают реакции, ускоряющие процесс пайки. При охлаждении в паяном шве возникает структура дисперсионного упрочнения с высокими термическими и механическими характеристиками.

Применяется способ монтажа кристаллов БИС с использованием припоя на основе цинка, по которому на паяемую сторону кристалла напыляют алюминий толщиной 0,7-1,2 мкм, а затем проводят пайку к корпусу, покрытому припоем цинк-алюминий-германий (ЦАГ).

Недостатком данного способа является высокая трудоемкость изготовления ППИ, заключающаяся в изготовлении сплава ЦАГ и нанесении его на монтажную площадку методом электрического взрыва фольги. Это требует наличия специального дорогостоящего оборудования. Кроме того, при посадке кристаллов на сплав ЦАГ необходимо создавать наименьшее удельное давление кристалла на расплав и выполнять траектории движения кристалла в виде восьмерки для разрушения поверхностной оксидной пленки. Соблюдение этих требований особенно необходимо для кристаллов с размерами, превышающими 4×4 мм, так как с ростом площади кристалла увеличивается вероятность непропаев и оксидных включений. Более того, смачиваемость и растекание припоя ЦАГ по алюминиевой металлизации кристалла ухудшаются с течением времени хранения перед пайкой.

Для пайки полупроводниковых кристаллов СПП с использованием бессвинцовых припоев разработан способ, при котором на алюминий на паяемой стороне кристалла наносят цинк, а пайку осуществляют к основанию корпуса, покрытому оловом, при этом толщины слоев цинка и олова выбирают исходя из заданной толщины паяного шва и образования эвтектического сплава цинк – олово (рис. 5.4). Пайка осуществляется в защитной среде при температуре несколько выше температуры образования эвтектического сплава Zn-Sn. При этом площадь спая равна площади кристалла.

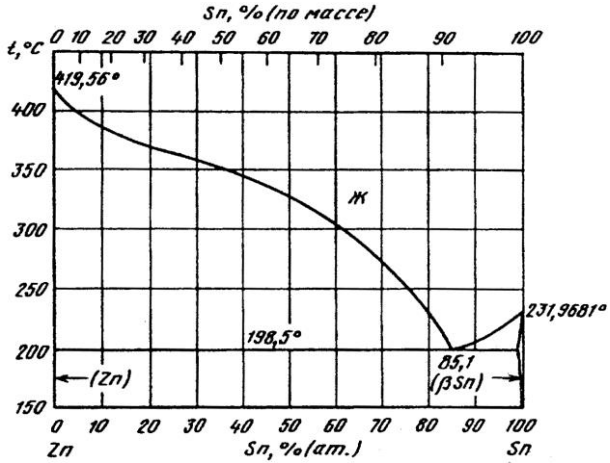


Рис. 5.4. Диаграмма состояния сплавов системы цинк – олово (Zn-Sn)

Например, для получения паяного шва толщиной 50 мкм необходимо наносить Zn толщиной 4 мкм и Sn – 46 мкм.

Известен способ пайки полупроводниковых кристаллов СПП с использованием бессвинцовых припоев. Сущность способа пайки заключается в том, что на алюминий на паяемой стороне кристалла наносят цинк, а пайку осуществляют к основанию корпуса, покрытому оловом, при этом толщины слоев цинка и олова выбирают исходя из заданной толщины паяного шва и образования эвтектического сплава цинк – олово.

При решении вопроса о надежности паяных соединений, наряду с выбором оптимальных способов и режимов пайки, необходимо учитывать состав и свойства паяемых покрытий. Анализ покрытий паяемых поверхностей кристаллов и оснований корпусов показал, что для пайки бессвинцовыми припоями в первую очередь целесообразно провести исследования следующих покрытий: цинковое, никелевое, никель – олово, серебряное, оловянное, цинк – олово и олово – висмут.

5.5.1. Пайка кристаллов ППИ на основания корпусов с образованием эвтектики Si-Au

Контактно-реактивная пайка широко используется на сборочных операциях ППИ. Контактно-реактивной или контактно-реакционной, называется такая пайка, при которой между соединяемыми металлами в результате контактного плавления образуется эвтектический сплав, заполняющий зазор и кристаллизующийся с образованием паяного соединения.

Одним из методом монтажа кремниевых кристаллов на основания корпусов является контактно-реактивная пайка на основе эвтектики Si-Au, в этом случае на основание корпуса или посадочного места на плате наносят золотое покрытие толщиной не менее 2,5 мкм. Меньшая толщина приводит к уменьшению эвтектического спая, а также к тому, что на границе эвтектики с материалом корпуса (например, ковара) появляются интерметаллические соединения железа и кобальта.

Оптимальным является соединение Si-Au толщиной 5-7 мкм эвтектического равномерного спая с содержанием кремния 2,4-2,8 % и площадью эвтектики под кристаллом не менее 70 %.

5.5.1.1. Свойства золота

Температура плавления золота 1063 °С. Кристаллическая структура – Г.Ц.К. При комнатной температуре у Au $\sigma_в$ = 120 МПа, δ = 50 %, ψ = 94 %, Н В 18. Свойства Au чистотой 99,9 % привелены в табл. 5.11.

С повышением температуры временное сопротивление золота монотонно уменьшается:

Т, °С	17	200	400	600	800
$\sigma_в$, МПа	134	110	90	50	25

Табл. 5.11. Свойства золота чистотой 99,9 % при 20 °С

Золото	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ
Литое	127	30	33

Деформированное (ε = 60 %)	225	4	58
Отожженное	134	45	25

Для выбора способов и режимов пайки и сварки ППИ необходимо учитывать взаимодействие золота с металлами:

1. Полная взаимная растворимость золота и элементов (Pd, Ni, Cu, Ag, Pt);

2. Полная взаимная нерастворимость золота и элементов (Si);

3. Ограниченная растворимость золота в элементах (Zn, Cd, Pb, Al);

4. Ограниченная растворимость элементов в золоте (In, Sn);

5. Ограниченная растворимость золота и элементов (P, S, Cl, N, O, B и др.).

5.5.1.2. Подготовка золотой фольги и позолоченных корпусов ППИ к сборочным операциям

Известно влияние обработки золотых пленок корпусов ППИ лазерным излучением неодимового ОКГ на механическую прочность и воспроизводимость качества ультразвуковой микросварки алюминиевой проволокой. Повышение качества микросварных соединений происходит за счет десорбции органических загрязнений и естественной оксидной пленки с поверхности золотого покрытия. Оптимальная мощность лазерной обработки золотых пленой $q = (1{,}85\text{-}2{,}75)\cdot 10^4$ Вт/см^2 позволяет существенно стабилизировать процесс микросварки и улучшить параметры соединений Al-Au.

Органические загрязнения и естественные оксидные пленки на поверхности соединяемых деталей как при пайке, так и при сварке существенно влияют на процесс образования и развития физического контакта в зоне соединения. Одним из методов подготовки позолоченных деталей к сборочным операциям является комплексное воздействие ультрафиолетового излуче-

ния с плотностью потока $1{,}2 \cdot 10^{-2}$ Вт/см^2 на длине волны 0,2537 мкм и озона (расход кислорода – 0,8 л/мин) на поверхность золотых пленок. При облучении ультрафиолетовым излучением и озоном золотых пленок в течение 6 ч толщина поверхностных органических пленок уменьшается с 1,2 до 0,4 нм.

Присоединение кристаллов кремниевых дискретных ППИ и ИС к корпусу может осуществляться следующим способом: размещают золотую фольгу между кристаллом и корпусом и соединяют их пайкой с образованием эвтектики золото – кремний. При этом поверхность фольги предварительно подвергают химическому травлению в растворе соляной кислоты при определенном режиме.

Основным недостатком данного способа является использование химического травления в растворе соляной кислоты. После этого золотая фольга подвергается промывке, а затем сушке при определенных режимах. Данная технология ухудшает экологию производства и не обеспечивает высокого качества очистки поверхности, т. к. у кислородных соединений золота преобладает кислотный характер, поэтому, например, пленка AuO(OH) практически не реагирует с разбавленными кислотами.

При пайке кристаллов площадью свыше 9 мм^2 между контактирующими поверхностями возникают локальные области непропаев. Данное явление приводит к неравномерности в распределении электрического тока по площади контакта, способствует увеличению теплового сопротивления соединения и, как следствие, к снижению надежности приборов в целом. Образование локальных участков непроплавления происходит в результате формирования на поверхности золотой фольги естественной оксидной пленки золота толщиной несколько десятков ангстрем. Оксидная пленка препятствует образованию физического контакта между соединяемыми поверхностями при пайке.

Для улучшения смачивания паяемой стороны кристалла на нее наносят золотое покрытие с подслоем из никеля, которое вжигают перед пайкой при температуре 400-420 °С. При пайке

кристаллов больших размеров в зазор дополнительно вводят фольгу из золота толщиной около 20 мкм.

Режимы контактно-реактивной пайки полупроводниковых приборов и ИС с образованием эвтектики Si-Au приведены в табл. 5.12.

Табл. 5.12. Режимы контактно-реактивной пайки

№ вар.	Au покрытие, мкм		Температура пайки, °С	Время притирки, с	Частота колебаний, Гц
	на кристалле	на корпусе			
1	Без покрытия	3-9	410-450	1-5	1-50 или 20-60
2	Au (1-2 мкм) с подслоем Ni (0,03 мкм)	3	430-450	2-3	1-4

Для активации соединяемых поверхностей, заключающейся в разрушении оксидных пленок, контактно-реактивную пайку выполняют также с ультразвуковым воздействием (амплитуда 0,05-0,8 мм) на кристалл, в результате чего кристалл получает возвратно-поступательное движение в горизонтальной плоскости и как бы притирается к корпусу, происходит контактное плавление кремния и золота, жидкий сплав перемешивается и процесс соединения кристалла с корпусом ускоряется. Жидкая фаза способствует диспергированию (измельчению) оксидных пленок и их удалению из зоны контакта.

В установках контактно-реактивной пайки столик, на котором подогреваются ножки (держатели), обычно нагревают до температуры 410±10 °С. Оптимальным считается усилие 0,05-0,07 Н, прикладываемой к инструменту для контактно-реактивной пайки. Увеличение усилия приводит к образованию сколов и трещин в кристаллах.

Известны данные анализа качества посадки кристаллов ИС на эвтектику золото – кремний. В качестве подложки использовались золоченая лента и корпуса ИС. Средняя толщина золотого покрытия составляла 2,5 мкм. Для анализа качества соединений использовался рентгенотелевизионный микроскоп и метал-

лография. На границе эвтектики с коваровым основанием обнаружены интерметаллические соединения, образованные железом и кобальтом. На некоторых участках происходит внедрение этого сплава в эвтектику, что способствует ее охрупчиванию, а со временем разрушению соединения.

Повышение качества контакта между кремниевым кристаллом и позолоченной поверхностью корпуса ППИ достигается за счет использования микрорельефа в виде линии глубиной 0,8-1,0 мкм на обратной поверхности кристалла. С помощью такого рельефа при пайке происходит разрушение пленки естественного оксида на поверхности золота, что способствует уменьшению локальных непроплавленных областей при формировании эвтектики кремний – золото.

Для снижения в 1,5 раза теплового сопротивления кристалл – основание корпуса разработан способ монтажа кристаллов ИС больших размеров в керамический корпус пайкой с применением прокладки из эвтектического сплава золото – кремний. Площадь прокладки составляет 75-80 % от площади кристалла и помещается в нагретый корпус. Высокое качество спая обеспечивается многоступенчатым нагревом корпуса при температуре 80-421 ºС, выдержкой сборки на позиции монтажа кристалла при температуре 490 ºС с последующим пятиступенчатым охлаждением.

5.5.1.3. Остаточные механические напряжения в кристаллах при эвтектической пайке Si-Au

С увеличением размеров кристаллов серьезную проблему при монтаже эвтектической пайки представляют остаточные механические напряжения (ОМН), возникающие в кристалле и элементах конструкции корпуса из-за различия коэффициентов термического напряжения соединяемых материалов. ОМН при определенных условиях могут привести к механическому разрушению кристалла и эвтектического соединения Si-Au.

Предложен способ снижения ОМН в кристаллах путем повышения податливости паяного шва соединения за счет локальной металлизации монтажной площадки металлокерамических корпусов. Для экспериментов монтаж кристаллов проводили на керамические подложки с размерами 38×20×0,7 мм, изготовленные из керамики ВК94-1, со сплошной и локально металлизированной монтажными площадками с размерами 10×10 мм. Толщина золотого покрытия монтажной площадки корпусов $(3\text{-}4)\cdot10^{-3}$ мм. При локальной металлизации на монтажных площадках выполнялась ортогональная сетка неметаллизированных полос шириной 0,25 мм с шагом 1,7×1,7 мм; 1,37×1,37 мм; 1,15×1,15 мм и 0,74×0,74 мм.

Пайку кристаллов проводили на установке УПК-1 с применением золотой прокладки (ПЗл999,9) толщиной 0,016 мм в размер кристалла. Режимы пайки: температура 420±20 ºС с предварительным подогревом подложек до 100-120 ºС, время – 8 с, сжимающее усилие на кристалл – 0,1 Н. Качество пайки оценивалось по площади смачивания обратной стороны кристаллов.

Хорошее смачивание (90-100 %) площади кристалла имели образцы, полученные при пайке кристаллов на подложки с шагом сетки 1,37×1,37 и 1,15×1,15 мм.

Значения максимальных ОМН (в центре кристалла) при пайке кристаллов на различные монтажные площадки подложки приведены в табл. 5.13.

Табл. 5.13. Остаточные механические напряжения в кристаллах при пайке на различные монтажные площадки

Металлизация монтажной площадки	Максимальные ОМН, МПа			
	кристалл 2,99×5,38 мм	кристалл 4×4 мм	кристалл 3,32×7,16 мм	кристалл 5,1×5,1 мм
Сплошная	–51,3±13,9	–73,2±12,3	–56,8±7,7	–60,8±12,3
Локальная (шаг сетки 1,15×1,15 мм)	–37,5±5,6	–51,5±5,4	–33,1±11,5	–36,7±9,1

Из табл. 5.13 видно, что ОМН на поверхности кристалла являются сжимающими и возрастают от краев к центру. Локальная металлизация монтажных площадок металлокерамических корпусов способствует снижению ОМН в кристалле на 20-30 %.

5.5.1.4. Новый способ подготовки золотой прокладки к пайке

Применяется способ крепления полупроводникового кристалла к корпусу через золотую прокладку, которую предварительно шаржируют алмазным порошком с размером зерен 2-5 мкм. Давление на кристалл при пайке составляет 0,05-0,1 Н.

Для пайки кристаллов большой площади через золотую прокладку рекомендуется производить притирание элементов при температуре около 400 ºС. Особенностью данного способа является то, что в центре прокладки на стороне, обращенной к монтируемому кристаллу, проходит полоса выступающего слоя толщиной 5 мкм из сплава Si-Au, занимающая более 70 % площади кристалла.

Оксид золота при взаимодействии с HCl диспропорционирует с образованием комплекса и свободного золота по реакции

$$Au_2O + 8HCl = 2H[AuCl_4] + 4Au + 3H_2O,$$

что не способствует повышению качества очистки поверхности.

Для повышения качества соединения кристалла с корпусом, снижения трудоемкости сборочных операций, улучшения качества очистки золотой фольги и экологии производства рекомендуется фольгу перед пайкой отжигать в вакууме при температуре 160-250 °С или в водороде в стандартных условиях (температура 25 °С, атмосферное давление 101 КПа).

Оксиды золота – твердые, амфотерные, не взаимодействующие с водой вещества, свободная энергия Гиббса $\Delta G^{\circ}_{Au_2O_3}$ составляет 78,7 кДж/моль. При 155 °С Au_2O_3 переходит в Au_2O.

Водородное восстановление золота из оксидов происходит по реакции

$$Au_2O_2 + 3H_2 = 2Au + 3H_2O$$

$$\Delta G°_{\text{реакции}} = 3\Delta G°_{H_2O} - \Delta G°_{Au_2O_3} = 3(-228{,}6) - 78{,}7 = -764{,}5 \text{ кДж},$$

т. е. $\Delta G° < 0$.

$$AuO(OH) + 3/2H_2O = Au + H_2O$$

$$\Delta G°_{\text{реакции}} = 2\Delta G°_{H_2O} - \Delta G°_{AuO(OH)} = 2(-228{,}6) + 350 = -107{,}2 \text{ кДж},$$

т. е. $\Delta G° < 0$.

Т. к. свободная энергия Гиббса $\Delta G° < 0$, то восстановление золота из оксидов может протекать в стандартных условиях.

Температура разложения (диссоциации) оксидов золота Au_2O_3 составляет 155-160 °С, а Au_2O – 250 °С. Наибольший эффект восстановления золота из оксидов достигается путем отжига золотой фольги или деталей ППИ с золотым покрытием в вакууме при температуре 160-250 °С.

Таким образом, использование предлагаемого способа присоединения кристаллов кремниевых дискретных ППИ и ИС к корпусу с образованием эвтектики кремний – золото обеспечивает по сравнению с существующими способами следующие преимущества: повышение качества соединения кристалла с корпусом; снижение трудоемкости сборочных операций; повышение качества очистки золотой фольги; улучшение экологии производства.

5.5.2. Пайка кристаллов ППИ на основания корпусов с образованием эвтектики Sn-Zn

Известен способ пайки полупроводниковых кристаллов к корпусу, по которому на паяемую поверхность кристалла наносят цинк, а пайку осуществляют к основанию корпуса, покрытому оловом, при этом толщины слоев цинка и олова выбирают из условия получения необходимой толщины паяного шва и образования эвтектического сплава цинк-олово. Недостатком этого способа является низкая коррозионная стойкость цинкового покрытия во влажном воздухе и в атмосфере промышленного города.

Кроме того, цинк во влажном воздухе покрывается пленкой, состоящей из карбоната цинка, что ухудшает смачиваемость цинкового покрытия оловом с течением времени хранения перед пайкой. Более того, солевые пленки попадая в паяный шов, повышают вероятность непропаев, особенно при пайке кристаллов с размерами более 4×4 мм, что способствует увеличению теплового и электрического сопротивления контакта полупроводникового кристалла с корпусом.

Авторы предлагают на пленке цинка формировать оловянно-висмутовое покрытие толщиной около 1 мкм с содержанием висмута 0,4-0,9 %.

При соответствующих режимах электролиза покрытие сплавом Sn-Bi получают с мелкозернистой структурой и пониженной твердостью. В зависимости от состава электролита данные сплавы могут осаждаться в виде матовых или блестящих осадков. Электролиты с добавкой ОС-20 или двумя добавками ДДДМ и ОС-20 позволяют получать светлые, мелкозернистые, плотные покрытия.

Коррозионная стойкость покрытий сплавом Sn-Bi зависит от состава, толщины, структуры и пористости осадков. Большей коррозионной стойкостью обладают покрытия с содержанием висмута 0,4-0,9 %.

Пайка осуществляется в водороде или вакууме на оптимальных режимах. При нагреве происходит смачивание оловом паяемой поверхности кристалла, а при кристаллизации расплава цинк-олово-висмут образуется паяный шов с уменьшенной площадью непропаев.

Использование предлагаемого способа бессвинцовой пайки полупроводникового кристалла к корпусу обеспечивает по сравнению с существующими способами следующими преимущества: исключается использование свинца при пайке; повышается коррозионная стойкость покрытий паяемой поверхности кристалла; улучшается смачиваемость оловом поверхности кристалла при температуре пайки; повышается надежность ППИ за счет уменьшения площади непропаев в паяном шве.

5.5.2.1. Возможные варианты пайки кристаллов на эвтектику Sn-Zn

На рис. 5.5 представлены схемы сборки и пайки кристаллов.

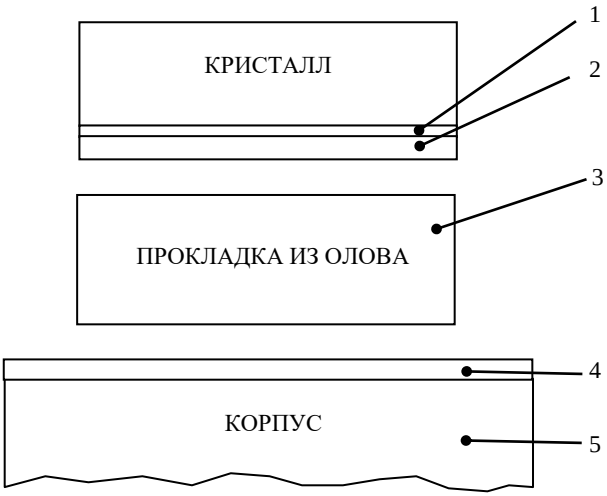


Рис. 5.5. Схема бессвинцовой пайки кристалла к корпусу: 1 – Al (2 мкм); 2 – Zn (4 мкм); 3 – Sn (46 мкм); 4 – Ni (3-4 мкм); 5 – Cu (корпус)

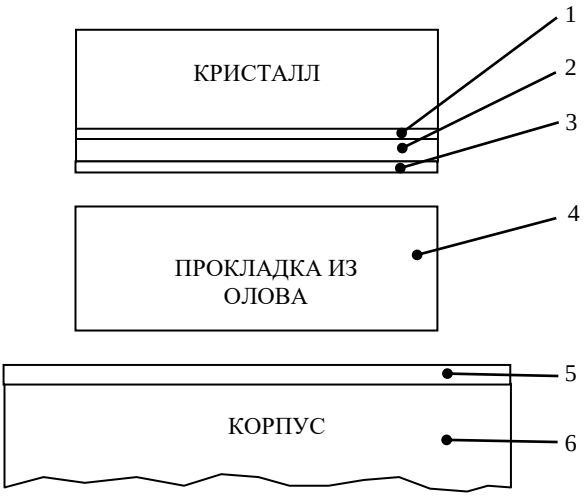


Рис. 5.6. Схема бессвинцовой пайки кристалла к корпусу: 1 – Al (2 мкм); 2 – Zn (4 мкм); 3 – Bi (1-2 мкм); 4 – Sn (46 мкм); 5 – Ni (3-4 мкм); 6 – Cu (корпус)

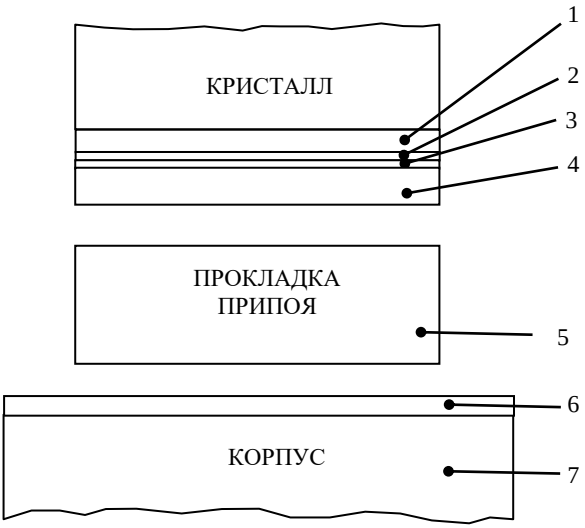


Рис. 5.7. Схема бессвинцовой пайки кристалла к корпусу: 1 – Al (2 мкм); 2 – Ti (0,15 мкм); 3 – Ni (0,02 мкм); 4 – Ni-Sn с ОС-20 (6 мкм); 5 – Припой (50 мкм); 6 – Ni (3-4 мкм); 7 – Cu (корпус)

5.5.3. Металлическая система для монтажа полупроводникового кристалла к корпусу

Разработка способов монтажа полупроводниковых кристаллов большой площади к основаниям корпусов ППИ – это актуальная задача, на решение которой направлены усилия всех специалистов, работающих в области полупроводниковой микроэлектроники. Существуют различные способы пайки полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов. Способ пайки полупроводникового кристалла к корпусу, по которому между кристаллом и корпусом размещают фольгу припоя, а пайку проводят в среде водорода или в вакууме.

К недостаткам данного способа следует отнести неизбежность образования пустот и непропаев в паяном шве, особенно при пайке кристаллов большой площади, что уменьшает прочность паяного соединения. Кроме того, паяный шов, формируемый с использованием фольги припоя большой толщины, ухудшает теплоотвод от кристалла к корпусу.

Разработан корпус электронного прибора с каналом снятия напряжений. Для согласования температурных коэффициентов линейного расширения корпуса и кристалла между ними размещается термокомпенсатор из Mo, W или стали, плакированной медью, толщиной более 0,25 мм. При этом на дне основания корпуса сформирована замкнутая трапециевидная канавка глубиной 20-40 % его толщины.

Недостатком данной конструкции является получение паяных швов толщиной более 0,25 мм, что ухудшает теплоотвод от кристалла к корпусу. Кроме того, замкнутая канавка способствует появлению непропаев в паяном шве из-за нарушения капиллярного течения припоя при пайке.

За рубежом применяется металлическая система для монтажа полупроводникового кристалла на основание корпуса, заключающаяся в том, для преодоления несогласованности материалов кристалла и основания корпуса по величине их ТКЛР в полость помещается буферный элемент (термокомпенсатор) в виде прямоугольной пластинки из Mo, W или их сплавов с Cu,

покрытой слоем Ni или Co. Элемент монтируется в полость пайкой или сваркой, а кристалл крепится на нем стеклоадгезивом с Ag-наполнителем.

Основным недостатком данной конструкции сявляется повышение трудоемкости производства ППИ, связанных с креплением термокомпенсатора. Кроме того, прямоугольная форма термокомпенсатора ухудшает затекание расплавленного припоя, что приводит к появлению пустот. Более того, однородный материал термокомпенсатора не позволяет существенно снизить термические напряжения в системе кристалл – паяный шов – корпус.

Нами разработан способ монтажа кристаллов большой площади, схема сборки представлена на рис. 5.8.

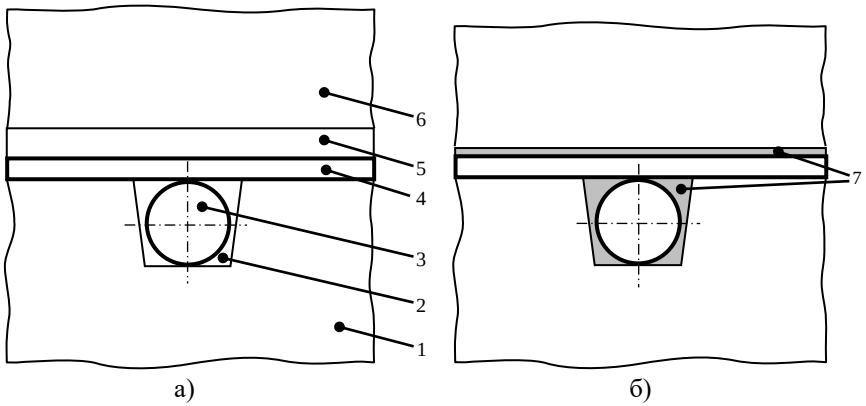


Рис. 5.8. Схема сборки ППИ: а – перед пайкой; б – после пайки

Монтаж полупроводникового кристалла к корпусу с использованием металлической системы (рис. 5.8) реализуется по схеме, содержащей основание 1 с канавками 2 в виде равнобочных трапеций, в которые вставляется нижняя сторона сетки, имеющая проволоки 3. На верхнюю сторону сетки из проволок 4, диаметр которых определяет заданную толщину паяного шва, размещают навеску припоя 5, а затем кристалл 6.

Сетка изготовлена из различных материалов. Например, для монтажа кремниевых кристаллов на основание медных кор-

пусов, нижняя сторона сетки представляет собой набор проволок 3 из меди, а верхняя сторона – проволоки 4 из Mo, W или их сплавов. При этом диаметр проволок 4 выбирают из условия получения заданной толщины паяного шва.

Фиксация кристаллов относительно корпусов осуществляется в прецизионных кассетах.

В процессе нагрева до температуры пайки припой заполняет ячейки сетки и канавки основания корпуса с образованием паяного шва 7 одинаковой толщины по всей площади кристалла.

Так как проволоки нижней стороны сетки вставляются в канавки, имеющие форму равнобочных трапеций, то существенно повышаются площадь и прочность паяного шва. Снижение остаточных напряжений в системе кристалл – паяный шов – корпус осуществляется за счет того, что буферный элемент выполнен в виде сетки из металлов с коэффициентами термического расширения идентичными корпусу и кристаллу.

Улучшение теплоотвода от кристалла к корпусу, достигается формированием паяного шва определенной толщины.

Форма канавки в виде равнобочной трапеции с размером в верхней части равном 1,2d, в нижней – 1,0d при глубине 1,0d, где d – диаметр проволоки нижней стороны сетки (рис. 5.8) способствует полному заполнению канавки припоем и обеспечивает равномерность толщины паяного шва по всей площади с кристаллом (рис. 5.8, б)

Глубина канавки, равная 1,0 диаметру проволоки исключает коробление верхней стороны сетки и способствует получению паяного шва заданной толщины.

Ширина канавки в нижней части, равная 1,0 диаметру проволоки нижней стороны сетки обеспечивает центрирование сетки как в процессе сборки, так и при пайке.

Ширина канавки в верхней части равная 1,2 диаметру проволоки нижней стороны сетки способствует смачиванию припоем всей поверхности проволоки и полному заполнению канавок основания корпуса припоем (рис. 5.8, б).

При термоциклировании напряжения сдвига в основном будут максимальными в местах пересечения проволок, что позволит свести к минимуму термические напряжения в кристалле.

Таким образом, использование предлагаемой металлической системы для монтажа полупроводникового кристалла к корпусу обеспечивает следующие преимущества: снижение непропаев в паяном шве; повышение прочности паяного соединения; улучшение теплоотвода от кристалла к корпусу; снижение термических напряжений в системе кристалл – паяный шов – корпус.

5.6. Пайка золота в изделиях микроэлектроники оловянно-индиевыми припоями

Внутренние сборка и монтаж ППИ включают в себя операции по установке, закреплению кристаллов в корпусе и выполнению электрических соединений между контактными площадками кристалла и корпуса. Присоединение выводов осуществляется пайкой, термокомпрессионной или ультразвуковой сваркой, сваркой косвенным импульсным подогревом либо расщепленным электродом.

При монтаже золотой микропроволоки к контактным площадкам подложек наиболее широко применяется односторонняя контактная сварка с расщепленным электродом. В этом случае импульс тока проходит через сварочный инструмент, соединяемую проволоку и контактную площадку. Косвенный импульсный нагрев осуществляется при подаче импульса тока на У-образный сварочный инструмент в момент сварки.

Пайку золотой проволоки к контактным площадкам микросборок чаще всего осуществляют импульсным косвенным нагревом с помощью термокарандаша, при котором импульс тока подается от заряженного конденсатора. Следует отметить, что вопросы формирования надежных контактов с использованием золотой проволоки и низкотемпературных припоев еще полностью не решены. Если удалось, в частности, получить

прочные паяные соединения с помощью индиевых припоев, то нельзя не учитывать то, что процессы старения протекают в этих соединениях с большей скоростью, чем при использовании оловянно-свинцовых припоев. Поэтому при решении применять тот или иной припой необходимо учитывать конструкционные особенности ППИ и условия их эксплуатации. Знание процессов взаимодействия золотой проволоки с различными припоями как при пайке (в жидкой фазе припоев), так и при эксплуатации ППИ (в твердой фазе припоев) в конечном счете определяет качество и надежность контактных соединений.

В данном разделе рассмотрены особенности взаимодействия золота с оловянно-индиевыми припоями. Практический интерес представляют припои с концентрацией олова от 50 до 77 % (вес). Состав эвтектического сплава имеет температуру плавления 120 °С и содержит 50 % In и 50 % Sn (ПОИн50). Доэвтектические сплавы имеют очень узкий интервал кристаллизации и по температурным характеристикам не отличаются от эвтектического. Характеристики оловянно-индиевых припоев приведены в табл. 5.14.

Принципиально возможно получение припоев с любой температурой полного расплавления от 120 до 190 °С.

Табл. 5.14. Химический состав, температура плавления и структура оловянно-индиевых припоев

Марка	Содержание элементов, % (вес.)		Температура, °С		Структура
	Sn	In	в начале плавления	полного расплавления	
ПОИн50	50	50	120	120	Эвтектика (Р + Y)
ПОИн60	60	40	120	150	γ + э(β+γ)
ПОИн70	70	30	120	170	γ + э(β+γ)
ПОИн77	77	23	120	190	γ + э(β+γ)

5.6.1. Исследование растворения золотой проволоки в жидкой фазе припоя ПОИн50

Исследования растворения золота в жидких низкотемпературных припоях проводились в ряде работ. Рассматривались две принципиально различные методики оценки растворения: взвешиванием образцов и с помощью металлографических шлифов.

В первом случае золотую проволоку диаметром 1 мм, предварительно смоченную раствором канифоли, в течение 15 с погружали в расплавленный припой на глубину 20 мм, а затем с такой же скоростью извлекали из ванны. Взвешиванием определяли количество золота, перешедшего в расплав припоя. Эта методика не позволяет определить кинетику растворения, а дает возможность только сравнивать скорости растворения в зависимости от температуры и состава припоя. В другом случае растворение золотой проволоки диаметром 0,5 мм исследовали с помощью металлографических шлифов поперечных сечений. Предварительно проволоку длиной 38 мм погружали в расплав припоя на глубину 25 мм. Шлифы сечений проволоки изготавливались после выдержки образцов в припое в течение 10-120 с с интервалом 10 с.

При оценке растворения не упоминается о предварительном прогреве золотой проволоки до температуры расплава припоя с целью восстановления оксидов на ее поверхности. Учитывая большую скорость растворения золота и то, что исследование проводится при малом времени выдержки в припое, необходимо осуществлять предварительный нагрев образцов до температуры плавления припоя. Это время является соизмеримым с продолжительностью выдержки образца в расплаве припоя, поэтому невыполнение этой операции может привести к неправильной оценке растворения золота.

Следует отметить, что при монтаже внутренних межсоединений в ППИ наиболее широко применяется золотая проволока диаметром около 0,04 мм, а время пайки в зависимости от состава припоя составляет от 1 до 3 с.

Для получения достоверных результатов с учетом вышеизложенных недостатков использовалась установка для исследования растворения микропроволоки в жидких низкотемпературных припоях. На ней отработана методика исследования растворения золотой проволоки, которая позволила приблизить эксперимент к реальным условиям монтажа ППИ. Золотая проволока диаметром 0,04 мм разваривалась на алюминиевую рамку ультразвуковым способом. Выбор алюминия в качестве материала рамки обусловлен его несмачиваемостью низкотемпературными припоями и возможностью разварки по нему золотой проволоки ультразвуковым способом.

Золотая проволока предварительно отжигалась при температуре 250 °С в течение 10 мин для обеспечения качественной разварки на алюминиевую рамку. После разварки образцы обезжиривались в изопропиловом спирте и снова подвергались отжигу при температуре 400 °С в течение 20 мин для снятия внутренних напряжений.

Исследования растворения золотой проволоки в жидкой фазе низкотемпературных припоев проводились с использованием припоя ПОИн50. Объем жидкого припоя составлял 1,5 мм. Для флюсования золотой проволоки и с целью предохранения поверхности жидкого припоя от окисления использовался триэтаноламин, который имеет сравнительно высокую температуру кипения.

Эксперименты по растворению золотой поволоки проводились при различных температурах и времени выдержки образцов в расплаве припоя. На каждом режиме исследовались по три образца. На каждом образце рассматривалось пять сечений по длине золотой проволоки. Таким образом, количество замеров поперечных сечений проволоки на каждом режиме испытаний составляло 15.

Растворение золотой проволоки в припое ПОИн50 анализировалось при температурах расплава 160, 190 и 220 °С. Время контактирования с жидким припоем изменялось от 0,3 до 4 с, что соответствовало режимам пайки золотой проволоки к контактным площадкам ППИ.

Для исследований растворения золотой проволоки в припое рамка с проволокой заливалась эпоксидной смолой, а затем изготовлялся шлиф поперечного сечения проволоки. Под микроскопом при увеличении 1000× проводился анализ формы и размеров золотой проволоки после соответствующих испытаний.

На основании результатов эксперимента построен график растворения золотой проволоки в припое ПОИн50 в зависимости от температуры расплава и времени выдержки в расплаве (рис. 5.9). Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о допустимых температурах и временных интервалах использования данного припоя при пайке золотой проволоки.

Припой ПОИн50 при температурах ниже 160 °С не обладает достаточной смачиваемостью золота. При температуре 160 °С наблюдается незначительное растворение золотой проволоки без образования интерметаллидов по границе спая. При температуре 190 °С происходит частичное растворение проволоки и по границе спая наблюдается образование интерметаллидов. Для получения качественных соединений и повышения производительности пайки припоем ПОИн50 рекомендуется температура пайки более 160 °С с одновременным сокращением времени выдержки в расплаве.

Рис. 5.9. Зависимость растворения золотой проволоки диаметром 0,04 мм от времени выдержки в припое ПОИн50 при различных температурах расплава, °С: 1 – 160; 2 – 190; 3 – 220

5.6.2. Исследование растворения золотой проволоки в твердой фазе припоя ПОИн50

Исследования свойств паяных соединений непосредственно на реальных образцах представляют большую сложность и иногда приводят к противоречивым результатам. Это связано с варьированием режимов и объемов припоя в реальных условиях, что влияет на исходные характеристики соединений в процессе монтажа, а при эксплуатации приборов – на свойства контактов. Поэтому для получения достоверных сведений и уменьшения времени исследований необходимо стремиться к полной идентичности исследуемых паяных соединений.

С этой целью проводились исследования процессов термостарения паяных контактов на печатных платах микросборок с использованием золотой проволоки диаметром 0,04 мм и припоя ПОИн50. С помощью поперечных шлифов анализировалось не только растворение золотой проволоки в твердой фазе, но и рост интерметаллических соединений, прилегающих к проволоке.

Обычно при эксплуатации ППИ их максимально допустимая температура не превышает 125 °С. Поэтому с учетом температуры плавления ПОИн50 термостарение паяных соединений проводили при 100 °С.

Золотая проволока предварительно разваривалась ультразвуковым способом на алюминиевые рамки толщиной 0,5 мм. Затем рамка с проволокой быстро погружалась в алюминиевый тигель с расплавленным припоем. Практически одновременно с этим алюминиевый тигель охлаждался в воде комнатной температуры. Внутренний диаметр тигля составлял 11 мм, а глубина жидкого припоя равнялась 7-8 мм. При этом золотая проволока полностью погружалась в расплавленный припой, т. е. объем припоя можно считать бесконечно большим для проволоки диаметром 0,04 мм. В данном эксперименте исключалось влияние объема припоя на кинетику диффузионных процессов проволоки с припоем.

Во избежание образования на поверхности расплавленного припоя оксидной пленки и для обеспечения хорошего смачивания проволоки на поверхность припоя наносилось небольшое количество триэтаноламина, а припой расплавлялся до температуры пайки. Хорошая теплопроводность алюминия обеспечивала равномерный прогрев припоя в тигле и быстрое его охлаждение в воде.

Застывший припой с золотой проволокой извлекался из тигля, с нижней стороны слитка изготавливались шлифы поперечных сечений. Исходное состояние золотой проволоки после вплавления и каждого цикла термотренировки регистрировалось на микроскопе МИМ-8М. Измерение диаметра золотой проволоки проводилось без подшлифовки металлографического сечения и после дополнительного снятия слоя с продуктами химических реакций.

Экспериментальным путем установлено растворение золотой проволоки диаметром 0,04 мм от времени выдержки в твердой фазе (температура 100 °С) припоя ПОИн50. На поперечных шлифах (рис. 5.10) показан характер растворения золотой проволоки в припое ПОИн50. Полное растворение золотой прово-

локи в припое ПОИн50 при температуре 100 °С произошло через 540 ч.

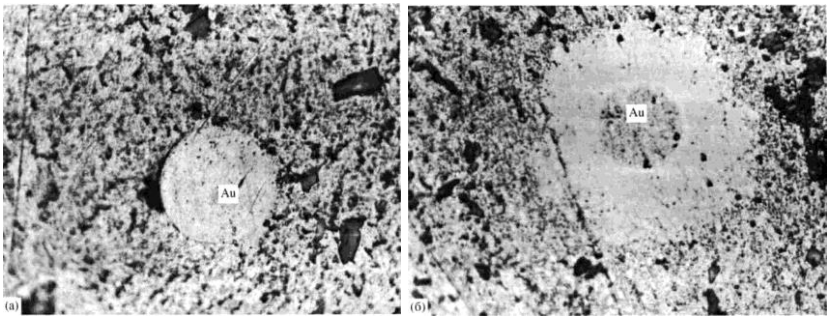


Рис. 5.10. Растворение золотой проволоки (Au) диаметром 0,04 мм в припое ПОИн50: (а) – в начальный момент испытаний; (б) – после выдержки при температуре 100 °С в течение 120 ч. Увеличение 850×.

Термотренировка образцов проводилась в муфельной печи, температура в которой поддерживалась с точностью ±5 °С. Принудительное охлаждение образцов после выгрузки их из печи не применялось. По полученным результатам построен график растворения золотой проволоки в зависимости от времени ее контактирования с припоем ПОИн50 при температуре 100 °С (рис. 5.11).

Рис. 5.11. Растворение золотой проволоки диаметром 0,04 мм в припое ПОИн50 от времени выдержки в твердой фазе при температуре 100 °С

Эти эксперименты можно отнести к методам ускоренных испытаний для выявления поведения золотой проволоки микронных размеров в контакте с припоем. В реальных паяных контактах на начальном этапе старения процессы идут аналогично, но в дальнейшем растворение золота и насыщение им припоя сдерживает диффузионные процессы. Несмотря на эти особенности, экспериментальные данные позволяют судить о кинетике растворения золотой проволоки, росте интерметаллидных прослоек и дают возможность оценить термостойкость реальных паяных соединений.

Одним из основных критериев оценки надежности любых контактов, в том числе и паяных, является изменение их сопротивления при испытаниях или при эксплуатации изделия. С этой целью проводили замеры сопротивления шести контактов после пайки и после выдержки при температуре 100 °С в течение 2500 ч. Как видно из гистограммы (рис. 5.12), сопротивление контактов после пайки находилось в пределах 0,196-0,206 Ом, а после испытаний сопротивление возросло до 0,201-0,23 Ом. Следует отметить, что сопротивления контактов № 1 и № 4 практически не изменились, а у контакта № 3 оно возросло в 1,17 раза. Такой разброс значений сопротивлений связан, по-видимому, с отклонением от оптимальных режимов при формировании паяных контактов.

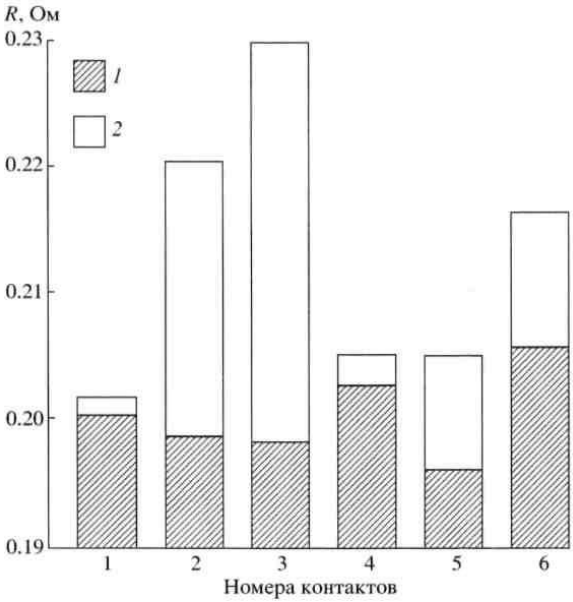


Рис. 5.12. Гистограмма сопротивлений контактов золотой проволоки диаметром 0,04 мм, паянных припоем ПОИн50: 1 – после пайки; 2 – после испытаний в течение 2500 ч при температуре 100 °С.

5.6.3. Взаимодействие припоя ПОИн50 с золотым технологическим покрытием ППИ

В технологии производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) одной из операций сборки является присоединение диэлектрических плат к металлическим основаниям. Из всех способов крепления плат СВЧ и ГИС на металлические основания наиболее широко применяется пайка, так как она обеспечивает качественное интерметаллическое соединение, а главное – электрический контакт, который с увеличением площади спая повышает надежность механического контакта и улучшает электрические характеристики изделий. На поверхности плат под пайку наносят золотое технологическое покрытие толщиной около 3 мкм (в качестве подслоя золота использовалась напыленная и гальваническая медь общей толщиной около 8 мкм).

Для получения надежных паяных соединений с использованием низкотемпературных припоев необходимо учитывать активное взаимодействие золотого покрытия с припоями. В результате этих процессов уменьшается прочность шва и нарушается его сплошность. Поскольку поверхность платы покрыта пленкой золота, то проводились исследования взаимодействия припоя ПОИн50 с золотым покрытием.

Для исследования взаимодействия оловянно-индиевых припоев с золотым покрытием в качестве материала плат использовали поликор и ситалл. Схема сборки образцов для исследований показана на рис. 5.13.

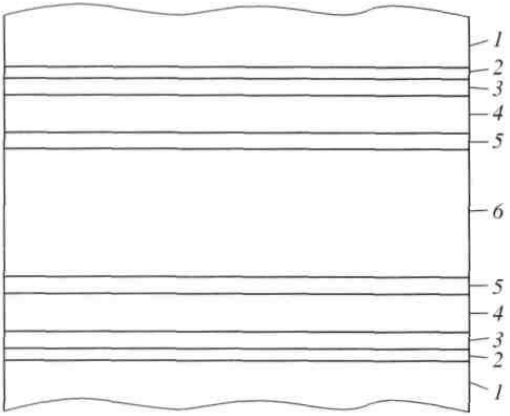


Рис. 5.13. Схема сборки образцов для исследования взаимодействия припоя с золотым покрытием плат: 1 – плата; 2 – Cr (600 Å); 3 – медь вакуумная (толщина пленки 1-2 мкм); 4 – медь гальваническая (6 мкм); 5 – пленка золота (3 мкм); 6 – припой ПОИн50

Поскольку поверхность платы покрыта пленкой золота, то проводились исследования взаимодействия припоя ПОИн50 с золотым покрытием. На рис. 5.14 показана форма растекания припоя по золотому гальваническому покрытию платы. Исследования формы и площади растекания припоя показали, что смачивание припоем ПОИн50 золотого покрытия хорошее.

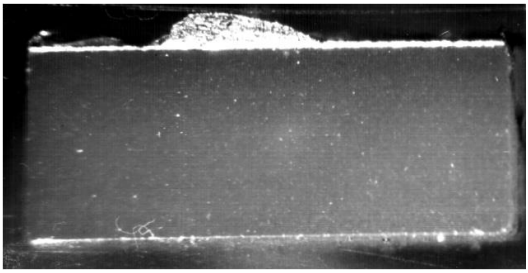
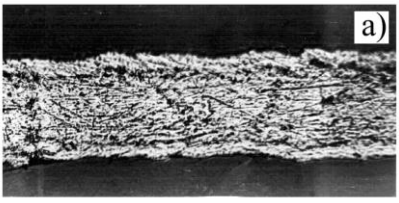


Рис. 5.14. Растекание припоя ПОИн50 по золотому гальваническому покрытию платы. Увеличение 24×

Микроструктура поперечного сечения позолоченной ситалловой платы, паянной припоем ПОИн50, показана на рис. 5.15. Микроструктурный анализ проводился после пайки образцов, а также после испытания при температуре от –60 до +100 °С после 100 термоциклов. Исследования показали, что после пайки образцов в некоторых случаях наблюдаются продольные поры между золотым покрытием и припоем. После испытаний образцов на термоциклирование золотая пленка частично сохраняется в паяном шве. Следует отметить, что в шве имеются поры как одиночные, так и в виде цепочки, однако структура паяного шва обладает достаточной плотностью.



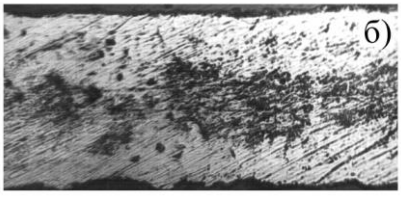


Рис. 5.15. Микроструктура паяного соединения золотого покрытия припоем ПОИн50: а – после пайки (увеличение

500×); б – после 100 термоциклов при температуре от –60 до +100 °С (850×)

При монтаже, а особенно при эксплуатации РЭА, платы с навесными компонентами в некоторых случаях приходится перепаивать. В процессе перепайки золотое покрытие растворяется в расплавленном припое. При оценке надежности РЭА необходимо учитывать растворение золотого покрытия в припое при различных режимах пайки. С этой целью проведены исследования по влиянию многоразовой перепайки на растворение золотого покрытия плат из поликора толщиной 0,5 мм. Толщина пленки золота составляла 3 мкм.

Продолжительность одноразовой пайки находилась в пределах 3 с. Температура пайки с использованием припоя ПОИн50 поддерживалась в пределах 160±10 °С. Число перепаек составляло от одной до шести, что соответствовало суммарной продолжительности воздействия расплавленного припоя на золотое покрытие от 3 до 18 с. Микроструктурный анализ процессов взаимодействия золотого покрытия с припоем после каждой перепайки проводился по металлографическим поперечным шлифам на микроскопе МИМ-8М.

Эксперименты с припоем ПОИн50 показали, что ярко выраженных структурных изменений от увеличения числа перепаек не наблюдается. После шести перепаек сплошной интерметаллической прослойки, прилегающей к нерастворенному золотому покрытию, не обнаружено. Изменение толщины золотого покрытия от числа перепаек припоем ПОИн50 приведены в табл. 5.15.

Табл. 5.15. Влияние количества паек припоем ПОИн50 на толщину золотого покрытия

Число паек	Толщина меди, мкм	Толщина золотого покрытия, мкм
1	8,0	3,0
2	7,6	4,0
3	9,0	3,6
4	8,0	3,6
5	8,0	3,0
6	8,0	2,0

Незначительный разброс значений толщин меди и золотого покрытия связан, по-видимому, с погрешностями при измерении или с отклонениями в толщинах исходных покрытий.

Таким образом, золотое технологическое покрытие частично сохраняется после шести перепаек при использовании припоя ПОИн50.

Проведенные исследования растворения золота в контакте с припоем ПОИн50 показали, что этот припой в меньшей степени растворяет золото, чем припои, содержащие свинец. Из литературных данных известно, что золото с такими металлами, как олово и индий обладает ограниченной растворимостью. При взаимодействии золота с индием образуются следующие соединения: $AuIn_2$, AuIn, Au_7In_3, Au_3In и Au_4In. Предельная растворимость индия в золоте в твердом состоянии составляет 9 % (ат.).

Максимальная растворимость олова в золоте составляет 6,8 % (ат.) при температуре (498±10) °С. Система Au-Sn имеет следующие соединения: AuSn, $AuSn_2$, $AuSn_4$, $Au_{10}Sn$ и $Au_{83}Sn_{17}$.

Сплавы Au-In и Au-Sn используют для низкотемпературной пайки ППИ. Следует отметить, что при пайке ППИ припоями на основе олова и индия в паяном шве возникают значительные механические напряжения. Это обусловлено тем, что тепловое расширение обычного белого олова и индия, имеющих тетрагональную кристаллическую структуру, крайне анизотропно: ТКЛР вдоль главной оси кристалла больше ТКЛР в направлении, перпендикулярном главной оси. Это приводит к тому, что при изменении температуры на несколько десятков градусов

напряжения вызывают пластическую деформацию припоя независимо от контактируемых материалов, имеющих другой ТКЛР.

Анализ микроструктуры паяных соединений золотого покрытия припоем ПОИн50 показал, что пластические деформации наиболее интенсивны в центре паяного шва (рис. 5.15, б). Поэтому при определенных условиях эксплуатации ППИ, паянных припоем ПОИн50, возможно появление в паяном шве не только цепочки пор, но и продольных трещин. Это обстоятельство нужно иметь в виду конструктору и технологу при изготовлении ППИ с использованием при сборке и монтаже оловянно-индиевых припоев.

Глава 6. Проволочный монтаж в производстве ППИ

Кристалл ППИ может выполнять свои функции только после присоединения к его активным областям металлических проводников – выводов, которые служат для подключения к корпусам, выводным рамкам, а затем – к внешним электрическим цепям.

Соединения в полупроводниковых приборах и ИС должны удовлетворять следующим требованиям: прочность соединения должна быть близка к прочности соединяемых элементов микросхем; соединение должно иметь минимальное омическое сопротивление; основные параметры процесса соединения (температура нагрева, удельное давление и длительность выдержки) должно быть минимально возможными, с тем чтобы не повреждались элементы схемы; выполнять соединение материалов разнообразных сочетаний и типоразмеров; после соединения не должно оставаться материалов, вызывающих коррозию; качество соединений должно контролироваться простыми и надежными методами.

Методы присоединения электродных выводов разделяют на проволочные и беспроволочные. Для проволочного монтажа применяется проволока различного диаметра (0,005-0,15 мм) из алюминия, золота и меди. Беспроволочный монтаж осуществляется подсоединением кристаллов с жесткими выводами и компонентов с объемными выводами, сборкой на рамке, ленте или гибком носителе.

Разработка новых типов ИС, особенно БИС и СБИС, ориентирована на использование автоматического сборочного оборудования с электронными сканирующими устройствами и системами оптико-телевизионного контроля. Уже используются в производстве автоматы производительностью до 10-15 тысяч соединений в час и выше.

Автоматизация процессов монтажа микросоединений, являясь одной из сложнейших инженерных задач, по-прежнему выдвигает повышенные требования к микропроволоке, покры-

тиям контактных площадок кристаллов и траверс корпусов и микросварочному инструменту.

Для изготовления высоконадежной радиоэлектронной аппаратуры специалисты ведущих стран мира проводят постоянный поиск конструктивных и технологических решений, направленных не только на повышение надежности выпускаемых изделий микроэлектроники, но также на снижение себестоимости, особенно в производстве приборов широкого применения.

В производстве ППИ и специальных микроприборов широко используется метод проволочного присоединения, при котором в качестве выводов служат гибкие металлические проводники из Al, Au, Cu и Pt. Проволочное присоединение обеспечивает высокую надежность микросоединений, легкость контроля и возможность автоматизации технологического процесса сборки.

Одним из направлений монтажа проволочных выводов является использование в качестве источника нагрева лазера, обладающего рядом преимуществ: возможностью получения надежных и стабильных по свойствам микросоединений, локальностью нагрева, дозированным регулированием подводимого тепла и др. Этим методом медные выводы ИС диаметром 0,07 мм можно припаивать к контактным площадкам печатных плат. Припой состава (%): 15Ag/2,5-3,5P/81,5-82,5Cu размещали на проволоке. Введение в состав припоя P позволило проводить пайку без флюса. Для уменьшения отражательной способности меди соединяемые элементы покрывали химическим Ni толщиной 1,5 мкм.

Соединение гибких электрических проводов пайкой возможно способом, при котором на паяемые участки помещают припои и флюс. Сборка производится в приспособлениях, выполненных из материалов, способных пропускать луч лазера. Нагрев при пайке производят расфокусированным лучом, который после расплавления припоя и последующей его кристаллизации образует прочные паяные соединения.

Рассмотрено влияние давления, мощности, времени сварки и шероховатости поверхности на прочность микросоединений при УЗС. Теоретические расчеты и экспериментальные исследования показали, что прочность микросоединений, в основном, зависит от времени сварки.

Качество проволочных соединений во время процесса сварки контролируют следующим способом. Выводы носителя во время процесса сварки соединены с тестером. После проведения первой сварки замеряют сопротивление между местом сварки и шиной на носителе. После следующей сварки осуществляют контроль места сварки и каждого предыдущего проволочного мостика. Контроль проводится с переменной полярностью, чтобы определить нелинейность контакта. Данным методом можно проверять все присоединительные перемычки без конечного контроля всего прибора. Обнаруженные дефекты устраняются во время процесса сварки.

Для ТКС проволочных выводов ППИ с высокой степенью интеграции, где расстояние между выводами не превышает 0,2 мм, разработан способ, который предусматривает покрытие металлической проволоки диаметром 0,015-0,02 мм диэлектрической пленкой толщиной 1-10 мкм. Это предотвращает возникновение короткого замыкания в случае контакта двух выводов. В качестве материала пленки используется смола, которая устойчива при T<200 °C, а в процессе ТКС пленка на концах проволоки разлагается, обеспечивая надежное соединение с контактной площадкой.

Для уменьшения шага расположения контактных площадок разработана установка сборки, снабженная керамическим капилляром – инструментом, рабочая часть которого имеет форму удлиненного овала с двумя параллельными гранями.

Уменьшение термомеханических напряжений в сварных соединениях, выполненных микропроволокой внахлест с контактными площадками выводной рамки, при термоциклировании от минус 65 до 150 °C достигается за счет формы контактных площадок, которые имеют наклон в 5-20 °. Скос контактных площадок осуществляется в процессе штамповки выводной

рамки. Утверждается, что термомеханические напряжения по сравнению с плоской контактной площадкой выводной рамки уменьшаются после термоциклирования на 50 %.

6.1. Способы присоединения проволочных выводов

Наиболее широкое применение при монтаже проволочных выводов в полупроводниковых приборах и ИС нашли следующие методы монтажа: ультразвуковая сварка (УЗС), сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН), ультразвуковая сварка с косвенным импульсным нагревом (УЗСКИН), односторонняя контактная сварка, термокомпрессионная сварка и пайка. Внешний вид микросоединений, выполненных различными методами сварки, представлен на рис. 6.1.

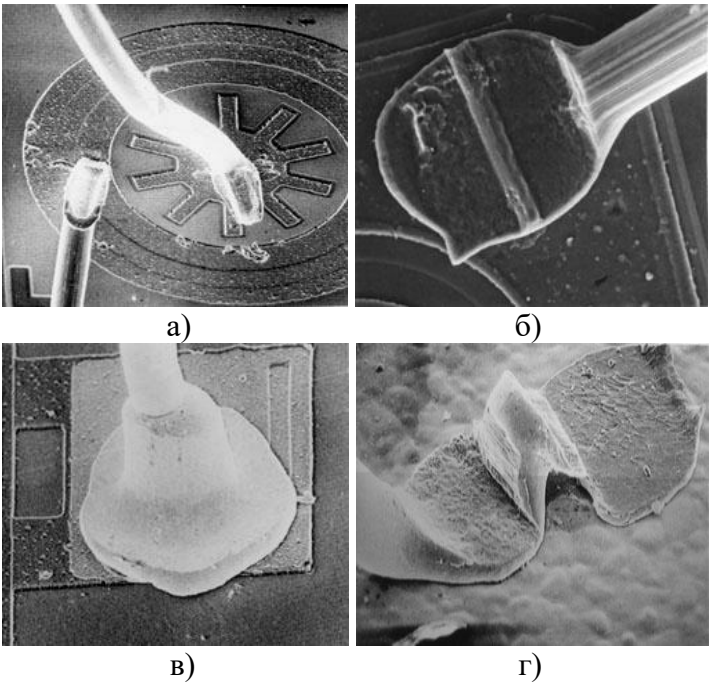


Рис. 6.1. Внешний вид соединений, выполненных различными методами микросварки: а – ультразвуком; б – термокомпрессией внахлестку; в – термо-

компрессией с образованием шарика; г – расщепленным электродом. Увеличение 150× (а) и 350× (б, в, г)

6.1.1. Термокомпрессионная микросварка

Этот метод сварки давлением с подогревом используется для соединения в твердом состоянии металлов с металлами и полупроводниками при относительно невысоких удельных давлениях.

При термокомпрессионной микросварке один из соединяемых материалов (обычно вывод) должен обладать достаточно высокой пластичностью. Металлы при этом способе монтажа нагреваются до температуры начала рекристаллизации (отжига) или несколько выше, но на 20 ºС ниже самой низкой температуры эвтектики системы.

При термокомпрессионной микросварке все материалы можно разделить на три группы:

1. Металлы с хорошей взаимной диффузией в твердом состоянии (Ag-Au, Au-Cu); они образуют ряд твердых растворов и обладают наилучшей свариваемостью.

2. Материалы, образующие между собой низкотемпературные эвтектики (Al-Si, Au-Si); они обладают удовлетворительной свариваемостью.

3. Металлы, взаимная диффузия которых приводит к образованию интерметаллических соединений и эвтектик (Au-Al, Au-Sn); при тщательном соблюдении технологии сборки они обеспечивают необходимое качество соединений.

На эффективность и качество микросварных соединений при термокомпрессионной сварке влияют оксидные пленки, находящиеся на поверхности контактных площадок кристаллов.

Основными режимами термокомпрессии являются:

- усилие сжатия соединяемых элементов;
- температура нагрева соединения;
- длительность выдержки под давлением.

Давление при сварке определяется допустимой деформацией проводника и допустимым механическим воздействием на ППИ (кристалл). Подвод тепла в зону сварки определяется

Подвод тепла в зону сварки определяется конструктивными особенностями прибора, подвергаемого сборке, и может осуществляться общим нагревом прибора, нагревом рабочего инструмента и одновременным нагревом рабочего инструмента и прибора (рис. 6.2). Время сварки (длительность выдержки под давлением) устанавливается зависимости от соединяемых материалов и определяется экспериментальным путем, исходя из получения заданной прочности соединений.

Все разновидности термокомпрессии классифицируют по трем признакам:

• по способу нагрева (рис. 6.2);

• по способу соединения (рис. 6.3, 6.4);

• по типу образующегося соединения, обусловленного формой инструмента (рис. 6.5).

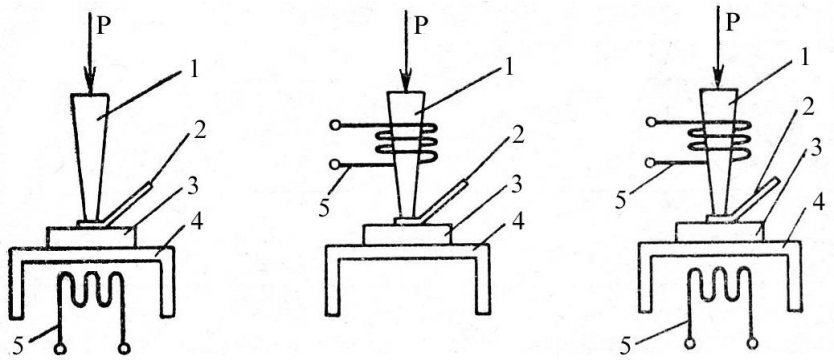


Рис. 6.2. Разновидности термокомпрессии в зависимости от способа нагрева: а – нагрев только рабочего столика; б – нагрев рабочего инструмента; в – одновременный нагрев рабочего столика и инструмента; 1 – рабочий инструмент (пуансон); 2 – присоединяемый проводник; 3 – подложка или кристалл ППИ; 4 – рабочий столик; 5 – спираль для нагрева

По способу выполнения соединений различают сварку внахлест (рис. 6.3) и встык (рис. 6.4, 6.5). При сварке внахлест

проволочный вывод накладывают на металлизированную контактную площадку (при этом ось вывода располагают параллельно плоскости контактной площадки).

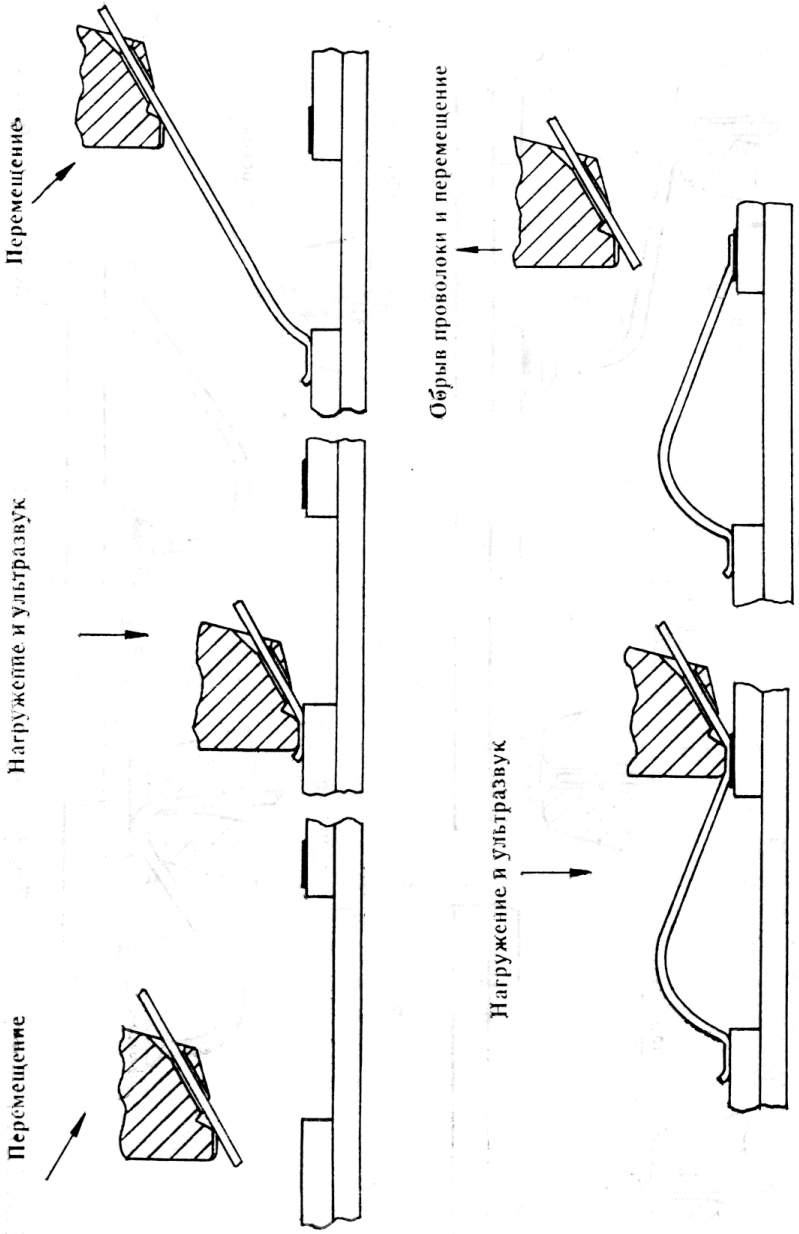


Рис. 6.3. Последовательность формирования проволочной перемычки при сварке внахлест

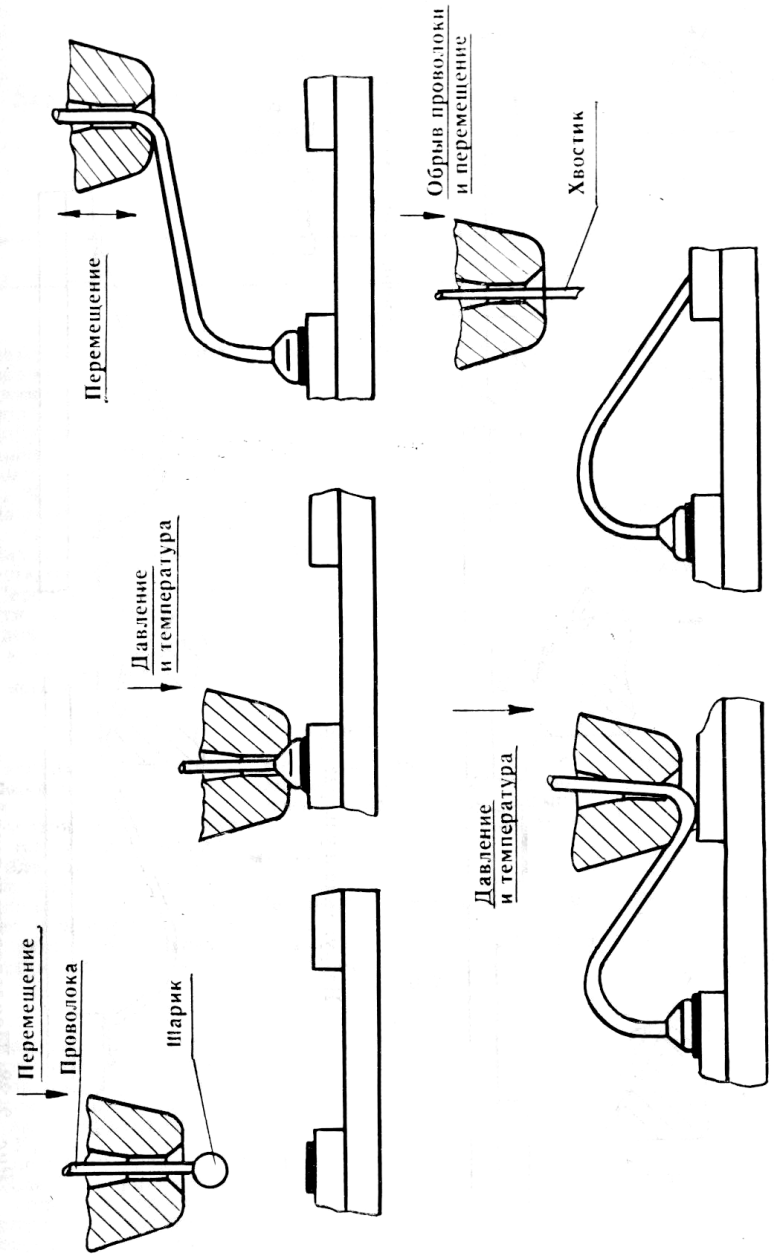


Рис. 6.4. Последовательность формирования проволочной перемычки при первой сварке встык

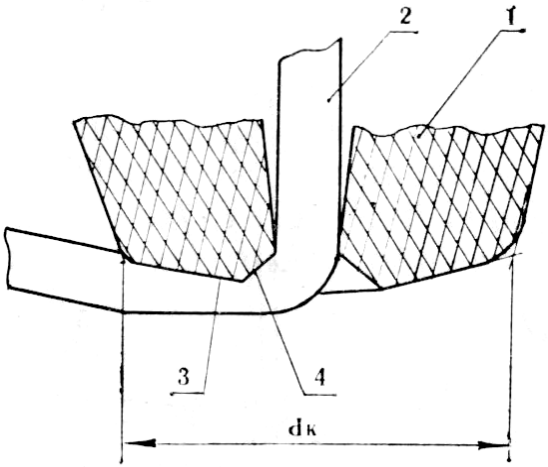
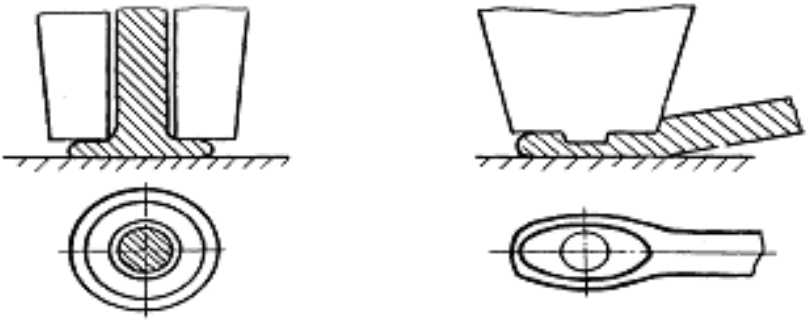


Рис. 6.5. Второе присоединение при монтаже проволочной перемычки: 1 – капилляр; 2 – проволока; 3 – рабочая поверхность; 4 – внутренняя фаска ($d_к$ – диаметр торца капилляра)

При сварке встык конец проволочного вывода (ось вывода перпендикулярна плоскости контактной площадки) предварительно оплавляют, образуя шарик с диаметром, равным удвоенному диаметру привариваемой проволоки. Прочность сварных соединений, выполненных встык, значительно выше прочности соединений внахлестку и равна, при оптимальных параметрах режима процесса сварки, прочности привариваемого проводника. Это объясняется отсутствием концентраторов напряжений и надрывов, вызываемых деформацией присоединяемой проволоки при сварке.

Тип образующегося микросварного соединения зависит от формы инструмента (рис. 6.6). Наиболее высокой прочностью обладают соединения, выполненные по схеме (рис. 6.6, а). Размер торца рабочего инструмента должен быть не менее двух диаметров привариваемой проволоки.



а) б)

Рис. 6.6. Основные виды термокомпрессионых соединений: а – соединение встык (термокомпрессия капилляром с образованием шарика); б – сварка внахлестку инструментом с канавкой на торце

Метод соединения термокомпрессией в настоящее время является наиболее распространенным при монтаже ППИ, полученных методом планарной технологии, и монтаже твердых схем в разнообразных корпусах гибкими проволочными проводниками.

6.1.2. Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН)

Этот метод является разновидностью способа сварки давлением с подогревом. Метод СКИН осуществляется V-образным инструментом (пуансоном), импульсно нагреваемым проходящим по нему током (рис. 6.7). Способ применяется при монтаже гибридных ИС, которые не допускают общего разогрева. Вследствие кратковременности процесса нагрева металлический проводник в месте контакта может нагреваться до более высоких температур, чем при термокомпрессии. Этим методом приваривают золотые, алюминиевые и медные проводники диаметром 0,02-0,1 мм с разнообразными пленками, напыленными на диэлектрические или полупроводниковые подложки.

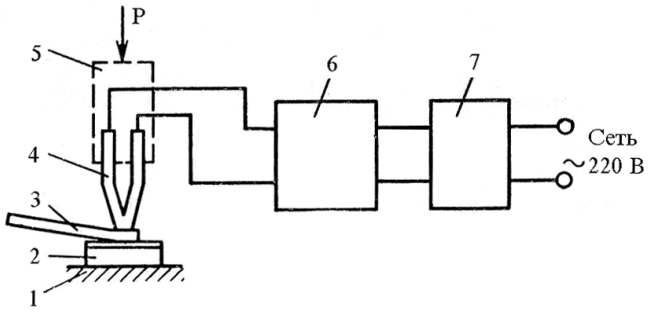


Рис. 6.7. Схема сварки давлением с косвенным импульсным нагревом V-образным инструментом: 1 – рабочий столик; 2 – подложка; 3 – проводник; 4 – инструмент; 5 – сварочная головка для создания давлением; 6 – источник питания; 7 – реле времени

6.1.3. Ультразвуковая микросварка

При этом методе соединение металлов в твердом состоянии осуществляется за счет возбуждения в свариваемых деталях упругих колебаний ультразвуковой частоты при одновременном создании определенного давления. В микроэлектронике УЗС используется при изготовлении транзисторов, ИС, гибридных ИС и др. изделий микроэлектроники.

Основными параметрами процесса при этом методе микросварки являются амплитуда колебаний рабочего торца инструмента, которая зависит от электрической мощности преобразователя и конструктивного исполнения колебательной системы; усилие сжатия свариваемых элементов; длительность включения ультразвуковых колебаний (время сварки).

Сущность метода ультразвуковой сварки заключается в возникновении трения на поверхности раздела между соединяемыми телами, в результате чего происходит разрушение оксидных и адсорбированных пленок, образование физического контакта и развитие очагов схватывания между соединяемыми деталями.

Для ультразвуковой микросварки применяют две колебательные системы (рис. 6.8). Температура нагрева деталей непосредственно в зоне контакта обычно не превышает 0,3-0,5 от температуры плавления соединяемых материалов.

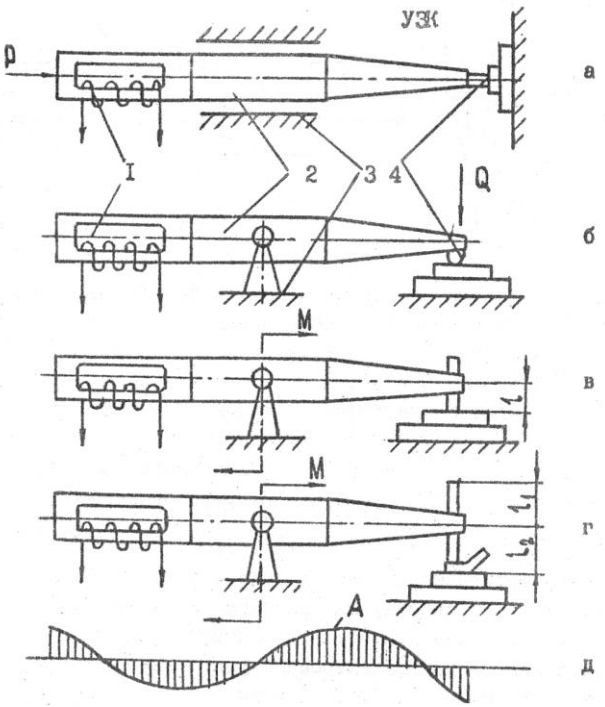


Рис. 6.8. Ультразвуковые колебательные системы для микросварки: 1 – преобразователь; 2 – волновод-концентратор; 3 – акустическая развязка; 4 – сварочный инструмент. А – амплитуда колебаний; Р – усилие сжатия; М – момент силы

6.1.3.1. Расчет концентраторов для установок ультразвуковой микросварки

При монтаже проволочных выводов в СПП для силовой электроники в основном применяется УЗС. Основными параметрами процесса при этом методе микросварки являются: амплитуда колебаний рабочего торца инструмента, которая зависит от электрической мощности преобразователя и конструк-

тивного исполнения колебательной системы; усилие сжатия свариваемых элементов; длительность включения ультразвуковых колебаний (время сварки).

Сущность метода УЗС заключается в возникновении трения на поверхности раздела соединяемыми элементами, в результате чего происходит разрушение оксидных и адсорбированных пленок, образование физического контакта и развитие очагов схватывания между соединяемыми деталями.

Ультразвуковой концентратор является одним из основных элементов колебательных систем микросварочных установок. Концентраторы выполняются в виде стержневых систем с плавно меняющимся сечением, т. к. площадь излучения преобразователя всегда значительно больше площади сварного соединения. Большим, входным, сечением концентратор присоединяется к преобразователю, а к меньшему, выходному, сечению крепится ультразвуковой инструмент. Назначение концентратора – это передача ультразвуковых колебаний от преобразователя в ультразвуковой инструмент с наименьшими потерями и наибольшей эффективностью.

В ультразвуковой технике известно большое количество типов концентраторов. Наибольшее распространение получили следующие: ступенчатый, экспоненциальный, конический, катеноидальный и концентратор типа «цилиндр-катеноида». В колебательных системах установок часто используются конические концентраторы. Это объясняется тем, что они просты в расчете и изготовлении. Однако из пяти вышеперечисленных концентраторов конический обладает наибольшими потерями из-за внутреннего трения, рассеивает наибольшую мощность, а следовательно, больше нагревается. Наилучшей устойчивостью обладают концентраторы с наименьшим значением отношения входного и выходного диаметров для одинакового коэффициента усиления K_y. Желательно также, чтобы "полуволновая" длина его была наименьшей. Для целей микросварки обычно применяют концентраторы с $2<K_y<10$. В этом диапазоне коэффициентов усиления и с учетом вышеизложенных соображений рекомендуются концентраторы типа «цилиндр-катеноида».

Материал концентратора должен обладать высокой усталостной прочностью, малыми потерями, хорошо паяться твердыми припоями, легко обрабатываться и быть сравнительно недорогим.

Расчет ультразвукового концентратора сводится к определению его длины, входных и выходных сечений, формы профиля его боковых поверхностей. При расчете вводят следующие допущения: а) вдоль концентратора распространяется плоская волна; б) колебания носят гармонический характер; в) концентратор колеблется только вдоль осевой линии; г) механические потери в концентраторе невелики и линейно зависят от амплитуды колебаний (деформации).

Теоретический коэффициент усиления K_y амплитуды колебаний экспоненциального концентратора определяется из выражения

$$K_y = \frac{D_0}{D_1} = N, \qquad (1)$$

где D_0 и D_1 – соответственно диаметры входного и выходного сечений концентратора, мм; N – отношение диаметра входного сечения концентратора к выходному.

Длина l концентратора рассчитывается по формуле

$$l = \frac{\tilde{n}}{2f}\sqrt{1+\left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}, \qquad (2)$$

где c – скорость распространения ультразвуковых колебаний в материале концентратора, мм/с; f – рабочая частота, Гц.

Положение узловой плоскости x_0 (места крепления волновода) выражается соотношением

$$\tilde{o}_0 = \frac{l}{\pi} arctg\left(\frac{1}{\pi}\ln N\right). \qquad (3)$$

Форма образующей профиля катеноидальной части концентратора рассчитывается по уравнению

$$D_x = D_0 \cdot e^{-\beta x}, \qquad (4)$$

где $\beta = \frac{\ln \hat{E}_{\acute{o}}}{l}$ – коэффициент формы образующей; x – текущая координата по длине концентратора, мм.

В данной работе разработана компьютерная программа для расчета параметров пяти типов ультразвуковых концентраторов: экспоненциального, ступенчатого, конического, катеноидального и концентратора «цилиндр-катеноида», реализованная на языке Паскаль (компилятор Turbo-Pascal-8.0). Исходными данными для расчетов являются: диаметры входного и выходного сечений (D_0 и D_1), рабочая частота (f) и скорость распространения ультразвуковых колебаний в материале концентратора (с). Программа позволяет рассчитать длину, положение узловой плоскости, коэффициент усиления, а также для экспоненциального, катеноидального и концентратора «цилиндр-катеноида» форму образующей с заданным шагом. Структурная схема алгоритма для расчета экспоненциального концентратора представлена на рис. 6.9.

Пример расчета. Рассчитать параметры полуволнового экспоненциального концентратора, если заданы рабочая частота f = 66 кГц; диаметр входного сечения D_0 = 18 мм, выходного D_1=6 мм; материал концентратора – сталь 30ХГСА (скорость ультразвука в материале $c = 5{,}2 \cdot 10^6$ мм/с).

По формуле (1) определяем коэффициент усиления концентратора $K_y = 18/6 = 3$.

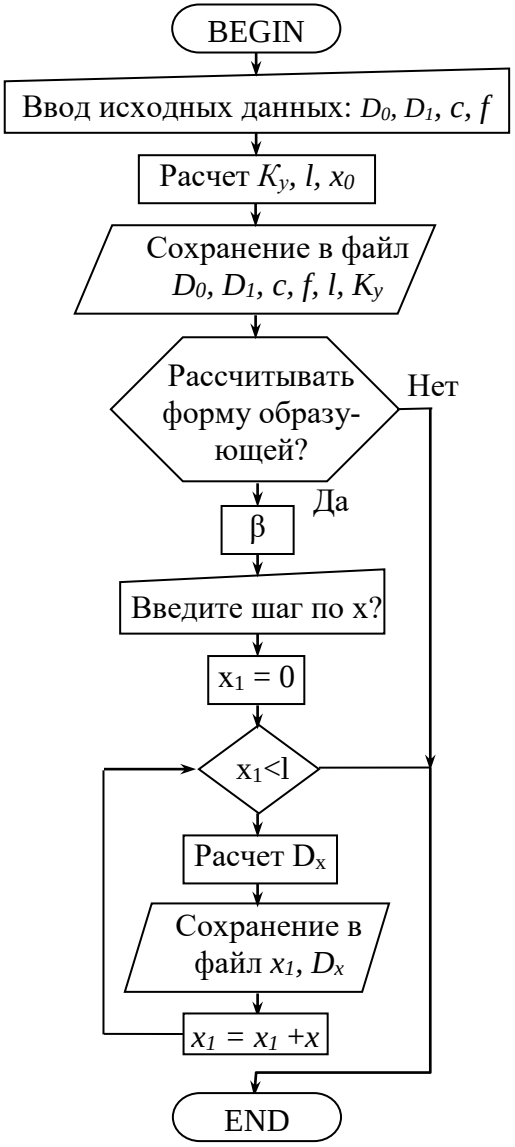


Рис. 6.9. Структурная схема алгоритма расчета экспоненциального концентратора

В соответствии с выражениями (2) и (3) длина концентратора $l = \frac{5{,}2 \cdot 10^6}{2 \cdot 66 \cdot 10^3}\sqrt{1+\left(\frac{\ln 3}{3{,}14}\right)^2} = 41{,}733$ ìì , положение узловой плоскости $\tilde{o}_0 = \frac{41{,}733}{3{,}14} arctg\left(\frac{1}{3{,}14}\ln N\right) = 4{,}469$ мм.

Уравнение (4) для расчета формы профиля концентратора приобретает после подстановок следующий вид:

$$D_x = 18 \cdot \mathring{a}^{-0{,}026\delta}.$$

Расчеты с помощью компьютерной программы профиля образующей экспоненциального концентратора с шагом по параметру *x*, равным 5 мм, приведены в табл. 6.1. По данным табл. 6.1 конструируется профиль концентратора.

Табл. 6.1. Данные расчета профиля концентратора

x, мм	0	5	10	15	20	25	30	35	40	42
D_x, мм	18	15,7	13,8	12	10,6	9,3	8,2	7,2	6,3	6

В табл. 6.2 приведены результаты расчетов параметров различных типов ультразвуковых концентраторов из стали 30ХГСА (при D_0 = 18 мм; D_1 = 6 мм; f = 66 кГц).

Табл. 6.2. Параметры УЗ концентраторов

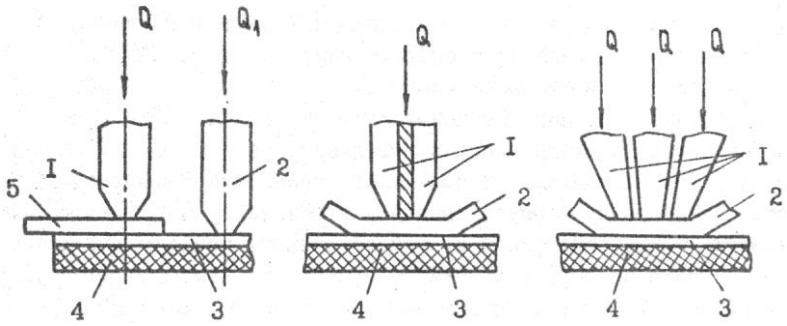
Тип концентратора	l_1, мм	l_2, мм	l, мм	K_y
Экспоненциальный	–	–	41,733	3,000
Ступенчатый	–	–	39,394	9,000
Конический	–	–	65,783	5,341
Цилиндр-катеноида*	9,848	33,425	43,274	5,102
Катеноидальный	–	–	69,398	5,897

*l_1 и l_2 – соответственно длина цилиндрической и катеноидальной части концентратора.

6.1.4. Односторонняя контактная сварка

Метод применяется для соединения весьма тонких проводников (плоских и круглых) с относительно толстым материалом и для сварки проводников с электроосажденными пленками толщиной более 0,02 мм. Особенностью односторонней контактной сварки является расположение электродов, обеспечивающих подвод тока и сжатие свариваемых деталей (рис. 6.10).

Таким образом приваривают проводники диаметром от 0,02 до 0,25 мм к разнообразным тонким пленкам. При односторонней сварке сдвоенным или строенным электродом электроды устанавливают на верхнюю привариваемую деталь (проволоку, ленту) и прижимают к нижней детали. При пропускании электрического тока происходит, в основном, разогрев верхней детали, а сварка может произойти как под электродами, так и в зазоре. В зависимости от размеров свариваемых проводников и требований, предъявляемых к соединениям, зазор между электродами может составлять от 0,01 до 1,0 мм.



а) б) в)

Рис. 6.10. Схемы односторонней контактной сварки: а – односторонняя точечная сварка: 1 – электрод для сжатия свариваемых деталей и подвода тока к проволоке; 2 – электрод для подвода тока к шине печатной платы; 3 – контактная площадка или шина печатной платы; 4 – диэлектрическое основание печатной платы; 5 – привариваемая проволока или лента; б и в – односторонняя сварка соответственно сдвоенным электродом (с параллельными зазорами) и строенным электродом трехфазным (1 – электроды; 2 – привариваемый проводник; 3 – тонкая металлическая пленка; 4 – диэлектрическая подложка)

6.1.5. Пайка электродных выводов

Пайкой присоединяют электродные выводы СПП – транзисторов, выпрямителей, туннельных и СВЧ диодов, а также модулей. Пайку выполняют низкотемпературными припоями на основе олова, свинца и индия в печах непрерывного или периодического действия в атмосфере защитного газа или на воздухе. Пайку можно производить нагревом (прямым и косвенным) электрическим током или паяльником (электрическим, газовым). Перед пайкой детали необходимо тщательно очищать.

В производстве находит применение кассетная сборка мощных транзисторов в защитной восстановительной среде (рис. 6.11). Применение прецизионных кассет позволяет совместить операции пайки кристаллов на ножку корпуса, выводов к кристаллу и траверсам, ликвидировать применение флюса и, следовательно, последующей его отмывки, а также исключить влияние оператора на качество изготовления приборов. Кассета должна обеспечить точную ориентацию кристалла относительно ножки прибора, выводов относительно контактных площадок и исключить их смещение в процессе пайки. Усилие прижатия выводов к кристаллу и траверсам, а также к ножке должно быть достаточным для получения надежного соединения.

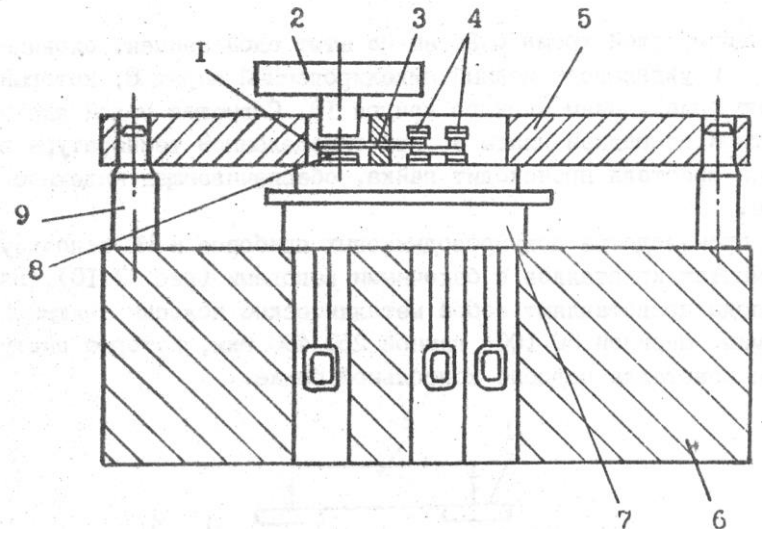


Рис. 6.11. Схема сборки транзисторов в прецизионной кассете: 1 – кристалл; 2 – грузик; 3 – паз для ориентации вывода; 4 – навеска из припоя; 5 – трафарет; 6 – корпус кассеты; 7 – ножка транзистора; 8 – прокладка из припоя; 9 – направляющие

6.1.5.1. Оборудование для присоединения проволочных выводов

ЭМ-4210 – установка присоединения проволочных выводов мощных приборов

Назначение:

• ручное присоединение алюминиевых выводов увеличенного диаметра к контактным площадкам ГИС методом ультразвуковой сварки.

Особенности:

• автоматическая обрезка выводов с помощью ножа.

Основные технические характеристики

Производительность	2000 сварок/час
Диаметр присоединяемых выводов	0,125-0,5 мм

Рабочее поле	65×65 мм
Потребляемая мощность	1 кВт
Габаритные размеры	750×720×530 мм
Масса	55 кг

ЭМ-4260 – автомат присоединения проволочных выводов

Назначение:

• автоматическое присоединение проволочных выводов из золота к контактным площадкам и выводам корпусов ИС методом термозвуковой сварки.

Особенности:

• линейный шаговый привод с обратной связью по координатам X, Y;

• привод типа «звуковая катушка» (voice coil motor) с обратной связью по координате Z;

• система автоматического контроля качества сварки;

• встроенная программно-управляемая библиотека петель;

• магазинная подача обрабатываемых рамок с программируемой переналадкой.

Основные технические характеристики

Длина присоединяемой перемычки	до 7 мм
Время выполнения одной перемычки, не более	0,125 с
Диаметр присоединяемых выводов	20-50 мкм
Размер рабочего поля	30×45 мм
Максимальное количество присоединяемых выводов	не ограничено
Погрешность присоединения выводов	± 5 мкм
Время переналадки на другой тип изделия	5-10 мин
Потребляемая мощность	0,9 кВт
Габаритные размеры	890×700×1960 мм
Масса	370 кг

ЭМ-4260Т1 – автомат присоединения золотых проволочных выводов приборов на непрерывной ленте

Автомат ЭМ-4260Т является модификацией автомата ЭМ-4260, сохраняя его основные конструктивные особенности и характеристики.

Назначение:

• автоматическое присоединение методом термозвуковой или термокомпрессионной сварки выводов из золота при сборке транзисторов в корпусах типа SOT-23, SOT-223, SOT-323, электронных карт и других изделий, расположенных на ленточном носителе шириной от 16 до 70 мм.

Особенности:

• подача изделий в зону сварки загрузочным устройством с катушки на катушку;

• автоматическое программирование загрузочного устройства с учетом ширины и шага ленточного носителя.

Основные технические характеристики

Производительность при разварке приборов SOT-23, двухрядных	12000 приборов/час
Размер рабочего поля (X-Y)	50×42 мм
Габаритные размеры	1400×700×1960 мм

ЭМ-4480 – автомат присоединения проволочных выводов

Назначение:

• автоматическое присоединение алюминиевых проволочных выводов изделий, требующих большого поля и повышенной точности монтажа, в том числе многокристальных и многоуровневых ГИС, методом ультразвуковой сварки внахлестку.

Особенности:

• высокая динамика формообразования выводов и снижение влияния механических вибраций на инструмент за счет размещения сварочной головки отдельно от приводов X, Y, Z;

• автоматическое определение положения контактных площадок кристаллов, траверс и многоуровневых изделий;

• индивидуальное программирование режимов присоединения и формы петель для каждого вывода;

• обеспечение универсальности автомата за счет использования многоместных матричных кассет и большого рабочего поля.

Основные технические характеристики

Время формирования проволочного вывода длиной 1,5 мм	0,33 с
Диаметр присоединяемых выводов	20-60 мкм
Размер рабочего поля X-Y	120×200 мм
Повторяемость X-Y	± 5 мкм
Потребляемая мощность	1,2 кВт
Габаритные размеры	600×600×1250 мм
Масса	180 кг

Примечание: разработка и производство ОКБТЭМ-СО (г. Минск, Республика Беларусь)

6.2. Влияние состава алюминиевой металлизации на качество микросварных соединений Al-Al

В кремниевых ППИ для создания токоведущих дорожек и контактных площадок используется в основном тонкопленочный алюминий. Несмотря на большое количество исследований свариваемости алюминиевой проволоки с алюминиевыми контактными площадками на кристалле, проблема повышения выхода годных изделий остается. На наш взгляд, это объясняется недостаточным вниманием исследователей к составу алюминиевой металлизации, его влиянию на качество микросоединений.

6.2.1. Повышение качества микросоединений, выполненных УЗС

В качестве образцов использовались кремниевые пластины с готовыми структурами ИС. Методом магнетронного распыления в вакууме наносилась алюминиевая металлизация с добавлением 1 % (в массовых долях) кремния или никеля. Для получения адгезии алюминиевой пленки к диэлектрическому покрытию кристалла ИС проводилась термообработка в среде азота в течение 25 мин для МОП-структур при температуре 475 °С и в течение 15 мин для биполярных структур при температуре 520 °С. Пассивирующее покрытие из оксида кремния наносилось на металлизацию пиролитическим осаждением, а вскрывалось на контактных площадках методом плазмохимического травления через маскирующий фоторезист. Разварка алюминиевой проволоки марки АК09ПМ35 проводилась на автомате типа УЗС.А-1 как на готовых структурах ИС, так и на тестовых структурах без гравировки металлических дорожек и без использования защитного диэлектрика.

В результате сравнительной оценки свариваемости на готовых и тестовых структурах было установлено, что микросоединения на тестовых структурах имели значительно лучшее качество. Это, очевидно, объясняется тем, что тестовые струк-

туры не подвергались операциям фотолитографического формирования алюминиевой разводки на кристалле и нанесения защитного диэлектрического покрытия. Кроме того, свариваемость алюминиевых контактных площадок с добавлением 1 % никеля была значительно лучше, чем с добавлением кремния. Контроль состояния поверхности алюминия контактных площадок для структур, имеющих неудовлетворительную свариваемость, проведенный на растровом электронном микроскопе, показал наличие у некоторой группы контактных площадок отдельных крупных выступающих включений неправильной формы.

С помощью рентгеновского микроанализатора был установлен следующий состав этих включений: алюминий – 71 %, кремний – 12 %, кислород – 17 %. На структурах другой группы в углублениях микрорельефа поверхности были обнаружены остатки фоторезиста. По состоянию поверхности третья группа структур не имела внешних отличий от структур с хорошей свариваемостью. На этих структурах методом Оже-спектроскопии был проведен послойный анализ поверхности пленок 48 контактных площадок кристаллов ИС, результаты которого представлены в табл. 6.3. Например, в поверхностном слое глубиной 50 Å пленки Al+1%Si в исследуемых контактных площадках содержание алюминия составляло от 70 до 80 вес.%, углерода от 3,5 до 14 вес.% и т. д.

Табл. 6.3. Результаты контроля состава поверхности алюминиевых пленок, имеющих неудовлетворительную свариваемость

Состав исходной пленки	Вариант	Глубина поверхностного слоя, Å	Процентное содержание элементов					
			Al	C	O	Ni	Si	N, P
Al + 1 % Si	1	50	70-80	3,5-14	4-10	–	5-7	2-4
		500	78-86	2-8	3-8	–	3-4,5	0-1,5
	2	50	0-10	70-87	22-36	–	1-2	2,3
		500	23-35	45-56	10-15	–	1	1-3
Al + 1 % Ni	3	50	70-80	5-12	4-9	1	4-5	2-3
		500	16-89	2-7	3-7	1	3-3,5	1-2
	4	50	0-12	65-87	18-40	1	1-2	2-3
		500	24-37	43-57	10-20	1	0-1	1-2

Как видно из таблицы, свариваемость ухудшается при загрязнении поверхностного слоя углеродом (более 40 %) и связанным с ним кислородом (варианты 2 и 4) или при повышенной концентрации кремния (более 3 %) (варианты 1 и 3). В вариантах 2 и 4 практически на поверхности отсутствовал алюминий. Легирование алюминиевой металлизации кремнием (до 1 %) при вакуумном напылении приводит к повышенной его концентрации на поверхности после операции фотогравировки металлизированной разводки на структуре и диэлектрического покрытия диоксидом кремния. Увеличение содержания кремния в поверхностном слое металлизации (рис. 6.12) связано с растворением пассивирующего диэлектрического покрытия даже при пиролитическом способе его нанесения, хотя температура нагрева подложки в этом случае минимальная и составляет 430-450 °С.

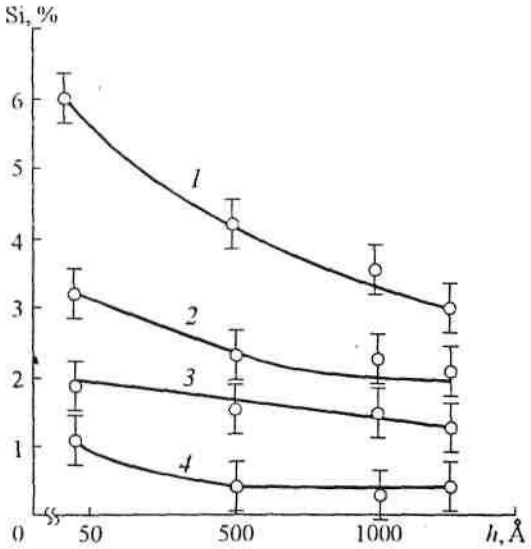


Рис. 6.12. Распределение содержания кремния в поверхностном слое алюминиевой металлизации толщиной 1200 Å: 1-3 – для металлизации Al+1%Si; 4 – для двухслойной металлизации Al-Al+1% Si (1 – неудовлетворительная свариваемость; 2 – удовлетворительная; 3-4 – хорошая)

На операции вскрытия диэлектрика под контакты этот слой может удалиться не полностью. По этой причине возможны и локальные «островковые» остатки пассивирующей пленки на поверхности контактных площадок структур, которые практически невозможно определить методами контактной разности потенциала и «мягкого» зонда. Увеличение концентрации кремния и связанного с кислородом углерода способствует повышению микротвердости алюминиевой пленки, что ухудшает ее пластическую деформацию и приводит к нарушению изолирующего диэлектрика под алюминиевой металлизацией при сварке.

Для алюминиевой металлизации, легированной никелем (до 1 %), аналогичная термообработка не приводит к увеличению концентрации никеля ни на поверхности, ни по толщине пленки. Кроме того, такие пленки более пластичны, чем легированные кремнием. С целью исключения нарушений диэлектрического покрытия в процессе присоединения выводов авторами было предложено на контактных площадках формировать два слоя алюминия по следующей схеме: нижний слой (более толщины защитного диэлектрического покрытия) легируют 1 % кремния или никеля до микротвердости не менее микротвердости материала вывода, а верхний слой (толщиной не менее 0,4 мкм) не легируют (рис. 6.11).

Нанесением верхнего слоя чистого алюминия обеспечивают хорошую свариваемость с алюминиевым микропроводником при «мягких» сварочных режимах за счет высокой пластичности данного слоя. При толщине чистого алюминия более 0,4 мкм зона взаимодействия свариваемых материалов не доходит до нижнего слоя; уменьшение толщины данного слоя приводит к взаимодействию проводника с нижним слоем легированного алюминия, что может привести к деформации последнего и контакту проводника со ступенькой диэлектрика. Формированием нижнего слоя контактной площадки из алюминия, легированного до микротвердости не менее микротвердости материала вывода и толщиной более толщины защитного диэлектрического покрытия, защищают диэлектрическое покрытие от непосред-

ственного контакта с привариваемым проводником. Верхний слой алюминия выполняет функцию своеобразной демпфирующей прослойки, за счет деформации которой при сварке и выдавливания ее на периферию контактной площадки практически устраняют деформацию нижнего слоя легированного алюминия и исключают непосредственный контакт микропроводника с защитным диэлектрическим покрытием. Верхние пределы толщины слоев ограничены только необходимой степенью разрешения фотолитографии при формировании металлизированной разводки.

Нанесение слоев алюминиевой металлизации за один технологический процесс обеспечивает гарантированную адгезию между ними. Данная конструкция дает 100 %-ное распознавание контактных площадок с помощью системы технического зрения УЗС.А-2 и повышение стабильности прочности формируемых микросварных соединений на 30-40 %.

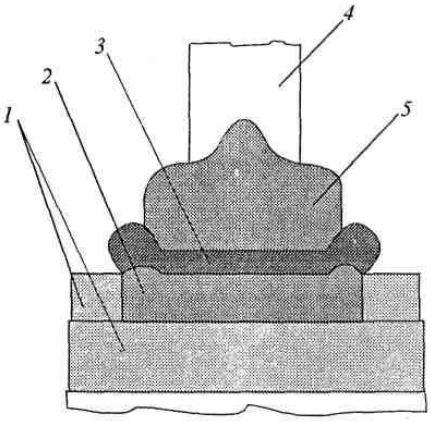


Рис. 6.11. Схема монтажа алюминиевой проволоки к контактной площадке на кристалле: 1 – диэлектрическая пленка; 2 – легированный алюминий; 3 – чистый алюминий; 4 – алюминиевая проволока; 5 – сварное соединение

6.2.2. Повышение качества микросоединений, выполненных ТКС

При изготовлении ППИ в металлостеклянных корпусах широко используется метод ТКС алюминиевой проволокой внахлестку. Установлено, что термокомпрессионные соединения алюминиевой микропроволоки с алюминиевыми пленками, нанесенными в вакууме, имеют стабильность прочности ниже, чем соединения типа Al-Au на траверсах корпусов. Анализ характера разрушения микросоединений при натяжении микропроволоки под углом 90° к плоскости соединения показывает, что около 8-10 % микросварных соединений разрушаются по зоне сварки.

Исследования показали, что на качество микросоединений оказывают влияние структура и толщина оксидной пленки Al_2O_3 на поверхности алюминиевой металлизации контактных площадок. Известно, что естественный слой оксида имеет неравную толщину и сплошность, но хорошую адгезию к пленке алюминия. Данный слой состоит из аморфной смеси с небольшой примесью кристаллической фазы, он склонен к гидратации, т. е. содержит молекулы воды, которые находятся в твердом растворе в виде гидроксильных ионов.

При термообработке с целью улучшения адгезии алюминиевой пленки к поверхности ППИ и формирования омических контактов поверхностная часть оксидного слоя переходит из аморфной модификации в кристаллическую γ-фазу Al_2O_3.

При ТКС под воздействием температуры и давления происходит пластическое течение свариваемых материалов, в результате которого на соединяемых поверхностях должны разрушаться, а затем и выноситься из зоны адсорбированные соединения и оксидные пленки. Однако аморфный слой оксида алюминия обладает высокой пластичностью и легко утоняется при механическом давлении, т. е. его сложно полностью удалить при пластической деформации. Поэтому было сделано предположение, что одним из основных факторов, снижающих стабильность прочности термокомпрессионных соединений алю-

миниевых проводников с пленками алюминия, осажденными в вакууме, является наличие на поверхности пленки слоя оксида алюминия аморфной модификации. Оксидный слой на поверхности алюминиевого проводника разрушается легче, так как микропроволока при ТКС деформируется гораздо больше, чем пленка.

Для исследования влияния структуры оксида на пленке алюминия на качество соединений с алюминиевой микропроволокой были изготовлены три партии полупроводниковых кристаллов. Осаждение алюминия на полупроводниковые кристаллы всех партий осуществляли на установке вакуумного напыления УВН-73 в следующем режиме: остаточное давление в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-3}$ Па, напряжение на электронно-лучевом испарителе 8-11 кВ, ток эмиссии 600-700 мА.

Различие для кристаллов всех партий заключалось в режимах охлаждения получаемых пленок. В первой партии охлаждение проводили в вакууме до температуры 100 °С, затем осуществляли напуск азота в подколпачный объем и охлаждение до комнатной температуры. Во второй партии охлаждение проводили так же, как в первой партии, но осуществляли напуск кислорода. Охлаждение третьей партии проводили отключением нагрева с одновременным напуском кислорода сразу после осаждения металла при температуре 150±20 °С.

После фотолитографической гравировки по металлу все кристаллы подвергались термообработке в среде аргона при температуре 500 °С в течение 20 мин.

Для определения прочности микросоединений алюминиевых микропроводников с вакуумно-осажденными пленками алюминия ТКС проводили на установке типа НПВ-1А проволокой марки АК09ПМ35 в режимах, оптимальных для данных металлов. Для каждой партии кристаллов было сформировано по 100 сварных соединений. Контроль качества микросварных соединений проводился разрушающим методом – натяжением проволочного вывода под углом 90° к поверхности подложки (рис. 6.12). Характер разрушения анализировался под микроскопом типа ММУ-3 при увеличении 80×. По результатам измере-

ний для каждой партии кристаллов были определены среднее значение разрушающих усилий $P_{ср}$ и коэффициент вариации

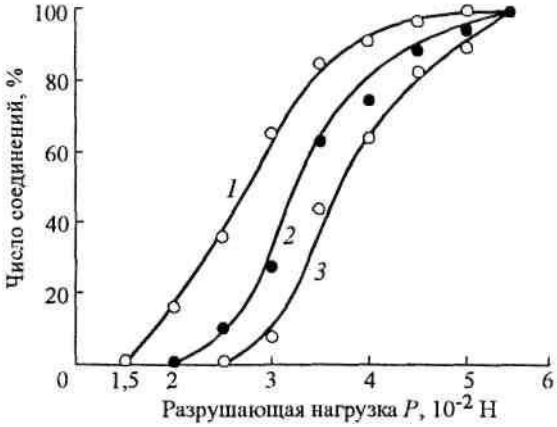


Рис. 6.12. Интегральное распределение прочности микросварных соединений алюминиевых микропроводников с различными вакуумно-осажденными пленками алюминия (номера кривых соответствуют номерам партий кристаллов)

$$K_v = \frac{\sigma}{P_{ñð}} 100\ \%,$$

где σ – среднее квадратичное отклонение усилий отрыва, Н.

Из табл. 6.4 видно, что средние значения усилий разрушения и их стабильность выше во второй и третьей партиях кристаллов, металлизация которых сформирована окислением в кислороде. Кроме того, в этих партиях отсутствуют разрушения сварных соединений в виде отслоения проволоки от пленки.

Табл. 6.4. Экспериментальные результаты контроля качества микросоединений

Номер партии кристаллов	$P_{ср}$, 10^{-2} Н	σ, Н	K_v, %	Примечания
1	2,46	0,67	27,3	8 % разрушений в виде отслоения проволоки от пленки
2	3,2	0,75	23,4	Разрушения в виде отслоения проволоки от пленки отсутствуют
3	3,53	0,65	18,4	То же

Большая прочность микросоединений на кристаллах третьей партии по сравнению со второй, видимо, связана с отсутствием роста естественного оксида на воздухе после окисления в цикле осаждения металла, и поэтому в данном случае происходит более полный перевод оксида в кристаллическую модификацию. Для повышения качества микросоединений при ТКС рекомендуется сразу же после нанесения в вакууме пленок алюминия окислять их в чистом кислороде при температуре подложки 130-170 °С.

6.3. Микросварные соединения алюминиевой проволоки с алюминиевым гальваническим покрытием корпусов изделий электронной техники

В технологии производства ППИ в качестве технологических покрытий корпусов широко используется золото, серебро, никель и его сплавы. Важнейшей задачей полупроводниковой микроэлектроники является экономия золота или даже его замена на другие металлы и сплавы. При этом разработка способов и технологий монтажа микросоединений в ППИ должны приниматься с учетом максимального использования существующих в отрасли технологий и оборудования.

В производстве многих ППИ используется металлизация корпусов никелем и его сплавами. С целью повышения температурной стойкости покрытий применяют сплав Ni-B. Кроме этих покрытий используют алюминиевую металлизацию, которую получают различными методами: вакуумным алюминированием или алюминиевой плакировкой, которые пригодны только для пластмассовых и металлостеклянных корпусов, поэтому не решают проблему замены золота на корпусах приборов повышенной надежности.

Анализ покрытий корпусов ППИ показал, что перспективным является применение гальванического алюминирования, которое осуществляется как из расплавов солей, так и из невод-

ных электролитов. Известно, что алюминиевое гальванопокрытие хорошо смачивается припоями типа Al-Zn и Al-Ge, что можно использовать в технологии пайки полупроводниковых кристаллов на основания корпусов ППИ. Кроме того, данное покрытие удовлетворительно сваривается с алюминиевой проволокой как ТКС, так и УЗС.

Однако следует отметить, что технологический процесс гальванического алюминирования достаточно сложен, структура покрытий неодинакова у различных партий корпусов, полученных на одних и тех же режимах, что недопустимо в условиях массового производства ППИ.

6.3.1. Алюминиевые покрытия, полученные электролитическим методом

Одним из способов получения алюминиевой металлизации является электролитическое алюминирование.

Особенностью электроосаждения алюминия является то, что он не может быть выделен путем электролиза водных растворов в виду того, что стандартный электродный потенциал алюминия ($E° = –1,66$ В) намного отрицательнее потенциала выделения водорода из воды ($E° = –0,41$ В). Поэтому в качестве растворителей используют органические апротонные, например, толуол или ксилол, которые не содержат подвижных атомов водорода. Эти растворители имеют высокую электрохимическую устойчивость и не восстанавливаются до потенциалов –(3-3,5) В, а их анодное окисление близко к 1,0-1,5 В. Основными растворяемыми компонентами в этих электролитах являются ионы металлов, а также органические и неорганические соединения, обладающие высокой растворимостью и электропроводностью.

Для практического применения разработано достаточно большое число электролитов алюминирования. Однако, как показали исследования, не все электролиты могут быть использованы для осаждения алюминия. Из числа разработанных электролитов можно выделить следующие группы, нашедшие прак-

тическое применение: эфирно-гидридные, алюмоорганические, этилбромидные, алкилбензольные и алкилбензольные с четвертичными аммониевыми соединениями.

Из анализа литературных данных по электролитам алюминирования можно заключить, что все они неустойчивы, а алюминиевые покрытия, осаждаемые в узком диапазоне катодной плотности тока, имеют недостаточную адгезию к основе и неудовлетворительную структуру. Процесс электролиза затруднен использованием инертной атмосферы и закрытых электролизеров, поскольку при контакте электролитов с атмосферной влагой они разлагаются, а в некоторых случаях становятся взрывоопасными. Кроме того, отмывка деталей, покрытых алюминием, после электролиза осуществляется в органических растворителях. Все эти факторы ограничивают использование электролитов алюминирования в промышленном масштабе.

Наиболее стабильные результаты получены при электроосаждении алюминия из алкилбензольных электролитов.

Перспективными следует считать ксилольные, при этом можно использовать как отдельные изомеры ксилола, так и их смесь.

Основными компонентами ксилольных электролитов являются бромид алюминия, изомеры ксилола и электропроводящие добавки – бромиды калия и натрия. В некоторых случаях через электролит пропускают газообразный HBr. В результате химических взаимодействий между компонентами электролитов алюминирования основными ионами, определяющими свойства растворов $AlBr_3$ в алкилбензолах, являются: $[Al_2Br_5 \cdot ArH]^+$, $[Al_2Br_4OH \cdot ArH]^+$, ArH_2^+, $[CH_3\ AlBr_3]^+$, $Al_2Br_7^-$, $AlBr_4^-$.

Наиболее систематические исследования кинетики и механизма электроосаждения алюминия из алкилбензольных электролитов, в том числе ксилольных, проведены Симанавичусом. В соответствии с развиваемой теорией электроосаждения алюминия из ксилольных электролитов был предложен механизм осаждения алюминия по схеме:

$$[Al_2Br_4OH \cdot C_6H_4\ (CH_3)_2]^+ + C_6H_4\ (CH_3)_2H^+ + 6e \rightarrow$$
$$2Al^\circ + 4Br^- + H_2O + 2\ C_6H_4\ (CH_3)_2.$$

Образующиеся в процессе электролиза различные комплексные ионы, а также протекающие под действием электрического тока сложные химические превращения усложняют выделение алюминия. По этой причине алюминиевые покрытия осаждаются сравнительно небольшой толщины (до 20 мкм).

Следует отметить, что анодное поведение гальванического алюминия в различных средах изучено в меньшей степени, чем электрометаллургического, который получают электролизом расплава оксида алюминия в смеси с криолитом.

Коррозионно-электрохимические свойства алюминиевых покрытий в нейтральной среде исследовались в растворе, имитирующем конденсат влаги промышленной атмосферы (КПА) состава (моль/л): NaCl – 0,01; Na_2SO_4 – 0,001; Na_2SO_3 – 0,001.

Алюминиевые покрытия получали из ксилольного электролита состава (г/л): бромид алюминия – 500, парафин – 5,0, ксилол – остальное. Электроосаждение алюминиевых покрытий осуществляли на медную основу.

Анодные потенциодинамические кривые снимались по известной методике, применяя катодную активацию при E = –2 В.

Из анодных поляризационных кривых (рис. 6.13) видно, что эти кривые имеют характерные для пассивного металла, каким является алюминий, три кинетические области: активного растворения, активно-пассивного состояния и перепассивации.

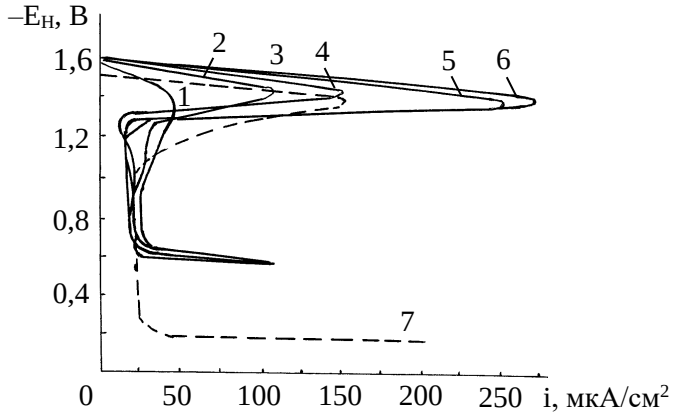


Рис. 6.13. Потенциодинамические кривые алюминиевых покрытий, полученных из ксилольного электролита без добавок, в зависимости от $i_к$ (А/дм^2): 1 – 1,0; 2 – 1,5; 3 – 2,0; 4 – 2,5; 5 – 4,0; 6 – 5,0; 7 – $Al_{металлург.}$ (А99,99). Время электролиза τ = 15 мин

Активное растворение алюминия происходит в соответствии с реакцией:

$Al - 3e = Al^{3+}$ при потенциалах от –1,58 до –1,34 В.

В этом интервале потенциалов наблюдается появление максимума, которое обусловлено возникновением защитной пленки по реакции:

$$2Al + 3H_2O + 6e = Al_2O_3 + 6H^+$$

При дальнейшем смещении потенциала в положительную область скорость растворения алюминия замедляется и при потенциале пассивации $E_п \approx 1,4$ В становится равной скорости образования защитной оксидной пленки, при этом достигается предельный ток пассивации $i_п$.

При потенциалах, положительнее $E_п$, скорость роста оксидной пленки превышает скорость ее химического растворения и формируется защитная пленка, появляется характерный аномальный участок на анодной кривой, при этом ток резко снижается до значения полной пассивации $i_{пп} \approx 25$ мкА/см^2. При дальнейшем увеличении потенциала до –(0,66-0,6) В алюминий находится в активно-пассивном состоянии, при котором скорость анодного процесса практически не зависит от потенциала и в основном определяется скоростью химического растворения защитной пленки в электролите.

В присутствии хлорид-ионов (концентрация их в КПА равна 10^{-2} г-ион/л) происходит постепенное вытеснение ими кислорода из защитной пленки и адсорбированного кислорода с поверхности электрода. Вследствие этого при достижении потенциала пробоя $E_{пр} \approx 0,6$ В оксидная пленка не возобновляется за счет прямого окисления. Анодный процесс образования защитного оксида заменяется анодным процессом образования легкорастворимого соединения металла с активным анионом и гидроксида алюминия:

$$Al + 3Cl^- - 3e = Al_3;$$
$$Al + 3OH^- - 3e = Al(OH)_3.$$

Образование этих соединений затрудняет доступ кислорода к поверхности электрода и пассивацию алюминия.

Из рис. 6.13 видно, что на характер анодных поляризационных кривых влияет величина катодной плотности тока $i_к$, при которой осаждается алюминий. С увеличением $i_к$ потенциал пассивации практически не изменяется. Это свидетельствует о том, что не изменяется природа пассивирующего слоя на поверхности алюминия в данной среде. Однако при этом видно, что заметное влияние катодная плотность тока $i_к$ оказывает на ток пассивации, который возрастает примерно в 5 раз (от 5 до 250 мкА/см^2) при увеличении $i_к$ от 1 до 4 А/дм^2.

Пробой оксидной пленки наступает при потенциале $Е_{пр.} \approx$ –0,6 В и не зависит от $i_к$. Для электрометаллургического алюминия (А99,99) $Е_{пр}$ положительнее на 0,4 В (рис. 6.13, кривая 7). Очевидно, на величину $Е_{пр}$ оказывает влияние условие формирования защитной оксидной пленки, которая на гальваническом алюминии образуется более пористой и не такой сплошной, как на металлургическом алюминии.

Для количественной оценки защитных свойств гальванопокрытий применяется метод построения коррозионных диаграмм, позволяющий определить суммарный коррозионный ток в системе основа – гальванопокрытие. В соответствии с этим методом на катодные (или анодные) поляризационные кривые переносят значения стационарных потенциалов изучаемой системы.

Определено влияние режимов электролиза при получении алюминиевых гальванопокрытий на коррозионный ток $i_{кор}$ в КПА и установлено, что с увеличением катодной плотности тока $i_{кор}$ постепенно снижается, т. к. возрастает толщина покрытий и соответственно снижается их пористость. С увеличением продолжительности электролиза стационарный потенциал $Е_{ст}$ системы алюминий гальванический – медная основа, сдвигается в отрицательную сторону, что объясняется увеличением толщины покрытий и снижением пористости. Поскольку сквозных пор

становится меньше, поэтому $E_{ст}$ по отношению к медной основе определяется природой алюминия и свойствами его защитной пленки.

С целью улучшения структуры покрытий в электролиты алюминирования вводят различные поверхностно-активные вещества (ПАВ). Установлено влияние некоторых органических добавок (парафина, 4,4′-диамино-3,3′-диметоксидифенилметан (ДДДМ) и др.) на коррозионную стойкость алюминиевых покрытий. При введении этих добавок существенно улучшается микроструктура алюминиевых покрытий (рис. 6.14). Видно, что из электролита без добавок покрытия осаждаются с большим числом сквозных пор. Наиболее мелкокристаллические покрытия осаждаются из электролита с ДДДМ. Анодное поведение алюминия, полученного из ксилольных электролитов, в присутствии этих добавок имеет свои особенности и зависит от их концентрации в электролите. Например, введение 0,5 г/л ДДДМ повышает ток пассивации и сдвигает $E_{пр}$ до –0,74 В (τ = 20 мин). При дальнейшем увеличении продолжительности электролиза резко возрастают токи пассивации и полной пассивации, а это приводит к увеличению $i_{кор}$ до 200 мкА/см^2 ($E_{ст}$ = 0,76 В) при $i_к$ =1,0 А/дм^2 и τ = 30 мин (табл. 6.5).

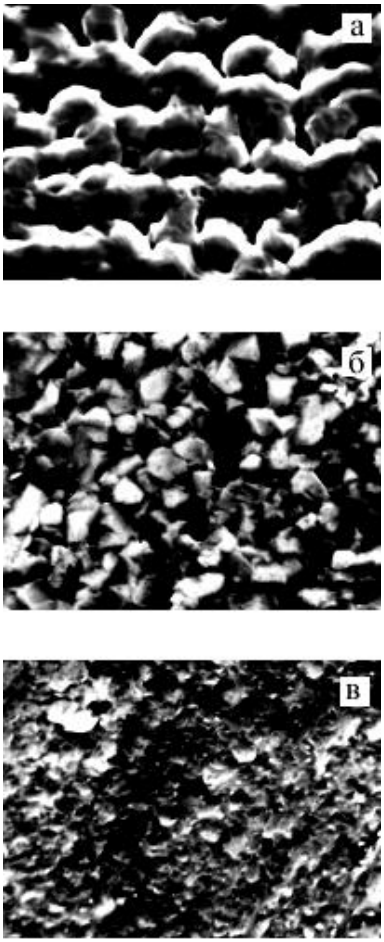


Рис. 6.14. Микроструктура поверхности алюминиевых покрытий, полученных из ксилольного электролита без добавок (а), с добавками парафина (б) и ДДДМ (в). Увеличение 2000^{x}

Табл. 6.5. Зависимость скорости коррозии гальванического алюминия с различной толщиной (δ), полученного из ксилольных электролитов с добавкой ДДДМ, в КПА

Концентрация вводимой добавки, г/л	Режим электролиза			$E_{погр}$, мВ	$E_{ст}$, мВ	$i_{кор}$, мкА/см^2
	$i_к$, А/дм^2	τ, мин	δ, мкм			
0,5	1,0	1,0	1,5	700	690	–
0,5	1,0	20	2,8	740	780	160

0,5	1,.0	30	3,6	790	760	200
5.0	1,0	10	1,1	1240	1200	100
5,0	1,0	20	2,1	1280	1250	50
5,0	1,0	30	2,7	1260	1220	10
0,5	0,5	30	2,4	580	630	40
0,5	1,0	30	3,6	740	670	180
5,0	0,5	30	2,5	1060	1000	15
5,0	1,0	30	2,7	1260	1220	10
5,0	2,0	30	3,2	1240	1240	23

С увеличением концентрации ДДДМ до 5 г/л изменяется характер анодных кривых, что особенно заметно при повышении $\tau_{эл}$ до 30 мин. Анодные кривые характеризуются появлением катодного участка при потенциалах от –1,63 до –1,2 В, так называемой «катодной петли» (рис. 6.15), наличие которой указывает на переход системы из активного в пассивно-активное состояние, т. е. относительно большей устойчивости пассивного состояния коррозионной системы. Подтверждением этому является сдвиг $E_{ст}$ в отрицательную сторону, что свидетельствует об уменьшении пористости гальванопокрытий при увеличении концентрации ДДДМ в электролите. Например, при изменении концентрации ДДДМ от 0,5 до 5 г/л потенциал алюминия становится отрицательнее на 0,4 В. Это приводит к снижению токов коррозии (табл. 6.5) в 20 раз (при $i_к$ = 1 А/дм^2 и τ = 30 мин).

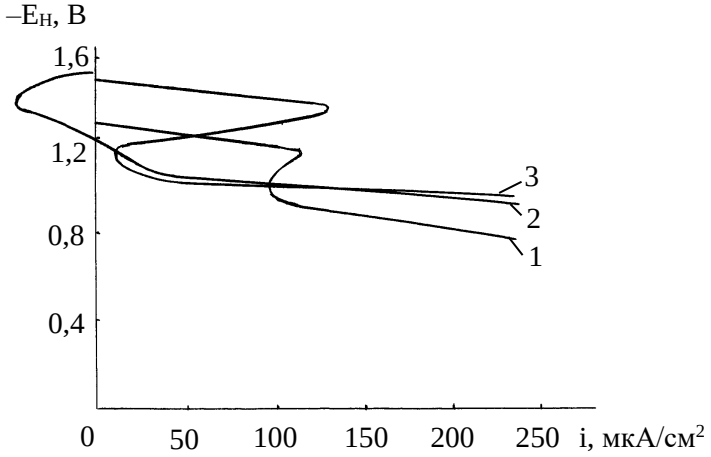


Рис. 6.15. Потенциодинамические кривые алюминия, полученного из ксилольного электролита с добавкой 5 г/л ДДДМ и τ (мин): 1 – 10 ; 2 – 20 ; 3 – 30

При повышении $i_к$ от 0,5 до 2 А/дм^2 потенциал алюминия также смещается в отрицательную сторону, а на анодных кривых появляются «катодные петли». Из анализа коррозионных диаграмм (табл. 6.5) следует, что при низкой концентрации ДДДМ снижается устойчивость алюминия, а с повышением концентрации добавки до 5 г/л она заметно повышается. Более коррозионно устойчивыми являются алюминиевые покрытия, полученные из ксилольного электролита с добавкой 5 г/л ДДДМ ($i_{кор}$=10 мкА/см^2) при $i_к$ = 1,0 А/дм^2 и τ = 30 мин).

Отжиг алюминиевых покрытий влияет на характер Е, i-кривых в КПА. Из рис. 6.16 видно, что на анодных кривых неотожженного алюминия, полученного из ксилольного электролита с ДДДМ, отсутствуют участки активного и пассивного состояний, которые появляются при отжиге. Это обусловлено особенностями структуры алюминия. Исследования поверхности покрытий показали, что электролитический алюминий имеет поликристаллическую структуру с малым размером зерен. Очевидно, на алюминии, не подвергнутом отжигу, поверхностная оксидная пленка тонкая и пористая, что подтверждается высоким значением $i_{кор}$ = 100-200 мкА/см^2.

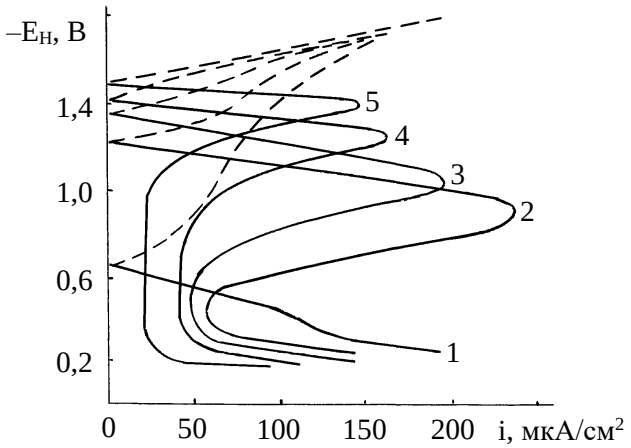


Рис. 6.16. Потенциодинамические кривые неотожженного (1) и отожженного алюминия, снятые в КПА. Температура отжига, °С : 2 – 350, 3 – 450, 4 – 550, 5 – Al металлургический (А99,99)

Отжиг при 350 °С повышает коррозионную стойкость алюминиевых покрытий примерно в 3,5 раза, причем на Е-i-кривых появляются активная и пассивная области (рис. 6.16, кривая 2). С повышением температуры отжига до 550 °С область пассивации расширяется с 0,06 до 0,45 В, ток пассивации снижается с 240 до 165 мкА/см^2 (табл. 6.6), а Е, i-кривая приобретает сходство с кривой электрометаллургического алюминия (рис. 6.16, кривая 5), при этом область пассивации несколько уже, а ток полной пассивации выше, чем у последнего ($i_{пп}$ = 45 мкА/см^2) примерно в 1,8 раза.

Табл. 6.6. Стационарные потенциалы ($E_{ст.}$) и погружения ($E_{погр.}$), ток пассивации ($i_п$) и полной пассивации ($i_{пп}$) электролитического алюминия в КПА при t = 25 °С

Температура отжига, °С	$E_{погр}$, В	$E_{ст}$, В	$i_п$, мкА/см^2	$i_{пп}$, мкА/см^2
без отжига	-0,92 ÷ -0,86	-0,42 ÷ -0,40	–	–
350	-0,84 ÷ -0,81	-0,39 ÷ -0,38	240	56

450	-0,76 ÷ -0,74	-0,36 ÷ -0,35	205	50
550	-0,54 ÷ -0,50	-0,34 ÷ -0,32	165	45

В присутствии Cl^--ионов алюминий склонен к питтингообразованию. С увеличением температуры отжига коррозионная стойкость возрастает. В литературе имеются данные о том, что при уменьшении размера зерна, например, стали Х18Н10Т склонность к питтинговой коррозии возрастает. Следует отметить, что при образовании оксидов на металлах имеют место явления ориентационного соответствия, когда структура поверхностной пленки повторяет структуру металла. Поэтому можно предположить, что низкая коррозионная стойкость электролитического неотожженного алюминия обусловлена формированием дефектной защитной пленки. С увеличением температуры отжига растет размер зерна (при Т = 450 °С до 0,83 мкм), структура покрытий характеризуется более правильной формой кристаллов. Гранулы зерен становятся менее дефектными, на поверхности алюминия образуется пленка с лучшими защитными свойствами.

6.3.2. Влияние свойств покрытия на качество соединений с алюминиевой проволокой при термокомпрессионной сварке

Рассмотрено влияние структуры и толщины алюминиевого покрытия на свариваемость с алюминиевой микропроволокой при ТКС. Для изготовления образцов были взяты кристаллодержатели из сплава ферроникель 42Н, на которые наносились пленки алюминия из электролита, содержащего бромид алюминия – 500 г/л, парафин – 5 г/л, ксилол – остальное. Электролиз проводился в герметизированном электролизере в атмосфере азота. В качестве анодов использовались пластины алюминия марки А99,99. Режим электролиза:

- катодная плотность тока $i_к$ = 0,5-5 А/дм^2;
- продолжительность электролиза τ = 15-30 мин.

После контроля морфологии поверхности на растровом электронном микроскопе проводилась имитация напайки кри-

сталлов на основания корпусов ППИ: нагрев образцов до 450 °С и выдержка в течение двух минут.

Формирование микросварных соединений алюминиевой проволоки с алюминиевым покрытием осуществлялось на установке термокомпрессионной сварки типа НПВ-1А. Проволока марки АК09ПМ30 в исходном состоянии имела предел прочности $\sigma_в$ = 200-220 МПа и относительное удлинение γ = 3-4 %. Для ТКС использовали следующие режимы: температура нагрева кристаллодержателя 350±10 °С, давление сварочного инструмента на проволоку 2,0±0,1 Н, время приложения давления при сварке 0,4±0,05 с. Для сварки использовались режими, рекомендуемые для пары алюминий – алюминий.

Для каждой группы образцов, полученных при определенном режиме электролиза, было выполнено по 100 сварных соединений.

Известно, что важнейшей характеристикой надежности микросоединений ППИ является стабильность прочности (усилие разрушения). Поэтому оценка свариваемости осуществлялась по среднему значению разрушающего усилия ($P_{ср}$) и коэффициенту вариации (K_v), характеризующему воспроизводимость качества микросоединений.

Контроль прочности соединений проводился разрушающим методом – натяжением проволочного вывода под углом 90° к плоскости сварного соединения. Характер разрушения анализировался под микроскопом типа ММУ-3 при увеличении 80×. При этом наблюдались два вида разрушений: обрыв по утоньшению проволоки в зоне сварки и частичное или полное отслаивание проволоки от покрытия. Соединения считались качественными, если при оценке прочности разрушающим методом обрывы проволоки происходили по «шейке» (участке перехода сварного соединения в проволоку).

По результатам измерений для каждой партии образцов были определены $P_{ср}$ и K_v. Коэффициент вариации определялся по известной формуле

$$K_v = \sigma / P_{ср} \cdot 100\ \%,$$

где σ – среднее квадратичное отклонение усилий отрыва, сН.

Контроль структуры и толщины алюминиевых пленок показал, что величина зерна и толщина пленки определяются режимами электролиза – катодной плотностью тока и продолжительностью процесса. Пленки толщиной до 2 мкм, полученные при значениях $i_к$ = 0,5 А/дм^2 и τ = 15-30 мин, имеют мелкозернистую структуру, но большое количество пор. С увеличением $i_к$ свыше 2 А/дм^2 размер зерна увеличивается и на поверхности появляются дендриты, количество которых возрастает в местах с повышенной плотностью тока.

На кристаллодержателях, имеющих покрытие толщиной до 2 мкм, наблюдается локальное отслоение покрытия после проведения термообработки, имитирующей напайку кристаллов, что связано с окислением ферроникеля кристаллодержателей через поры в алюминиевом покрытии.

Полученные данные по качеству сварных соединений были обработаны с помощью методов математической статистики и сведены в 10 групп (табл. 6.7). На рис. 6.17 представлена зависимость качества сварных соединений от свойств покрытий.

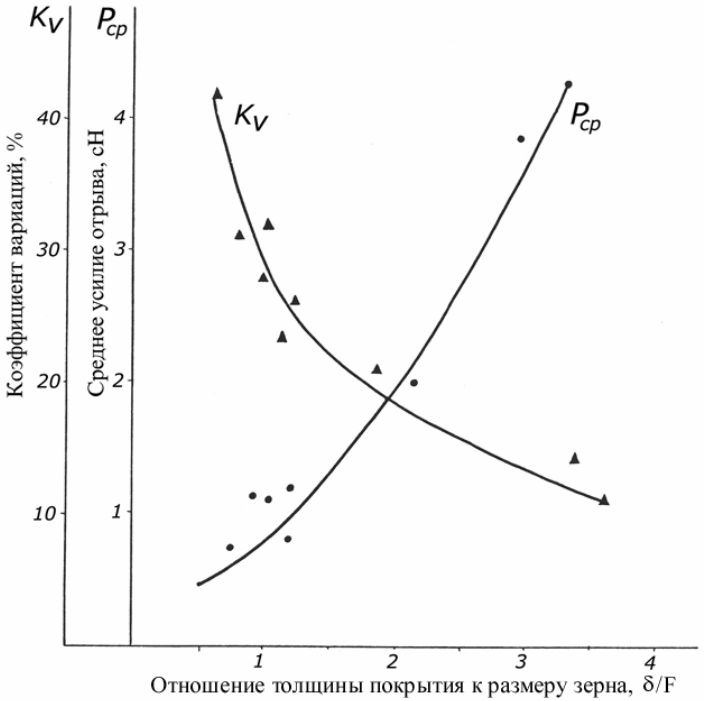


Рис. 6.17. Влияние свойств покрытий на качество микросварных соединений

Табл. 6.7. Оценка свариваемости алюминиевых покрытий

Номер группы	Плотность тока, А/дм^2	Время электролиза, мин	Толщина δ, мкм	Размер зерна F, мкм	$P_{ср}$, сН	K_V, %	Разрушение в виде отслоения проволоки от покрытия, %
1	0,5	15	1	1-2	0,4	42	20
2	0,5	30	2	1-2	0,7	34	17
3	1,0	15	2	1-2	1,4	26	5
4	1,0	30	5	1-2	4,3	12	Отслоений нет
5	2,0	15	3	2-3	1,4	22	3
6	2,0	30	7	2-3	3,8	15	Отслоений нет
7	3,0	15	4	4-5	1,2	32	10
8	3,0	30	10	4-5	1,9	27	8
9	5,0	15	6	5-7	1,1	37	28

10	5,0	30	14	5-7	0,7	40	35

Из рис. 6.17 и табл. 6.7 видно, что свариваемость алюминиевого покрытия, нанесенного на подложку из ферроникеля, зависит от структуры и толщины алюминиевой пленки. Максимальную прочность имеют сварные соединения алюминиевой микропроволоки с мелкозернистыми покрытиями толщиной 5-7 мкм, полученными при режиме электроосаждения: $i_к$ = 1-2 А/дм^2, τ = 30 мин. Низкая прочность и высокий процент (~ 20 %) разрушений в виде отслоения проволоки от покрытий меньших толщин связаны с загрязнениями поверхности покрытия оксидами железа и никеля, выходящими при нагревании через поры в покрытии, что приводит к уменьшению площади взаимодействия проволоки с покрытием при сварке.

Сварные соединения с пленками, полученными при значениях $i_к$ > 2 А/дм^2, имеют более низкую прочность и большой разброс параметров.

При контроле качества соединений с покрытиями, полученными при $i_к$ > 3 А/дм^2, наблюдалось до 10 % разрушений в виде отслоения проволоки от покрытия, а при $i_к$ = 5 А/дм^2 число отслоений составило ~ 35 %. Это связано с крупнозернистой и дендритной структурой поверхности алюминиевого покрытия (рис. 6.18, б), которая ухудшает условия вытеснения адсорбированных и оксидных пленок из зоны соединения при пластической деформации в процессе сварки, что приводит к уменьшению площади взаимодействия свариваемых металлов.

Таким образом, свариваемость алюминиевых покрытий, нанесенных гальваническим осаждением, зависит от их структуры и толщины. Оптимальные результаты для исследуемого электролита получены на покрытиях толщиной 5-7 мкм, величина зерна при этом не превышала 3 мкм и на поверхности отсутствовали дендриты.

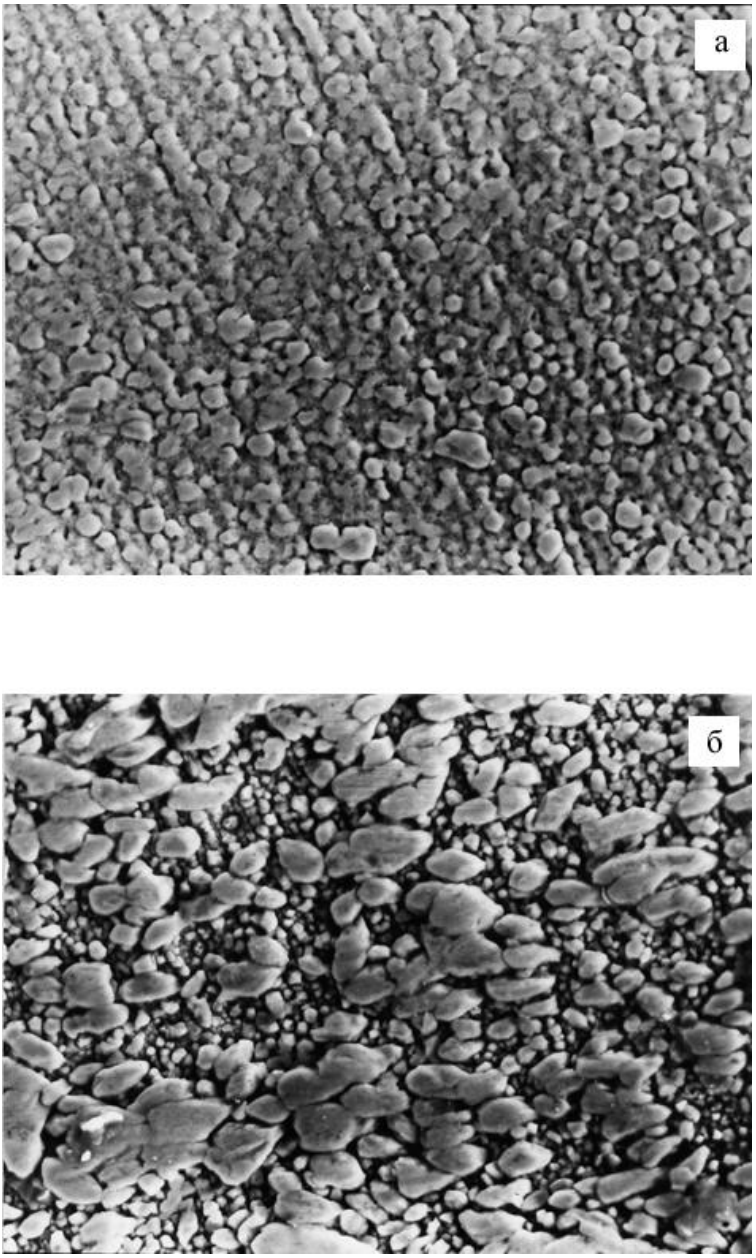


Рис. 6.18. Структура алюминиевых покрытий, характеризующихся хорошей (а) и неудовлетворительной (б) свариваемостью. 2000×

6.3.3. Коррозионная стойкость микросоединений $Al_п$-$Al_г$

Коррозионная стойкость металлов и сплавов зависит от химического состава элементов сплава, внутренней структуры, а также чистоты поверхности деталей. Существует большое количество способов определения скорости коррозии токопроводящих материалов. В одном случае исследуемые образцы помещают в агрессивную среду, выдерживают заданное время и по коррозионным поражениям поверхности образца судят о степени коррозии материала. В другом – через образцы, размещенные параллельно друг другу, пропускают ток звуковой или ультразвуковой частоты, измеряют сопротивление образцов и по нему определяют скорость коррозии. Коррозионную стойкость металлов, особенно микронных размеров, оценивают также изменением внутреннего трения образца, измеряемого до и после коррозионных испытаний.

Для оценки скорости разрушения контактной пары обычно определяют величины коррозионных токов. Значение этих токов можно получить либо на основе анализа поляризационных измерений, проводимого отдельно на каждом из металлов пары с последующей графической обработкой результатов, либо при измерениях на короткозамкнутых образцах того и другого металла, моделирующих работу контактной пары. Обычно используются оба метода для определения величины коррозионного тока.

В сравнении с контактной парой Al-Au контакт алюминиевой проволоки ($Al_п$) с алюминиевым гальванопокрытием ($Al_г$) должен быть предпочтительнее с точки зрения коррозионной устойчивости, поскольку в паре $Al_п$-$Al_г$ отсутствует разность потенциалов.

Для проведения коррозионных испытаний были изготовлены модельные образцы – кристаллодержатели из сплава ферроникель, которые были покрыты гальваническим алюминием, полученным из электролита состава (г/л): бромид алюминия – 500, парафин – 5,0, ксилол – остальное.

Из данных табл. 6.8 следует, что время, в течение которого наблюдается полное разрушение контакта $Al_п$-$Al_г$ в среде КПА составляет от 19 до 63 ч. Это свидетельствует о более высокой коррозионной стойкости контакта $Al_п$-$Al_г$, чем контакта $Al_п$-$Au_г$, для которого это время составляет максимально 50 мин (среднее время 20 мин), а при обработке парами ингибиторов возрастает до 90 мин.

Табл. 6.8. Влияние режимов электроосаждения алюминия на прочность ($P_{ср}$) и коррозионную стойкость ($\tau_{ср.}$) сварного контакта $Al_п$-$Al_г$ в конденсате промышленной атмосферы

Плотность тока, А/дм^2	Время электролиза, мин	Толщина Н, мкм	$P_{ср}$, сН	$\tau_{ср}$, ч
0,5	15	1	0,4	19
0,5	30	2	0,7	24
1,0	15	2	1,4	32
1,0	30	5	4,3	57
2,0	15	3	1,4	36
2,0	30	7	3,8	63
3,0	15	4	1,2	33
3,0	30	10	1,9	54
5,0	15	6	1,1	26
5,0	30	14	0,7	23

Сопоставление данных по свариваемости алюминиевой проволоки с гальваническим алюминиевым покрытием, с данными коррозионных испытаний контактов $Al_п$-$Al_г$ показывает, что сварные контакты, имеющие максимальную прочность, имеют и наибольшую коррозионную устойчивость ($\tau_{ср}$ = 57-63 ч). Это, по-видимому, связано со структурой сварного шва, который у сварных контактов с высокой прочностью имеет значительно меньшее количество пор и пустот в сравнении с контактами, имеющими низкую прочность. Известно, что прочность сварных соединений зависит от площади взаимодействия материалов в сварном соединении, которая увеличивается при отсутствии в контакте адсорбированных загрязнений и оксид-

ных пленок, а также при увеличении класса чистоты поверхности пленок.

Известно, чтобы повысить коррозионную стойкость микросоединений проволока – пленочная металлизация в ППИ контакты подвергают обработке ингибиторами коррозии.

При обработке парами ингибиторов метанитробензоатгексаметиленимином (МНБГМИ) и 3,5-динитро-бензоатгексаметиленимином (ДНБГМИ) – контактов $Al_п$-$Al_г$ существенно изменяется характер потенциодинамических поляризационных кривых. Из рис. 6.19 видно, что как для металлургического алюминия, так и для алюминия, необработанного ингибиторами, кривая имеет все характерные участки для пассивного металла: активную, активно-пассивную и транспассивную области.

При введении в коррозионную среду МНБГМИ исчезают области активного и активно-пассивного состояния, а токи полной пассивации становятся меньшими. Область полной пассивации сдвигается в положительную сторону ($\Delta E = 80$ мВ). Еще в большей степени этот сдвиг наблюдается при введении в коррозионную среду ДНБГМИ.

Влияние ингибиторов на коррозионную стойкость алюминиевого покрытия обусловлено адсорбцией ингибиторов на поверхности алюминия и ее последующей пассивации, возрастающей при увеличении их содержания. Защитные свойства ингибиторов были проверены на сварных контактах $Al_п$-$Al_г$, которые обрабатывали парами в эксикаторах. Было установлено, что обработка ингибиторами сварных контактов существенно повышает их коррозионную стойкость. Например, при обработке парами МНБГМИ (в течение суток) среднее время, необходимое для их разрушения в КПА возрастает до 80 ч, аналогичная обработка ДНБГМИ увеличивает это время до 85 ч.

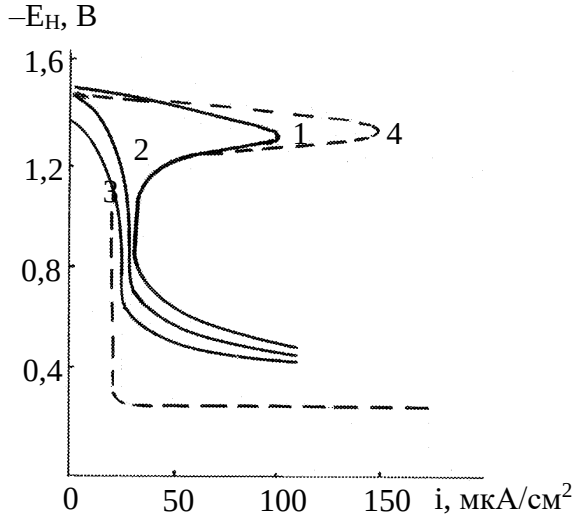


Рис. 6.19. Потенциодинамические кривые элекролитического алюминия (на меди), полученного из ксилольного электролита при $i_к$ = 1 А/дм^2 и $\tau_{эл}$ = 30 мин. Коррозионная среда – КПА: 1 – без ингибитора; 2 – 0,001М метанитробензоатгексаметиленимина; 3 – 0,001М 3,5-динитробензоатгексаметиле-нимина; 4 – алюминий марки А99,99

Таким образом, проведенные исследования показали, что в технологии производства ППИ в качестве технологических покрытий корпусов возможно использование гальванического алюминирования. Естественно, при оценке надежности данных контактов необходимо проведение дополнительных исследований при повышенных температурах, термоциклировании, под токовой нагрузкой, т. е. в режиме эксплуатации конкретных типов ППИ.

6.4. Исследование микросварных соединений алюминиевой проволоки с золотым гальваническим покрытием корпусов изделий электронной техники

Несмотря на то, что проводятся работы по замене золота на другие покрытия корпусов ППИ, данный металл широко ис-

пользуется в настоящее время в технологии и, по-видимому, будет использоваться и в будущем. В данном разделе обобщены основные результаты исследований соединений Al-Au, проведенных в разные годы. Следует отметить, что результаты исследований качества микросоединений Al-Au иногда расходятся. В некоторых случаях использовались упрощенные модели (без учета реальных факторов, происходящих в микросварных соединениях приборов). Трудность заключается и в сложности анализа столь малых объемов исследуемых материалов.

Основной недостаток работ по исследованию надежности микросварных соединений Al-Au – акцентирование внимания на анализе отказавших (деградировавших) соединений и определение на основании этого ожидаемого срока службы контактов. При этом для сокращения времени исследований испытания проводятся при высоких температурах.

6.4.1. Микросварные соединения Al-Au

Золото и алюминий имеют хорошую взаимную свариваемость при отсутствии толстых оксидных пленок на алюминии. Однако получаемые сварные соединения термодинамически неустойчивы из-за образования в контакте этих металлов низкотемпературных интерметаллических соединений. Последние появляются уже в процессе формирования сварного соединения как при термокомпрессионной сварке (ТКС), так и при ультразвуковой сварке (УЗС) и продолжают расти при повышенной температуре в процессе технологических обработок и эксплуатации приборов.

Установлено, что уже в процессе сварки образуется слой, состоящий из фаз $AuAl_2$, AuAl и Au_5Al_2. Рост этих фаз и всей диффузионной зоны происходит неравномерно и меняется вдоль сварного соединения. Известно, что фаза $AuAl_2$ при низкотемпературных отжигах образцов резко тормозит рост остальных фаз, т. е. играет барьерную роль, а неоднородность толщины барьерного слоя вызывает неравномерный рост других фаз в про-

цессе отжига. При высокотемпературном отжиге растут фазы богатые алюминием, а при низкотемпературном – фазы богатые золотом.

Например, при температурах отжига 250 и 300 °С в диффузионной зоне присутствуют в основном фазы $AuAl_2$, AuAl и Au_5Al_2, а при температуре 500 °С – AuAl и $AuAl_2$. Ни в одном из исследованных режимов в диффузионном слое не наблюдаются все фазы, допустимые для данной температуры диаграммой состояний.

Образование интерметаллических соединений в контактах золота с алюминием происходит уже при температуре 100 ºС. В начальный момент времени образуются кристаллы Au_2Al, позже появляется фаза $AuAl_2$, а при дальнейшей выдержке фаза Au_2Al уменьшается, пока в образце не остаются кристаллы пурпурного цвета $AuAl_2$. Процесс завершается более чем за 150 ч. Пурпурный цвет соединений золота с алюминием связан с образованием исключительно фазы $AuAl_2$. В результате взаимодействия контактирующих пленок золота и алюминия при температуре 150 °С и выше при соотношении толщин $\delta_{Au}/\delta_{Al} = 3$ кристаллов «пурпурной чумы» не обнаружено.

Установлено, что соотношение размеров проволоки и пленки влияет на качество сварных соединений. Например, если отношение ширины деформированной части алюминиевого вывода к толщине золотой пленки больше чем 4 сопротивление контакта незначительно изменяется. Таким образом, выбором соотношения толщин свариваемых материалов можно повышать надежность соединений.

Деградацию сварных соединений системы Al-Au можно существенно уменьшить легированием золотой пленки Pd и Ag, а также алюминиевой проволоки 1-2 % Pd или 1 % Be. Загрязнения золотой металлизации примесями Pb, Zn, Ta, Te, S, Co, Fe и т. д. значительно ускоряют диффузионные процессы в сварных соединениях. Отрицательное действие оказывает на деградацию сварных соединений и загрязнение поверхностей соединяемых элементов органическими веществами типа смолы и т. п.

Эксперименты по термообработке сварных контактов Al-Au в вакууме не показали явных отличий в росте интерметаллических фаз в сравнении с газовыми средами.

При оценке надежности микросварных соединений необходимо учитывать существенные различия физико-механических свойств интерметаллических соединений Al-Au от свойств чистых металлов (табл. 6.9).

Табл. 6.9. Физико-механические свойства интерметаллических соединений Al-Au и чистых металлов

Параметры	Соединения Al-Au и чистые металлы						
	Au	Au_4Al	Au_5Al_2	Au_2Al	AuAl	$AuAl_2$	Al
Постоянная решетки, Å	4,08	6,92	–	6,05	6,05	6,0	4,05
Удельное сопротивление, 10^6 Ом·см	2,3	37,5	25,5	13,1	12,4	7,9	3,2
Линейное расширение, 10^5 °C^{-1}	1,42	1,2	1,4	1,3	1,2	0,94	2,3

Основным механизмом отказа микросварных соединений Al-Au является нарушение механической целостности данных соединений, что обусловлено формированием пустот и микротрещин в контакте вследствие эффекта Киркендалла. Следует отметить, что в данных работах анализировали качество микросоединений, сформированных встык золотой проволокой с алюминиевой металлизацией. В этом случае толстый слой золота увеличивает интенсивность возникновения пустот Киркендалла, образующихся в пограничном слое золото – интерметаллиды.

Анализ литературных данных показал, что работы по исследованию соединений внахлестку алюминиевой проволоки с золотым гальваническим покрытием траверсов корпусов ППИ при температурных воздействиях и под токовой нагрузкой практически отсутствовали. Также не проводились работы по исследованию коррозионной стойкости данных контактов.

Температурная стойкость микросварных соединений Al-Au. При изготовлении, испытаниях и эксплуатации ППИ подвергаются различным температурным обработкам, влияющим

на структуру, механические и электрические свойства контактов Al-Au.

Для проведения исследований микросварных соединений алюминиевой проволоки с золотым покрытием траверсов ППИ образцы разваривались УЗС и ТКС. Для монтажа использовалась алюминиевая проволока диаметром 27 мкм марки А999К0,9 толщина золотого гальванического покрытия составляла 6-9 мкм.

ТКС проводилась на установке НВП-1А при следующих режимах: давление сварочного инструмента 2,2 Н, температура 350 °С и время 0,4 с. Контакты УЗС получены на установке УЛ71 при величине выходного напряжения ультразвукового генератора 40 В, усилия прижатия проволоки к пленке 0,4 Н, длительности импульса 0,05 с.

В результате металлографического анализа поперечных сечений соединений Al-Au было установлено, что непосредственно после ТКС в соединениях между алюминиевой проволокой и золотой пленкой образуется ровная прослойка интерметаллида толщиной 1-3 мкм (рис. 6.20, а). В соединениях, полученных УЗС, интерметаллидов обнаружить не удалось (рис. 6.20, б). После термотренировки, предусмотренной технологией производства ППИ, интерметаллиды примерно одной и той же толщины были выявлены в контактах, полученных ТКС и УЗС. Следует отметить, что в соединениях, образованных УЗС, они имели ярко выраженный островковый характер (рис. 6.20, в). Проведенные исследования показывают, что отказы в контактах Al-Au в большей степени связаны с механическими напряжениями, возникающими в сварном соединении и в структурах Al_xAu_y, из-за различия в коэффициентах термического расширения. Это хорошо видно на соединениях, полученных УЗС. Анализ поперечных сечений соединений Al-Au с помощью шлифов показал, что интерметаллиды, представляющие собой островки, при нагреве (или при эксплуатации приборов) увеличиваются в размерах, образуя зазор в сварном соединении, тем самым не только уменьшая прочность соединения, но и изменяя электрическое сопротивление контактов. Чем больше площадь

взаимодействия соединяемых металлов, например при ТКС, тем в меньшей степени проявляется эффект роста сопротивления контактов (рис. 6.20, г).

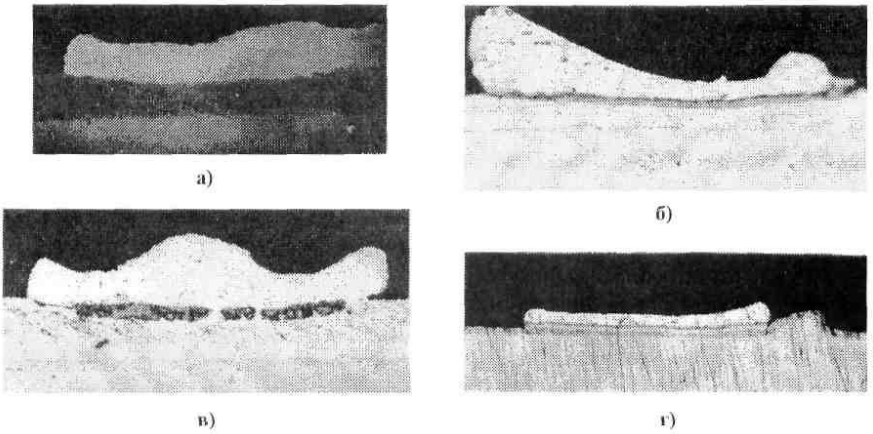


Рис. 6.20. Поперечные сечения микросоединений Al-Au: ультразвуковое (а) и термокомпрессионное (б) соединения после сварки; ультразвуковое (в) и термокомпрессионное (г) соединения после термотренировки при 125 °С в течение 96 ч. Увеличение 1200$^{\times}$ (а, б, в) и 800$^{\times}$ (г)

6.4.2. Термоэлектротренировка микросварных контактов Al-Au.

Для эксперимента использовались корпуса ИС типа «Схема-74» из ковара с золотым покрытием с подслоем из никеля и ситалловые подложки с золотым покрытием с подслоем из меди. Для каждого эксперимента изготавливались по 20 образцов. Соединения формировались алюминиевой проволокой марки АК09ПМ35 УЗС на установке УЛ71 и ТКС на установке СТ24 при режимах сварки, обеспечивающих получение максимальной прочности сварных соединений.

Термоэлектротренировка контактных соединений осуществлялась в течение 250 ч при температуре 125 °С и постоянном токе 0,5 А. Через каждые 10 ч проводился замер сопротивлений контактных соединений. Перед проведением измерений

сопротивлений образцы вынимались из печи, отключался ток электротренировки и образцы выдерживались при комнатной температуре. Наряду с этими измерениями осуществлялись металлографические исследования по поперечным шлифам до и после определенного цикла термоэлектротренировки. Для этих целей использовали микроскоп МИМ-8.

Характер изменения сопротивлений микросварных контактов, полученных УЗС, в процессе термоэлектротренировки приведен на рис. 6.21 видно, что в первые 10 ч термоэлектротренировки наблюдается уменьшение сопротивлений, а после 250 ч сопротивление практически достигает своих первоначальных значений.

Результаты металлографических исследований показывают, что во всех контактах Al-Au непосредственно после УЗС интерметаллидов на инструментальном микроскопе не обнаружено. На траверсах корпусов ИС в конце испытаний интерметаллиды занимают объем вплоть до никелевого покрытия (рис. 6.22, а), а на ситалловой подложке они образуются в виде тонкого слоя (рис. 6.22, б). Это, по-видимому, можно объяснить применением различных металлов, находящихся под слоем золотого покрытия.

В контактах Al-Au на ситалле после ТКС наблюдается зарождение микротрещин в области светлого интерметаллида, прилегающего к золотому покрытию (рис. 6.23, а), а после термоэлектротренировки – катастрофическое их развитие (рис. 6.23, б). Трещина в этом случае проходит не по границе с металлической пленкой, а несколько ниже под ней. При увеличении температуры сварки выше 380 °С некоторые контактные площадки отрываются от подложки в процессе сварки. Разрушение в этом случае происходит по ситаллу. Появление трещин в контакте и в ситалле под контактной площадкой зависит от коэффициентов термического расширения соединяемых материалов. Контактные площадки на ситалловой подложке играют роль локальных радиаторов, в силу этого в поверхностном слое ситалла имеет место перепад температур, что повышает внутреннее напряжение в ситалле, особенно в момент нагружения

сварочным инструментом. В зависимости от различных коэффициентов теплопроводности и линейного расширения ситалла и металлических элементов контактных площадок увеличивается напряжение, обусловливающее появление трещин и в микросварном контакте.

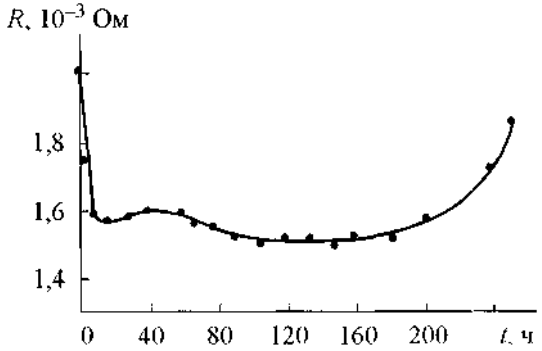


Рис. 6.21. Изменение сопротивлений микросварных контактов Al-Au на ситалле в процессе термоэлектротренировки

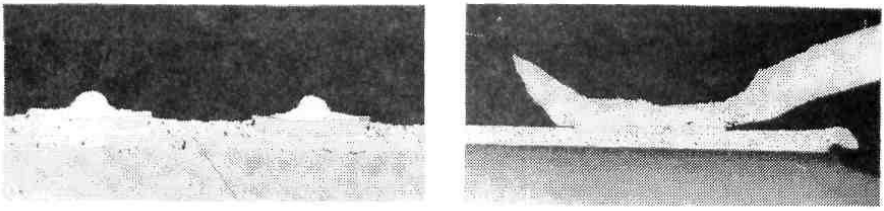
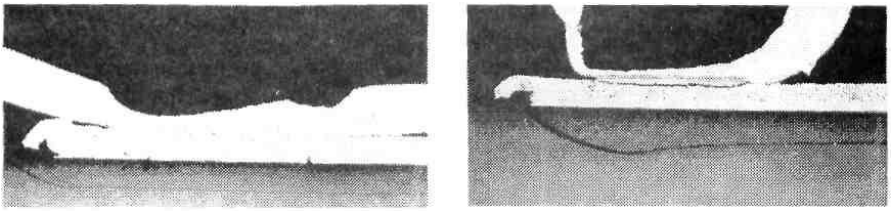


Рис. 6.22. Поперечные сечения микросоединений Al-Au, выполненных УЗС, после термоэлектротренировки в течение 250 ч: а – золотое покрытие с подслоем никеля на корпусе ИМС; б – золотое покрытие с подслоем меди на ситалле. Увеличение 500×



а) б)

Рис. 6.23. Поперечные сечения микросоединений Al-Au с подслоем меди на ситалле после ТКС (а) и после термоэлектротренировки в течение 250 ч (б). Увеличение 500×

При ТКС наблюдается некоторое повышение твердости пленки золота на ситалле. Повышение твердости золотого гальванического покрытия может быть обусловлено не режимом осаждения, а диффузией медного подслоя в пленку и на его поверхность. Так, в процессе термоэлектротренировки произошло покраснение золотого покрытия контактных площадок, а на некоторых из них наблюдалось потемнение.

Повышение сопротивлений контактов Al-Au на ситалле, образованных УЗС, после 160 ч термоэлектротренировки, по-видимому, связано с характером роста интерметаллидов. Чем более ярко выражен островковый характер роста интерметаллидов, тем в большей степени возрастает сопротивление такого контакта. Увеличение сопротивления в вышеуказанных контактах, по всей видимости, связано с зарождением и ростом микротрещин в прослойке интерметаллида. Трещины, возникающие по периметру сварного соединения, вызывают изоляцию проволоки от места сварки и повышают не только электрическое сопротивление, но и снижают прочность соединений. На снижение прочности соединений существенное влияние оказывает и отжиг проволоки при испытаниях.

В соединениях на траверсах (золото с подслоем никеля) сопротивление стабильно в процессе всего времени термоэлектротренировки. Трещин в контактах не обнаружено. Следует отметить, что при изготовлении ППИ используется алюминиевая проволока, легированная 0,9 % Si. Добавка кремния, естественно, оказывает определенную роль на металлургические

процессы в сварном соединении. Кроме того, толщина золотого покрытия на корпусах ИС (особенно на контактных площадках траверсов транзисторов) может колебаться в пределах нескольких микрометров.

Определенный вклад в формирование различных фаз Al_xAu_y вносит перенос металла в результате электромиграции.

6.4.3. Повышение коррозионной стойкости микросоединений Al-Au.

Надежность ППИ невозможна без обеспечения стойкости микросоединений к воздействию атмосферных условий (температура, влажность и т. д.). Наиболее опасной по своим последствиям является локальная коррозия. Одним из видов локального коррозионного разрушения металлов и сплавов является контактная коррозия. Контактной или гальванической коррозией называют усиление коррозии одних металлов при их контакте с другими. Немаловажным фактором, определяющим величину контактной коррозии, является характер среды, поскольку значения электродных потенциалов, степень поляризуемости катода и анода, токи обмена и другие электрохимические параметры процесса зависят от природы электролита. Так как при герметизации ППИ исключить попадание паров воды в корпус не удается, то понижение температуры даже на 10 °С относительно той, при которой проводилась герметизация, неизбежно приведет к появлению конденсированной влаги на внутренней поверхности приборов и схем.

Для оценки качества микросоединений в технологии производства ППИ разработан экспресс-метод оценки качества микросоединений испытаниями на коррозию. Установлено, что к ускорению коррозионного разрушения контактных соединений Al-Au могут приводить нарушения как технологического, так и конструктивного плана. Завышение давления инструмента и температуры процесса сварки влечет за собой получение так называемых «передавленных» сварных микросоединений.

Сильное натяжение проволоки и касание при этом траверсы будут создавать благоприятные условия для развития щелевой коррозии.

Чтобы установить влияние режимов сварки и воспроизводимости конструкции микросоединений на коррозионную стойкость контактов, были изготовлены две партии образцов с алюминиевой перемычкой с траверсы на траверсу (прибор 2Т312). Первая партия была выполнена с петлей оптимальной формы и строгим соблюдением режимов ТКС, а вторая – с нарушением на одной из траверс (например, различия в натяжении проволоки, в ее деформации при сварке и др.).

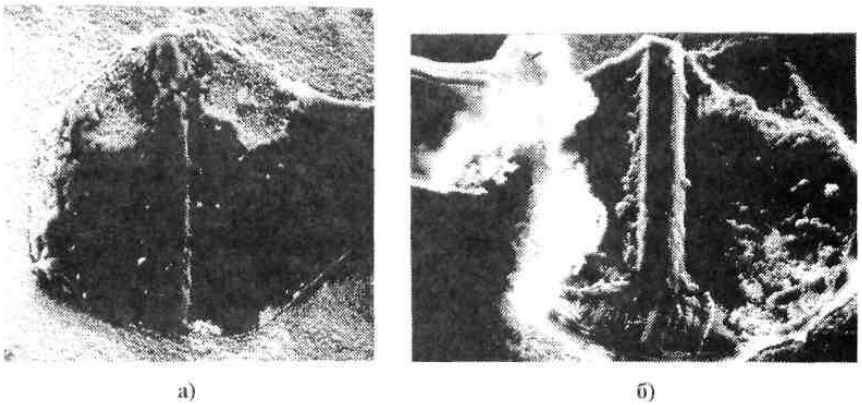
Ускоренные испытания этих двух партий в электролите, имитирующем конденсат промышленной атмосферы (КПА), показали, что скорость коррозионного разрушения контактов второй партий в 3-5 раз выше, чем первой. Основной причиной выхода из строя образцов второй партии было нарушение контактов на одной из траверс. На основании этого следует, что отклонения от оптимальных технологических режимов образования микросоединений способствуют значительному ускорению коррозионного разрушения контактов Al-Au.

Исследования показывают, что коррозионный потенциал пары Al-Au нестабилен во времени. Это обусловлено неустойчивым пассивным состоянием анодной составляющей, т. е. алюминиевой проволоки. Повысить коррозионную стойкость алюминиевой проволоки можно легированием ее коррозионностойкими компонентами или предварительной обработкой алюминиевой проволоки ингибиторами коррозии. Для защиты алюминия и его сплавов от коррозии в водных нейтральных растворах солей, а также в воздушной (газовой) среде предложено большое число ингибиторов.

С целью повышения коррозионной стойкости микросварных соединений Al-Au исследовался летучий ингибитор коррозии алюминия – гексаметиленимин (ГМИ). Исследованиям подвергались 40 контактов (20 без предварительной обработки ингибиторами и 20 после обработки парами ГМИ). Образцы изго-

тавливали ТКС алюминиевой проволоки марки АК09ПМ30 к золотым покрытиям корпусов.

Испытываемые контакты обрабатывали в парах ингибиторов и их смесей в эксикаторах в течение трех суток, а затем проводили ускоренные испытания. С этой целью контакты погружали в электролит, имитирующий КПА (моль/л): 0,01NaCl + $0{,}001Na_2SO_3$ + $0{,}001Na_2SO_4$. Эффективность защитных свойств оценивали по времени полного разрушения контакта, фиксируемого по разрыву электрической цепи, в которую они были включены. Внешний вид микросварного контакта оценивался с помощью электронного микроскопа. На рис. 6.24 показан внешний вид микросоединений Al-Au при испытаниях на коррозионную стойкость.



а) б)

Рис. 6.24. Внешний вид микросоединений Al-Au в процессе испытаний в КПА (продукты коррозии удалены): а – частичное разрушение; б – полное разрушение. Увеличение 1000×

Анализ разрушения контактов Al-Au, не обработанных парами ингибиторов, показал, что коррозия протекает непосредственно в зоне сварного соединения. Время до отказа микросоединений Al-Au при их полном погружении в коррозионную среду составляет от 10 до 50 мин.

Обработка микросварных соединений Al-Au парами ГМИ увеличивает среднее время отказа до 260 мин. Коррозионный

потенциал пары Al-Au смещается в положительную область и стабилизируется, что подтверждает повышение устойчивости анодной компоненты. Алюминий переходит в пассивное состояние, которое обусловлено адсорбцией ингибитора за счет содержащихся в его составе азотсодержащих имино- и нитрогрупп.

Для подтверждения полученных результатов были проведены контрольные испытания. На рис. 6.25 представлена гистограмма разрушения микросоединений Al-Au, предварительно обработанных парами ГМИ. Ускоренные испытания, проведенные при температуре 40 °С и 100 %-ной влажности, показали, что после обработки в парах ГМИ коррозионная стойкость микросоединений Al-Au возрастает примерно в 25 раз.

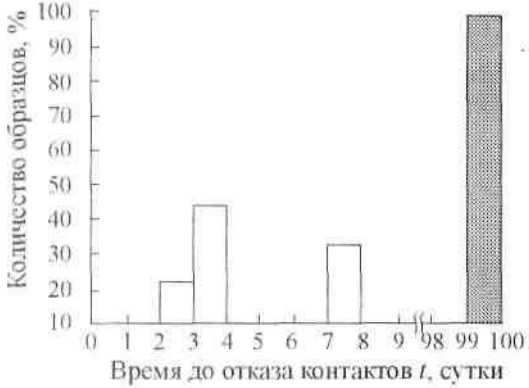


Рис. 6.25. Гистограмма коррозионной стойкости контактов Al-Au при температуре 40 °С и 100 %-ной влажности: ▭ – без обработки ингибитором; ▩ – с обработкой парами ГМИ

6.5. Микросварные соединения алюминиевой проволоки в корпусах ППИ с покрытиями из никеля и его сплавов

На нужды электронной промышленности в конце 70-х годов расходовалось около 80 % золота, используемого в мире для технических целей. Из этого количества золота 90 % приходилось на технологическое покрытие корпусов или их участков.

При разработке конструкций и технологии монтажа микросоединений в ППИ без золота целесообразно использовать существующее в полупроводниковой микроэлектронике технологии и оборудование.

В связи с дефицитом драгоценных металлов и резким увеличением объемов выпуска приборов проводились мероприятия, направленные на сокращение использования золота, но при этом обязательным условием являлось сохранение качества и надежности приборов. Работы по экономии золота можно разделить на три группы:

1) минимизация толщины гальванических покрытий путем совершенствования электролиза;

2) применение локального или локально-дифференцированного покрытия, позволяющего получать необходимую толщину золота только на функциональных участках корпусов;

3) замена золотого покрытия другими недефицитными металлами.

Использование первого метода дает незначительный эффект, так как толщина золотого покрытия уже минимизирована в большинстве конструкций микроприборов. В настоящее время широко используется второй метод, однако основное внимание исследователей направлено на полную замену драгоценных и дефицитных металлов в конструкциях корпусов.

6.5.1. Микросварные соединения к корпусам с покрытиями Ni и его сплавами

В производстве ППИ постоянно ведутся работы по изучению возможности применения металлизации корпусов никелем и его сплавами, алюминированию, использованию медной рамки и металлизации на основе медных паст, а также комбинированных покрытий корпусов. Для получения никелевой металлизации корпусов, отвечающей требованиям микросварки, необходимо внедрение новых электролитов никелирования с добав-

ками, повышающими температурную стойкость покрытия, например, сплав никель – бор. Никелировать можно и некоторые типы серийно выпускаемых корпусов, но только после соответствующей доработки, снижающей их шероховатости поверхности контактных площадок.

Вакуумное алюминирование и алюминиевая плакировка пригодны только для пластмассовых и металлостеклянных корпусов, поэтому не решают проблему замены золота на корпусах приборов повышенной надежности. Внедрение гальванического алюминирования сдерживается сложностью технологического процесса покрытий из расплава солей, а также отсутствием соответствующего серийного оборудования для этих целей.

Применение медных рамок и медных покрытий сильно усложняет технологический процесс сборки и может снижать надежность приборов из-за быстрого окисления меди, роста сульфидов и низкой коррозионной стойкости, особенно в контакте с алюминиевым выводом.

Анализ пленочной металлизации показал, что пленки никеля и его сплавов, а также алюминия являются наиболее перспективными технологическими покрытиями корпусов ППИ. Следует отметить, что соединения алюминиевой проволоки с алюминиевым покрытием корпусов ППИ характеризуются нестабильностью как при сварке, так и при технологических испытаниях по причине низкого качества алюминиевых покрытий. Технологический процесс гальванического алюминирования корпусов достаточно сложен, структура покрытий неодинакова у различных партий корпусов, полученных на одних и тех же режимах, что недопустимо в условиях массового производства ППИ.

Из вышеприведенного следует, что в настоящее время наиболее технологичными покрытиями корпусов ППИ являются никель и его сплавы. Известно, что качественные соединения Al-Ni формируются в основном ультразвуковой сваркой (УЗС) при отсутствии на никеле оксидных пленок толщиной более 0,005-0,007 мкм и значительной площади взаимодействия контактируемых материалов, т. е. при малой шероховатости по-

верхности пленочной металлизации (R_a = 0,32-0,16 мкм). Это связано с большей микротвердостью никеля по сравнению с алюминием, что практически исключает пластическую деформацию покрытия при сварке.

Исследования прочности соединений Al-Ni. Как отмечалось выше, качество микросоединений Al-Ni, выполненных УЗС, существенно зависит от состояния никелевых пленок и технологии их получения.

Для оценки прочности сварных соединений алюминиевой проволоки с различными никелевыми покрытиями были изготовлены две партии образцов:

• партия 1 – основания, покрытые химическим способом слоем никеля толщиной 2-3 мкм;

• партия 2 – основания, покрытые электрохимическим способом слоем никеля толщиной 3-6 мкм.

В качестве материала внутренних выводов использовалась алюминиевая проволока АК09ПМ35, которая присоединялась к никелевым пленкам УЗС. Режимы сварки подбирались для каждой партии образцов исходя из условий получения максимальной прочности сварных соединений.

По результатам контроля 100 микросварных контактов от каждой партии образцов построены гистограммы распределения прочности микросоединений алюминиевой проволоки с различными никелевыми покрытиями (рис. 6.26). Никелевое покрытие обеспечивает удовлетворительную прочность сварных соединений с алюминиевым проволочным выводом только при достаточной площади физического контакта. Увеличить площадь контакта вывода с пленкой можно за счет повышения чистоты поверхности никелевых покрытий. Повышение чистоты поверхности осуществляется введением операции химического или электрохимического полирования до осаждения слоя никеля. Затем никелевые пленки наносятся химическим или электрохимическим способами.

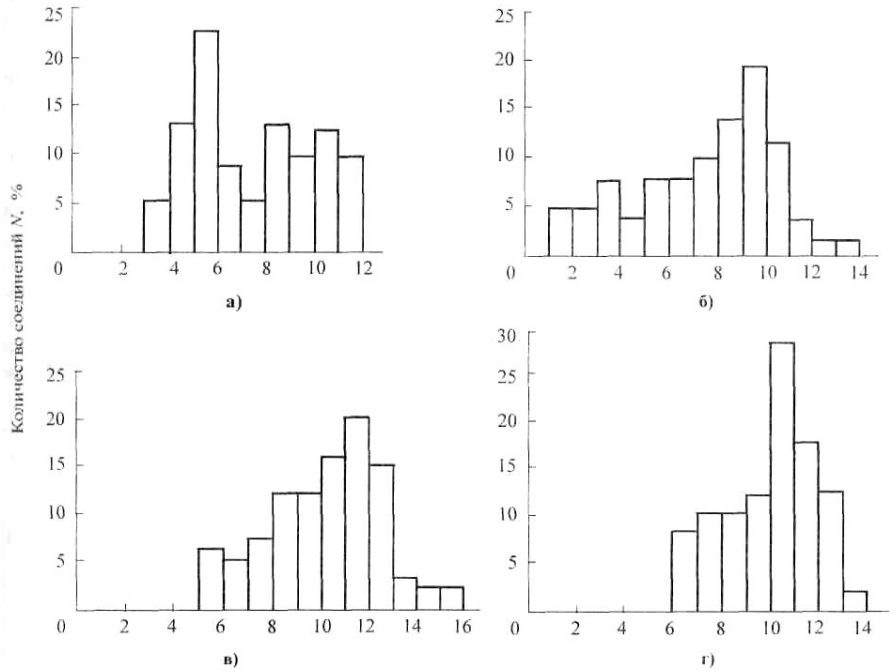


Рис. 6.26. Гистограммы распределения прочности микросварных соединений, выполненных УЗС, алюминиевой проволоки с различными никелевыми покрытиями: а – химическое никелирование; б – электрохимическое никелирование; в – химическое полирование поверхности с последующим электрохимическим никелированием; г – электрохимическое полирование поверхности с последующим электрохимическим никелированием

Для оценки влияния подготовки поверхности на прочность микросварных соединений были изготовлены еще две партии образцов:

• партия 3 – основания с предварительной химической полировкой поверхности и последующим электрохимическим осаждением слоя никеля толщиной 3-6 мкм;

• партия 4 – основания с предварительной электрохимической полировкой поверхности и последующим осаждением слоя никеля из того же электролита и той же толщины, что и для партии 3.

Таким образом, установлено, что УЗС алюминиевой проволокой по покрытиям, полученным электрохимическим никелированием с предварительной электрохимической полировкой поверхности, повышает прочность микросварных соединений Al-Ni в среднем на $(2\text{-}4)\cdot 10^{-2}$ Н по сравнению с покрытиями, полученными химическим и электрохимическим никелированием без предварительной подготовки поверхности (рис. 6.26, г).

Исследование коррозионной стойкости микросоединений алюминиевой проволоки с покрытиями из никеля и его сплавов. Для проведения коррозионных испытаний были изготовлены образцы – корпуса из сплава железо – никель, покрытые слоем гальванического никеля и сплавами никеля с бором, индием и фосфором. Сплавы никеля с бором и индием наносились гальваническим способом, а сплав никеля с фосфором – химическим. Для сравнения испытывались образцы с золотым гальваническим покрытием.

Формирование микросварных соединений алюминиевой проволоки с покрытиями из золота, гальванического никеля, сплавов никеля, легированного бором, индием, фосфором, осуществляли УЗС на установке УЗСМ-2,5. При этом одной перемычкой проволоки марки АК09ПМ35 соединялись две изолированные площадки каждого корпуса. Для исследований использовалось по 50 корпусов с различными покрытиями.

Коррозионные испытания проводили путем погружения исследуемых контактов в электролит, имитирующий конденсат промышленной атмосферы (КПА), следующего состава (моль/л): $0{,}01NaCl + 0{,}001Na_2SO_3 + 0{,}001Na_2SO_4$.

Кинетику разрушения контактов изучали кондуктометрическим методом с помощью омметра с одновременным измерением потенциала коррозионной пары высокоомным вольтметром ВК2-22. О степени разрушения контактов судили по измерению электросопротивления, а также визуально с помощью микроскопа МБС-1. При полном разрушении контакта электросопротивление резко возрастало с 0,15 Ом до 1 кОм.

Электрохимические измерения исследуемых материалов проводились потенциодинамическим методом на потенциостате

П-5827М с использованием самопишущего потенциометра КСП. Электрод сравнения – насыщенный хлорсеребряный (ХСЛ), вспомогательный – из платины.

В табл. 6.10 приведены результаты коррозионных испытаний микросоединений алюминиевой проволоки с покрытиями из никеля и его сплавов.

Табл. 6.10. Стационарный потенциал $E_{ст}$, среднее время разрушения $\tau_{ср}$ и ток коррозии $I_{кор}$ сварных контактов алюминиевой проволоки с покрытием из никеля, его сплавов и золота в КПА

Контакт	$E_{ст}$, В	$\tau_{ср}$, ч	$I_{кор}$, мкА/см^2
Al-(Ni+P)	-0,35	49	2
Al-(Ni+Jn)	-0,39	45	7
Al-(Ni+B)	-0,41	41	11
Al-Ni	-0,44	28	17
Al-Au	-0,32	0,5	39

Из табл. 6.10 видно, что среднее время полного разрушения микросоединений в КПА существенно различается в зависимости от материала покрытия. Наименьшее значение тока коррозии (2 мкА) получено для никеля, легированного 2-4 %-ным фосфором (химический способ нанесения покрытия). Электрохимическое легирование никеля индием и бором повышает ток коррозии. Несколько большее значение тока коррозии наблюдается для гальванического никеля – 17 мкА/см^2, а для золотого покрытия – 39 мкА/см^2. Это обусловлено большой пористостью покрытия и уменьшением поляризуемости. Наименее пористые покрытия получаются для никеля, легированного фосфором, что объясняет снижение тока коррозии.

6.5.2. Стойкость микросварных соединений Al-Ni к температурным воздействиям и под токовой нагрузкой.

Одним из методов ускоренных испытаний микросоединений ППИ является оценка их стойкости к повышенным температурам и под токовой нагрузкой.

Для исследований термостойкости микросоединений Al-Ni испытания проводились в термошкафу при температуре 350±10 °С в течение 12 ч. В качестве образцов использовались корпуса микросхемы типа 401.14-3 с никелевым покрытием толщиной 5мкм, а для соединительных проводников – алюминиевую проволоку марки АК09ПМ30. Монтаж осуществлялся УЗС на установке УЗСМ-2,5 при режимах, обеспечивающих получение максимальной прочности сварных соединений. Для исследований разварено две партии образцов по 100 в каждой.

Визуальный контроль образцов в процессе термообработки проводился через каждый час под микроскопом ММУ-3. Изменение внешнего вида сварных соединений Al-Ni под микроскопом не обнаружено. Результаты замеров прочности микросварных соединений алюминиевой микропроволоки с никелевым покрытием после сварки и после термообработки контактов представлены на рис. 6.27. Из рисунка видно стабильное снижение прочности сварных соединений после термообработки на 2-10 Н.

Никелевые пленки (в некоторых изделиях золотые) используются на контактных площадках ситалловых подложек в микросборках. Анализ соединений Al-Ni показал, что отказы этих контактов возникают при эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

В данной работе приведены результаты исследований качества микросоединений, полученных УЗС и термокомпрессионной сваркой (ТКС), алюминиевой проволоки с никелевыми гальваническими покрытиями на ситалловых подложках в процессе термоэлектротренировки.

Для экспериментов использовались ситалловые подложки с никелевыми гальваническими покрытиями. С помощью скрайбера ситалловые пластины с контактными площадками разделялись на кристаллы заданных размеров.

Для формирования и исследования микроконтактов алюминиевой проволоки с никелевым гальваническим покрытием на ситалловой подложке кристаллы с контактными площадками размерами 0,3×0,3 мм присоединялись высокотемпературным

клеем ВК32-200 в корпус ИС. Сушку клея проводили ступенчато: 2 ч при Т = 170 °С и 1 ч при Т = 300 °С. Это позволило проводить разварку контактов термокомпрессией. Для каждого эксперимента использовалось по пять корпусов ИС, т. е. было сформировано по 10 перемычек и, следовательно, по 20 сварных контактов. Соединения формировались алюминиевой проволокой марки АК09ПМ35 УЗС на установке УЛ71 и ТКС на установке СТ24 при режимах, обеспечивающих получение максимальной прочности сварных соединений.

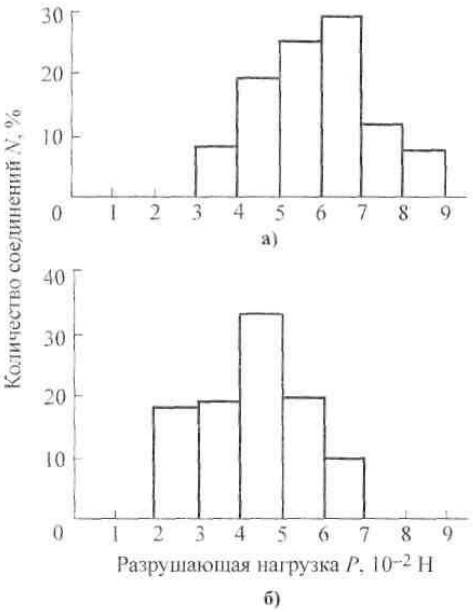


Рис. 6.27. Гистограммы распределения прочности микросварных соединений Al-Ni: а – после сварки; б – после термообработки при температуре 350 °С в течение 12 ч

Эксперименты проводились в течение 250 ч при температуре 125 °С и постоянном токе 0,5 А. Через определенные промежутки времени осуществлялся замер сопротивлений сварных микроконтактов. Перед проведением измерений сопротивлений образцы вынимались из печи, отключался ток электротрениров-

ки и проводилась выдержка их при комнатной температуре. Наряду с этими измерениями проводились металлографические исследования по поперечным шлифам до и после определенного цикла термоэлектротренировки. Для этих целей использовали микроскоп МИМ-8.

В процессе экспериментов установлено (рис. 6.28), что сопротивления контактов Al-Ni практически не изменяются в процессе 250 ч термоэлектротренировки. Под инструментальным микроскопом не обнаружено наличия ин-терметаллидов в данных микросоединениях, выполненных как ТКС, так и УЗС, ни после сварки, ни в процессе термоэлектротренировки. Следует отметить, что в соединениях после ТКС на некоторых образцах наблюдались трещины в ситалле под контактом.

Таким образом, эксперименты показали, что соединения алюминиевой проволоки по никелевому покрытию на ситалловых подложках, выполненные УЗС, обеспечивают стабильное качество данных контактов и могут быть рекомендованы в производство РЭА.

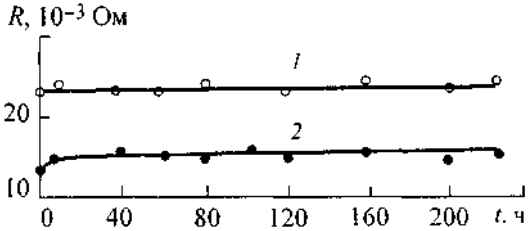


Рис. 6.28. Изменение сопротивлений микросварных контактов Al-Ni, выполненных ТКС (1 и УЗС (2), в процессе термоэлектротренировки

6.5.3. Свариваемость алюминиевой проволоки с никель-бор покрытием при термообработке.

Существенным недостатком пленок из чистого никеля является их низкая теплостойкость, поэтому данные покрытия применимы только при низкотемпературном монтаже элементов или при использовании защитной среды. В процессе напайки кристаллов к корпусу происходит окисление никелевого покры-

тия, что резко ухудшает свариваемость алюминиевой микропроволоки с пленочными площадками.

Легирование никеля бором значительно повышает температурную стойкость сплава даже при малой концентрации бора, а микротвердость и хрупкость покрытия можно уменьшать путем отжига.

Авторами проводилось исследование свариваемости покрытия никель – бор с алюминиевой микропроволокой УЗС после температурного воздействия в диапазоне возможных технологических обработок в процессе изготовления микросборок. В качестве подложек использовали корпуса микросборок, выводная рамка которых изготовлена из ферроникеля (42Н). Толщина исследуемых покрытий составляла 3-5 мкм. Исходная концентрация бора в покрытии определялась химическим способом по известной методике и методом Оже-спектрального послойного анализа и составляла 0,7-1,2 %. Температурное старение образцов проводили на воздухе в диапазоне температур 300-500 °С в течение 15-60 мин.

Приварка алюминиевых проводников марки АК09ПМ35 осуществлялась УЗС на установке УЗСМ-2,5. Режимы сварки подбирали опытным путем исходя из условия получения максимальной прочности сварных соединений.

Контроль прочности сварных соединений осуществлялся на установке типа 12МП-0,05/100-1 натяжением вывода под углом 45° к плоскости сварного соединения до разрушения контактов. Для исследований использовалось 100 проволочных перемычек от каждой группы образцов.

Оценка свариваемости никель-бор покрытий проводилась по средним значениям прочности $P_{ср}$ сварных соединений. Коэффициент вариации K_v, характеризующий воспроизводимость качества сварных соединений, определялся по известной формуле:

$$K_v = (\sigma_{ср}/P_{ср})\cdot 100\ \%,$$

где $a_{ср}$ – среднее квадратичное отклонение значений.

Эксперименты показали (рис. 6.29), что свариваемость покрытий Ni+1%B практически не изменяется после выдержки

при температуре 300 °С в течение 90 мин. После нагрева при температуре 400 °С происходит медленное ухудшение свариваемости, а при 450-500 °С – сначала ухудшение свариваемости (после термообработки покрытий в течение 15 мин), а затем стабилизация ее на этом уровне (в течение 15-30 мин), после чего происходит резкое ухудшение свариваемости. На образцах, подвергавшихся температурной обработке при 450-500 °С более 30 мин, наблюдались случаи разрушения сварных соединений по зоне контакта («отслоение») как в процессе сварки, так и при контроле прочности сварных соединений. Количество таких разрушений изменялось пропорционально времени обработки и колебалось от 6 до 20 %. Подбор режимов сварки (увеличение амплитуды и мощности колебаний, времени сварки, а также изменение давления инструмента) не позволил значительно улучшить свариваемость и исключить «отслоения».

Методом оже-спектроскопии поверхностного слоя толщиной 250-300 Å никель-бор покрытия установлено, что при нагреве выше 300 °С происходит диффузия бора на поверхность покрытия, содержание которого достигает 5,5 % при 500 °С, что ухудшает пластичность покрытия, необходимую для формирования сварных соединений. Термообработка в течение 45-60 мин при температуре 500 °С приводит к растрескиванию покрытия, т. е. начинает окисляться никель, что подтверждается быстрым увеличением содержания кислорода в поверхностном слое покрытия. В результате резко снижается прочность сварных соединений и их воспроизводимость.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что нанесенное электрохимическим способом покрытие сплавом Ni+1 % B имеет удовлетворительную свариваемость методом УЗС с алюминиевой проволокой после нагрева при температуре 400 °С в течение 60 мин и при температуре 450-500 °С в течение 30 мин. Указанные время и температура перекрывают реальные режимы, применяемые при монтаже кристаллов в корпуса.

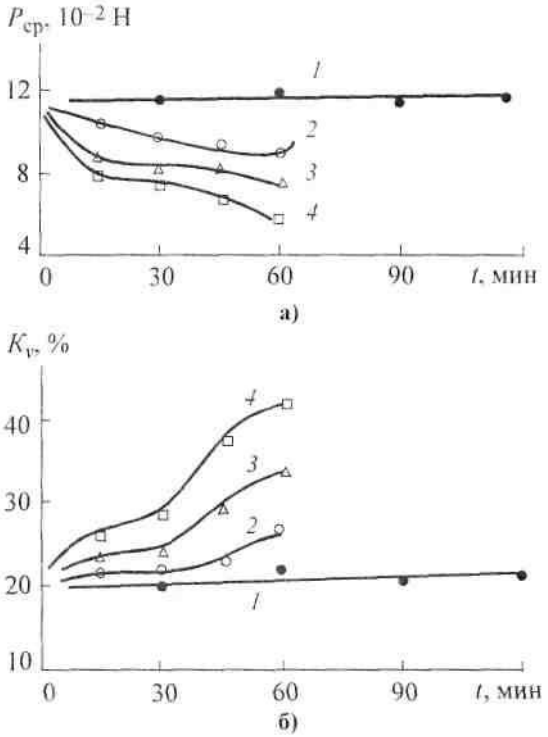


Рис. 6.29. Среднее значение прочности $P_{ср}$ (а) и воспроизводимость K_v (б) качества микросоединений алюминиевой проволоки с никель-бор покрытием корпусов в зависимости от времени отжига покрытий перед сваркой при различных температурах, °С: 1 – 300; 2 – 400; 3 – 450; 4 – 500

Внедрение покрытия Ni+1% B на рамках стеклокерамических корпусов типа 401.14 позволило на 40-50 % повысить стабильность микросоединений по прочности.

6.6. Оптимизация режима ультразвуковой сварки алюминиевой проволоки с серебряным гальваническим покрытием корпусных деталей СПП

В производстве ППИ в качестве покрытий корпусов широко используют такие металлы как золото, никель и его сплавы и др.

К покрытиям предъявляются следующие требования:

• они должны обеспечивать хорошую паяемость с полупроводниковыми кристаллами и свариваемость с внутренними выводами;

• сохранять способность к пайке и сварке при заданном сроке хранения; обеспечивать антикоррозионную защиту;

• не подвергаться иглообразованию при хранении и разрушению при температурах сборки, испытании и эксплуатации;

• обеспечивать минимальное переходное электрическое сопротивление;

• быть устойчивыми к тепловому удару при монтаже приборов на печатные платы пайкой, к химическим реагентам, используемым в процессе сборки;

• обеспечивать адгезию компаунда при герметизации прибора опрессовкой полимером.

В полупроводниковой микроэлектронике серебрение используется для создания функциональных покрытий с высокой электропроводностью и стабильной величиной переходного сопротивления в местах контактов. Серебряные покрытия, полученные из обычных электролитов, характеризуются малой твердостью и незначительной износостойкостью. Для улучшения этих параметров в электролит при серебрении вводят соли никеля или кобальта. В этом случае твердость покрытия повышается в 1,5, а износостойкость – почти в 3 раза.

Серебрение деталей корпусов в практике производства ППИ, в т. ч. силовых, находит ограниченное применение из-за нестабильности качества сборочных операций. Особенно критичным является процесс формирования сварных соединений

алюминиевой проволоки с серебряным покрытием траверс корпуса.

В производстве некоторых типов СПП серебро используется в качестве технологического покрытия паяемой стороны кристалла и корпуса. В первом случае осуществляется напыление пленки серебра на пластины с кристаллами, во втором нанесение серебряного покрытия на корпуса проводят гальваническим способом только на участки под пайку кристаллов и разварку внутренних выводов.

Снижение качества сборочных операций по серебряному покрытию происходит из-за наличия сульфидной пленки Ag_2S на поверхности. Следует отметить, что сульфид серебра не всегда формируется в виде пленок. В некоторых случаях на серебряном покрытии вырастают тонкие копьевидные кристаллы длиной до 3-5 мм, способные приводить к короткому замыканию близлежащих цепей или их размыканию при пониженных температурах. Начало роста нитевидных кристаллов Ag_2S происходит на границе раздела фаз $Ag\text{-}Ag_2S$, его росту способствуют повышенная влажность и нагрев. Известно, что рост кристаллов сульфида серебра происходит из-за повышенной миграции ионов серебра к активным центрам и высокой подвижности их в присутствии влаги, адсорбируемой пленкой сульфида.

Таким образом, исследования по отработке технологии сварки алюминиевой проволоки с серебряным покрытием корпусных деталей ППИ актуальны и принципиально важны для создания изделий с таким покрытием. Результаты исследований могут быть успешными при учете всех особенностей и свойств серебряного покрытия, наносимого наиболее производительным гальваническим способом, и выборе приемлемого способа подготовки (очистки), деталей корпуса к сборочным операциям.

6.6.1. Серебряное покрытие

Серебро обладает чрезвычайно высокой чувствительностью к окружающей воздушной среде. В атмосферных условиях

происходит потемнение серебряного покрытия. Ионы серебра вступают в реакции с другими ионами с образованием трудно-растворимых соединений, например сульфида серебра Ag_2S.

Известно, что серебро обладает большим сродством к ионам серы, что объясняет образование сульфида серебра даже с незначительным их количеством. Присутствие сероводорода в атмосфере активизирует образование на поверхности серебра сульфида серебра

$$4Ag + 2H_2S + O_2 \rightarrow 2Ag_2S + 2H_2O.$$

При нагреве Ag_2S в ампуле без доступа воздуха при температуре выше 350 ºС происходит частичная его диссоциация с образованием нитей серебра. В присутствии воздуха Ag_2S при нагреве окисляется до сульфата серебра (Ag_2SO_4). Сульфид серебра восстанавливается до металла водородом при температуре выше 200 ºС.

В атмосфере чистого сухого воздуха серебро не меняет внешний вид. Оптическими исследованиями установлено, что на воздухе поверхность серебра покрывается тонкой пленкой оксида толщиной до 1,2 нм. При нагревании серебра в атмосфере кислорода до 300-400 ºС образуется более толстая пленка оксида Ag_2O, имеющая темно-бурый цвет. При избыточном давлении кислорода (до 20 МПа) и повышенных температурах серебро может окислиться полностью.

Основной трудностью сборочных операций по серебряному покрытию является наличие сульфидной пленки Ag_2S на поверхности. Пайка низкотемпературными припоями по серебряным покрытиям требует тщательной подготовки соединяемых деталей ППИ. Образование сульфидных пленок при хранении корпусов ППИ может привести к полной потере паяемости серебра.

Сульфид серебра Ag_2S может образовываться также и при непосредственном воздействии сероводорода на серебро. Известно, что Ag_2S может существовать в трех модификациях: α-модификации, устойчивой до температуры 110 ºС, β-модификации, устойчивой в интервале температур 90-175 ºС, и γ-модификации, образующейся при температурах, превышаю-

щих 175 ºС. Проводимость сульфида серебра резко меняется с температурой, при температуре 26 ºС она незначительна.

При понижении температуры электрическое сопротивление пленок Ag_2S увеличивается и они становятся электроизоляционными. Образование сульфидных пленок при хранении кристаллов или корпусов с серебряными покрытиями может привести к полной потере паяемости серебра оловянно-свинцовыми припоями. При температуре 175 ºС и выше проявляется металлический характер проводимости. В силу этого контактная пара может удовлетворительно работать при повышенных температурах при наличии плотной и прочно сцепленной сульфидной пленки с поверхностью покрытия. В то же время следует помнить, что термообработка серебряных гальванических покрытий при температуре 400 ºС приводит к их отслаиванию от основы.

С точки зрения электропроводимости Ag_2S является полупроводником n-типа проводимости. Наивысшей проводимостью обладает Ag_2S в γ-модификации при температуре выше 178 ºС. Из фазовой диаграммы системы Ag-S видно, что при температуре выше 178 ºС происходит изменение в структуре от $\alpha - Ag_2S$ к $\gamma - Ag_2S$. Этот переход сопровождается изменением внешнего вида потемневшего покрытия при нагреве.

6.6.2. Подготовка корпусов с серебряным покрытием к сборочным операциям

Для очистки серебряных покрытий применяют различные методы: механические, химические и электрохимические.

Из механических методов наиболее простым является очистка покрытий, заключающаяся в легком полировании смесью, состоящей из 40 г мыльной стружки, 60 г карбоната аммония, 100 г кизельгура (инфузорной земли), 60 г кремнистого мела ($CaSiO_3$) и 1 л воды. Сульфидную пленку удаляют путем полирования или нагревания металла до 400 ºС. При этой температуре Ag_2S разлагается.

Наиболее эффективными химическими методами обработки являются следующие:

1. Обработка поверхности в горячем щелочном растворе (10 %-ном растворе соды). По данной технологии обрабатываемые изделия погружают в раствор вместе с кусочками алюминия, выделяющийся при этом водород восстанавливает Ag_2S.

2. Сульфидная пленка Ag_2S растворяется в следующем растворе: 80 г тиомочевины, 10 г серной кислоты и 1 л воды. При pH 0,5 реакция протекает очень быстро.

Механическое удаление и химическое растворение сульфидной пленки, например, в азотной кислоте или в цианидных растворах не предотвращают процесса повторного образования Ag_2S.

Сульфидные пленки Ag_2S не растворяются существующими флюсами, поэтому посеребренные изделия под пайку необходимо защищать, например, с помощью полиуретанового лака.

Для предохранения от потускнения серебряные изделия обрабатывают в течение 3-6 мин в растворе бихромата натрия (100 г/л), хромовой кислоты (0,5 г/л) или применяют катодную обработку в электролите состава, г/л: хромовая кислота – 50, серная кислота – 10. Время обработки 1-5 мин, напряжение 6 В, температура ванны 20-25 ºС.

Повышение временной защиты серебряного покрытия обеспечивают обработкой в растворе, содержащем 10-14 г/л бензотриазола, 30-50 мл/л этилового спирта и до 1 л воды, при 35-45 ºС в течение 30 мин. При такой обработке не изменяются внешний вид покрытия и переходное сопротивление серебра.

Защитить поверхность контактов от образования Ag_2S при хранении их на складе или при очень малых электрических нагрузках можно нанося слой золота толщиной более 2,2 мкм. Однако применение защитных покрытий из золота, во-первых, экономически нецелесообразно и, во-вторых, возможна коррозия подслоя через поры в таком покрытии.

Образование Ag_2S сопровождается потемнением поверхности серебра и увеличением электрического сопротивления.

При низких температурах пленки Ag_2S фактически становятся электроизоляционными.

С целью защиты серебра от воздействия серосодержащих соединений и потемнения поверхности рекомендованы различные способы, одним из которых является нанесение гальванических тонких пленок золота, палладия и родия (0,5-1,0 мкм). В образующейся системе серебряная основа – гальванопокрытие токоведущими компонентами выступают верхние слои указанных металлов, серебро же не работает как контактный материал, а лишь ухудшает электрические свойства контактных металлов, диффундируя через поверхностные слои и образуя сульфидно-оксидные пленки.

Другим способом защиты является нанесение хроматных пленок, полученных из растворов CrO_3, что сопровождается повышением переходного сопротивления покрытия в 50 раз, а из раствора хромата калия – в два раза. Неравномерные хроматные пленки дают большой разброс значений переходного сопротивления.

Для очистки поверхности серебра от сульфидных пленок может быть рекомендован метод термического водородного восстановления, который широко применяют для получения чистых металлов из их оксидов и солей.

Например, серебро получают водородным восстановлением из хлорида серебра. Восстановление серебра водородом из сульфида серебра протекает в соответствии с реакцией

$$Ag_2S + H_2 \leftrightarrow 2Ag + H_2S.$$

Однако из термодинамических расчетов следует, что эта реакция в стандартных условиях (T = 25 ºC) не идет, поскольку изменение свободной энергии Гиббса $\Delta G^o > 0$ (ΔG^o = 7,0 кДж). Используя значения стандартных энтальпий и энтропий, участвующих в реакции веществ, можно рассчитать изменение энтальпии (ΔH^o_p), энтропии (ΔS^o_p) и температуру равновесного состояния или начала реакции (T):

$$\Delta H^o_p = \Delta H^o_{H_2S} - \Delta H^o_{Ag_2S} = -21{,}0 \text{ кДж} + 32{,}8 \text{ кДж} = 11{,}8 \text{ кДж}.$$

Видно, что $\Delta H^o_p > 0$, т. е. реакция эндотермическая.

$$\Delta S^o_p = (2 \cdot \Delta S^o_{Ag} + \Delta S^o_{H_2S}) - (\Delta S^o_{Ag_2S} + \Delta S^o_{H_2}) =$$

$$(2 \cdot 42{,}69 + 205{,}7) - (144 + 130{,}6) = 16{,}48 \text{ Дж/К}.$$

Температура равновесного состояния равна

$$T = \frac{\Delta H^o_p}{\Delta S^o_p} = 443 \text{ ºС}.$$

Таким образом, для проведения реакции восстановления сульфида серебра водородом необходимо повышать температуру выше 443 ºС, что недопустимо в технологии производства ППИ.

Анализ способов подготовки к сборочным операциям корпусов с серебряным покрытием изделий микроэлектроники показал, что они обладают рядом существенных недостатков. Перспективным способом подготовки к сборочным операциям (в основном перед пайкой полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов) является отжиг корпусов с серебряным покрытием в кислороде при температуре 250-350 ºС в течение 15-45 мин. Микроструктурным и рентгеноспектральным микроанализом установлено, что после отжига происходит удаление с поверхности покрытия сульфидной пленки Ag_2S и образование при этом оксидной пленки Ag_2O.

Очистить поверхность серебра от пленки Ag_2S можно и другим способом, например, в атмосфере кислорода:

$$Ag_2S + O_2 \rightarrow 2Ag + SO_2.$$

Эта реакция может протекать даже в стандартных условиях, поскольку $\Delta G^o < 0$ ($\Delta G^o = -259{,}57$ кДж). С заметной скоростью она протекает при температуре ~ 400 ºС. Однако в избытке кислорода серебро частично окисляется. Образующуюся оксидную пленку восстанавливают до чистого серебра в водороде:

$$Ag_2O + H_2 \rightarrow 2Ag + H_2O.$$

Для этой реакции $\Delta G^o < 0$ ($\Delta G^o = -217{,}98$ кДж), т. е. она может протекать в стандартных условиях.

На основании вышеизложенного можно заключить, что восстановление серебра из сульфида серебра целесообразно проводить в среде кислорода с последующим восстановлением оксидной пленки в водороде.

6.6.3. Выбор оптимального режима УЗС соединения Al-Ag

После пайки кристаллов присоединение алюминиевых выводов к контактным площадкам кристалла и траверсам корпуса проводят ультразвуковой сваркой.

Качество соединений определяется множеством факторов: физико-механическими свойствами проволоки и металлизации; режимами УЗС; материалом инструмента, геометрическими формой и размерами его рабочей площадки; наличием или отсутствием загрязнений на соединяемых поверхностях и т. д.

Вопросу оптимизации режимов УЗС алюминиевой проволоки с серебряной металлизацией корпусов ППИ посвящен данный раздел. Представим процесс УЗС в виде «черного ящика» (рис. 6.30). X_1, X_2, …, X_n – входные параметры, действующие в исследуемом процессе. Y – выход системы, называемый функцией отклика, является функцией входных параметров. В этом случае задача выбора оптимальных режимов УЗС заключается в следующем: найти математическую модель процесса в виде некоторой функции $Y=f(X_1, X_2,…, X_n)$ и значения X_i, обеспечивающие экстремум (максимум) функции.

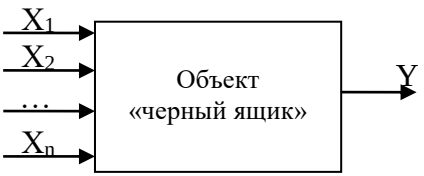


Рис. 6.30. Условное представление процесса УЗС

Необходимо получить математическую модель процесса УЗС алюминиевых проволочных выводов с серебряным гальваническим покрытием корпусных деталей СПП, с целью определения оптимальных режимов сварки.

В процессе проведения эксперимента варьировались три фактора: усилие нагружения на микросварочный инструмент

(X_1), мощность УЗ генератора (X_2) и время сварки (X_3) (табл. 6.11). В качестве критерия качества, а, следовательно, функции отклика исследуемого процесса принята прочность соединений. Прочность соединений определялась натяжением вывода под углом 90º к плоскости образца до разрушения соединений с одновременным контролем характера разрушения.

Табл. 6.11. Значения уровней варьирования

Уровни варьирования	Параметры		
	X_1, сН	X_2, дел	X_3, мс
Основной	300	6,3	75
Верхний	350	6,8	100
Нижний	250	5,8	50
Интервал варьирования	50	0,5	25

Примечание: мощность генератора УЗ колебаний (X_2, дел.) устанавливается по числу делений регулятора мощности в установке УЗ-сварки.

Для проведения экспериментальных исследований осаждение серебра на медные пластины проводили в электролите следующего состава (г/л): AgCl – 40; $K_4[Fe(CN_6)]3H_2O$ – 200; K_2CO_3 – 20. В качестве анодов использовались пластины из чистого серебра. Режимы осаждения: $I_к$ = 1-1,5 А/дм^2, температура электролита 50 ºС, время 10 мин для толщины покрытия 6 мкм. После осаждения покрытий образцы отмывались в дистиллированной воде. Перед сваркой медные пластины с серебряным покрытием отжигались в водороде при температуре 390 ± 20 ºС с целью имитации процесса напайки кристаллов на основания корпусов. Предварительный отжиг образцов в кислороде не проводился из-за образования на поверхности серебряного покрытия оксидной пленки Ag_2O толщиной 500-600 Å. Оксидная пленка Ag_2O обеспечивает необходимое растекание припоя при пайке, но при сварке не способствует заданному качеству сварных соединений.

Для оценки влияния параметров УЗС на качество микросоединений алюминиевой проволоки с серебряной металлизацией использовали проволоку марки АОЦПоМ

(ТУ 6365-051-46594157-2004) диаметром 250 мкм. Химический состав проволоки, %: Si – 0,01; Cu – 0,01; Mg – 0,01; Mn – 0,01; Fe – 0,01; Sb ≤ 0,02; Ti – (0,003-0,08); Zn – (0,03-0,28); Al – остальное. Разварку выводов производили на установке для ультразвуковой сварки типа У-153 инструментом с треугольной канавкой на рабочем торце марки КУТ-41-250-600 (ОСТ 11 31 5001.8-92).

Для удобства обработки результатов проводится преобразование значений управляемых переменных (учитываемых в эксперименте факторов X_i) к безразмерным величинам

$$X_{i\text{б}}=(X_i-X_{oi})/\Delta X_i,$$

где X_i – текущее значение i-го фактора; X_{oi} – базовое или начальное значение i-го фактора в центре плана; ΔX_i – значение интервала варьирования по i-му фактору.

Поскольку в эксперименте используются 3 фактора, а предполагаемая математическая модель исследуемого процесса линейна, то она соответствует полиному вида

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+b_{23}x_2x_3+b_{123}x_1x_2x_3,$$

где Y – значение функции отклика; $x_1x_2x_3$ – значения исследуемых факторов; b_0 – значение функции отклика в центре плана; b_1, b_2, b_3 – коэффициенты, характеризующие степень влияния факторов на функцию отклика; b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123} – коэффициенты, характеризующие взаимовлияние факторов.

При варьировании каждым из трех факторов (к = 3) на двух уровнях число опытов N будет составлять $N = 2^к = 2^3 = 8$. Для каждой комбинации факторов было проведено 15 параллельных опытов (n = 15).

По известной методике составлена матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^3, представленная в табл. 6.12.

Табл. 6.12. Матрица планирования и результаты полного факторного эксперимента

Номер опыта	$X_{0\text{б}}$	$X_{1\text{б}}$	$X_{2\text{б}}$	$X_{3\text{б}}$	$X_{1\text{б}}X_{2\text{б}}$	$X_{1\text{б}}X_{3\text{б}}$	$X_{2\text{б}}X_{3\text{б}}$	$X_{1\text{б}}X_{2\text{б}}X_{3\text{б}}$	Экспериментальная прочность y_ξ, сН	Теоретическая прочность сН
1	+	–	–	–	+	+	+	–	321,0	317,71

2	+	+	–	–	–	–	+	+	305,4	311,09
3	+	–	+	–	–	+	–	+	286,0	283,91
4	+	+	+	–	+	–	–	–	291,0	290,53
5	+	–	–	+	+	–	–	+	291,7	286,27
6	+	+	–	+	–	+	–	–	290,0	292,89
7	+	–	+	+	–	–	+	–	265,0	265,71
8	+	+	+	+	+	+	+	+	257,4	259,09

Проведена оценка однородности дисперсий функции отклика в соответствии с критерием Кохрена, ее результаты (для N = 8 и n = 15: $\sigma_{max} = 0{,}2787 \le 0{,}29 = \sigma_{кр}$) позволяют сделать вывод о воспроизводимости эксперимента, а отклонения значений функции отклика носят случайный характер и вызваны влиянием неконтролируемых и неуправляемых факторов.

Вычислены коэффициенты полинома по формуле

$$b_i = \sum_{\xi=1}^{N} \frac{x_{\xi i}\,\overline{y}_{\xi}}{N},$$

где b_i – коэффициент полинома, соответствующий i-фактору; $\xi = 1, \ldots, N$ – номера опытов; $x_{\xi i}$ – значение безразмерного фактора в матрице планирования, соответствующего ξ-строке и i-столбцу; y_ξ – значение функции отклика в ξ-опыте.

Проверка значимости коэффициентов с помощью t-критерия Стьюдента показала, что коэффициенты b_1, b_{12}, b_{13}, b_{23} признаны статистически незначимыми, поэтому соответствующие им члены полинома исключаются из уравнения математической модели процесса. Остальные коэффициенты имеют следующие значения: $b_2 = -13{,}59$; $b_3 = -12{,}41$; $b_{123} = -3{,}31$; $b_0 = 288{,}4$. Исключение члена полинома, соответствующего фактору x_1, означает, видимо, что этот фактор, а именно, усилие инструмента в выбранном интервале его значений не оказывает влияния на функцию отклика (прочность соединений). Влияние двух других факторов примерно равнозначно. Некоторое влияние оказывает взаимодействие трех факторов.

Таким образом, математическая модель с учетом значимости коэффициентов полинома имеет вид

$$Y = b_0+b_2x_2+b_3x_3+b_{123}x_1x_2x_3,$$

$$Y = 288,4 – 13,59x_2 – 12,41x_3 – 3,31x_1x_2x_3.$$

Теоретические значения прочности соединений для каждого опыта $y_{çt}$, предсказываемые математической моделью, вычислены и представлены в табл. 6.12.

Проведена проверка адекватности математической модели результатам эксперимента. По известным формулам, вычислена дисперсия адекватности $S^2_{ад} = 21,45$, которая не превышает дисперсию опыта $S^2\{y\} = 165$, следовательно, можно сделать вывод о том, что полученная математическая модель адекватно представляет результаты эксперимента.

Полученная функция исследована на экстремум. Максимальное значение прочности соединений достигается при следующих значениях безразмерных факторов: $x_1^{опт} = – 1$; $x_2^{опт} = – 1$; $x_3^{опт} = – 1$. Следовательно, оптимальными параметрами процесса УЗС будут следующие значения: $Q_{опт} = 250$ сН; $W_{опт} = 5,8$ дел; $\tau_{опт} = 50$ мс. Максимальная теоретическая прочность соединений при этих значениях параметров, предсказываемая математической моделью, составляет 317,71 сН.

Прочность соединений в значительной степени зависит от механических свойств проволоки в состоянии поставки. С целью стабилизации прочности и пластичности проволоки проводят ее отжиг перед сваркой. Перед проведением исследований проволоку отжигали в вакууме при Т=210±10 ºС в течение 7 мин. После отжига проволока имела следующие свойства: $\sigma_т$ = 31-33 МПа, $\sigma_в$ = 69-71 МПа и твердость в пределах 210-310 МПа.

Для экспериментальной оценки качества микросоединений Al-Ag на оптимальных режимах было разварено по 50 образцов. Деформация проволоки в зоне сварки определялась под микроскопом с точностью ±2 мкм. Анализ прочности соединений показал, что разрушение происходит, в основном, на участке перехода сварного соединения в проволоку.

На рис. 6.31 представлены гистограммы деформации алюминиевой проволоки и прочности соединений алюминиевой проволоки с серебряным покрытием, сформированных на опти-

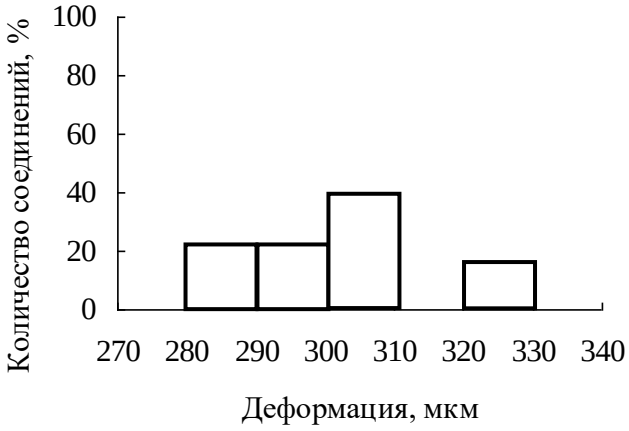
мальных режимах УЗС. Из рис. 6.31 видно, что соединения Al-Ag имеют стабильную прочность в пределах 320-325 сН.

Для прогнозирования надежности СПП, имеющих соединение Al-Ag, необходим анализ данной контактной пары. Известно, что диаграмма состояния Al-Ag со стороны алюминия относится к эвтектическому типу. Растворимость серебра в твердом алюминии существенно зависит от температуры:

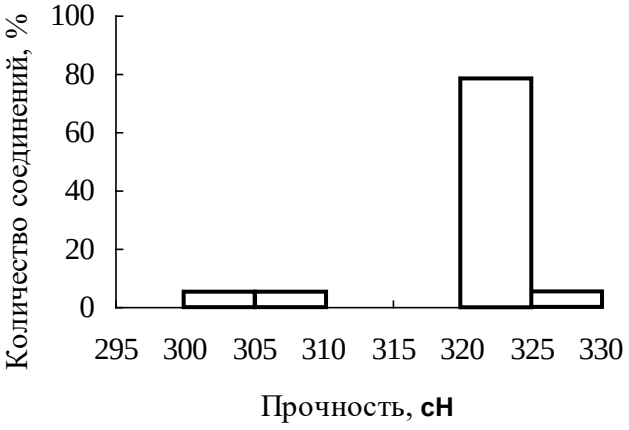
Температура, ºС	566	526	500	450	400	300	200	150
Растворимость, %	55,6	49,4	28,0	16,0	8,0	3,2	1,1	0,7

Увеличение содержания серебра приводит к повышению удельного электросопротивления сплава Al-Ag:

Содержание Ag, %	1,97	3,39	6,58	10,02	16,8
Удельное электросопротивление, мкОм·см	3,46	3,79	4,70	5,47	7,07



а)



б)

Рис. 6.31. Гистограммы распределения деформации алюминиевой проволоки (а) и прочности соединений алюминиевой проволоки с серебряным покрытием траверс корпусов (б)

Зависимость растворимости серебра в алюминии от температуры приводит к упрочнению сплавов Al-Ag при термической обработке (закалке и старении). В процессе закалки и старения твердость по Бринеллю у сплава с 8,7 % Ag увеличивается с 363 до 710 МПа и предел прочности со 120 до 210 МПа, а у сплава с

20 % Ag предел прочности повышается со 180 до 340 МПа. Повышение концентрации серебра в сплаве Al-Ag до 10 % повышает модуль упругости алюминия (каждый процент серебра на 527 МПа).

6.6.4. Тепловые эффекты в зоне соединения Al-Ag

На качество соединений при УЗС большое влияние оказывает состояние поверхности соединяемых элементов. На поверхности металлов всегда присутствует слой оксидов. В атмосфере сухого кислорода толщина оксидной пленки на поверхности алюминия является функцией температуры. При комнатной температуре предельная ее толщина составляет 2,5-3,0 нм. Различными исследователями установлен логарифмический закон изменения толщины пленки во времени при низких и нормальных температурах. Толщина оксидной пленки увеличивается в присутствии паров воды. При комнатной температуре и 100 % относительной влажности толщина пленки вдвое больше, чем в сухом кислороде. Однако в обоих случаях временная зависимость изменения толщины одинакова. Во влажной атмосфере на поверхности алюминия образуется двухслойная пленка: непрерывная пленка оксида алюминия непосредственно на поверхности металла и пленка гидрооксида на границе раздела металла и газовой фазы. При более высоких температурах на алюминии и алюминиевых сплавах, в особенности легированных магнием и медью, образуется пленка более сложной структуры. В этих случаях рост пленки уже не подчиняется простым временным зависимостям.

Молекулярный объем оксида почти в 1,3 раза больше, чем объем алюминия, участвовавшего в реакции окисления. Поэтому поверхностный слой находится под действием сжимающих напряжений и быстро восстанавливается при повреждении.

Методом Оже-спектроскопии исследована поверхность алюминиевой проволоки и установлено, что слой оксида алюминия толщиной около 1 нм не препятствует образованию каче-

ственного сварного соединения с контактными площадками ППИ. Однако при толщине оксидов 100 нм и более получить качественное сварное соединение не удается.

При УЗС поверхностные оксиды и адсорбированные пленки разрушаются и вытесняются из зоны сварки при пластической деформации в процессе приложения давления и за счет диспергирующего воздействия ультразвуковых колебаний, но не полностью. Оставшиеся оксиды уменьшают фактическую площадь контакта, а следовательно, увеличивают сопротивление и снижают прочность сварных соединений.

В процессе УЗС происходит нагрев соединяемых элементов, вызванный несколькими причинами, например, трением при скольжении поверхностей относительно друг друга. Одной из причин дополнительного подогрева контактирующих поверхностей является протекание химических реакций между соединяемыми металлами и их оксидами, проходящих с выделением некоторого количества тепла. С увеличением температуры контакта увеличивается глубина объемного взаимодействия между соединяемыми металлами, ускоряются процессы диффузии, и в результате возможно увеличение прочности соединений. В то же время с увеличением температуры интенсивно протекают процессы образования интерметаллидов. Вышеизложенные процессы могут оказать существенное влияние на формирование качественного сварного соединения.

По известной методике проведены расчеты экзотермических тепловых эффектов в зоне контакта при УЗС алюминиевой проволоки с серебряным покрытием траверс корпусов СПП.

Допустим, что при УЗС поверхностный оксид на алюминиевой проволоке разрушается и происходит взаимодействие ювенильных слоев алюминия с окисленной поверхностью покрытия траверсы корпуса ППИ. Для процессов, протекающих при атмосферном давлении, $Q = -\Delta H$, где Q – теплота образования (тепловой эффект реакции), ккал/моль; ΔH – изменение энтальпии системы.

В зоне контакта алюминия с покрытием из серебра протекает реакция

$$2Al+3Ag_2O \rightarrow Al_2O_3+6Ag+Q_y.$$

Теплота образования: $Al_2O_3(-\Delta H_{298})$ + 399 ккал/моль, $Ag_2O(-\Delta H_{298})$ + 7,306 ккал/моль. Следовательно, протекание данной реакции термодинамически возможно.

При УЗС алюминиевой проволоки диаметром 0,25 мм с покрытием из серебра длина сварного соединения при оптимальных режимах составляет 0,6 мм, ширина 0,3 мм, а площадь 0,18 мм^2. При толщине слоя Al_2O_3 на поверхности алюминиевой проволоки, равной 10^{-6} мм, общий объем оксида $1{,}8\cdot10^{-7}$ мм^3, плотность $3{,}5\cdot10^{-3}$ г/мм^3, вес оксида $6{,}3\cdot10^{-10}$ г.

Реакции, протекающие в контакте алюминиевой проволоки с серебряным покрытием имеют вид

$$\left|\begin{array}{l} 2Al + \tfrac{2}{3}O_2 \rightarrow Al_2O_3 + 399 \text{ ккал/моль}, \\ 4Ag + O_2 \rightarrow 2Ag_2O + 7{,}306 \text{ ккал/моль}; \end{array}\right.$$

$$4Al + 3O_2 - 12Ag - 3O_2 \rightarrow 2Al_2O_3 + 798 - 6Ag_2O - 21{,}918;$$

$$2Al + 3Ag_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6Ag + 388{,}041 \text{ ккал/моль}.$$

Молекулярная масса Al_2O_3 – 102 г/моль, $Q_{Al\text{-}Ag}$ = 388041/102 = 3804,3 кал/г. Таким образом, выделится тепло в количестве: $3804{,}3\cdot6{,}3\cdot10^{-10} = 2{,}397\cdot10^{-6}$ кал. Если предположить, что, окисляясь, нагревается только Al_2O_3 (теплоемкость 0,185 кал/(г·ºС)), то локальное повышение температуры без учета теплоотвода составит

$$\Delta T_{Al-Ag} = 2{,}397\cdot10^{-6}/(6{,}3\cdot10^{-10}\cdot0{,}185) = 2{,}057\cdot10^{4}\ ^{\circ}C.$$

Предположим, что процесс УЗС сопровождается объемным взаимодействием соединяемых металлов на глубину 10^{-4} мм. При этом на площади сварного соединения 0,18 мм^2: объем алюминия $1{,}8\cdot10^{-5}$ мм^3, вес $4{,}86\cdot10^{-8}$ г, теплоемкость 0,216 кал/(г·ºС); объем серебра $1{,}8\cdot10^{-5}$ мм^3, вес $1{,}89\cdot10^{-7}$ г, теплоемкость 0,0565 кал/(г·ºС).

Локальное повышение температуры при нагреве алюминиевой проволоки и серебряного покрытия без учета теплообмена с окружающей средой составит

$$\Delta T_{Al-Ag} = \frac{2{,}397\cdot10^{-6}}{4{,}86\cdot10^{-8}\cdot0{,}216 + 1{,}89\cdot10^{-7}\cdot0{,}0565} = 113{,}2\ ^{\circ}C.$$

Таким образом, температура в зоне УЗС может достигать существенных значений не только в результате трения соединяемых поверхностей, но и за счет экзотермических химических реакций. В контакте алюминиевой проволоки с серебряным покрытием выделяется большее количество тепла, чем при сварке с никелевым покрытием (50,5 ºС). Данный фактор необходимо учитывать при выборе режимов формирования сварных соединений.

В заключение следует отметить, что проведенные исследования соединений Al-Ag являются первым этапом работы по оценке качества и надежности данных контактов. Авторы статьи продолжают исследования этих соединений при термоциклировании, длительных температурных воздействиях, под токовой нагрузкой, а также испытаниями на коррозионную стойкость.

6.7. Выбор оптимальных режимов сварки внутренних микросоединений датчиков газов

Газочувствительные датчики (химические сенсоры) находят широкое применение для контроля газовых технологических сред в микроэлектронике. Химические сенсоры основаны на изменении примесной проводимости в результате взаимодействия полупроводникового материала с активными газами. Концентрация газа при этом преобразуется непосредственно в электрический сигнал, для регистрации которого требуются относительно простые электрические схемы.

Широкое распространение для газочувствительных датчиков получили полупроводниковые оксиды металлов, в частности, диоксид олова SnO_2.

Так как каждый газ характеризуется определенной энергией связи с поверхностью SnO_2, то различные газы обладают индивидуальными значениями температур максимальной адсорбции. Для SnO_2 большинство газов имеют температуры максимальной чувствительности в интервале 200-400 °С.

Высокая чувствительность химических сенсоров к активным окисляющим (кислород, фтор) и восстанавливающим (водород, пары ацетона) газам, а также малая потребляемая мощность позволили изготавливать на их основе переносные и автономные портативные автоматические газоанализаторы.

Для повышения чувствительности измерения контролируемых газов микросоединения проволока – пленка на контактных площадках должны иметь стабильные омические сопротивления. Качество соединений определяется множеством факторов: физико-механическими свойствами проволоки и пленочной металлизации; режимами микросварки; типом инструмента, формой и геометрическими размерами его рабочей площадки; наличием или отсутствием загрязнений на соединяемых поверхностях и т. д.

В качестве металлизации контактных площадок кристаллов датчиков газов широко используется пленка платины, а формирование электрического контакта осуществляется проволокой микронных размеров из алюминия, золота или платины. Наибольшее распространение при монтаже внутренних микросоединений высокой надежности в датчиках газов получила проволока диаметром 0,03-0,05 мм из платины.

Наиболее важными механическими свойствами привариваемой проволоки являются прочность и относительное удлинение. Для стабилизации свойств проволоки ее подвергают отжигу перед монтажом. Целью отжига является снижение механической прочности и повышение пластичности проволоки.

Вопросам выбора оптимальных режимов сварки «расщепленным» электродом платиновой проволоки к платиновой металлизации контактных площадок датчиков газов посвящен данный раздел.

Основной целью современного эксперимента с позиции производителя продукции является разработка математической модели, адекватно описывающей процесс и позволяющий, в конечном результате, осуществлять его управление. Статистические методы планирования эксперимента, являются одним из

эмпирических способов получения математического описания сложных процессов.

Представим процесс микросварки в виде «черного ящика» (рис. 6.32). X_1, X_2, …, X_n – входные параметры, действующие в исследуемом процессе. Y – выход системы, называемой функцией отклика, является функцией входных параметров. В этом случае задача выбора оптимальных режимов микросварки заключается в следующем: найти математическую модель процесса в виде некоторой функции: $Y = f(X_1, X_2, \ldots, X_n)$ и значения X_i, обеспечивающие экстремум (максимум) функции.

Необходимо получить математическую модель процесса сварки платиновых выводов с платиновой металлизацией датчиков газов с целью определения оптимальных режимов сварки.

В процессе проведения эксперимента варьировались три фактора: температура отжига проволоки T ºC (X_1), давление на сварочный электрод $P_Э$ (X_2) и напряжение, подаваемое на сварочный электрод, U (X_3) (табл. 6.13). Время сварки во всех случаях составляла 0,1 с.

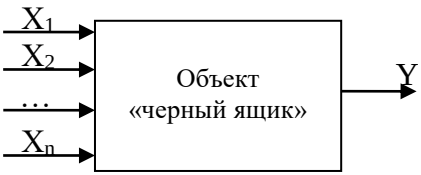


Рис. 6.32. Схема процесса сварки «расщепленным» электродом

В качестве критерия качества, а следовательно, функции отклика исследуемого процесса принята прочность микросоединений.

Табл. 6.13. Значение уровней варьирования

Уровней варьирования	Параметры		
	X_1, ºC	X_2, МПа	X_3, мВ
Основной	600	12	400
Верхний	800	16	500
Нижний	400	8	300
Интервал варьирования	200	4	100

Для выбора оптимальных режимов монтажа микросоединений платиновой проволоки диаметров 0,05 мм к платиновой металлизации толщиной 0,003 мм датчиков газов использовалась импульсная сварка «расщепленным» электродом на установке УСМ-1С с использованием сварочного электрода с рабочей частью из вольфрама (рис. 6.33).

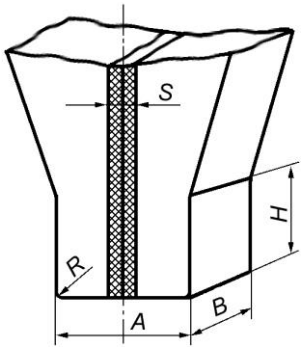


Рис. 6.33. Геометрия рабочей части «расщепленного» электрода: A и B – ширина и длина рабочей части; H – высота прямоугольной части электрода; R – радиус электрода; S – межэлектродный зазор

При сварке сдвоенным «расщепленным» электродом учитывается особенность выполнения соединений в изделиях, которая заключается в одностороннем расположении электродов, объединенных в жесткую конструкцию.

Между электродами размещается электроизоляционная (слюда или синтетический корунд) прокладка толщиной 0,03-0,22 мм. Если диаметр проволочного вывода составляет 0,03-0,15 мм, то длинна и ширина торца каждого электрода соответственно составляют 0,02-0,1 мм и 0,08-0,6 мм.

Материалом электродов кроме вольфрама может быть молибден или металлокерамический твердый сплав типа ВК8. Такие электроды выдерживают до 30-40 тыс. сварок.

Платиновая пленка напылялась на подложку из кварца на установке с электроннолучевым испарителем. Давление остаточной атмосферы в камере вакуумной установки при напылении пленок составляло $1{,}33 \cdot 10^{-2}$ Па. Кварцевые подложки при напылении подогревались до температуры 800 ºС. После напыления пленок в течение 30 мин приводился отжиг образцов при той же температуре.

В процессе формирования сварного соединения участок проволока – контактная площадка при прохождении через него электрического тока вследствие выделения теплоты разогревается. Усилие прижатия электрода и время сварки зависит от материала и диаметра проволоки.

Внешний вид микросоединений платиновой проволоки к пленке из платины представлен на рис. 6.34.

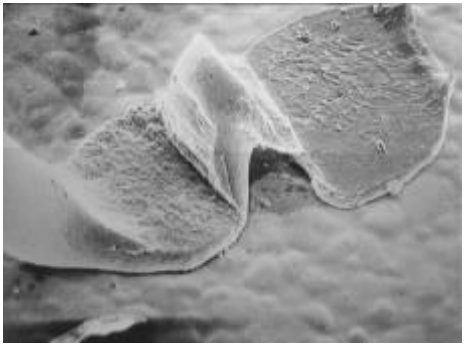


Рис. 6.34. Соединение платиновой проволоки с платиновой металлизацией, выполненное «расщепленным» электродом. Увеличение 350×

Механическая прочность оценивалась на отрыв проволоки под углом 90º к плоскости образца на установке УКПМ-1 с одновременным контролем характера разрушения.

Для удобства обработки результатов опытов проводилось преобразование значений управляемых переменных (учитываемых в эксперименте факторов X_i) к безразмерным величинам:

$$X_{i\text{б}} = (X_i - X_{oi}) / \Delta X_i,$$

где X_i – текущее значение i-го фактора; X_{oi} – базовое или начальное значение i-го фактора в центре плана; ΔX_i – значение интервала варьирования по i-му фактору.

Таким образом, в безразмерной системе координат верхний уровень фактора при проведении эксперимента равен + 1, а нижний – 1 (при составлении матрицы планирования для упрощения заменяем на символы ‘+’ и ‘–‘).

Поскольку в эксперименте используется 3 фактора, а предполагаемая математическая модель исследуемого процесса линейна, то она соответствует полиному вида:

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+b_{23}x_2x_3+b_{123}x_1x_2x_3,$$

где Y – значение функции отклика; x_1, x_2, x_3 – значения исследуемых факторов; b_0 – значение функции отклика в центре плана;

b_1, b_2, b_3 – коэффициенты, характеризующие степень влияния факторов на функцию отклика; b_{12}, b_{13}, b_{23}, $b_{12.3}$ – коэффициенты, характеризующие взаимовлияние факторов.

При варьировании каждым из трех факторов (к = 3) на двух уровнях число опытов N будет составлять $N = 2^к = 2^3 = 8$. Для каждой комбинации факторов было проведено 15 параллельных опытов (n = 15). Для проведения эксперимента по известной методике составлена матрица планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^3, представленная в безразмерной форме в табл. 6.14 и в числовом выражении в табл. 6.15.

Проведена оценка однородности дисперсий функции отклика в соответствии с критерием Кохрена, ее результаты (для N = 8 и n = 15: $G = 0{,}157 \le G_{кр} = 0{,}29$) позволяют сделать вывод о воспроизводимости эксперимента, а отклонения значений функции отклика носят случайный характер и вызваны влиянием неконтролируемых и неуправляемых факторов.

Табл. 6.14. Матрица планирования ПФЭ типа 2^3

Номер опыта	$X_{0б}$	$X_{1б}$	$X_{2б}$	$X_{3б}$	$X_{1б}X_{2б}$	$X_{1б}X_{3б}$	$X_{2б}X_{3б}$	$X_{1б}X_{2б}X_{3б}$	$y_ç$
1	+	–	–	–	+	+	+	–	y_1
2	+	+	–	–	–	–	+	+	y_2
3	+	–	+	–	–	+	–	+	y_3
4	+	+	+	–	+	–	–	–	y_4
5	+	–	–	+	+	–	–	+	y_5
6	+	+	–	+	–	+	–	–	y_6
7	+	–	+	+	–	–	+	–	y_7
8	+	+	+	+	+	+	+	+	y_8

Табл. 6.15. Зависимость прочности соединения от исследуемых факторов

Номер опыта	Температура Т, ºС	Давление $P_Э$, МПа	Напряжение U, мВ	Прочность микросоединений $y_{çt}$, сН	
				экспериментальная	теоретическая
1	400	8	300	26,8	25,8
2	800	8	300	19,8	20,8

3	400	16	300	30,5	30,6
4	800	16	300	25,7	25,6
5	400	8	500	31,8	32,5
6	800	8	500	28,2	27,5
7	400	16	500	39,4	39,6
8	800	16	500	34,9	34,7

Коэффициенты полинома вычислены по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{\xi=1}^{N} x_{\xi i} y_\xi}{N},$$

где b_i – коэффициент полинома, соответствующий i-фактору; ξ – номера опытов; $x_{\xi i}$ – значение безразмерного фактора а матрице планирования, соответствующего ξ-строке и i-столбцу; y_ξ – значение отклика в ξ-опыте.

Проверка значимости коэффициентов с помощью t-критерия Стьюдента показала, что коэффициенты b_{12}, b_{13}, b_{123} признаны статистически незначимыми, поэтому соответствующие им члены полинома исключаются из уравнения математической модели процесса. Остальные коэффициенты имеют следующие значения: $b_0 = 29,6$; $b_1 = -2,5$; $b_2 = 3$; $b_3 = 4$, $b_{23} = 0,6$. Исключение членов полинома, включающих коэффициенты b_{12}, b_{13}, b_{123}, означает, видимо, что взаимодействие соответствующих им факторов не оказывает влияния на функцию отклика (прочность соединений). Наименьшее влияние оказывает первый фактор (температура отжига проволоки). Влияние двух других факторов примерно равнозначно. Таким образом, математическая модель с учетом значимости коэффициентов полинома имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{23}x_2x_3;$$

$$Y = 29,6 - 2,5 \cdot x_1 + 3 \cdot x_2 + 4 \cdot x_3 + 0,6 \cdot x_2x_3.$$

Теоретические значения прочности соединений для каждого опыта $y_{çt}$, предсказываемые математической моделью, вычислены и представлены в табл. 6.15.

Проведена проверка адекватности математической модели результатам эксперимента по известным формулам. Вычисленная дисперсия адекватности $S^2_{ад} = 0,6$ не превышает дисперсию

опыта $S^2\{y\} = 13,3$. Следовательно, можно сделать вывод о том, что полученная математическая модель адекватно представляет результаты эксперимента.

Исследование функции на экстремум показало, что максимальное значение прочности соединений достигается при следующих значениях безразмерных факторов $X_1 = -1$; $X_2 = +1$; $X_3 = +1$. Следовательно, оптимальными параметрами процесса исследуемого процесса будут следующие значения: Т = 400 ºС, $P_Э$ = 16 МПа, U = 500 мВ. Максимальная теоретическая прочность соединений, предсказываемая математической моделью при этих значениях параметров, составляет 39,6 сН. Экспериментальные значения прочности микросоединений платина – платина, полученные на оптимальных режимах сварки, показали хорошее совпадение с теоретическими расчетами.

Глава 7. Групповой монтаж в технологии производства ППИ

В производстве радиоэлектронной аппаратуры широко используются сверхбольшие и сверхскоростные ИС. В данных ИС помимо роста степени интеграции, функциональной сложности, быстродействия и размеров кристалла резко возрастает число контактных микросоединений.

Технология «flip-chip» – присоединение перевернутых кристаллов с объемными выводами к основаниям корпусов или подложкам получила широкое распространение в современной отечественной и зарубежной микроэлектронике.

Данный метод имеет следующие преимущества перед другими:

1. Снимает связанные со сборкой ограничения для кристаллов с субмикронными топологическими размерами.

2. Открывает новые возможности в миниатюризации ППИ благодаря ряду компоновочных и конструктивных особенностей.

Совершенствование технологии «flip-chip» и оборудования для сборки ППИ данным способом позволит в определенной степени нейтрализовать известное отставание отечественного производства при выпуске современных изделий микроэлектроники.

С увеличением числа выводов и размеров кристалла значительно увеличиваются габариты корпусов и длина межсоединений, а вследствие этого, значения сопротивлений, индуктивностей и емкостей.

Методы сборки многовыводных СБИС в металлокерамические (пластмассовые) корпуса с помощью ТКС или УЗС проволочных выводов имеют ряд принципиальных ограничений дальнейшего развития.

В связи с вышеизложенным, в 80-е годы возникла необходимость разработки альтернативных методов сборки. Ведущие зарубежные фирмы (General Electric, Sharp, Toshiba и др.) наиболее перспективным считают метод групповой сборки пау-

ковых выводов к кристаллам ИС. Этот метод получил название АСЛН (автоматизированная сборка на ленте носителе).

7.1. Пайка полупроводниковых кристаллов с объемными выводами к основаниям корпусов методом «flip-chip»

Применение монтажа полупроводникового кристалла на основание корпуса или плату методом «flip-chip» позволяет полностью автоматизировать процесс сборки. Основу метода перевернутого кристалла составляют объемные столбиковые выводы, располагаемые на металлизированных контактных площадках кристаллов ППИ.

В настоящее время при сборке по технологии «flip-chip» используются в основном два варианта формирования объемных выводов на кристалле:

1. Изготовление столбиковых припойных выводов.
2. Получение шариковых выводов оплавлением проволоки.

7.1.1. Изготовление шариков припоя и размещение их на кристалле

Для изготовления шариков припоя диаметром 0,025-0,2 мм используется установка, которая содержит нагреватель, резервуар с жидким припоем, эжекторную камеру, эжектор с соплом, электронную схему управления эжектором, обеспечивающим выдачу сигналов с частотой 2-100 кГц. Для предохранения припоя от окисления в установке используется инертный рабочий газ. При работе на частоте 15 кГц и скорости газа 3,5 м/с получаются шарики припоя диаметром 0,08-0,1 мм, следующие один за другим с небольшим интервалом.

Для формирования на кристалле более 600 контактных выступов с использованием шариков из припоя диаметром 0,4 мм, а также свыше 500 контактных выступов из шариков диаметром 0,25 мм используется специальная автоматическая установка.

Формирование на контактных площадках кристалла припойных выступов, имеющих однородность по высоте, при невысокой стоимости и хорошей производительности осуществляется на специальной установке. Установка включает в себя держатель кристаллов, устройство нанесения на их площадки флюса, резервуар с шариками припоя диаметром 0,125 мм. На перемещающемся вертикально и вращающемся рычаге закреплен вакуумный захват, рабочая поверхность которого имеет набор отверстий для удерживания шариков припоя. Расположение отверстий точно соответствует расположению контактных площадок на кристалле. Перенос шариков на кристалл осуществляется захватом из резервуара. При нагреве кристаллов до температуры плавления шариков припоя образуются припойные выступы.

Размещение и крепление на контактных площадках керамической подложки шариков из припоя осуществляется следующим способом: вначале шарики устанавливают в лунках прецизионно обработанной графитовой пластины с помощью вакуума, подаваемого к лункам через сквозные отверстия; затем, используя маску из стальной фольги, на шарики сверху наносится паста из того же состава припоя; после этого производится совмещение пластины с подложкой с помощью юстировочной платы. Удалив плату, подложка и пластина поступают в печь для пайки при заданной температуре. При этом припойная паста при расплавлении корректирует положение шариков относительно контактных площадок.

Захват и прецизионное размещение шариков припоя на контактных площадках подложки или кристалла ППИ осуществляется при помощи специального устройства. Устройство содержит рабочий столик, на котором располагается кассета с шариками, перемещающуюся вертикально монтажную головку, имеющую набор инструментов в виде вертикально смонтированных трубочек наружным диаметром 0,875 мм и внутренним диаметром 0,3 мм. Трубочки служат для захвата шариков припоя диаметром 0,76 мм с помощью вакуума.

Перенос токопроводящих шариков припоя на контактные площадки кристалла может осуществляться с помощью пере-

водной пластины из кремния. Пластина имеет углубления трапециевидной в сечении формы, по расположению точно соответствующими позициями площадок на Si-пластине со структурами ППИ. После оксидирования поверхности переводной пластины в ее полости укладываются шарики припоя, а затем на нее сверху кладется пластина с ППИ, площадки которых имеют золоченную поверхность с подслоями Cu и Cr. При нагреве сборки и расплавления припоя шарики переходят на контактные площадки ППИ в форме припойных выступов. Высокая точность переноса шариков припоя достигается применением одинакового материала пластин (Si), не приводящего к рассовмещению площадок и полостей при их совместном нагреве.

Монтаж шарика припоя на контактную площадку кристалла ИС подложки осуществляется с помощью специального инструмента в виде цилиндрического стержня со скошенной на угол 45° нижней частью. Инструмент изготовлен из W или Ti, WC, Al_2O_3. На плоском рабочем торце инструмента имеется выемка, размеры которой определяют объем захватываемого припоя. Вдоль оси инструмента может быть капилляр для подвода энергии с целью подогрева шарика припоя. Инструмент также используется при реставрации ППИ и многокристальных модулей.

Для формирования шариковых контактов на подложке, используемой для обращенного монтажа нескольких кристаллов ППИ, используется специальная пластина из несмачиваемого припоем материала, например алюминия, содержащая матрицу полусферических углублений, расположенных соответственно контактным площадкам на подложке. В углублениях пластины размещают шарики из припоя. Затем подложка накладывается на пластину с высокой точностью совмещения ее контактных площадок с шариками, которые присоединяются к ним термокомпрессионной сваркой или пайкой.

Известен планаризации шариковых припойных выводов, расположенных на установочной поверхности безвыводного матричного корпуса ИС. Выравнивание проводится пластиной с нагревателем, имеющую тщательно обработанную и несмачива-

емую припоем поверхность. Подбором величины давления, времени и температуры обеспечивается размягчение припойных шариков и их выравнивание по высоте в процессе прижатия ИС к подложке.

Для повышения надежности бескорпусной ИС и уменьшения стоимости ее изготовления рекомендуется формировать шарики припоя не на кристалле, а на плате. Последовательность технологических операций заключается в следующем: нанесение на плату металлизации и получение контактных площадок; формирование маски из слоя фоторезиста; напыление барьерного слоя металла; нанесение припойной пасты способом трафаретной печати; удаление фоторезиста и оплавление пасты с образованием одинаковых по высоте шариков припоя.

7.1.2. Изготовление столбиковых припойных выводов

Контактные площадки, на которые наносят шариковые выводы из припоя, получают, используя две операции фотолитографии. Сначала на пластину Si с контактами в виде алюминиевой металлизации осаждается пленка несмачиваемого припоем металла (Cr, Ti, Zr и др.), затем наносится фоторезистивная маска, в окна которой осаждается пленка смачиваемого припоем металла (Cu, Co, Ni и др.) с подслоем из комбинации смачиваемого и несмачиваемого припоем металлов. После удаления первой фоторезистивной маски формируется маска с окнами больших размеров из толстого негативного фоторезиста. В эти окна гальванически или напылением осаждается припой. После удаления второй фотомаски проводится травление несмачиваемой припоем металлизации, используя осажденный припой в качестве маски. Пластина Si затем нагревается до температуры плавления припоя, который за счет капиллярных сил приобретает форму шариков на смачиваемом припоем участке контактной площадки.

Для исключения подтравливания столбиковых выводов на полупроводниковых кристаллах разработан способ, по которому

на кристаллы в составе пластины с открытыми контактными площадками наносят слой первого фоторезиста, устойчивого к травителю, применяемому для удаления барьерного слоя металлизации. После вскрытия окон в нем на пластину напыляется барьерная многослойная металлизация, содержащая слой Ti или Cr, слой Cu или Pd, а затем слой Au. Затем на пластину наносится слой второго фоторезиста, в котором над площадками вскрываются окна размером меньше окон в первом фоторезисте на удвоенную толщину барьерной металлизации. В этих окнах гальваническим способом наращивают золотые столбиковые выводы. После удаления второго фоторезиста последовательно снимаются металлизация вокруг выводов и слой первого фоторезиста.

Известен способ изготовления столбиковых выводов из припоя в технологии производства полупроводниковых приборов и ИС. На полупроводниковую пластину с контактными площадками осаждают несколько слоев металла, а затем – слой припоя через маску. После удаления маски часть слоев металла за пределами областей, покрытых припоем, стравливают в растворе, содержащем фосфорную и уксусную кислоты, перекись водорода и деионизованную воду, который не реагирует с припоем. Режимы травления: температура 70 °С, время – 1-10 мин. Столбики припоя, изготовленные на многослойном металлическом основании, состоящем из алюминия, сплава никель-ванадий и меди пригодны для монтажа методом перевернутого кристалла.

На полупроводниковых кристаллах контактные выступы можно получать без применения фотолитографии. В этом случае на всю полупроводниковую пластину со вскрытыми в защитном диэлектрическом слое на контактные Al площадки наносится барьерный слой Ti, Cr, Ni или нитридов Ti и Ta. Затем помещают пластину в вакуумную установку и проводят наращивание выступа из Au, In или припоев. Барьерный слой напыленного на поверхности пластины металла удаляется химическим способом. Скорость осаждения контактных столбиков около

105 мкм^3/с, т. е. для получения 200 контактов с размерами 100×100×10 мкм требуется менее 4 минут.

Для монтажа кристаллов методом перевернутого кристалла разработана система металлизации, состоящая из слоя состава $WSi_{0,4}N_{0,2}$ со слоем никеля, смачивающим припоем. Столбиковые выводы формируют последовательным осаждением слоев золота и олова в соотношении 80:20 (мас., %) для образования припоя эвтектического состава толщиной 10 мкм. Расплавление припоя проводят в атмосфере формир-газа путем импульсного нагрева до температуры 330 °С со скоростью 4 °С/с.

Образующиеся на первоначальном этапе нагрева фазы AuSn и Au_5Sn характеризуются взаимной диффузией в твердом состоянии. Дальнейший нагрев приводит к их расплавлению с образованием однородного эвтектического расплава, который при охлаждении образует столбиковые выводы гомогенного состава.

Изготовление полупроводниковых кристаллов с шариковыми выводами, имеющими повышенную надежность при меньшей стоимости, осуществляется по следующей технологии: после формирования окон, вскрываемых в защитном полиимидном слое над контактными площадками из Al, пластина Si погружается в расплавленный припой, содержащий, например, Pb и Sn. Облуживание площадок производится с наложением ультразвуковых колебаний, которые способствует разрушению оксидных пленок Al. Таким образом получают шариковые выводы высотой до 30 мкм, на которые могут быть нанесены дополнительные выступы из сплава Pb-Sn высотой до 150 мкм. В припой при повторном лужении могут быть введены Ag или Cu, способствующие упрочнению выводов. По данной технологии разработана конструкция мощного полупроводникового прибора, сохраняющего постоянную прочность контактных соединений с корпусом после 1000 ч испытаний при температуре 125 °С.

Замена контактных выступов из сплава Pb-Sn на контакты из нескольких слоев Au позволила снизить стоимость ИС, повысить их надежность и обеспечить удовлетворительные параметры на частотах до 15 ГГц.

Для обеспечения защиты ППИ от электромагнитных полей, наводок и снижения их паразитных электропараметров разработана специальная конструкция столбиковых выводов. Выводы состоят из центрального выступа и соосно расположенного с ним ободка одинаковой высоты 15-30 мкм. При этом центральный выступ соединен с сигнальным проводником, проходящим в середине многослойной коммутационной структуры, а ободок – с верхним заземленным слоем металлизации. Выводы изготавливаются из индиевого припоя, гальванически осажденного на тонкопленочную металлизацию из слоя Nb, защищенного барьерным слоем Pd и покрытого дополнительно слоем Au. Поверхность кристаллов, используемых при изготовлении многокристальных модулей с рабочими частотами 250 МГц, защищается тонкопленочным диэлектриком SiO_2.

Формирование столбиковых выводов на контактных площадках коммутационных подложек может производиться с помощью легкорастворимой полимерной пленки-носителя. Пленку с выводами получают литьем из раствора на основе алифатического мономера акрилата или акрилового полимера, либо на основе стеариновых пластиков. В пленке пробиваются сквозные конические отверстия, которые заполняются припойной пастой или расплавленным припоем. После этого пленка совмещается с подложкой и происходит оплавление припоя. Эта операция может быть совмещена с монтажом компонентов. Затем пленка растворяется. Данный способ позволяет одновременно формировать с высокой точностью на подложках сотни и тысячи выводов.

Шариковые выводы на кристаллах ИС или на подложках формируют нанесением припойной пасты через маску-трафарет. Маска имеет трапециевидные отверстия, наклон стенок которых составляет угол <10°, а их площадь в нижней части равна или в 1,5-5 раз превышает площадь контактных площадок. Припойная паста готовится из порошка припоев Sn-Pb, Sn-Ag и др. с флюсом, состоящим из органической кислоты, высокомолекулярной добавки и растворителя. После нанесения маска удаляется, а припой оплавляется, образуя шариковые выводы, которые могут

быть получены на обеих соединяемых поверхностях, при этом припои могут иметь различную температуру плавления.

Выводы полусферической формы высотой 20-25 мкм и диаметром 0,03 мм на кристаллах ИС получают также оплавлением припойной пасты. Для повышения прочности сцепления вывода с контактной площадкой кристалла на участке Si вытравливаются в плазме CF_4 или CF_6 с добавкой O_2 V-образные выемки. Затем осаждается защитный слой SiO_2 и слой Al, а для обеспечения паяемости площадок наносят слой Cu с подслоем Ti.

Для получения паяных выступов на кристалле поверхность пластины кремния со структурами ИС защищается пленкой полиимида, в которой вскрываются окна небольшого диаметра над контактными площадками. На пленке равномерно по всей площади кристалла формируются контакты большего диаметра намазыванием пасты через трафарет из тонкой стальной сетки. Нанесенная металлизация на пластине сушится при температуре около 165 °С в течение 30 минут. Затем на контакты устанавливаются шарики из припоя, которые расплавляются нагревом пластины до температуры их плавления.

Разработан способ получения контактных столбиков на кристаллах ИС, на которых уже имеются алюминиевая металлизация и пассивирующий диэлектрик. Контактные столбики создают методом трафаретной печати, используя в качестве пасты эпоксидную смолу с серебряным наполнителем, которая после нагрева затвердевает. На поверхности кристалла создают опорный изолирующий слой толщиной равной высоте контактных столбиков. При сборке на плату методом перевернутого кристалла изолирующий слой заполняет промежуток между кристаллом и платой.

На рис. 7.1 приведена известная схема формирования припойных выводов на полупроводниковых кристаллах. По данной схеме на контактное основание высотой 3-5 мкм наносят двухслойное покрытие серебро – олово с суммарной толщиной 10, 20, 30, 40 мкм и проводили оплавление. В процессе сплавления припоя за счет капиллярных сил происходит изменение формы

припойного вывода (уменьшается диаметр и увеличивается высота). Данный способ формирования припойных выводов не потерял актуальности и в настоящее время.

По результатам замеров, изучению поперечных шлифов и электронной микроскопии установлено, что при общей высоте вывода, меньшей или равной диаметру основания, диаметр вывода равен последнему. Для более высоких выводов их диаметр приблизительно равен высоте. Разброс значений высот в пределах одного кристалла составляет ±1 мкм, в пределах одной пластины ±2,5 мкм, от пластины к пластине ±4 мкм. Хорошая воспроизводимость высот и диаметров выводов гарантирует надежное контактирование и отсутствие замыканий между соседними выводами в процессе монтажа кристаллов.

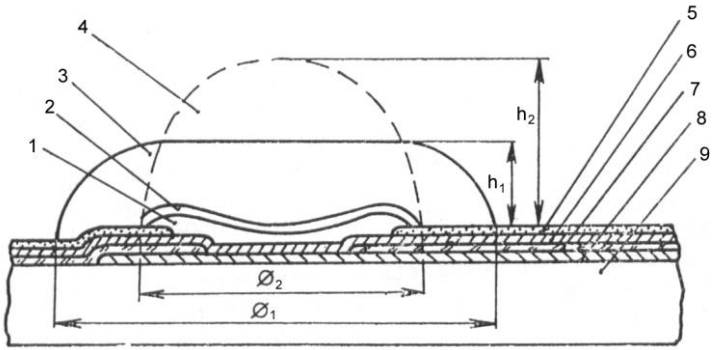


Рис. 7.1. Схема формирования припойного вывода: 1 – твердое основание вывода; 2 – слой Ag; 3 – слой Sn; 4 – сплав Ag-Sn; 5 – защитная маска фоторезиста; 6 – технологический подслой; 7 – SiO_2; 8 – Al; 9 – Si; h_1 – суммарная толщина слоев компонентов припоя; h_2 – высота вывода после сплавления припоя. $\varnothing_1$ и $\varnothing_2$ – диаметры вывода после нанесения слоев припоя и после сплавления припоя

На рис. 7.2 приведена конструкция объемного столбикового вывода. Технологический процесс его изготовления включает следующие основные операции: нанесение поверх алюминиевой металлизации слоя защитного диэлектрика; вскрытие контактных окон меди с адгезионным и пассивирующим слоями; локальное гальваническое выращивание медного столбика при за-

щите фоторезистом; гальваническое покрытие буферным слоем; снятие технологических слоев и горячее лужение завершающего процесса.

Применяется способ изготовления контактных выступов из припоя на кристалле, включающий последовательное нанесение на кристалл слоя диэлектрика и слоя позитивного фоторезиста, вскрытие контактных площадок, напыление пленок Cr/Cu/Au, нанесение второго слоя фоторезиста, химическое осаждение в окна в нем припойного сплава или Sn, удаление двух слоев фоторезиста с частью металлизации между ними и плавления припоя.

Известен способ, суть которого заключается в том, что к контактным площадкам подложки, повернутой этими площадками вниз, подводят разъемную литниковую систему, состоящую из заливочной пластинки и подводящей формы, в каждой из которых выполнены соосные отверстия, сужающиеся к поверхности разъема пластинки и формы и расположенные напротив контактных площадок, к которым обращена пластинка. Затем к пластинке, прижатой вплотную к подложке, подводят форму и подают в отверстия последней расплав припоя, который по отверстиям в пластинке подтекает к контактным площадкам; в этот период температура пластинки ниже температуры формы, но выше температуры ликвидуса припоя. После этого форму отводят от пластинки, и находящийся в отверстиях пластинки припой, смачивая контактные площадки, повисает на них, после чего отводят и пластинку. Таким образом, повисший на пластинках припой затвердевает в форме шариков или конусообразных столбиков.

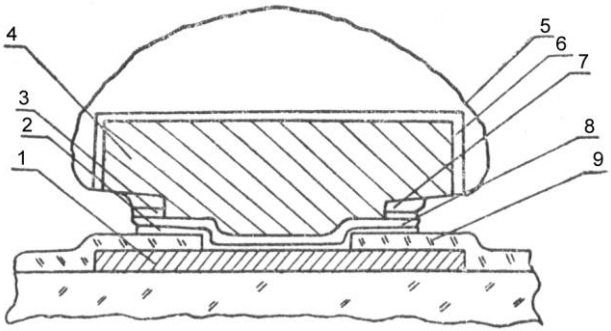


Рис. 7.2. Конструкция столбикового вывода полупроводниковой микросхемы: 1 – алюминиевая металлизация; 2 – адгезионный подслои ванадия; 3 – пассивирующий слой ванадия; 4 – гальванический медный столбик; 5 – припой ПОС-61; 6 – гальванический припой олово-висмут; 7 – фоторезист; 8 – напыленный слой меди; 9 – пассивирующий окисел

Для создания контактных столбиков на кристалле ППИ его помещают на разогретый столик и выдерживают в течение некоторого времени. Затем, на контактную площадку опускают тонкую проволоку припоя и выдерживают в таком положении до тех пор, пока нижняя часть проволоки не расплавится с образованием шарика. После этого проволоку поднимают и переносят на следующую контактную площадку. Когда шарики припоя нанесены на все контактные площадки кристалла, столик охлаждают и припой застывает, образуя контактные столбики. Данный способ реализуется при температуре нагрева столика выше температуры плавления припоя, а диаметр проволоки несколько меньше размера контактной площадки. Данные операции проводят в защитной среде.

Недостатком данного способа является большая трудоемкость для изготовления контактных столбиков на кристаллах БИС и СБИС, имеющих десятки и сотни контактных площадок. Кроме того, данным способом невозможно получать контактные столбики одинаковых размеров, что отрицательно скажется на последующей операции присоединения выводов к контактным столбикам кристалла. Более того, данным способом нецелесообразно формировать контактные столбики на площадках кри-

сталлов в составе пластины из-за длительности данной технологической операции.

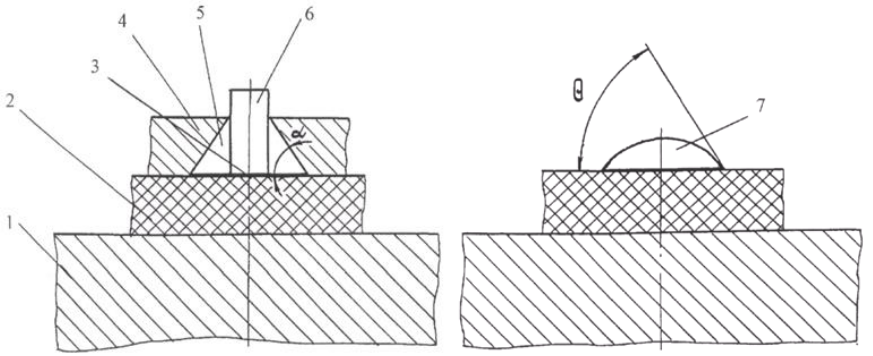
Одной из последних разработок в области изготовления столбиков припойных выводов на полупроводниковых кристаллах ИС, БИС и СБИС является способ, который реализуется следующим образом.

На столике 1 размещают кристалл 2 с контактными площадками 3 (рис. 7.3). К кристаллу вплотную прижимают пластину 4, конические отверстия 5 в которой совмещают с контактными площадками 3. Затем отрезки проволоки припоя 6, каждый размером равный объему контактного столбика, размещают в конических отверстиях 5 пластины 4 на контактных площадках 3 кристалла 2. Затем осуществляют нагрев столика 1 до температуры расплавления припоя 6. После этого столик охлаждают и припой при кристаллизации образует контактные столбики 7 заданной формы (рис. 7.3, б).

Использование отрезков проволоки из припоя с размерами, равными объему контактного столбика, позволяет формировать контактные столбики одинаковой формы.

Конические отверстия в пластине с углом конуса в отверстии α, равным краевому углу смачивания припоем металла контактной площадки θ, способствуют центровке контактного столбика относительно контактной площадки, а также свободному отделению пластины 4 от кристалла с напаянными контактными столбиками 7 после охлаждения.

В случае, когда конические отверстия в пластине имеют угол конуса α меньше краевого угла смачивания припоем металла контактной площадки θ, расплавленный припой за счет капиллярного течения полностью заполнит нижнюю часть отверстия, что может привести к разрушению контактных столбиков при отделении пластины от кристалла после его охлаждения.



а) б)

Рис. 7.3. Схема формирования столбиковых выводов: а – расположение отрезка проволоки припоя до расплавления; б – форма припойного столбика после расплавления: 1 – столик; 2 – полупроводниковый кристалл; 3 – контактная площадка кристалла; 4 – пластина; 5 – конические отверстия в пластине; 6 – проволока из припоя; 7 – припойных столбик

Если конические отверстия в пластине имеют угол конуса α больше краевого угла смачивания припоем металла контактной площадки θ, то припой при расплавлении может свободно растекаться по металлу контактной площадки, в результате чего контактные столбики при кристаллизации припоя будут иметь некоторое смещение относительно центра контактной площадки.

Таким образом, использование предлагаемого способа изготовления контактных столбиков на полупроводниковом кристалле обеспечивает по сравнению с существующими способами следующие преимущества: снижает трудоемкость изготовления контактных столбиков на полупроводниковом кристалле; позволяет получать контактные столбики одинаковой формы и объема.

7.1.3. Формирование шариковых выводов оплавлением проволоки

При формировании контактных выступов с термокомпрессионным присоединением шарика из золотой проволоки к алюминиевой контактной площадке на кристалле на верхней части шарика остается заостренный выступ – след обрыва проволоки. Разработан способ формирования контактных выступов, улучшающий однородность их размеров и формы. Суть способа заключается в следующем: вначале выступ расплющивают с помощью формующей иглы, которая имеет плоскую или вогнутую рабочую поверхность, а затем шарик термически обрабатывают лазерным лучом.

Для формирования ОСВ на кристаллах в составе пластины диаметром до 150 мм разработана установка УФМ-1. Технические возможности установки позволяют получать контактные выступы из золотой проволоки с прочностью, обеспечивающей устойчивость выводов к воздействию технологических факторов сквозного разделения пластин на кристаллы.

На рис. 7.4 представлена схема устройства для получения шариковых выводов оплавлением проволоки.

Устройство содержит механизм подачи микропроволоки 1, сварочную головку 2, на которой закреплен микросварочный инструмент 3 имеющий центральное капиллярное отверстие, трубчатый электрод 4, симметрично установленный на инструменте 3 и имеющий возможность принудительного перемещения по инструменту, трубопровод 5 для подачи газа, предметный столик 6 для размещения полупроводниковой подложки 7 и источник 8 электрического напряжения, соединенный с микропроволокой 1 и электродом 4. Для перекрытия бокового истечения газа из трубопровода 5 электрод выполняют переменного сечения с выступом 9, а избыточный газ выдавливается из отверстий 10 в стенках электрода 4 в зазор между проволокой и стенками центрального капиллярного отверстия инструмента.

Устройство работает следующим образом. Микропроволока 1 с помощью механизма подачи попадает в центральное ка-

пиллярное отверстие инструмента 3, закрепленного на сварочной головке 2, подводится трубопровод 5 и опускается с помощью механизма подачи электрода 4 до перекрытия трубопровода 5 выступом 9. Принудительное перемещение электрода 4 можно осуществлять, например, от механизма подачи микропроволоки (одновременно с подачей микропроволоки в капиллярное отверстие микросварочного инструмента 3). Может быть применен и любой другой механизм подачи, так как точных перемещений не требуется. Для обеспечения перекрытия электродом 4 трубопровода 5 на конце электрода выполняют выступ 9, диаметр которого выбирают равным сумме величин диаметра отверстия трубопровода 5, необходимого перекрытия (контакта поверхностей торца электрода 4 и торца трубопровода 5, необходимого для герметичности) и известной величины погрешности механизма подвода трубопровода 5.

Электрод 4, перекрывающий отверстие трубопровода 5, имеет капиллярные отверстия 10 в стенках, сечение которых соизмеримо с зазором между микропроволокой 1 и стенками центрального капиллярного отверстия в микросварочном инструменте 3, а также обеспечивает избыточное давление рабочего газа в оградительной камере.

Рабочий газ, подаваемый по трубопроводу 5, выбирают в зависимости от материала микропроволоки 1, например, для алюминиевой микропроволоки может применяться аргон или увлажненный аргон. Под действием даже минимального избыточного давления рабочего газа в трубопроводе происходит сначала удаление атмосферных загрязняющих газов, а затем и выдавливание рабочего газа через капиллярные отверстия в стенке электрода в зазор между проволокой 1 и стенками капиллярного отверстия сварочного инструмента 3, таким образом обеспечивается необходимая рабочая атмосфера в зоне оплавления при минимальном расходе рабочего газа.

Затем между электродом 4 и проволокой 1 возбуждается импульсный электрический разряд от источника электрического напряжения 8. Под действием радиального электрического поля происходит оплавление микропроволоки 1 и образование на

конце ее шарика, симметричного относительно оси микропроволоки 1. Поскольку электрическое поле находится между внутренней боковой поверхностью электрода 4 и поверхностью микропроволоки, то значительно снижается износ электрода 4. Затем электрод 4 поднимают, отводят трубопровод 5, а микросварочным инструментом 3 с шариком на его торце осуществляют присоединение микропроволоки 1 к контактным площадкам полупроводниковой подложки 7, закрепленной на предметном столике 6. При повторении цикла работы достигается полная повторяемость получаемых результатов, так как исключена несоосность электрода и микропроволоки и создана необходимая атмосфера в зоне оплавления.

Конструкция обеспечивает повторяемость формы, размеров и соосности формируемых шариков, что повышает стабильность их качества; создает необходимую рабочую атмосферу в зоне оплавления при минимальном расходе рабочего газа; снижает износ электрода при длительной работе последнего; упрощает конструкцию привода механизма подвода трубопровода.

Для образования шариковых выводов оплавлением проволоки могут также использоваться различные устройства. Способ и технология формирования шарика оплавлением золотой проволоки термозвуковой сваркой широко используется в настоящее время в производстве. Для этой цели в «ОКБТЭМ-СО» ГНПК ТМ «Планар» (г. Минск, Республика Беларусь) модифицировано ручное или автоматическое оборудование для термозвукового присоединения выводов при сборке ИС.

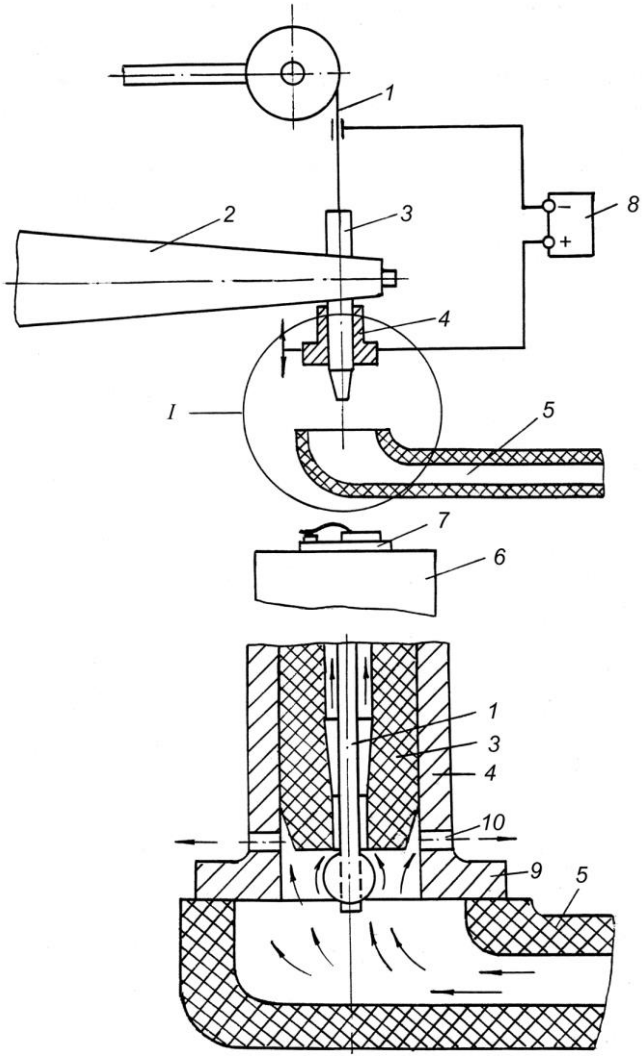


Рис. 7.4. Устройство для формирования шарика оплавлением проволоки: а – схема устройства; б – фрагмент устройства в момент образования шарика: 1 – проволока; 2 – сварочная головка; 3 – микросварочный инструмент; 4 – трубчатый электрод; 5 – трубопровод; 6 – столик; 7 – подложка; 8 – источник питания; 9 – электрод с выступом; 10 – отверстия в стенке электрода

7.1.4. Пайка кристаллов со столбиковыми выводами на контактные площадки

Монтаж методом «flip-chip» применяют для кристаллов со столбиковыми выводами. Кристаллы монтируют на основание корпусов или подложки планарной стороной. При этом рисунок их контактных площадок является зеркальным отображением расположения выводов на кристалле.

Последовательность выполнения монтажа кристалла со столбиковыми выводами из низкотемпературного припоя на подложку показано на рис. 7.5.

Используется способ монтажа полупроводникового кристалла на основание корпуса (подложку), имеющего углубление или сквозное отверстие, вокруг которого располагаются контакты и проводники. Форма канавки, включая зазор между кристаллом и основанием корпуса, а также пазы по углам обеспечивает в процессе герметизации пластмассой затекание жидкого компаунда под кристалл и защиту лицевой поверхности кристалла. При наличии сквозного отверстия на обратную поверхность корпуса накладывают пластину, чтобы не допустить излишний расход компаунда.

На паяемых поверхностях кристалла и подложки формируют контактные столбики. При сборке между кристаллом и подложкой размещают фольгу толщиной менее 50 мкм из диэлектрических материалов: Al_2O_3, полиимида или оксида бериллия. В фольге имеются отверстия, расположение которых соответствует расположению контактных столбиков на поверхностях соединяемых деталей. При сборке в отверстиях фольги размещают припой, совмещают отверстия со столбиками кристалла и подложки и нагревают прибор до температуры плавления припоя. Использование диэлектрической фольги устраняет растекание припоя по поверхности подложки и уменьшает вероятность короткого замыкания между контактами прибора.

С целью повышения качества монтажа приборов со столбиковыми выводами в качестве защитного диэлектрического покрытия на планарную поверхность полупроводниковых пла-

стин наносят полимерный лак, толщина которого находится в пределах от 8 мкм до 2/3 высоты выводов.

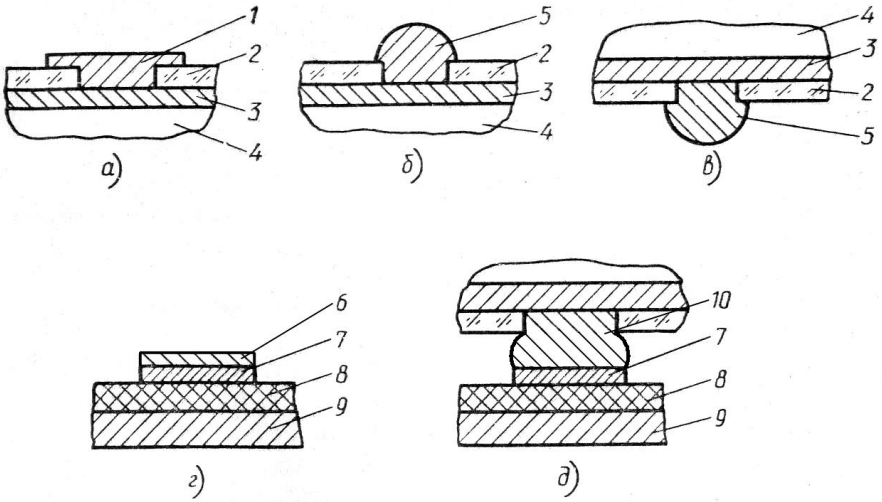


Рис. 7.5. Последовательность выполнения монтажа кристалла со столбиковыми выводами из низкотемпературного припоя на подложку: а, б – гальваническое нанесение припоя на кристалл и оплавление его, в – переворачивание кристалла, г – нанесение припоя на подложку, д – соединение кристалла с подложкой; 1 – припой, 2 – пленка оксида кремния, 3 – слой металлизации на кристалле, 4 – кристалл, 5, 6 – оплавленный припой на кристалле и подложке, 7 – контактная площадка, 8 – подложка, 9 – основание корпуса, 10 – столбик припоя

Пайка кристаллов со столбиковыми выводами на контактные площадки тестовой керамической подложки, которая позволяет также демонтировать кристаллы и повторно использовать подложку для испытаний и контроля электропараметров других ИС, осуществляется следующим образом. Столбики на кристалле представляют собой слои из сплава Cr:Cu/Cu/Au или Sn. Верхний слой контактов подложки состоит из W или Ta. В качестве припоя применяется сплав 95 % Pb-Sn, осаждаемый или наплавляемый на столбик. Соединение кристаллов с тест-подложкой проводится их совмещением и нагревом до 342 °С с последующей выдержкой при температуре 250 °С в специальной

камере. В процессе напайки кристаллов в камеру подается формир-газ, или небольшое количество паров муравьиной кислоты, или CO. Демонтаж кристаллов проводится погружением нагретой до 340 °C подложки в смесь полиэтиленгликоля с канифолью.

На кристалле формируют контактные выступы из Au с покрытием припоем из In-Sn. Монтаж кристалла выполняют с нагревом до температуры, не превышающей температуру плавления припоя. Затем в зазор между кристаллом и подложкой вводят раствор термопласта и проводят термообработку для обеспечения надежного механического соединения кристалла с подложкой.

Специалисты французского центра ядерных исследований разработали сверхминиатюрный процесс перевернутого монтажа полупроводниковых кристаллов на поверхность подложки. В данной технологии используются шарики припоя диаметром 0,01 мм, что позволяет уменьшить расстояние между контактами до 50 мкм. Процесс сборки применяется при наличии на поверхности подложки двух уровневой системы металлизации, что позволяет использовать кристаллы, содержащие до 3000 контактных площадок.

Для контроля положения столбиковых выводов в процессе монтажа методом «flip-chip» структуру на подложке освещают от двух независимых источников наклонными лучами. Положение определяют, контролируя ориентацию теней от выводов на поверхности подложки относительно направления падения света.

Известны результаты исследований шести составов припоя, а также токопроводящего адгезива с серебряным наполнителем, которые используются при изготовлении СБИС в корпусах с матрицей шариковых выводов с кристаллами, монтируемыми на основание корпуса. Паяные соединения исследовались с помощью микрошлифов, а также подвергались испытаниям на прочность при термоциклировании от минус 55 до 125 °C. Установлено, что соединения с припоем Sn/Bi способны выдерживать свыше 750 термоциклов, с припоем Sn/Ag/Bi – свыше 620, с

припоем Sn/Pb – 225. Растрескивание соединений на основе токопроводящего адгезива происходит после 260 термоциклов только на участках, где имеются поры в адгезиве.

Для отвода тепла от кристалла СБИС, смонтированного на подложку методом «flip-chip», используется пластинчатый теплоотвод, который крепится на кристалл сверху пайкой. Теплоотвод изготавливают из материала на основе углерода с ТКЛР равным $(6\text{-}10)\cdot10^{-6}$ °C^{-1}. Теплоотвод может быть изготовлен, например, из пористого графита, пропитываемого полимером, или в виде углеполимерного композита с волокнами углерода. Надежность сборки обеспечивается благодаря согласованности кристалла с теплоотводом по ТКЛР.

7.2. Сборка ППИ с паучковыми выводами

На стадии разработки новых конструкций ИС возникает необходимость определения и оптимизации геометрических параметров микросоединений: высоты петли, длины перемычки и сечения проводника. Критерием оптимизации служит величина допускаемых напряжений в сварном (паяном) микросоединении и присоединяемом микропроводнике как в процессе монтажа, так и в процессе испытаний и эксплуатации ИС.

Для определения напряжений необходимо знать величины не только внешних сил, действующих на микросоединения и возникающих в результате ударов, вибраций, изменений температуры, но и внутренних, зависящих от механических свойств материала микропровода и конструктивного исполнения ППИ. Особенно это нужно учитывать при монтаже паучковых выводов к кристаллам ИС и подложке, т. к. жесткость данных выводов выше, чем у проволочных проводников.

7.2.1. Расчет напряжений в микросоединениях, сформированных ультразвуковой микросваркой паучковых выводов к кристаллам ИС

Беспроволочный монтаж ИС с использованием паучковых выводов широко используется в производстве. Технологический процесс сборки некоторых типов ИС заключается в следующем. Система алюминиевых проводников – выводов, расположенная на полиимидной основе, совмещается с контактными площадками кристалла. Пленка полиимида, накладываясь на лицевую поверхность кристалла, исключает короткое замыкание выводов на край кристалла и создает одинаковую для всех выводов высоту деформирования (прогиба) при микросварке. Выводы присоединяются при помощи ультразвуковой сварки путем их последовательного обхода на полуавтомате с программным управлением.

После присоединения выводов микросварные контакты и лицевая поверхность кристалла ИС защищаются полимерным компаундом. Полученные таким образом бескорпусные ИС, поступают на операцию измерения электрических параметров и тренировок. В процессе полимеризации защитного компаунда, тренировок ИС, монтажа их на подложки или корпуса возможно температурное воздействие до 300°С.

Вследствие различия коэффициентов термического расширения материалов элементов конструкции (полиимид, алюминий, кремний) в микросварных контактах возникают механические напряжения. Наиболее опасны напряжения от усилий, направленных вдоль оси вывода R_x (рис. 7.6). В удаленных от оси симметрии контактах могут возникнуть напряжения и от усилий, направленных перпендикулярно к оси вывода в плоскости кристалла R_y. В результате смещения конца вывода относительно нейтральной оси из-за отклонений в размерах кристалла и полиимидной ленты возникает сила R_z. Эта сила действует на сварное соединение в направлении параллельном плоскости кристалла.

При сборке под действием микросварочного инструмента происходит упругопластическая деформация вывода и при воздействии ультразвуковых колебаний образование неразъемного соединения.

Известно, что во всем диапазоне деформаций (наиболее точно в пластической области) зависимость σ – ε (напряжение – деформация) аналитически выражена степенной функцией

$$\sigma = K\varepsilon^n,$$

где К и n – константы кривых упрочнения, которые обычно выражаются через основные механические свойства, известные по стандартным испытаниям металла на растяжение.

При деформации микропроводника по окончании стадии упругого изгиба начинается пластический изгиб с первоначальной и постепенно увеличивающейся кривизной. Тогда, кроме нормальных растягивающих и сжимающих напряжений, возникают радиально сжимающие, которые достигают максимальной величины в нейтральном слое. При этом главные нормальные напряжения при пластическом изгибе равны между собой, что указывает на смещение нейтрального слоя.

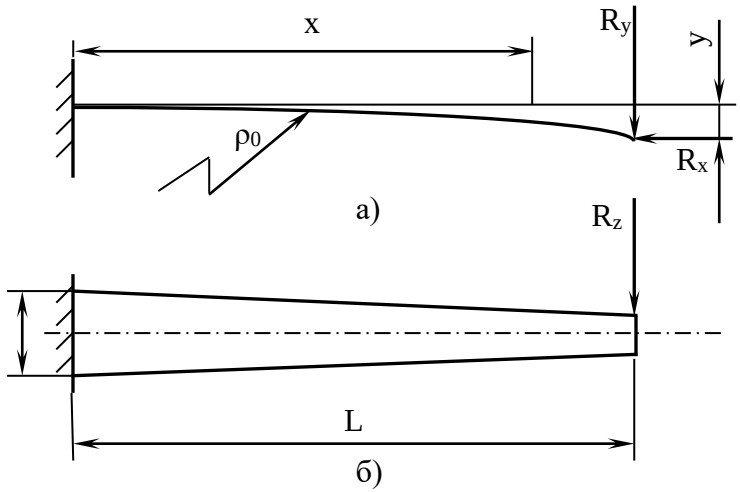


Рис. 7.6. Расчетная схема для определения напряжений изгиба в выводе и напряжений сдвига в сварном соединении: R_x, R_y и R_z - усилия действующие

на вывод; ρ_0 - радиус кривизны нейтрального слоя; L - длина вывода; B - ширина вывода; y - прогиб вывода

В технологии обработки металлов давлением при холодной штамповке применяется гибка с малым радиусом закругления, сопровождаемая уменьшением толщины материала и смещением нейтрального слоя в сторону сжатых волокон. В этом случае радиус кривизны нейтрального слоя при чистом изгибе образца прямоугольного сечения определяется по формуле

$$\rho_0 = \frac{R + r}{2}\alpha\beta,$$

где R – наружный радиус изогнутого вывода; r – внутренний радиус гибки; $\alpha = h_1/h$ – коэффициент утонения; $\beta = B_{ср}/B$ – коэффициент уширения.

Следует заметить, что в микроэлектронике при монтаже ИС с паучковыми выводами использование данной формулы для расчета радиуса кривизны ρ_0 нецелесообразно, т. к. паучковые выводы представляют собой микропровода прямоугольного сечения, при этом их ширина соизмерима с толщиной. При изгибе паучкового вывода взаимное нажатие волокон друг на друга незначительно, что характеризуется только линейным напряженным и объемным деформированным состоянием.

Кроме того, нагружение паучковых выводов сварочным инструментом осуществляется на присоединяемом участке, в то время как другой находится в защемленном состоянии. В этом случае радиус изгиба ρ_0 зависит от длины L и прогиба вывода Y и определяется согласно рис. 7.6 по формуле

$$\rho_0 = \frac{\sqrt{L^2 + y^2}}{2\cos arctgL/y}.$$

Расположение зон упругой и пластической деформации по высоте сечения (рис. 7.7) зависит от радиуса кривизны нейтрального слоя ρ_0 и определяется относительно последнего по формуле

$$y_H = \pm\rho_0 \left(\frac{K}{E} \right)^{\frac{1}{1-n}},$$

где E – модуль упругости материала вывода; K и n – константы кривых упрочнения.

Для принятой схемы и при условии, что в сечении вывода превалируют пластические деформации, соотношение между кривизной и изгибающим моментом имеет вид

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \left(\frac{M}{K \cdot J_z} \right)^{\frac{1}{n}},$$

где M – изгибающий момент; K и n – константы кривых упрочнения; $J_z = \frac{2b}{n+2} \left(\frac{h}{2} \right)^{n+2}$ – приведенный момент инерции прямоугольного сечения вывода; B и h – соответственно ширина и толщина вывода.

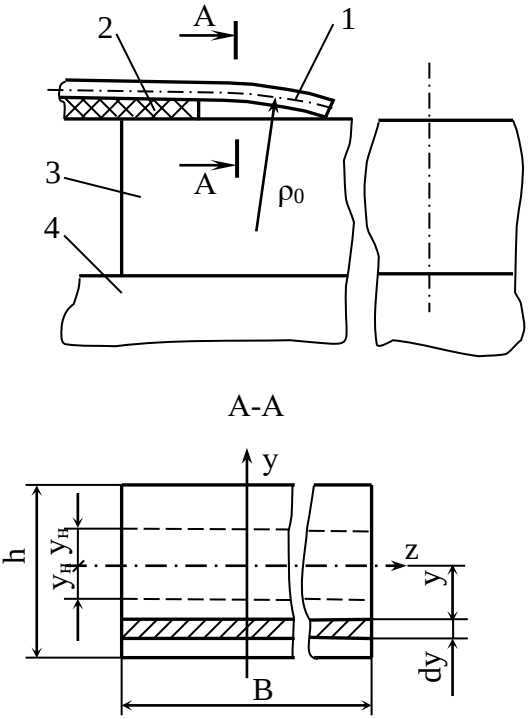


Рис. 7.7. Схема упругопластического изгиба паучкового вывода при ультразвуковой сварке: 1 – вывод; 2 – пленка полиимида; 3 – кристалл; 4 – подложка

После соответствующих математических преобразований найдены величины сил R_x, R_y и R_z и напряжения, обусловленные этими силами для длины выводов от 0,1 до 3,0 мм. Установлено, что напряжения при изгибе в алюминиевом выводе (B=0,15 и h=0,03 мм) и сварном микросоединении не превышают допустимых значений при длине вывода свыше 0,3 мм.

Проведенные расчеты позволяют на стадии разработки ИС определять оптимальные геометрические размеры паучковых выводов, что обеспечивает получение качественных микросоединений (рис. 7.8).

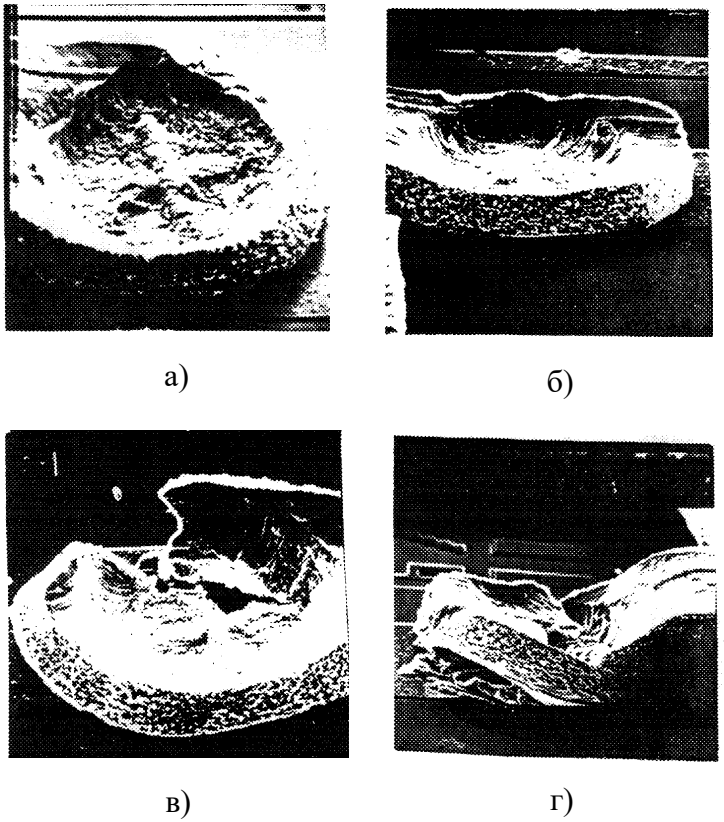


Рис. 7.8. Внешний вид микросварных соединений алюминиевых паучковых выводов к кристаллам ИС, сформированных ультразвуковой микросваркой: а, б – на оптимальных режимах; в, г – с отклонениями геометрических размеров выводов и режимов сварки. Увеличение 350^x (а, в) и 150^x (б, г)

7.2.2. Особенности монтажа внутренних выводов БИС и СБИС

Одним из методов обеспечения в СБИС высоких скоростей переключения, а также предотвращение деградации сигнала и перекрестных искажений, вносимых соседними выводами, является автоматизированная сборка кристаллов на гибкой ленте. Широкие выводы ленточных носителей с низким сопротивлением рассеивают тепло эффективнее, чем традиционные проволоч-

ные. В связи с этим в последние годы возрос интерес к разработке оборудования и совершенствованию технологии сборки СБИС на ленточных носителях.

Развитие поверхностного монтажа компонентов на печатные платы обусловлено уменьшением габаритов и веса радиоэлектронной аппаратуры. Поверхностный монтаж привел к необходимости разработки новых видов корпусов ИС, БИС и СБИС с большим количеством выводов. Широко используются плоские корпуса высотой 2-3 мм, имеющие сотни внешних выводов. Определяющими при выборе формы и конструкции корпуса являются размеры и технология изготовления кристалла. К конструкции корпуса предъявляются жесткие требования по надежности: хороший теплоотвод от кристалла, качественное крепление кристалла к основанию корпуса и присоединение внутренних выводов на кристалле с внешними выводами на корпусе. Различие в коэффициентах термического расширения кристалла и материала корпуса ведет к появлению механических напряжений в кристалле и корпусе, что может привести к растрескиванию кристалла, особенно у СБИС площадью до 100 мм^2. БИС и СБИС с большим (до миллиона и более) количеством транзисторов, резисторов, диодов и пр. на кристалле выполняются со специальными теплоотводами.

Корпуса ИС, изготавливаемые заливкой пластмассы, не обеспечивают достаточную надежность при количестве выводов >100. Предлагается использовать силиконовый гель, который позволяет защитить кристалл от примесей (Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, Na^+, NH_4^+, K^+) и улучшить его герметизацию, что обеспечивается слиянием молекул геля и воды при термообработке.

За последние годы неуклонно уменьшается ширина линий металлизации: в новых перспективных схемах до 0,18 мкм и менее. Однако несмотря на существенное уменьшение размеров элементов и увеличение сложности схем, требования к их надежности неуклонно повышаются.

Электрические и механические характеристики металлизации должны удовлетворять следующим основным требованиям: малое электрическое сопротивление, хорошая адгезия с изоля-

ционной поверхностью кристалла, согласованность с другими материалами, применяемыми при изготовлении схем. На этапах изготовления ИС малой и средней степени интеграции широко применялась алюминиевая металлизация, легированная кремнием. Известно, что при увеличении концентрации Si в металлизации от 0,5 до 1,1 (вес. %) удельное сопротивление Al-металлизации увеличивается более чем вдвое. Алюминиевая, а также Al с присадкой Si металлизация является неприемлемой для быстродействующих СБИС.

Добавка меди в Al-Si-металлизацию приводит к снижению интенсивности отказов. Однако при содержании Cu>0,1 % ее влияние на интенсивность отказов незначительно.

Расчетами с использованием метода конечных элементов установлено распределение механических напряжений в Al-Si-металлизации. Отмечается, что максимальные напряжения возникают при ширине линий разводки 2-3 мкм, что объясняется образованием пустот под разводкой на ступеньках SiO_2. При локальных напряжениях (около 450 МПа) перетекание кластерных вакансий может приводить к образованию микропустот даже при низких температурах.

В Al-металлизации, покрытой органическим компаундом, возникают процессы коррозии, связанные с электромиграцией. Очистка поверхности ИС перед заливкой компаундом позволяет подавить данное явление. Для очистки используют следующие методы: обдув сжатым азотом под высоким давлением; плазменную обработку в атмосфере кислорода; промывку во фреоне с последующей обработкой УФ-излучением и промывкой в деионизованной воде. Коррозионные характеристики Al-металлизации, покрытой различными полимерными материалами, показали высокую эффективность очистки кристалла во фреоне и УФ (озоновой) обработкой.

С увеличением числа выводов и размеров кристалла значительно увеличиваются габариты корпусов и длина межсоединений, а вследствие этого – значения сопротивлений, индуктивностей и емкостей.

Поэтому методы сборки многовыводных СБИС в металлокерамические (пластмассовые) корпуса с помощью термокомпрессионной или ультразвуковой сварки проволочных выводов имеют ряд принципиальных ограничений дальнейшего развития. В связи с этим возникла необходимость разработки групповых способов монтажа с использованием паучковых выводов. В производстве используются следующие схемы присоединения паучковых выводов к кристаллу: ультразвуковая групповая сварка, микропайка с косвенным подогревом без инструмента и термоимпульсная микропайка.

Наиболее широкое применение в производстве нашел метод термоимпульсной микропайки (рис. 7.9).

При термоимпульсной микропайке паучковые выводы 2, закрепленные на диэлектрической пленке 3, совмещаются с шариковыми контактами 4 на кристалле 5. Инструмент 1 опускается, прижимая паучковые выводы к шариковым контактам. Через инструмент пропускается импульс тока. Тепло передается в места контакта, нагревая их до температуры пайки. Слой клеящего вещества 6, удерживающий кристаллы на подложке 7 в ориентированном положении, расплавляется, и при поднятии инструмента кристалл, припаянный к паучковым выводам, отрывается от подложки за счет силы, вызванной предварительной упругой деформацией паучковых выводов. Силы сцепления кристалла с клеящим веществом и подложкой должны быть меньше этой силы.

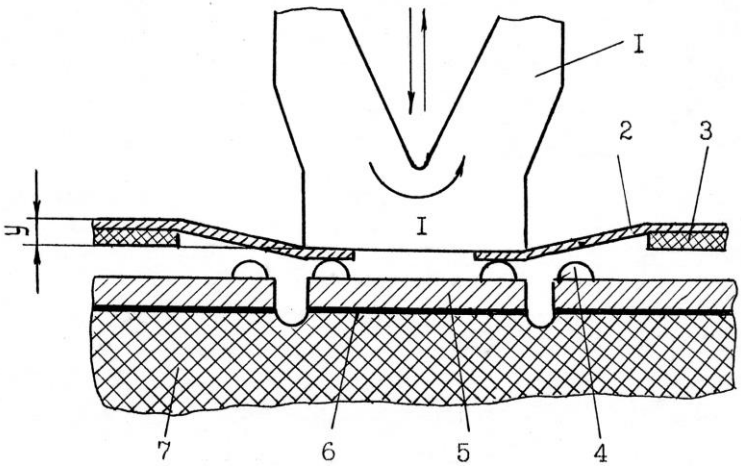


Рис. 7.9. Схема термоимпульсной микропайки: 1 – инструмент; 2 – паучковый вывод; 3 – диэлектрическая пленка; 4 – шариковый контакт; 5 – кристалл; 6 – клей; 7 – подложка

При проектировании оборудования для термоимпульсной микропайки необходимо рассчитывать оптимальные упругие деформации паучковых выводов и усилия, обусловленные этими деформациями. Знание этих величин позволит правильно выбирать материал и конструкцию паучковых выводов.

При групповом монтаже паучковых выводов к шариковым контактам кристаллов ИС из-за различных коэффициентов термического расширения выводов, кристалла и подложки в собранном узле возникают значительные термомеханические напряжения. Их величина зависит от соединяемых материалов, геометрических размеров и температуры процесса микропайки. Компенсировать термомеханические напряжения можно путем создания предварительных упругих деформаций паучковых выводов.

Для определения напряжения сдвига в направлении длины выводов получено выражение

$$\tau_x = \frac{Eh}{2rl}\left[\left(\alpha_1 l\Delta T_1 + \alpha_2 \Delta x \Delta T\right) - \left(\frac{l^2}{2y}\arcsin\frac{2y}{l} - l\right)\right],$$

где y – величина прогиба паучкового вывода, мм; h – толщина паучкового вывода в месте микропайки, мм; l – длина паучкового вывода от защемления до центра шарикового контакта, мм; r – радиус шарикового контакта, мм; Δx – расстояние от центра шарикового контакта до центра кристалла, мм; ΔT_1 и ΔT_2 – разность температур паучкового вывода и кристалла при микропайке и окружающей средой, ºС; α_1 и α_2 – коэффициенты термического расширения материалов паучкового вывода и кристалла соответственно, 1/ºС; E – модуль упругости материала паучкового вывода, МПа.

Напряжения сдвига в зависимости от прогиба, длины и толщины выводов приведены на рис. 7.10. Для практического использования расчетов следует ввести ограничения по максимально возможным упругим деформациям. Пунктирная линия (рис. 7.10) разграничивает области упругих и пластических деформаций для толщины вывода h = 0,02 мм. При длине паучкового вывода в 1 мм снизить термомеханические напряжения до нуля за счет упругих деформаций не удается. Таким образом по данной методике можно определять оптимальную длину паучкового вывода.

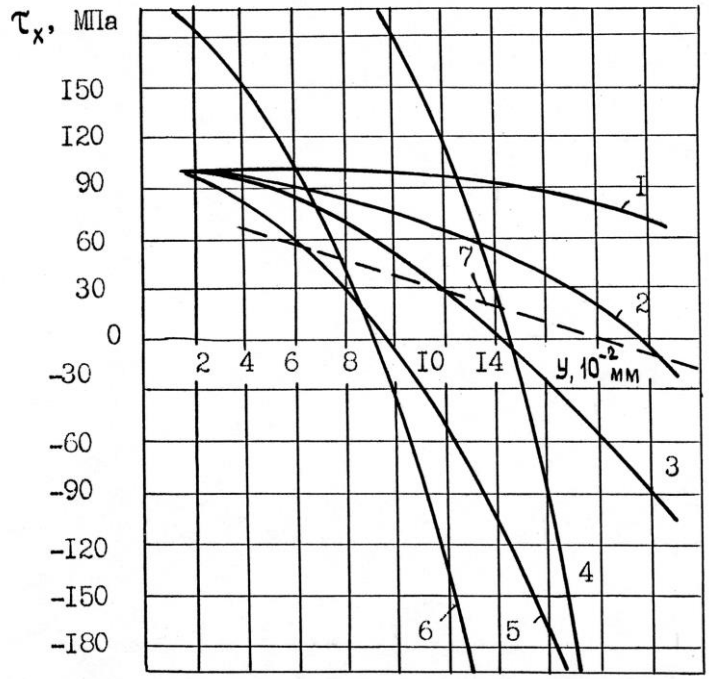


Рис. 7.10. Зависимость τ_x от прогиба y: 1 – при h = 0,02 мм и l = 3 мм; 2 – при h = 0,02 мм и l = 2 мм; 3 – при h = 0,02 мм и l = 1,5 мм; 4 – при h = 0,08 мм и l = 1,5 мм; 5 – при h = 0,02 мм и l = 1 мм; 6 – при h = 0,04 мм и l = 1 мм; 7 – кривая, разграничивающая области упругих и пластических деформаций для кривых 1, 2, 3 и 5 при h = 0,02 мм

Определение оптимальных размеров паучковых выводов позволит получать надежные микросоединения при групповом монтаже. На рис. 7.11 приведена номограммы для определения размеров паучковых выводов.

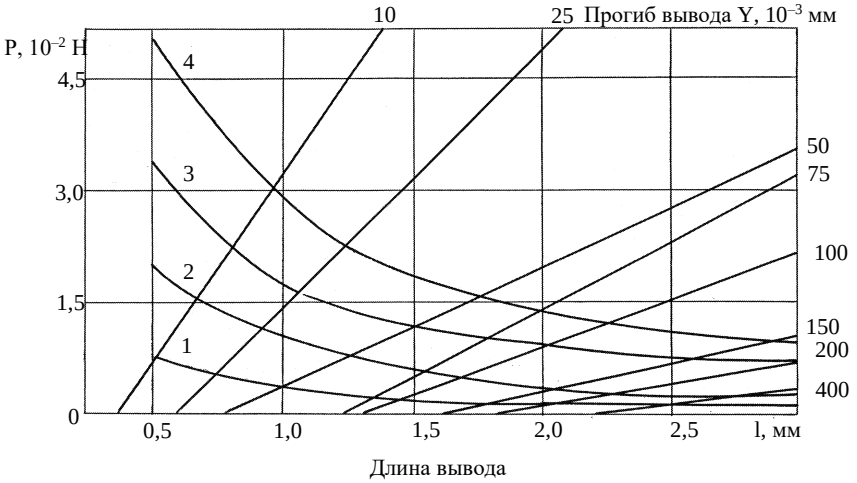


Рис. 7.11. Номограммы для определения размеров паучковых выводов при групповом монтаже ИС при b_0 = 0,60 мм; 1 – h = 0,02 мм; 2 – h = 0,03 мм; 3 – h = 0,04 мм; 4 – h = 0,05 м

Одним из способов сборки БИС является монтаж кристалла на прокладке с паучковой разводкой с последующим монтажом на подложке с микропроволокой. Например, 320-выводной корпус размером 16,5×16,5 мм всего в 1,9 раза превышает размеры кристалла. Кроме того, технология монтажа с использованием паучковой прокладки позволяет уменьшать расстояние между внешними выводами до 143 мкм.

Так как монтаж осуществляется способом перевернутого кристалла, то обратная сторона кристалла может быть использована для эффективного теплоотвода. Схема монтажа кристалла показана на рис. 7.12.

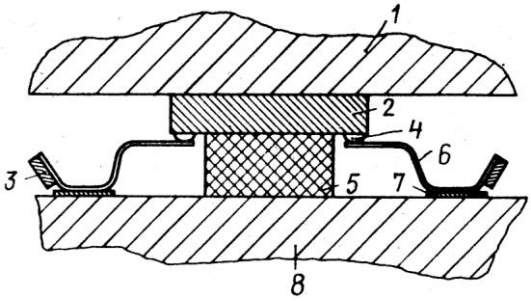


Рис. 7.12. Схема сборки БИС с использованием паучковых выводов: 1 – теплоотвод; 2 – кристалл; 3 – полиимидный несущий вывод; 4 – шариковый контакт; 5 – эластичный элемент; 6 – вывод; 7 – контактная площадка; 8 – монтажная подложка

Шариковые контакты БИС формируют методом электролитического осаждения нескольких слоев. Золотое покрытие, наносимое химическим осаждением на шариковые контакты, повышает их стойкость в процессе хранения перед монтажом кристалла. Структура столбикового электрода должна обладать стой-костью при термических операциях при монтаже кристалла. Высота шарикового контакта должна иметь размеры 18±1 мкм по всей площади кристалла.

Паучковая прокладка представляет собой трехслойную структуру из металлических проводников, наклеенных на полиимидную пленку. Разводка 320 контактных площадок кристалла БИС размером 11,54×12,67 мм^2 осуществляется выводами с шагом 143 мкм, поэтому необходимо разветвление выводов для обеспечения расстояния между ними 175 мкм. Паучковая прокладка для монтажа кристаллов БИС кроме центрального квадратного окна имеет прорези с четырех сторон от центрального окна для монтажа кристалла на тестовой плате. Материалом паучковых прокладок является упругая медная лента толщиной 35 мкм, на верхнюю поверхность которой наносится пленка Sn.

Изготовители и разработчики СБИС затрачивают очень много времени и средств на разработку аппаратуры для проверки характеристик изделий. Выбор правильного направления разработки тестеров для СБИС требует не только оценок необходимости проверок, но и выбора оптимального направления

проектирования СБИС. Нужно знать, какие СБИС и в каком количестве будут изготавливаться промышленностью. Испытательные установки являются экономически приемлемыми, если стоимость испытаний при серийном производстве составляет от 3 до 5 % стоимости серийных схем.

Основной трудностью анализа отказавших ППИ является вскрытие корпусов, особенно пластмассовых. Рекомендуется механический способ вскрытия пластмассовых корпусов с помощью торцовой фрезы. Фрезой получают поперечный паз на корпусе с обратной стороны до кристаллодержателя; затем удаляют кристаллодержатель; фрезеруют замкнутую по периметру кристалла канавку на глубину на 0,2 мм, превышающую толщину кристалла. После обработки в струе горячего газа при T = 170 °C кристалл легко отделяется от пластмассы. При этом полностью сохраняется физическая картина коррозии металлизации на кристалле или на отпечатке пластмассы.

Глава 8. Контроль качества внутренних соединений ППИ

8.1. Разработка методики оценки прочности микросоединений в изделиях силовой электроники

Для отраслей промышленности, занимающихся изготовлением ППИ, одним из наиболее важных вопросов является обеспечение высокого качества и надежности проволочного монтажа, т. к. в настоящее время от 35 до 60 % всех отказов изделий связано с низким качеством присоединения внутренних выводов. Поэтому при разработках технологических процессов и оборудования для монтажа внутренних выводов очень важно в зависимости от применяемого метода сборки правильно выбрать необходимые методы управления процессом микросварки и контроля качества полученных соединений.

В технологии производства ППИ единые критерии оценки качества микросоединений пока отсутствуют. В каждом конкретном случае выбираются свои технические средства и методы испытаний, способ обработки результатов испытаний и анализ качества микросоединений (рис. 8.1).

Эффективным способом обеспечения качества и надежности соединений является оптимизация режимов монтажа, т.е. управление технологическим процессом, а также контроль и прогнозирование качества сварки. При использовании математических моделей для оценки качества микросоединений необходимо учитывать следующие факторы: нестабильность сечения микропроволоки, изменение толщины пленочной металлизации на кристалле и корпусе для разных приборов одной и той же партии.

Применяются разрушающие методы контроля для выборочной оценки качества соединений, как правило, для проверки готовности микросварочного оборудования к работе. Из неразрушающих методов контроля, применяемых при 100 %-ной оценке качества микросоединений, следует отметить следующие: обдув струей газа под давлением, ультразвуковой резо-

нансный контроль микросварных соединений, электромагнитный метод, контроль качества микросоединений по тепловым параметрам зоны соединения.

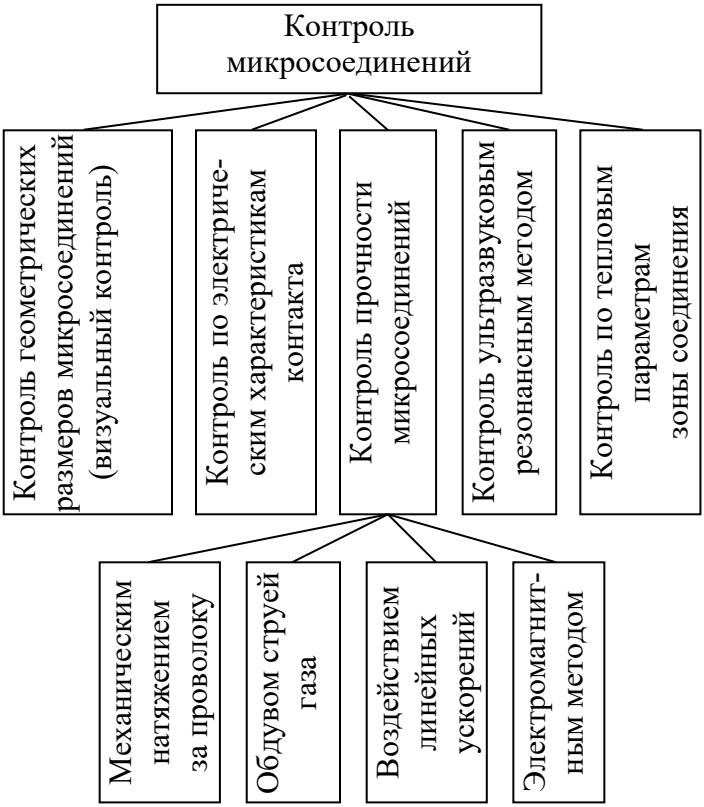


Рис. 8.1. Основные методы контроля сформированных микросоединений

Некоторые из дефектов (отклонение геометрических размеров микросоединений, плохое совмещение проволоки с контактными площадками кристалла или корпуса, чрезмерное натяжение или провисание проволоки) можно обнаружить визуальным контролем с помощью микроскопов.

Контролировать качество микросоединения можно по топографии его поверхности. Для исследования формы сварного соединения (отношение диаметра привариваемой проволоки к

минимальной высоте ее деформированной части) необходимо использование растрового электронного микроскопа.

8.1. Оценка прочности микросоединений в ППИ

При контроле прочности микросоединений статическими и динамическими испытаниями необходимо учитывать расположение контактных площадок на разных уровнях. При испытаниях на растяжение важную роль играет угол отрыва проволочной перемычки, т. к. при малых углах измеренная прочность сварного соединения оказывается в несколько раз меньше действительной величины.

В производстве ППИ используется способ контроля прочности микросоединений между кристаллом и корпусом натяжением крючком проволочной перемычки. При этом для 100 %-ного контроля прочности испытание должно быть неразрушающим. Возникает необходимость определить взаимосвязь между приложенным к перемычке усилием и действительным значением прочности сварного соединения в зависимости от механических свойств материала, геометрической формы и размеров перемычки.

На рис. 8.2 представлена схема контроля прочности микросоединений.

Приложенная к перемычке сила F связана с усилием натяжения проволоки со стороны кристалла (F_k) и траверсы ($F_т$) соотношениями

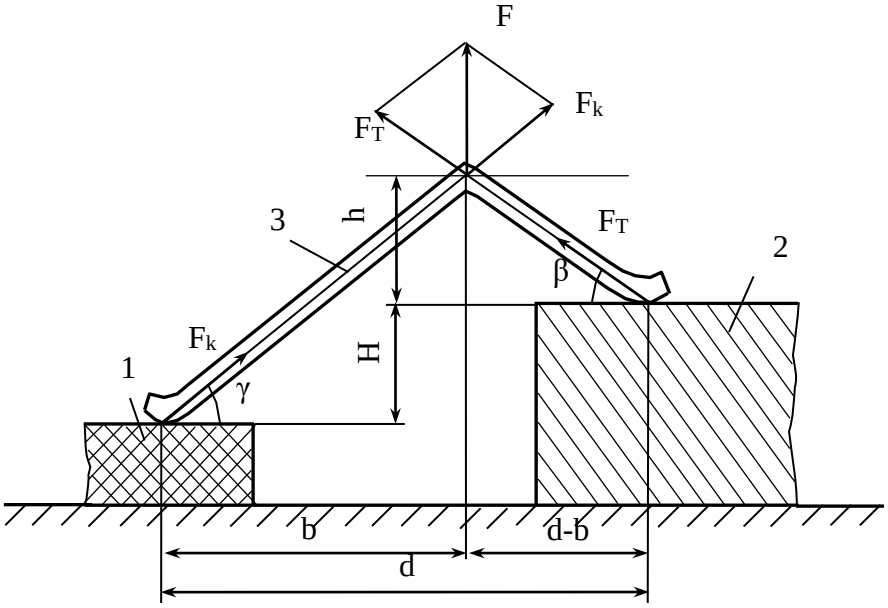


Рис. 8.2. Схема контроля прочности микросоединений натяжением проволочной перемычки: 1 – кристалл; 2 – траверса; 3 – проволочная перемычка

$$F_K = F\frac{\cos\beta}{\sin(\beta+\gamma)}, \quad (1)$$

$$F_{\grave{O}} = F\frac{\cos\gamma}{\sin(\beta+\gamma)}, \quad (2)$$

где β, γ – углы, образованные между плоскостью соединения и проволоки, град.

В процессе испытания для того, чтобы усилия, действующие на оба сварных соединения, были равны, необходимо равенство углов подъема ветвей вывода ($\beta = \gamma$). В этом случае усилия натяжения проволоки

$$F_K = F_T = \frac{F}{2\sin\gamma}. \quad (3)$$

В момент равенства сил F_k и $F_т$ крючок занимает вполне определенное положение b на перемычке в зависимости от d, h, H. Размер b исходя из этих условий определяют по формуле

$$b = \frac{d(h + H)}{2h + H}, \qquad (4)$$

где d – расстояние между сварными соединениями, мм; h – высота перемычки, мм; H – разновысотность кристалла и траверсы, мм.

Значение $b = 0{,}5d$, если микросоединения находятся на одном уровне. В случае если одно микросоединение находится выше другого, точка приложения усилия к перемычке при равенстве сил натяжения ветвей смещается в сторону более высокой точки присоединения вывода ($b > 0{,}5d$), т. е. к траверсе.

Длина L перемычки через геометрические размеры соединения составляет

$$L = \sqrt{b^2 + (H + h)^2} + \sqrt{h^2 + (d - b)^2}. \qquad (5)$$

Подставляя выражение (4) в формулу (5), получим значение высоты перемычки

$$h = 0{,}5\sqrt{L^2 - d^2} - 0{,}5H. \qquad (6)$$

Выражения (4) и (6) позволяют определить точные координаты места приложения к перемычке контрольного усилия при равенстве сил натяжения ветвей.

Угол подъема ветвей вывода γ рассчитывают по формуле

$$\sin\gamma = (2h + H)/L. \qquad (7)$$

Максимальное усилие натяжения ветвей через механические свойства материала проволочного вывода определяется из выражения

$$F_K = F_T = [\sigma_{доп}] \cdot S, \qquad (8)$$

где $[\sigma_{доп}]$ – допустимое напряжение в микросварном соединении, МПа; S – площадь поперечного сечения микросоединения, мм^2.

По приведенным формулам проведены расчеты геометрических размеров микросоединения, координат места приложения нагрузки, усилия натяжения ветвей и усилия, приложенного к перемычке. Результаты расчетов при равенстве сил натяжения проволоки со стороны кристалла и траверсы для микросоедине-

ний, выполненных алюминиевой проволокой диаметром 0,03 мм ($[\sigma_{доп}]$=283 МПа), приведены в табл. 8.1.

Табл. 8.1. Значение величины усилия F в зависимости от геометрических размеров перемычки

Разность высот между кристаллом и корпусом H=0,3 мм					Разность высот между кристаллом и корпусом H=0,1 мм				
d, мм	L, мм	b, мм	h, мм	F, Н	d, мм	L, мм	b, мм	h, мм	F, Н
2,0	2,484	1,201	0,596	0,024	2,0	2,369	1,079	0,585	0,022
2,2	2,662	1,32	0,599	0,023	2,2	2,556	1,185	0,600	0,021
2,4	2,842	1,436	0,611	0,022	2,4	2,711	1,29	0,615	0,020
2,6	3,026	1,552	0,624	0,021	2,6	2,935	1,395	0,631	0,019
2,8	3,212	1,667	0,636	0,020	2,8	3,426	1,501	0,645	0,018
3,0	3,399	1,782	0,649	0,019	3,0	3,319	1,605	0,661	0,017
3,2	3,588	1,896	0,661	0,018	3,2	3,512	1,711	0,671	0,016
3,4	3,778	2,01	0,673	0,017	3,4	3,766	1,815	0,687	0,016
3,6	3,969	2,123	0,685	0,017	3,6	3,901	1,92	0,701	0,015
3,8	4,161	2,236	0,697	0,016	3,8	4,096	2,025	0,711	0,015
4,0	4,354	2,349	0,709	0,016	4,0	4,292	2,13	0,720	0,014

В этом случае силы натяжения вывода определяются по формулам

$$F_T = F\left[\frac{b\sqrt{h^2 + (d-b)^2}}{hb + (d-b)(h+H)}\right], \qquad (9)$$

$$F_K = F\left[\frac{(d-b)\sqrt{(h+H)^2 + b^2}}{hb + (d-b)(h+H)}\right]. \qquad (10)$$

При испытаниях трудно обеспечить высокую точность ориентации крючка относительно перемычки, поэтому в расчетах необходимо учитывать погрешность позиционирования (рис. 8.3).

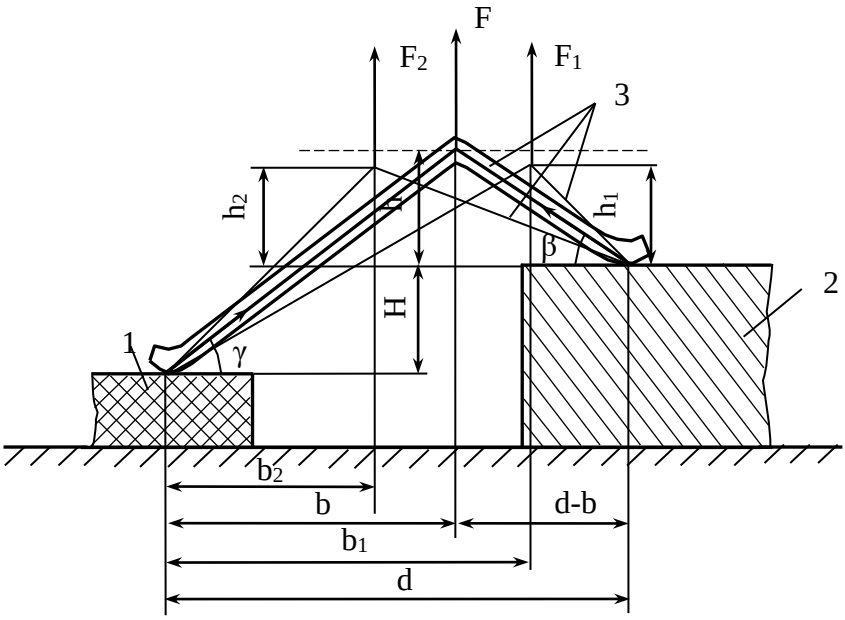


Рис. 8.3. Схема усилия, действующего на проволочную перемычку, в зависимости от места приложения нагрузки: 1 – кристалл; 2 – траверса; 3 – проволочная перемычка

Расстояние b до точки приложения усилия в исследуемом приборе с учетом погрешности позиционирования вычисляется по формуле

$$b_{1,2} = b_{опт} \pm \frac{b_{опт}\delta}{100\%}, \qquad (11)$$

где $b_{опт}$ – оптимальное значение b для случая равенства сил, действующих на микросоединения на кристалле и корпусе, мм; δ – погрешность позиционирования, %.

По формуле (6) рассчитывают высоту перемычки, а затем по выражениям (9) и (10) усилия натяжения ветвей и величину контрольного усилия, которое нужно приложить к перемычке. Результаты расчетов приведены в табл. 8.2 (при δ=10 %).

Из табл. 8.2 видно, что в случае смещения точки приложения нагрузки к траверсе усилия, действующие на сварные соединения кристалла и траверсы, будут равны при d=3,4 мм и

L=3,778 мм. Если нагрузка смещена к кристаллу, то $F_K=F_T=0,02$ Н при d=3,8 мм и L=4,161 мм.

Табл. 8.2. Зависимость прочности микросоединений ППИ от места приложения механической силы к проволочной перемычке диаметром 0,03 мм (при H=0,3 мм, δ=10 %)

d, мм		2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
L, мм		2,48	2,66	2,84	3,02	3,21	3,39	3,58	3,77	3,97	4,16
Точка приложения смещена к	b_1, мм	1,32	1,45	1,58	1,71	1,83	1,96	2,09	2,21	2,34	2,46
	h_1, мм	0,53	0,52	0,51	0,49	0,48	0,46	0,44	0,42	0,39	0,37
	$F_к$, Н	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,02	0,02	0,02
	$F_т$, Н	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	F_1, Н	0,022	0,021	0,019	0,018	0,017	0,015	0,014	0,013	0,012	0,01
Точка приложения смещена к	b_2, мм	1,08	1,19	1,29	1,39	1,50	1,60	1,71	1,81	1,91	2,01
	h_2, мм	0,48	0,46	0,43	0,4	0,36	0,33	0,28	0,24	0,19	0,14
	$F_к$, Н	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	$F_т$, Н	0,018	0,018	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,02
	F_2, Н	0,020	0,019	0,017	0,015	0,013	0,011	0,010	0,009	0,007	0,006

По предложенной методике проведены расчеты геометрических размеров микросоединения, координат места приложения нагрузки, усилия натяжения ветвей и усилия, приложенного к перемычке, для диода Шоттки в корпусе типа ТО-220. Конструктивные размеры прибора: d=5,6 мм; H=1,55 мм. Результаты расчетов для микросоединений, выполненных алюминиевой проволокой марки А995 диаметром 0,25 мм ($[\sigma_{доп}]$=71,2 МПа), при равенстве усилий, действующих со стороны кристалла и траверсы, приведены в табл. 8.3. Максимальное допустимое усилие натяжения ветвей по формуле (8) $F_{доп}$=3,49 Н.

Табл. 8.3. Значение величины усилия F в зависимости от геометрических размеров перемычки

L, мм	b, мм	h, мм	F, Н
6,200	4,432	0,555	2,995
6,066	4,661	0,391	2,683
5,992	4,836	0,291	2,484
5,946	4,972	0,224	2,345
5,920	5,060	0,185	2,264
5,896	5,154	0,147	2,183

Установлено, что при смещении точки приложения нагрузки к микросоединению сила, действующая на это соединение, увеличивается (табл. 8.4).

Табл. 8.4. Зависимость прочности микросоединений диодов Шоттки от места приложения механической силы к проволочной перемычке диаметром 0,25 мм

L, мм	Точка приложения смещена к траверсе					Точка приложения смещена к кристаллу				
	b_1, мм	h_1, мм	$F_к$, Н	$F_т$, Н	F_1, Н	b_2, мм	h_2, мм	$F_к$, Н	$F_т$, Н	F_2, Н
6,2	4,65	0,55	4,21	0,55	3,31	3,49	3,12	3,49	3,36	2,79
6,07	4,89	0,38	4,43	0,38	3,3	3,49	2,87	3,49	3,37	2,45
5,99	5,08	0,28	4,59	0,28	3,26	3,49	2,77	3,49	3,37	2,21
5,95	5,22	0,21	4,72	0,22	3,21	3,49	2,74	3,49	3,37	2,03
5,92	5,31	0,17	4,81	0,18	3,14	3,49	2,77	3,49	3,36	1,91
5,89	5,41	0,13	4,9	0,14	3,0	3,49	2,88	3,49	3,36	1,78

Таким образом, на величину усилия натяжения проволоки большое влияние оказывают геометрические размеры проволочной перемычки и точка приложения механической силы к перемычке. Силы натяжения проволоки со стороны кристалла и траверсы могут существенно отличаться и превышать усилия, приложенные к перемычке, и приближаться к допустимым значениям прочности микросоединений. С увеличением длины и высоты перемычки усилие, которое нужно приложить к перемычке, увеличивается. Это необходимо учитывать при проведении контроля прочности микросварных соединений ППИ.

8.2. Контроль прочности микросоединений БИС и СБИС

Существуют различные способы контроля качества микросоединений полупроводниковых приборов и ИС.

Известен способ прямой оценки качества микросоединений, заключающийся в механическом отрыве микросоединений

с фиксацией разрушающего усилия. Основным недостатком данного способа является то, что он является разрушающим и может быть использован для выборочного контроля прочности микросоединений в серийном производстве полупроводниковых приборов и ИС, а также для отработки технологических режимов присоединения внутренних выводов на стадии разработки новых ППИ.

По другому способу контроль микросоединений осуществляется по минимально заданному усилию на отрыв, при этом к проволочной перемычке прикладывается дозированное механическое воздействие. Применение данного способа контроля микросоединений связано с большой трудоемкостью контрольной операции и использованием специального приспособления.

Существует также способ отбраковки термокомпрессионных сварных соединений. Испытываемое ППИ с соединительными проводниками (перемычками) зажимают в оправке и обдувают потоком воздуха. Регулируя параметры потока воздуха, изменяют силовое воздействие на микросоединения. Приборы с оторванными проволочными перемычками бракуются при визуальном осмотре под микроскопом. Данный способ используют последовательно с формированием перемычек или параллельно с визуальным контролем сформированных микросоединений. Основным недостатком является то, что после обдува струей воздуха необходим 100 %-ный визуальный осмотр микросоединений под микроскопом.

Нами разработан способ отбраковки микросоединений ППИ (рис. 8.4). Проволочные перемычки 1 соединены с кристаллом 2 и траверсами корпуса 3 с помощью микросоединений 4. Корпус изделия 3 с кристаллом 2 и сформированными микросоединениями 4 закрепляют в оправке и подвергают обдуву струей сжатого воздуха. При обдуве струей сжатого воздуха ППИ подключено к прибору автоматического контроля статических параметров 5. Струя сжатого воздуха обдувает проволочные перемычки 1, вызывая их натяжение, тем самым, воздействуя на микросоединения 4 с усилием зависящим от давления

струи сжатого воздуха. На изделие подают максимально допустимое напряжение и по отклонению электрических параметров от допустимых значений, например, при токе утечки равном нулю фиксируют наличие в изделии дефектных микросоединений.

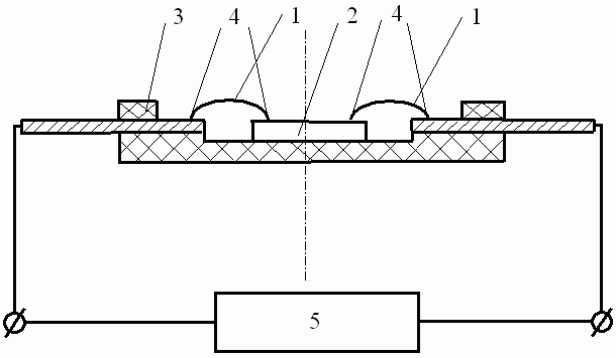


Рис. 8.4. Схема контроля прочности микросоединений

Для реализации описанной методики испытаний необходимо соответствующее оборудование. Известна установка для контроля адгезионной прочности пленок с подложкой, определяемой путем приложения отслаивающей нагрузки, механизм которой выполнен в виде вакуумной головки, состоящей из вакуумной камеры и системы вакуумных отсеков, располагаемых напротив каждой пленочной площадки.

Основным недостатком данной установки является трудоемкость изготовления отверстий над каждой контактной площадкой, особенно в БИС и СБИС, содержащих десятки и сотни микросоединений, что сильно усложняет ее конструкцию. Кроме того, отверстия малых размеров, располагаемые над каждой контактной площадкой, не позволяют создавать высокое отслаивающее усилие из-за специфики турбулентности потока воздуха, что снижает качество контроля прочности микросоединений ППИ.

Предложена конструкция установки, содержащая механизм приложения отслаивающей нагрузки, выполненный в виде вакуумной головки и состоящий из вакуумной камеры и систе-

мы вакуумных отсеков, расположенных напротив каждого микросоединения и имеющих калиброванные отверстия и дросселирующие пазы в стенках, сопрягаемые с соответствующими микросоединениями и стенками вакуумной камеры, при этом отверстия в вакуумных отсеках выполнены в виде пазов, расположенных над сформированными микросоединениями кристалла и корпуса. На рис. 8.5 представлена схема установки; на рис. 8.6 – схема расположения пазов над микросоединениями кристалла и корпуса.

Установка работает следующим образом. ППИ, содержащее корпус 2 с кристаллом 3 и сформированными микросоединениями 4 жестко закрепляется на основании 1 установки. После этого к ободку 5 корпуса 2 ППИ герметично крепится вакуумная головка 6, состоящая из вакуумной камеры 7 и системы вакуумных отсеков 8. Вакуумные отсеки 8 имеют отверстия 9 в виде пазов, расположенных над сформированными микросоединениями кристалла и корпуса, и дросселирующие пазы 10. Затем к стойке 11 вакуумной головки 6 подсоединяют трубку от вакуумного насоса.

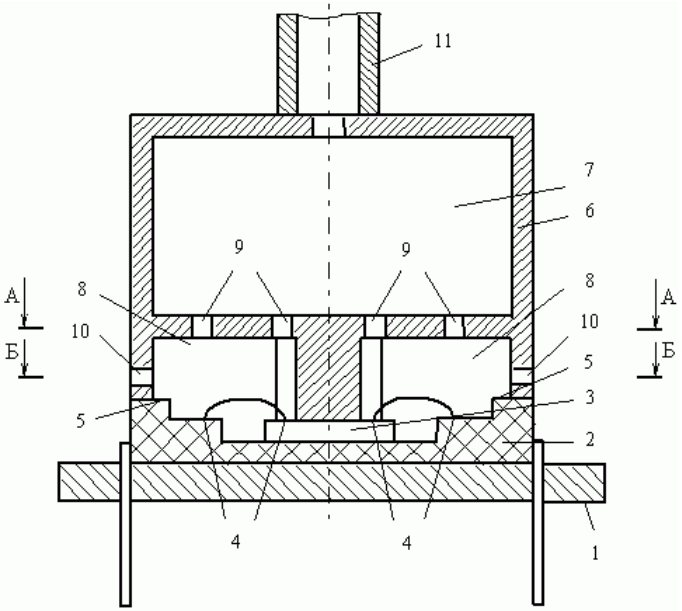


Рис. 8.5. Установка для контроля прочности микросоединений

При включении вакуумного насоса за счет перепада давлений в вакуумной камере создается поток воздуха, который вызывает механическую нагрузку на перемычки, как бы отрывая микросоединения от контактных площадок кристалла и корпуса. Пазы, расположенные над сформированными микросоединениями обеспечивают лучшую турбулентность потока воздуха и повышают механическое усилие отрыва микросоединений.

Изменяя ширину пазов над микросоединениями, можно увеличивать или уменьшать перепад давлений в вакуумной камере, тем самым регулировать величину отрывающей нагрузки, действующей на каждое микросоединение.

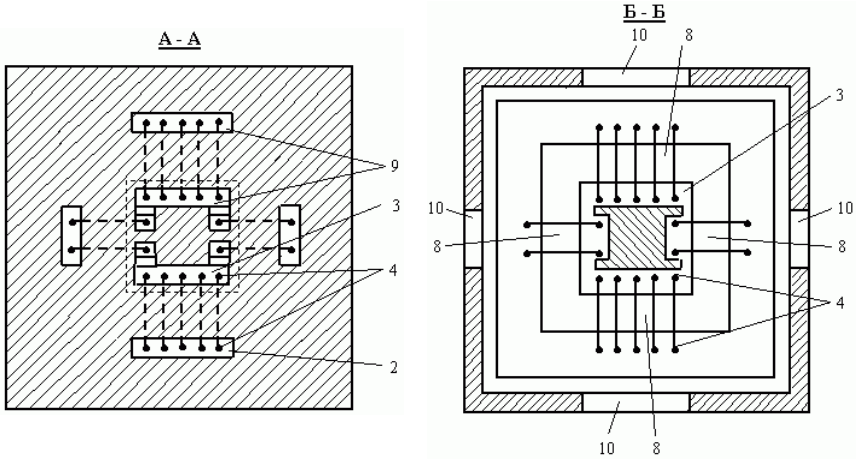


Рис. 8.6. Схема расположения пазов над микросоединениями кристалла и корпуса

Одновременно с данной операцией осуществляется очистка подкорпусного пространства от пыли и других посторонних частиц.

Таким образом, использование предлагаемой установки для контроля прочности микросоединений обеспечивает по сравнению с существующими установками следующие преимущества: прощает конструкцию установки; повышает качество контроля прочности микросоединений; способствует очистке подкорпусного пространства полупроводниковых приборов и ИС от различных посторонних включений. Использование предлагаемого способа отбраковки микросоединений ППИ позволяет снизить трудоемкость контрольной операции за счет исключения 100 %-ного визуального контроля микросоединений под микроскопом после их обдува потоком воздуха.

Заключение

При решении вопроса о надежности паяных, сварных и клеевых соединений, наряду с выбором оптимальных способов и режимов монтажа, необходимо учитывать состав и свойства покрытий контактных поверхностей кристаллов и корпусов.

Разработка способов сборки ППИ с использованием пайки припоями без свинца в настоящее время является основной экологической проблемой микроэлектроники. Движение за полный запрет свинца в электронной аппаратуре набирает все большую силу во всех промышленно развитых странах. Особую активность проявляют правительственные и экологические организации Европейского Союза, США и Японии.

Применение бессвинцовых припоев и покрытий естественно приведет к изменению технологии пайки и в целом сборочных процессов. Потребуется корректировка режимов пайки и, как следствие, доработка технологического оборудования. Необходимо проведение комплексных испытаний бессвинцовых паяных соединений на прочность, тепловое сопротивление, коррозионную стойкость, совместимость с материалами и покрытиями обратной стороны кристаллов и оснований корпусов ППИ.

Большая новая область исследований – сборочные операции в производстве СПП. В технологии изготовления данных изделий используется проволока диаметром до 0,5 мм, поэтому необходима разработка новых методов присоединения внутренних выводов, особенно к контактным площадкам кристаллов.

Данное учебное пособие не могло охватить все конструктивно-технологические особенности присоединения кристаллов и внутренних выводов в производстве ППИ.

Авторы надеются, что настоящее учебное пособие будет полезно не только студентам, непосредственно изучающим технологию производства ППИ, но и инженерам, и аспирантам, работающим в области электронной техники и микроэлектроники.

Библиографический список

1. Балашов Ю.С., Зенин В.В., Сегал Ю.Е. Сборочные операции и их контроль в микроэлектронике: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. 229 с.

2. Горлов М.И., Ануфриев Л.П., Бордюжа О.Л. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем в процессе серийного производства. Минск: Изд-во «Интеграл», 1997. 390 с.

3. Горлов М.И., Емельянов В.А., Строгонов А.В. Геронтология кремниевых интегральных схем.

4. Никитин В.Н. Проектирование и технология производства мощных СВЧ транзисторов / В.Н. Никитин, Б.К. Петров, В.Ф. Сыноров и др. М.: Радио и связь, 1989. 144 с.

5. Зенин В.В., Сегал Ю.Е., Спиридонов Б.А. Физико-химические процессы в микросоединениях полупроводниковых изделий: Монография. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2003. 168 с.

6. Груев И.Д., Матвеев Н.И., Сергеева Н.Г. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.

7. Мазур А.И., Алехин В.П., Шоршоров М.Х. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1981. 224 с.

8. Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры / Под. ред. Б.Е. Бердичевского. М.: Сов. Радио, 1976. 420 с.

9. Углов А.А., Анищенко Л.М., Кузнецов С.Е. Адгезионная способность пленок. – М.: Радио и связь, 1987. (Б-ка конструктора-технолога радиоэлектронной аппаратуры).

10. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. – М.: Химия, 1977.

11. Красулин Ю.Л. Микросварка давлением / Ю.Л. Красулин, Г.В. Назаров. М.: Машиностроение, 1976. 160 с.

12. Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов.-4-е изд., перераб. и доп.-М.: Машиностроение, 1988.-376 с.

13. Говард Г. Манко. Пайка и припои.-М.:Машиностроение,1968.-304с.

14. Малышев В.М., Румянцев Д.В. Золото.-М.:Металлургия,1979. 288 с.

15. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков; Под ред. В.А. Лабунцева.-М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.

16. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.

17. Улиг Г.Г., Реви Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия, 1989. Пер. изд., США, 1985. 456 с.

18. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник: В 2 т. / Под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 240 с.

19. Карамзинов Ф.В., Русак О.Н., Гребенников С.Ф., Осенков В.Н. Безопасность жизнедеятельности: Словарь – справочник / Под общей редакцией С.Ф. Гребенникова. СПб.: Изд-во «Лань», 2001.

20. Безопасность деятельности: Энциклопедический словарь / Под ред. засл. деят. науки и техники РФ, д-ра техн. наук, проф. О.Н. Русака. СПб: Информационно-издательское агентство «ЛИК», 2003.

21. Вол А.Я., Каган И.К. Строение и свойства двойных металлических систем: в 4 т. М.: Наука, 1976. Т. 3,814 с.

22. Блохин В.Г. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов / В.Г. Блохин, О.П. Глудкин, А.И. Гуров, М.А. Ханин; Под. ред. О.П. Глудкина. М.: Радио и связь, 1997. 232 с.

23. Свойства элементов: Справ. изд. / Под ред. М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1985. 672 с.

24. Хряпин В.Е. Справочник паяльщика.-5-е изд. перераб. и доп. М., 1981. 348 с.

25. Буркат Г.К. Серебрение, золочение, палладирование и родирование. Л., 1984. 86 с.

26. Алюминий: свойства и физическое металловедение. Справочник: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Е. Хэтча. М., 1989. 422 с.

27. Онегин Е.Е. Автоматическая сборка ИС: Справ. пособие / Е.Е. Онегин, В.А. Зенькович, Л.Г. Битно. Минск: Высш. шк., 1990. 383 с.

28. Грачев А.А. Ультразвуковая микросварка / А.А. Грачев, А.П. Кожевников, В.А. Лебига и др. М.: Энергия, 1977. 184 с.

29. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. Л.: Машиностроение, 1988. 224 с.

30. Колешко В.М. Ультразвуковая микросварка. Минск: Наука и техника, 1977. 328 с.

31. Бокарев Д.И. Модификация процесса формирования внутренних соединений силовых полупроводниковых приборов: Дис…канд. техн. наук. Воронеж, 2002. 165 с.

32. Сегал Ю.Е. Обеспечение качества паяных соединений кристаллов в полупроводниковых приборах для силовой электроники в процессе их разработки и серийного производства: Дис…канд. техн. наук. Воронеж, 2001. 134 с.

33. Болгов И.С. Металлические материалы для электроники // Электронная промышленность. 1996. № 3. С. 87-89.

Учебное издание

Зенин Виктор Васильевич
Рягузов Александр Владимирович

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СБОРКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

В авторской редакции

Компьютерная верстка: Рягузова А.В.

Подписано к изданию _____
Уч.-изд. л. 18,7

Воронежский государственный
технический университет

394026 Воронеж, Московский просп., 14