

Пайка ионным лучом в вакууме

Решение проблем бесфлюсовой пайки и лужения при сборке силовых электронных компонентов и необходимость обеспечения качественных паяных соединений приводят к использованию ускоренных ионных потоков в невысоком вакууме. Концентрированные потоки ионов с высокой энергией позволяют обеспечить локальное воздействие на зону пайки, удалить окисные пленки, активировать припой и паяемый материал и интенсифицировать процессы физико-химического взаимодействия при пайке.

**Владимир Ланин,
профессор**

vlanin@bsuir.unibel.by

Евгений Телеш

etelesh@mail.ru

Проблемы пайки прецизионных изделий электроники

Актуальной проблемой современной технологии полупроводниковых приборов является бесфлюсовое лужение и пайка, поскольку остатки флюсов — потенциальные инициаторы коррозии и загрязнений. Кроме того, наличие в припое остатков флюса и пузырей воздуха приводит к локальному перегреву силовых электронных компонентов и выходу их из строя. Ультразвуковые [1] и вакуумные [2] способы позволяют исключить применение флюса, однако имеют ряд существенных недостатков: большие температуры и время лужения или пайки, что увеличивает глубину диффузионной зоны; очистка поверхностей припоя и детали не совмещается с операцией лужения или пайки, что приводит к адсорбции загрязнений органического и неорганического происхождения и, как результат, к ухудшению механических, электрических и тепловых характеристик паяных соединений.

В 1980-е годы для технологических целей пайки начали использовать электронные [3] и ионные потоки. Целесообразность ионных потоков определяется тем, что при равном ускоряющем напряжении и равных токах электронный и ионный потоки переносят одинаковую энергию, однако импульс, переносимый ионом, значительно выше импульса, переносимого электроном [4]. При взаимодействии ионного потока с кристаллической решеткой, в силу закона сохранения количества движения, ионы решетки получают значительно больше кинетической энергии, и ее разрушение происходит значительно интенсивнее. Использование концентрированных потоков энергии в технологии пайки полупроводниковых приборов позволяет обеспечить локальное воздействие на зону нагрева, активировать припой и паяемый материал и интенсифицировать процесс физико-химического взаимодействия при пайке.

Для процессов лужения и пайки изделий перспективным направлением является использование низкоэнергетических ионных потоков. Используя доста-

точно невысокий вакуум (10^{-2} Па) и изменяя энергию и плотность потока ионов, можно совмещать процессы подготовки к лужению и пайке с самим процессом пайки и лужения. При этом процессы протекают в контролируемой атмосфере, что позволяет увеличить их чистоту и воспроизводимость и повысить выход годных приборов.

Энергия ускоренных ионов инертных газов эффективно используется для удаления окислов и загрязнений с поверхности металла и припоя, для нагрева припоя и детали до определенной температуры, активации поверхности металла и припоя и увеличения степени растекания припоя по поверхности металла.

Один из основных процессов, протекающих при бомбардировке твердых тел ионами, — ионное распыление, то есть удаление поверхностных атомов твердого тела. Следовательно, он будет способствовать эффективному удалению окисной пленки и загрязнений. Важной особенностью взаимодействия ионов с твердым телом является то, что более 90% энергии иона переходит в тепловые колебания атомов твердого тела, то есть расходуется на разогрев обрабатываемого материала.

Процесс распыления часто сопровождается иницированием радиационно-стимулированных химических реакций. Бомбардировка ионами инертных газов может вызвать диссоциацию сложных по составу соединений, изменение химического состава поверхностного слоя, стимулированную диффузию, восстановление материала из окисленного состояния. Ионная бомбардировка также активирует атомы поверхностного слоя, что стимулирует физико-химическое взаимодействие между припоем и металлом.

Концентрированные потоки ускоренных ионов, фокусируемых в виде луча на поверхность паяемых деталей, позволяют достичь высоких удельных плотностей мощности нагрева, обеспечивают его быстроту и локальность, а также точность управления тепловой энергией. Воздействуя ионным лучом на поверхность детали, осуществляют очистку от за-

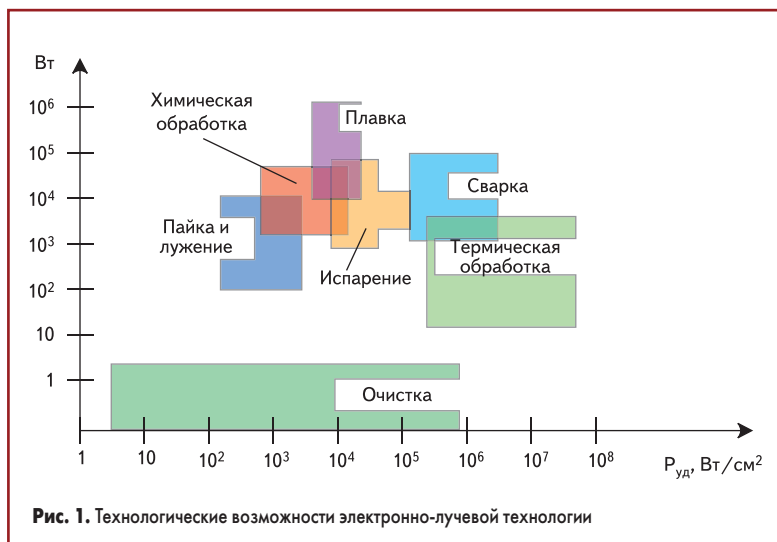


Рис. 1. Технологические возможности электронно-лучевой технологии



Рис. 2. Ионный пучок в вакууме

грязней и окисной пленки, а после совмещения деталей сборку подвергают повторному облучению, расплавляя припой [5]. Недостаток такой активации — необходимость вакуума, что ограничивает производительность и возможности групповой пайки.

Физические основы электронной и ионной пайки

Физические основы электронно-лучевого нагрева и распространения пучка определяют новые принципы технологии пайки. При электронно-лучевом нагреве происходит значительное проникновение пучка в металл, поэтому скорость подъема температуры ограничена только пределом плотности мощности пучка, при котором происходит оплавление основного металла, и достигает 100 °С/мин, что позволяет повысить производительность процесса пайки для большого числа изделий в 5–10 раз.

Электронно-лучевая пайка имеет следующие преимущества:

- возможность использования тугоплавких припоев с температурой плавления 1600–2000 °С;
- локальный нагрев способствует меньшему растворению паяемых металлов и ограничивает излишнюю растекаемость припоя;
- скорость нагрева более 100 °С/мин в процессе пайки не способствует росту зерен тугоплавких металлов, что исключает повышение их хрупкости;
- дополнительная очистка паяемой поверхности в процессе пайки за счет электронной бомбардировки обеспечивает хорошее затекание припоя в зазор с образованием полномерных галтелей;
- по сравнению с традиционным оборудованием для высокотемпературной пайки электронно-лучевые установки обладают в десятки раз меньшей потребляемой мощностью;
- при электронно-лучевой пайке в вакууме или форвакууме расход газа меньше в сотни раз;
- отсутствует необходимость использования нагревательных элементов из дорогостоящих тугоплавких сплавов.

Схематично широкие технологические возможности электронного луча изображены на рис. 1. В настоящее время для технологических целей стали использовать ионные потоки. Целесообразность их использования для технологических процессов определяется тем, что, хотя при равном ускоряющем напряжении и равных токах электронный и ионный потоки переносят одинаковую энергию, однако импульс, переносимый каждым ионом, значительно выше импульса, переносимого каждым электроном:

$$P_i/P_e = (M_i/M_e) \times N, \quad (1)$$

где P_i — импульс иона, P_e — импульс электрона, M_i — масса иона, M_e — масса электрона, N — кратность ионизации.

Так как масса самого легкого иона H_2 в 1840 раз больше, чем масса электрона, значит, импульс, переносимый ионами, на два порядка превышает импульс, переносимый электронами. При использовании потока многозарядных ионов ($N > 1$) это преимущество ионного потока еще более усиливается.

При взаимодействии ионного потока с кристаллической решеткой в силу закона сохранения количества движения ионы решетки получают больше кинетической энергии, чем при взаимодействии с электронным потоком. Разрушение кристаллической решетки при взаимодействии с ионным потоком будет происходить значительно интенсивнее, поэтому ионные потоки обладают большими технологическими возможностями, чем электронные.

Использование энергии потоков ускоренных ионов, фокусируемых в виде пучка на поверхность паяемых деталей с помощью электростатических и электромагнитных линз в вакууме, позволяет достичь высоких удельных плотностей мощности нагрева, обеспечивает его быстроту и локальность, дает возможность точно управлять тепловой энергией. Воздействуя ионным пучком (рис. 2) на поверхность деталей, можно осуществить очистку от загрязнений и окисной пленки [5]. После совмещения деталей сборку подвергают повторному облучению, расплавляя припой и соединяя детали после охлаждения.

Для реализации данных условий эффективно использование энергии ускоренных ионов инертных газов.

Взаимодействие пучка ионов с жидким припоем характерно физическим явлением, известным под названием «ионный ветер». Оно заключается в передаче импульса (количества движения) ионов расплавленному припою. Под действием этого импульса может происходить перемещение верхнего слоя жидкого припоя, что будет способствовать увеличению степени его растекания на поверхности материала, подвергаемого лужению. Ионная бомбардировка активирует атомы поверхностного слоя, что стимулирует физико-химическое взаимодействие между компонентами обрабатываемых материалов, в нашем случае — между припоем и материалом.

Конструкции ионных источников

Для процессов лужения и пайки использовались ионные источники типа ускорителя с анодным слоем, который позволяет формировать пучок ионов в виде полого конуса. Такая конфигурация пучка способствует концентрации энергии разряда на поверхности обрабатываемой детали, что ускоряет процессы очистки и нагрева. Энергия ионов регулируется путем изменения напряжения на аноде и составляет



Рис. 3. Схема ионно-лучевой пайки:
1 — ионный источник,
2 — пучок ионов,
3 — припой,
4 — деталь



Рис. 4. Внешний вид вакуумной установки UPM 3.279.017

0,5–2 кэВ. Пучок ионов под углом 60° от нормали фокусируется на поверхности детали, причем степень фокусировки можно в небольших пределах изменять величиной магнитного поля соленоида, который находится внутри ионного источника (рис. 3). Другой важной особенностью конструкции источника является то, что при пролете через область поперечного магнитного поля разрядной системы ионы отклоняются от продольной оси, то есть возникают условия, способствующие раскручиванию жидкого припоя относительно центра фокуса.

Ионные источники монтируются в вакуумном объеме установок вакуумного напыления, например UPM 3.279.017 (рис. 4).

Под колпаком вакуумной установки закрепляют собираемые детали, и после создания рабочего вакуума (5×10^{-2} Па) начинается процесс обработки. Общий вид устройства ионно-лучевой пайки и лужения вместе с обрабатываемыми деталями представлен на рис. 5.

В качестве рабочего газа используется аргон высшей очистки. Перед процессами лужения металлические заготовки и навески из припоя обезжириваются в изопропиловом спирте. Температуру образцов измеряют с помощью

проволочной термопары. Дополнительный нагрев образцов осуществлялся с применением резистивного нагревателя. Угол смачивания припоя определяют визуально с помощью установки УКУС-1. Адгезия измерялась методом нормального отрыва с помощью разрывной машины. Коэффициент растекания определяют как отношение площади залуженной поверхности образца к площади поверхности навески припоя.

Оптимизация параметров ионных пучков для пайки

Особенности ионно-лучевого лужения алюминиевых сплавов — это наличие зоны вторичного растекания припоя и образование эвтектики с припоем. Вторичное растекание обусловлено проникновением жидкого припоя под окисную пленку, причем зона вторичного больше зоны первичного растекания в 1,5–2,0 раза. При перегреве зоны лужения может произойти образование эвтектического сплава алюминия с оловом и свинцом, что приводит к растворению прилегающего к припою объема сплава. В результате возникает обширная зона взаимодействия, которая ухудшает качество лужения. Анализ полученных результатов показывает, что ионно-лучевое лужение обеспечивает в 2,0–2,5 раза большие значения коэффициентов растекания припоя Кр по сравнению с известными методами.

Высокое качество облуженных поверхностей, как алюминиевых сплавов, так и тугоплавких материалов, может быть объяснено следующим образом. Прежде всего, при лужении происходит эффективная очистка поверхности металлов и припоя, причем очистка не прерывается и в процессе самого процесса лужения. Следует также отметить, что эффективность очистки достигается за счет того, что окислы и загрязнения удаляются в результате одновременно протекающих процессов — физического распыления, сублимации и испарения за счет нагрева, ионно-стимулированных процессов десорбции, диссоциации и восстановления окислов. Высокая чистота контактирующих материалов способствует интенсивному протеканию процессов растекания и смачивания, что с учетом воздействия «ионного ветра» обеспечивает высокий коэффициент растекания припоя и низ-

кую величину угла смачивания. Адгезионная прочность сцепления слоя припоя с металлической поверхностью при ионно-лучевом лужении повышается за счет ионной бомбардировки, а также высокой чистоты поверхностей взаимодействующих материалов.

При торможении ускоренных ионов в твердом теле их кинетическая энергия трансформируется в тепловые колебания атомов материала, что является определяющим в процессах лужения и пайки. Вследствие того, что энергию ионов легко изменять в пределах 500–2000 эВ, варьируя ускоряющее напряжение, то так же легко можно регулировать и температуру деталей.

Кинетика нагрева облуживаемых или паяемых деталей имеет большое значение для обеспечения качественных соединений, так как скорость нагрева влияет на процессы взаимодействия между металлом и припоем. Поэтому очень важно знать, как влияют характеристики ионного пучка на скорость нагрева.

В качестве объекта для нагрева использовали стальную пластину размером $40 \times 40 \times 1$ мм³, на которой закреплялась хромель-алюмелевая термопара. Пластина располагалась в фокусе ионного пучка. Изменялись ускоряющее напряжение на аноде (энергия ионов), ток (количество ионов на пластине), величина магнитного поля (ток соленоида). На рис. 6 представлена кинетика нагрева образца в зависимости от напряжения на аноде и тока на мишени-образце. Учитывая полученные данные, можно сделать следующие выводы:

- степень расхождения ионного пучка не оказывает существенного влияния на скорость нагрева;
- ток мишени оказывает большее влияние на скорость нагрева, чем ускоряющее напряжение.

С помощью ионной бомбардировки при данных конструктивных параметрах ионного источника можно поднять температуру до 900–950 °С, а с помощью дополнительного резистивного нагревателя — до 1000–1200 °С.

Исследование процессов очистки осуществлялось с целью определения оптимальных режимов, а именно энергии ионов, плотности их пучка и времени процесса. Эксперименты проводились с использованием образцов из алюминиевого сплава АМц и припоя ПОС 61. Ускоряющее напряжение на аноде изменялось от 0,5 до 2,0 кВ, ток очистки составлял 5–20 мА,

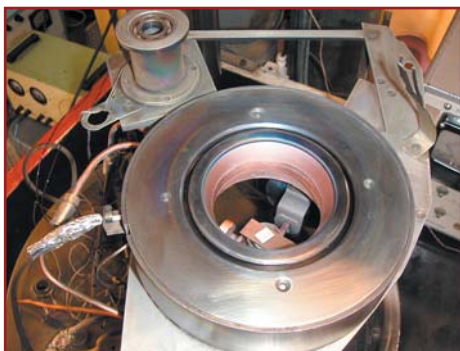


Рис. 5. Общий вид устройства ионно-лучевой пайки и лужения

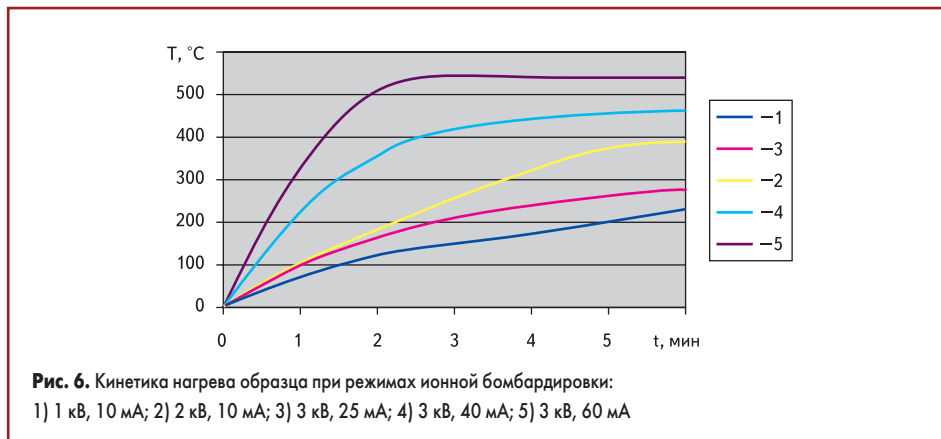


Рис. 6. Кинетика нагрева образца при режимах ионной бомбардировки: 1) 1 кВ, 10 мА; 2) 2 кВ, 10 мА; 3) 3 кВ, 25 мА; 4) 3 кВ, 40 мА; 5) 3 кВ, 60 мА

Таблица 1. Результаты ионно-лучевого лужения сплава АМц

№ образца	Режимы лужения				Кр		Угол смачивания, град	Адгезия, МПа
	$P \times 10^{-2}$ Па	Uл, кВ	Iл, mA	Время, мин	первичный	вторичный		
1	7	2,0	40	4,0	6,0	36,4	2	4
2	6	3,0	40	2,5	5,7	18,1	5	3
3	8	1,2	20	4,0	3,5	7,4	3	5
4	6	2,0	40	4,0	4,6	6,7	5	7
5	6	2,0	40	2,5	7,2	14,2	3	6

то есть мощность пучка изменялась в диапазоне от 2,5 до 40 Вт [6].

Эффективность очистки поверхности металла и припоя подтверждена с помощью фотоэмиссионной спектроскопии. Известно, что Al_2O_3 имеет следующие частоты излучения: 512,33; 510,21; 507,93; 489,21; 471,55; 469,46; 302,8 nm^{-1} . Наиболее интенсивный в спектре — пик излучения, соответствующий частоте 489,21 nm^{-1} . Поэтому спектрофотометр был настроен на эту частоту, и было проведено исследование изменения интенсивности этого пика во времени. Установлено, что интенсивность излучения оксида алюминия резко снижается уже после 1–2 мин ионной очистки при умеренных режимах: Uл = 1 кВ, Iл = 10 мА.

Время ионной обработки также оказывает влияние на качество лужения. Так, например, увеличение времени очистки с 5 до 10 мин позволило повысить коэффициент растекания припоя с 3,5 до 5,7 при лужении сплава типа АМц.

Особенность ионной очистки металлической поверхности с расположенной на ней навески из припоя — эволюция формы навески, так как под воздействием температуры и сил поверхностного натяжения происходит образование сферической капли жидкого припоя. Анализ экспериментальных результатов показал, что капля жидкого припоя экранирует часть поверхности металла. Эффект экранирования препятствует раннему началу процесса лужения и приводит к увеличению времени процесса. Поэтому целесообразно осуществлять ионную очистку без навески припоя. Для этого необходимо использовать специальные устройства типа манипулятора-дозатора, с помощью которых возможно помещение навесок припоя на поверхность очищенной детали в условиях вакуума.

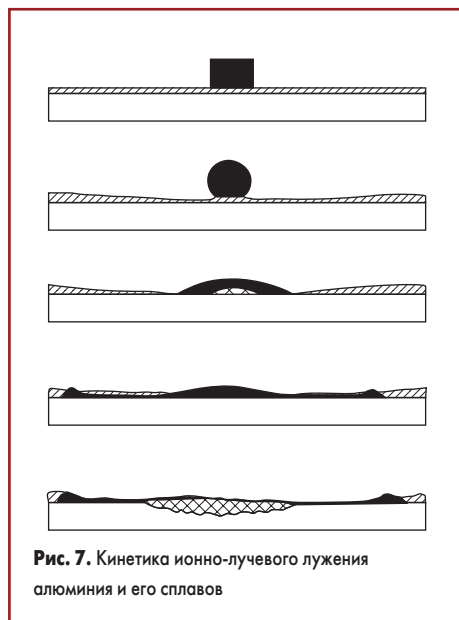


Рис. 7. Кинетика ионно-лучевого лужения алюминия и его сплавов

Ионно-лучевое лужение сплава АМц припоем ПОС 61 осуществляли при режимах, представленных в таблице 1.

Увеличение энергии ионов до 1000–1500 эВ и плотности их потока приводит к увеличению коэффициента растекания припоя.

Проведенные исследования позволили изучить и кинетику лужения сплавов на основе алюминия. При умеренных режимах ионной очистки и лужения была определена следующая кинетика процесса (рис. 7). Через 0,5–1,0 мин происходит расплавление навески припоя и образование сферической капли. Через 4,5–5,0 мин происходит распыление и десорбция оксидов металла в области навески, а также очистка поверхности самой навески. К этому времени образец нагревается до температуры лужения. При выполнении двух ус-

ловий — отсутствия оксидов и загрязнений в области соприкосновения припоя и металла, а также достаточной температуры — происходит быстрое (0,5 с) растекание припоя по поверхности (первичное растекание).

Дальнейшая бомбардировка ионами способствует повышению температуры образца, что приводит к затеканию припоя под тонкую (так как часть оксидной пленки уже стравлена) оксидную пленку и быстрое растекание припоя под ней. Припой растекается до тех пор, пока не достигнет достаточно толстой пленки оксида. В этой области поток припоя тормозится. При этом поступающая масса припоя взрывает слой оксида с образованием локальных капель. Таким образом, формируется зона вторичного растекания. Это происходит в течение 0,5–1 мин после начала растекания. Дальнейшая ионная бомбардировка в течение 3–5 мин вызывает перегрев металла, что приводит к созданию условий для формирования легкоплавких эвтектик алюминия с элементами припоя.

Ионно-лучевое лужение тугоплавких металлов проводили припоями ПОИ 50, ПОС 61, ПСр2,5 и ПСр45 в соответствии с режимами, приведенными в таблице 2.

Особенность лужения тугоплавких металлов — в отсутствии явлений вторичного растекания и образования эвтектик, что можно объяснить наличием прочной оксидной пленки и высокой температурой плавления таких металлов. Характеристики растекания припоя хуже, чем у алюминия, особенно по величине угла смачивания. В то же время адгезия залуженного слоя имеет величину, близкую к результатам, полученным при лужении алюминиевых сплавов. При использовании тугоплавких припоев, например ПСр45, можно достичь отличных результатов. Следует отметить, что при лужении тугоплавкими припоями можно создать условия для возникновения зоны вторичного растекания.

Ионно-лучевое лужение применено при сборке алюминиевых микрокорпусов интегральных схем [7]. В процесс входили следующие этапы: нанесение фоторезистивной маски, анодное оксидирование основы корпуса, ионная очистка и лужение углубления в корпусе для посадки кристалла (рис. 8).

Таблица 2. Режимы ионно-лучевого лужения и свойства соединений тугоплавких металлов

Металл	Припой	Режимы лужения				Коэффициент растекания	Угол смачивания, θ , град	Адгезия, МПа
		$P \times 10^{-2}$ Па	U, кВ	I, mA	Время, мин			
Mo	ПОИ 50	6	2,0	40	1,0	0,7	18	2,6
Mo	ПОС 61	6	2,5	40	1,5	2,2	10	5,7
W	ПОС 61	7	3,0	50	1,5	1,1	30	2,0
Ta	ПОС 61	6	2,5	40	1,5	2,5	20	4,2
V	ПОС 61	7	3,0	50	1,5	1,9	25	5,7
Ti	ПОС 61	7	3,0	60	1,3	2,1	10	8,5
Ti	ПОС 61	4	1,0	20	1,0	1,2	3	10,0
Ti	ПОС 61	5	2,0	40	1,0	1,3	2	13,5
Ti	ПОС 61	4	3,0	60	1,0	1,1	1	13,8
Mo	ПСр45	7	3,0	60	0,5	3,7	1	16,5
Ti	ПСр2,5	7	3,0	60	0,5	2,6	2	5,6

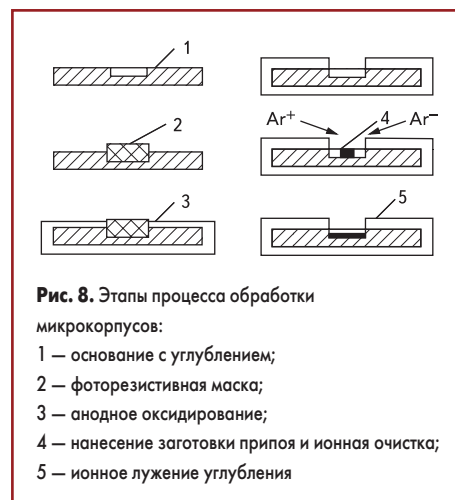


Рис. 8. Этапы процесса обработки микрокорпусов:
1 — основание с углублением;
2 — фоторезистивная маска;
3 — анодное оксидирование;
4 — нанесение заготовки припоя и ионная очистка;
5 — ионное лужение углубления

Ионная очистка проводилась в течение 3–5 мин при энергии ионов 700 эВ, ионное лужение — в течение 1 мин при энергии ионов 1500 эВ.

Для использованных припоев ПОС 61 и ПОИ 50 коэффициент растекания составил 3–7, угол смачивания 1–3°, а прочность соединений — 4–7 МПа.

Достоинствами данного процесса являются отсутствие флюса и высокое качество лужения. Процессы ионно-лучевого лужения тугоплавких металлов характерны более широким диапазоном параметров ионного пучка во время лужения, что позволяет получать воспроизводимые результаты. ■

Литература

1. Lanin V. L. Ultrasonic Soldering in Electronics // Ultrasonics Sonochemistry. 2001. № 8.
2. Валев С. Вакуумная пайка в производстве силовой электроники // Силовая электроника. 2006. № 3.
3. Комов А. Н., Бондарев Н. И., Колпаков А. И., Часовский Ю. Г. Применение низкоэнергетических электронных пучков в технологии производства полупроводниковых приборов // Электронная техника. Сер. 7. 1982. Вып. 4 (113).
4. Андожский С. О., Радченко Л. А., Генералов Е. И. Использование ионных потоков в качестве энергоносителя // Техника и технология сварки в радиоэлектронике и приборостроении: Материалы семинара. Л.: ЛДНТП, 1983.
5. Kohno A., Sasaki Y., Udo R., Harada T., Usami M. Bonding of IC bare chips for Microsystems using Ar atom bombardment // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2001. V. 11. № 5.
6. Достанко А. П., Телеш Е. В., Ланин В. Л., Хохлов А. Е. Ионно-лучевое лужение и пайка полупроводниковых приборов и элементов РЭА // Весці АН Беларусі. 1993. № 4.
7. Telesh E. V., Shulgov V. Component placement in the micropackage with application ion-beam soldering // Workshop on Wafer Bonding for MEMS Technologies. Halle, Germany, 2004.