

Электроискровой процесс формирования шарика при термозвуковой микросварке в электронике

В. Л. Ланин, И. Б. Петухов

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, e-mail: vlanin@bsuir.by
Конструкторское бюро точного электронного машиностроения (УП «КБТЭМ-СО»),
Партизанский пр-т, 2, г. Минск, 220763, Республика Беларусь, e-mail: petuchov@kbtcm.by*

Процесс формирования шарика электроискровым разрядом при отрицательной полярности на электроде разрядника дает наилучшую его форму при стабилизации тока разряда в пределах 25–30 мА. Оптимизация процесса формирования шарика заключается в сокращении времени разряда до 2 мс и увеличении разрядного тока.

УДК 621.396.6

ВВЕДЕНИЕ

Термозвуковая микросварка методом «шарик-клин» в настоящее время – самый быстрый действующий процесс присоединения проволочных выводов к контактными площадкам интегральных схем. Приблизительно в 95% изготавливаемых микросхем в мире применяют золотую проволоку для обеспечения надежных соединений между кристаллом и выводной рамкой. Первым этапом этого процесса является формирование шарика на конце золотой проволоки, выступающей из рабочего торца капилляра. Стабильность диаметра и симметрия образуемых шариков определяют качество получаемых сварных соединений «встык» на кристалле [1].

Золотая проволока была и остается на сегодняшний день основным материалом, обеспечивающим надежность процесса термозвуковой сварки за счет уникальных характеристик золота. В настоящее время электроискровой способ получения шарика на конце золотой проволоки позволяет эффективно контролировать процесс. Стабильность диаметра образуемых шариков может стать решающим фактором при сборке приборов с большим числом выводов, так как контактные площадки кристаллов таких приборов имеют малые размеры и незначительное расстояние между ними. Проволока из других материалов, таких как медь или алюминий, при присоединении методом «шарик-клин» создает трудности для образования шарика на конце проволоки из этих материалов по причине их высокой окисляемости. Защитная атмосфера в зоне образования шарика позволяет использовать медную проволоку, но ее повышенная микротвердость ограничивает широкое применение в производстве [2].

Растущий интерес к использованию медной проволоки как альтернативы золотой объясняется прежде всего ее меньшей стоимостью, которая

приближается к стоимости алюминиевой проволоки. Это дает возможность снизить стоимость приборов и повысить их конкурентоспособность.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В современных установках микросварки методом «шарик-клин» для формирования шарика используются специальные устройства электроискрового разряда (EFO и NEFO, что означает Electric Flame-Off и Negative Electric Flame-Off соответственно). До середины 80-х годов формователи высоковольтного импульса состояли из устройства зарядки высоковольтного конденсатора и тиристорной ключевой схемы разрядки заряженного конденсатора при запуске устройства через токоограничительную резистивную цепь и воздушный промежуток проволока-электрод разрядника. Подобные формователи успешно эксплуатировались в установках с присоединяемой проволокой диаметром в диапазоне 25–40 мкм и контактными площадками не менее 100x100 мкм. При этом на электрод разрядника, как правило, подавался высоковольтный импульс положительной полярности по отношению к проволоке (которая обычно конструктивно заземлена), так как при обратной полярности требовались ток большей амплитуды и прецизионная схема управления разрядом. Быстрое развитие технологии сверхбольших интегральных схем (СБИС) и уменьшение размеров контактных площадок потребовали использование проводников диаметром менее 20 мкм и соответственно высокой воспроизводимости образуемых шариков.

Установлено, что при подаче отрицательной полярности высоковольтного импульса на электрод по отношению к проволоке можно получать шарики стабильного диаметра на проволоке малых диаметров [3]. Обнаружены дополнительные преимущества: увеличение срока службы рабо-

чего инструмента, уменьшение нагарообразования и отсутствие переноса посторонних частиц на шарик со стороны электрода.

В процессе формирования шарика на электрод разрядника, входящий в состав сварочной головки, подается высоковольтный импульс положительной или отрицательной полярности длительностью от 2,5 до 15 мс в зависимости от диаметра проволоки. В момент подачи высоковольтного импульса наконечник электрода находится от конца проволоки на расстоянии 1,0–1,5 мм. Это обеспечивается за счет фиксации электрода в сварочной головке или с помощью механизма подвода электрода. Для электрического пробоя такого воздушного промежутка требуется напряжение порядка 3,5–4,5 кВ. Возникающий разряд разогревает газ между электродом и проволокой до температуры, необходимой для расплавления конца проволоки. Под действием сил поверхностного натяжения расплав формируется в шар. При образовании шарика важно минимизировать отжиг проволоки над шариком, так называемую HAZ (Heat Affected Zone) зону.

При положительной полярности на электроде плазменная оболочка разряда распространяется на часть проволоки выше формируемого шарика, что приводит к увеличению HAZ-зоны (рис. 1а). Отожженная зона является ослабленным местом проволочного соединения при сварке «шарик-клин» и сильно влияет на формообразование петли. Вторым недостатком заключается в том, что при коротком «хвосте» проволоки под инструментом плазменная оболочка может достигать торца капилляра, чем сокращается его срок службы. При отрицательной полярности (рис. 1б) разряд локализуется практически под кончиком проволоки, что минимизирует отжиг проволоки, но полностью не исключает. При тесте на прочность микросварных межсоединений обрыв происходит чаще всего у места перехода шарика в проволоку, что подтверждает ослабленность места перехода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки тепловых затрат при оплавлении золотой проволоки ее выступающую часть под торцом капилляра рассматриваем как цилиндрическую, которая за время разряда оплавляется в шар. Диаметр образуемых шариков примем равным двум диаметрам проволоки, то есть 60 мкм, как наиболее используемый. Для определения минимальной длины проволоки, необходимой для формирования шарика заданного диаметра, приравниваем объем цилиндра проволоки к объему шарика:

$$\pi \cdot r_w^2 \cdot l_t = \frac{4}{3} \pi \cdot r_b^3, \quad (1)$$

где r_w – радиус поперечного сечения проволоки; l_t – длина проволоки; r_b – радиус шарика.

При диаметре 30 мкм получаем длину проволоки, равную 160 мкм. Учитывая, что плазменное облако разряда распространяется над шариком до 0,5 мм (при положительной полярности на электроде), эту величину добавляем к длине для исключения воздействия высокой температуры на рабочий торец капилляра. Таким образом, длина проволоки под капилляром должна быть в пределах 0,7–0,75 мм.

Энергетические составляющие разряда, затрачиваемые на расплавление проволоки, можно представить следующим образом:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (2)$$

где Q_1 – количество тепла, передаваемого от разогретой плазменной оболочки к поверхности проволоки за счет теплопередачи:

$$Q_1 = k \cdot S_b \cdot t_u \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где k – коэффициент теплопередачи плазменной оболочки; S_b – площадь поверхности шарика; t_u – время разряда и ΔT – разность температур плазменной оболочки и проволоки; Q_2 – потери тепла за счет теплопроводности:

$$Q_2 = \frac{\lambda \cdot S_w \cdot t_u \cdot \Delta T}{l_t}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; S_w – площадь поперечного сечения проволоки; Q_3 – тепловое излучение, определяемое по закону Стефана-Больцмана:

$$Q_3 = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S_b \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (5)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – коэффициент излучательной способности; T_1 – температура плазменной оболочки; T_2 – температура расплавленного шарика; Q_4 – теплота нагрева проволоки до температуры плавления:

$$Q_4 = c \cdot \rho \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r_b^3 \cdot \Delta T, \quad (6)$$

где c – удельная теплоемкость золота; ρ – плотность; ΔT – разность температур от начала разряда до начала расплава;

$$Q_5 = q \cdot m = q \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r_b^3 \cdot \rho, \quad (7)$$

где q – скрытая теплота плавления; m – масса шарика.

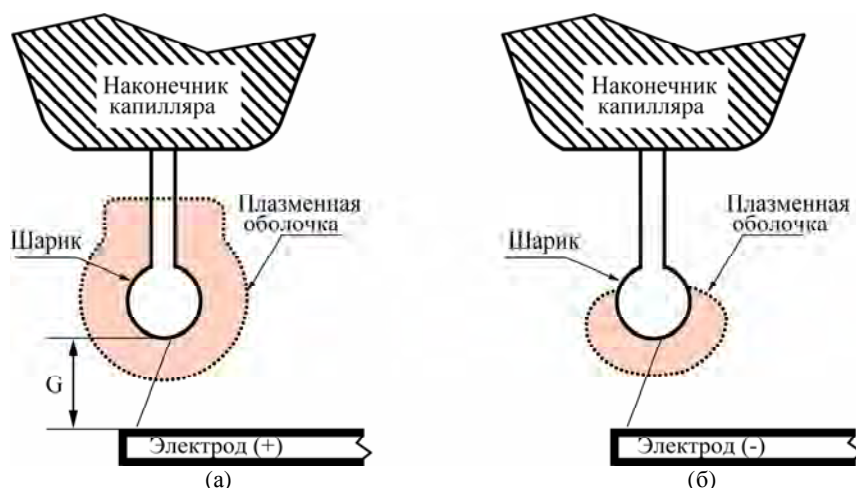


Рис. 1. Формирование шарика с использованием положительной (а) и отрицательной полярностей (б) на электроде.

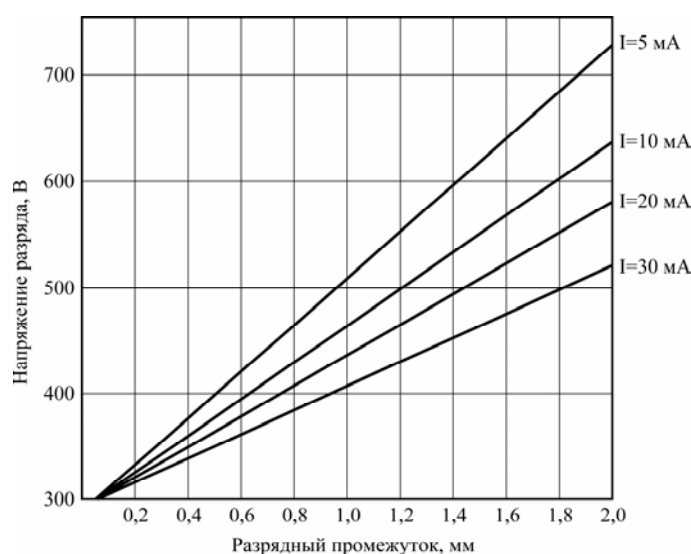


Рис. 2. Зависимости напряжения разряда от зазора и величины тока разряда.

Вычисление Q_2 – Q_5 трудностей не вызывает в отличие от Q_1 , поскольку сложно определить коэффициент теплопередачи k . Для оценки Q_1 воспользуемся соотношением для определения температуры поверхности, нагреваемой от точечного неподвижного источника дугового разряда:

$$T = \frac{p}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \Delta g}, \quad (8)$$

где T – температура плавления золота; p – мощность теплового источника; λ – коэффициент теплопроводности; Δg – расстояние от теплового источника до нагреваемой поверхности. Экспериментально установлено с помощью оптического микроскопа, что величина Δg находилась в пределах 30 мкм. Тогда Q_1 можно вычислить из следующего соотношения:

$$Q_1 = T \cdot 2\pi \cdot \lambda \cdot \Delta g \cdot t_m, \quad (9)$$

где t_m – время от начала разряда до начала плавления конца проволоки.

Посредством скоростной видеосъемки цифровой камерой Motion Blitz Cube установлено, что время от начала разряда до начала расплавления составляет порядка 0,2 мс. Произведя вычисления по (9), получим значение $Q_1 = 12,3$ мДж. Сумма остальных членов уравнения (2) равна примерно 2,4 мДж. Таким образом, общая тепловая энергия для оплавления шарика на 30 мкм золотой проволоке достигает 14,7 мДж.

Из формулы (8) видно, что температура на поверхности проволоки прямо пропорциональна подводимой энергии искрового разряда и обратно пропорциональна теплопроводности и расстоянию от источника нагрева. Очевидно, что для образования шарика на медной проволоке того же диаметра, что и золотой, мощность разряда будет значительно выше вследствие более высокой теплопроводности.

При положительной полярности на электроде для получения шарика лучшие результаты получены при спадающей форме тока с начальной

амплитудой тока 7 мА и длительностью разряда 6 мс при постоянной времени разряда, равной 20,4 мс. Амплитуда стабилизированного тока разряда при отрицательной полярности составляла 25 мА, а длительность разряда – 2,1 мс. Экспериментально установлено, что напряжение разряда зависит от величины тока разряда и величины зазора между концом проволоки и разрядником (рис. 2).

Для типового зазора 1,2 мм напряжение для тока разряда 25 мА составляет порядка 450 В, а для тока 10 мА – 500 В. Необходимо отметить, что зазор между разрядником и концом проволоки определяется конструкцией сварочной головки, необходимостью подвода инертного газа и др. Современные устройства формирования шарика обычно имеют встроенную систему контроля изменения разрядного промежутка и соответственно автоматически компенсируют это [4].

Для случая отрицательной полярности на электроде подводимая электрическая энергия вычисляется как

$$E_1 = U \cdot I \cdot t = 450 \cdot 0,025 \cdot 0,0021 = 23,6 \text{ мДж.} \quad (10)$$

При положительной полярности для спадающей по экспоненте форме тока с постоянной времени 20,4 мс:

$$\begin{aligned} E_2 &= U \cdot I \cdot t = \int_0^6 7 * e^{-t/RC} dt = \\ &= \int_0^6 7 * e^{-t/20,4} dt = 500 \cdot 36,4 \cdot 10^{-6} = 18,2 \text{ мДж.} \end{aligned} \quad (11)$$

ВЫВОДЫ

С энергетической точки зрения процесс формирования шарика при положительной полярности на электроде предпочтителен, однако сложность формирования шарика на проволоке малого диаметра (менее 20 мкм) ограничивает его применение. При отрицательной полярности на

электроде разрядника наилучшие результаты достигаются при стабилизации тока разряда в пределах 25–30 мА. При заданной длительности разряда воспроизводимость диаметра образуемых шариков значительно выше. Оптимизация процесса формирования шарика заключается в сокращении времени разряда до 2 мс (для уменьшения отжига) и увеличении разрядного тока. Формирование шарика на золотой проволоке диаметром более 75 мкм, например для контактных выступов для Flip-Chip технологии, предпочтительно с использованием электроискровых устройств положительной полярности из-за их относительной простоты и стоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов В.А., Ланин В.Л., Ласточкина В.Ф. Термозвуковая разварка межсоединений золотой проволокой на медных рамках. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 1998, (2), 28–30. www.nbu.gov.ua/portal/natural/tkea/texts/1998.../98_2_28-30.pdf.
2. Harmann G.G. *Wire Bonding in Microelectronics*. N.Y.: McGraw Hill, 2-d edition, 2010. pp. 23–69.
3. Prasad S.K. *Advanced Wirebond Interconnection Technology*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. pp. 107–109.
4. Ланин В.Л., Петухов И.Б., Шевцов В.В. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников. *Компоненты и технологии*. 2009, (8), 124–128. www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2009_08_124.pdf.

Поступила 21.03.12

Summary

Ball formation process by the electrospark discharge at negative polarity on a discharge electrode gives the best form of a ball at stabilization of current within 25–30 mA. Optimization of a ball formation process consists in a reduction of a discharge time to 2 ms and an increase in the discharge current.