

УДК 534.8:621.396.6

**ВЫБОР ПОЛЯРНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ШАРИКА
В УСТАНОВКАХ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ ВЫВОДОВ***д-р техн. наук, проф. В.Л. ЛАНИН, А.Ф. ЦИНМАН**(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск);**И.Б. ПЕТУХОВ**(УП «КБТЭМ-СО», Минск)*

Рассматривается метод присоединения «шарик – клин» для формирования шарика в современных установках с использованием специального устройства электроискрового разряда. Даны рекомендации выбора полярности электрического разряда при формировании шарика на золотой и медной проволоке в установках присоединения выводов методом «шарик – клин». Отрицательная полярность электрода разрядника по отношению к проволоке при формировании шарика методом «шарик – клин» позволяет эффективно дозировать подводимую энергию разряда за счет стабилизации разрядного тока и минимизировать отжиг проволоки. Проведенные расчеты показали, что в случае подачи на электрод высоковольтного импульса положительной полярности передача тепла к проволоке происходит через боковые поверхности выступающего конца проволоки.

Введение. Термозвуковая сварка методом «шарик – клин» в настоящее время по-прежнему остается самым быстродействующим способом присоединения проволочных выводов к контактным площадкам интегральных схем. Первым шагом этого процесса является формирование шарика на конце золотой или медной проволоки, выступающей из рабочего торца капилляра. Стабильность диаметра и симметрия образуемых шариков определяют качество получаемых сварных соединений [1].

Растущий интерес к использованию медной проволоки как альтернативы золотой проволоке объясняется прежде всего меньшей стоимостью, которая приближается к стоимости алюминиевой проволоки. Это позволяет снизить стоимость приборов и повысить их конкурентоспособность.

Теплопроводность у меди в 1,6 раз выше, чем у алюминия, и в 1,3 раза выше, чем у золота [2]. Лучшая теплопроводность медной проволоки может обеспечить дополнительный теплоотвод от кристалла прибора при большом числе выводов. Меньшее электрическое сопротивление позволяет использовать медную проволоку диаметром в 1,25 раза меньше по отношению к диаметру золотой проволоки при одной и той же плотности тока. Это преимущество актуально для транзисторов средней мощности в малогабаритных корпусах для поверхностного монтажа.

Несмотря на очевидные преимущества, известны два основных недостатка, сдерживающих широкое применение медной проволоки. К первому недостатку относится быстрая окисляемость проволоки, особенно при повышенных температурах. Для предотвращения окисления используется инертный газ для получения шариков сферической формы на конце проволоки при сборке методом «шарик – клин». Для обеспечения подвода формирующего газа используются разрядники особой конструкции и устройства формирования шарика повышенной мощности. Вторым недостатком – это повышенная твердость медной проволоки, что требует тщательного подбора режимов сварки, исключающих образование кратеров на контактных площадках [3].

В современных установках присоединения методом «шарик – клин» для формирования шарика используются специальные устройства электроискрового разряда. До середины 80-х годов прошлого столетия формирователи высоковольтного импульса состояли из устройства зарядки высоковольтного конденсатора и тиристорной ключевой схемы разрядки заряженного конденсатора через токоограничительную цепь. Подобные формирователи успешно эксплуатировались в установках с присоединяемой проволокой диаметром в диапазоне 25...40 мкм и контактными площадками не менее 100×100 мкм. При этом на электрод разрядника, как правило, подавался высоковольтный импульс положительной полярности по отношению к проволоке, так как при обратной полярности требовался ток большей амплитуды и прецизионная схема управления (дозирования) разрядом. Быстрое развитие технологии сверхбольших интегральных схем (СБИС) и уменьшение размеров контактных площадок потребовало использования 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. Обнаружены дополнительные преимущества: увеличение срока службы рабочего инструмента, уменьшение нагарообразования и отсутствие переноса посторонних частиц на формируемый шарик со стороны электрода. Проведенные расчеты показали, что в случае подачи на электрод высоковольтного

импульса положительной полярности передача тепла к проволоке происходит через боковые поверхности выступающего конца проволоки [4], а при обратной полярности источник нагрева локализован под торцом кончика проволоки симметрично оси проволоки.

Методика исследований и обсуждение результатов. Цикл формирования шарика можно представить следующим образом. На электрод разрядника, входящий в состав сварочной головки, подается высоковольтный импульс положительной или отрицательной полярности длительностью, не превышающей несколько миллисекунд. В момент подачи высоковольтного импульса конец электрода находится от конца проволоки на расстоянии 1,0...1,5 мм (рис. 1). Это обеспечивается за счет предварительной 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 образованным шариком, так называемую HAZ (Heat Affected Zone) зону, по зарубежной терминологии.

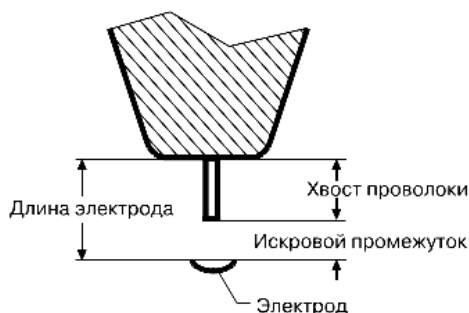


Рис. 1. Исходное положение электрода и проволоки перед образованием шарика

Длина разогреваемого участка проволоки раскаленным газом значительно зависит от полярности электрод – проволока. В случае положительной полярности на электроде кончик проволоки окружен раскаленным газом на длине 0,15...0,5 мм (зависит от тока разряда), что приводит к сильному отжигу проволоки над шариком, приводящим к ослаблению прочности проволочного соединения в этом месте. На рисунке 2 показана форма искрового разряда при положительной полярности на электроде по отношению к медной проволоке диаметром 50 мкм, которая обычно заземлена. Разряд охватывает часть проволоки над кончиком проволоки приблизительно 0,5 мм при токе разряда 27 мА. При подаче отрицательной полярности на электрод по отношению к проволоке форма разряда кардинально меняется (рис. 3).



Рис. 2. Форма искрового разряда на кончике медной проволоки диаметром 50 мкм при положительной полярности на электроде



Рис. 3. Форма искрового разряда на кончике медной проволоки диаметром 50 мкм при отрицательной полярности на электроде

Разряд локализуется под кончиком проволоки симметрично оси проволоки, что подтверждает выводы, сделанные в [4]. Ток разряда в обоих случаях был стабилизирован высоковольтным источником тока. Типовая осциллограмма разрядного тока показана на рисунке 4.

В проведенных экспериментах было выявлено, что размер горячей зоны разряда на проволоке при положительной полярности на электроде уменьшается при снижении тока разряда. Таким образом, спа-

дающий ток разряда предпочтителен для формирования шариков на тонкой проволоке (25...30 мкм) и уменьшения отжига проволоки над местом перехода проволоки в шар. Типовая форма разряда в этом случае имеет вид, представленный на рисунке 5.



Рис. 4. Типовая осциллограмма формы тока разряда

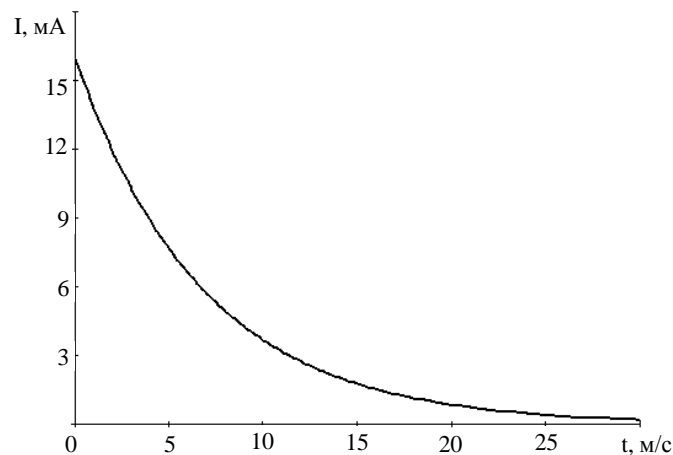


Рис. 5. Спадающая форма тока разряда при положительной полярности на электроде

Для вычисления общей подводимой энергии E разряда используем следующее выражение:

$$E = U \cdot I \cdot T, \quad (1)$$

где U – напряжение разрядного промежутка; I – ток разряда; t – время разряда.

Напряжение разрядного промежутка зависит от зазора между электродом и кончиком проволоки и от величины тока разряда. На рисунке 6 показаны экспериментальные зависимости напряжения разрядного промежутка от зазора и от величины тока разряда. Видно, что при токе разряда 27 мА и зазоре 1,6 мм напряжение разрядного промежутка составляет порядка 500 В.

Экспериментально установлено, что для получения шарика диаметром 75...80 мкм ($2,5d$, где d – диаметр проволоки) на золотой проволоке диаметром 30 мкм при стабилизированном токе разряда 27 мА необходимо время 2,5...2,7 мс при отрицательной полярности на электроде по отношению к проволоке (форма разряда, см. рис. 3).

Установлено также, что при положительной полярности на электроде для получения такого же шарика необходима спадающая форма тока с начальной амплитудой тока 12 мА и длительностью разряда 15...16 мс при постоянной времени разряда, равной 6,8 мс (разрядный конденсатор емкостью 0,068 мкФ и токоограничительный резистор 100 кОм).

Вычислим подводимую энергию для обоих случаев.

Для случая отрицательной полярности на электроде имеем:

$$E_1 = U \cdot I \cdot T = 500 \cdot 0,027 \cdot 0,026 = 351 \text{ мДж}. \quad (2)$$

Для вычисления энергии для случая положительной полярности на электроде необходимо вычислить определенный интеграл огибающей импульса тока разряда:

$$I \cdot T = \int_0^{15} 12 \cdot e^{-t/RC} dt = 72,6 \cdot 10^{-6} \text{ А}\cdot\text{с}, \quad (3)$$

отсюда значение энергии при положительном потенциале на электроде

$$E_2 = 500 \cdot 72,6 \cdot 10^{-6} = 0,0363 = 36,3 \text{ мДж}. \quad (4)$$

Из приведенных расчетов видно, что подводимая энергия практически одинаковая, однако процесс передачи тепла происходит различно.

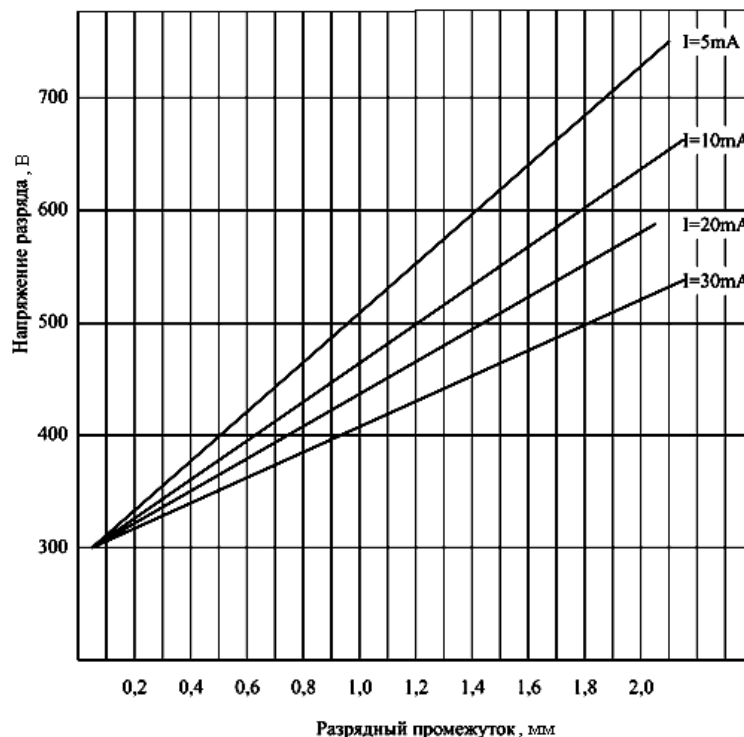


Рис. 6. Зависимость напряжения разряда от зазора и величины тока разряда

Как было отмечено выше, при положительной полярности на электроде передача тепла происходит с боковых поверхностей цилиндрической части проволоки высотой 0,5 мм при токе разряда 27 мА. Соответственно, получить шарики стабильного диаметра на конце проволоки диаметром 20 мкм менее затруднительно ввиду избыточного расплава проволоки. При отрицательной полярности электрода источник разогрева проволоки локализован под кончиком проволоки и отжиг проволоки происходит преимущественно за счет теплопроводности проволоки. Учитывая короткое время разряда (в 3...4 раза короче, чем при положительной полярности), отожженная зона проволоки над шариком значительно меньше.

Ведущие производители проволоки, такие как Kulicke and Soffa (США), Heraeus (Германия) и Tanaka (Япония), в настоящее время предлагают проволоку для различного применения с различной зоной отжига.

На рисунке 7 показаны высоты зоны отжига для золотой проволоки диаметром 25 мкм фирмы Tanaka [5]. Для проволоки типа GLF зона отжига составляет порядка 85 мкм.

Размер зоны отжига не только определяет прочность полученных соединений на отрыв, но и влияет на формообразование перемычек. Это особенно актуально при получении перемычек малой высоты в технологии smart-card. Опытная разварка соединений на установке ЭМ-4320 [6] показала зависимость высоты перемычек от тока разряда.

Применение технологии образования шарика с использованием отрицательной полярности на электроде минимизирует отжиг проволоки, что позволяет формировать низкопрофильные перемычки. Как было отмечено выше, самые «горячие» точки в газовом разряде находятся в приэлектродном пространстве (у катода и анода) и видимы на рисунках 2, 3 по яркости световых пятен. В работе [4] проделаны количественные расчеты и экспериментальные данные распределения горячих областей разряда. Схема, по которой проводились исследования теплового поля при формировании шарика, при различ-

ной полярности напряжения разрядного электрода, приведена на рисунке 8. В экспериментальных исследованиях использовалась проволока из алюминия и меди диаметром соответственно 3,2 и 1,6 мм.

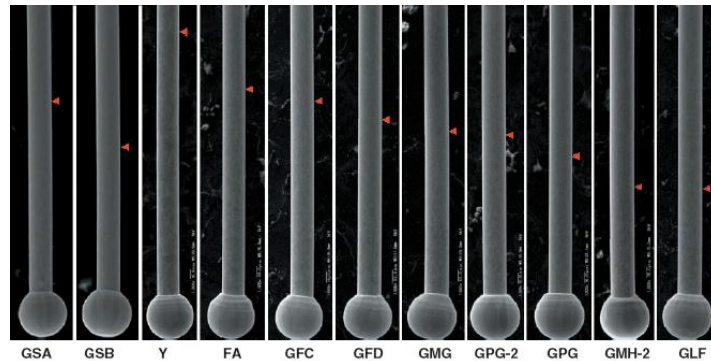


Рис. 7. Высота зоны отжига для различных типов золотой проволоки диаметром 25 мкм, диаметр шарика 50 мкм, время разряда 1 мс, ток разряда 28 мА

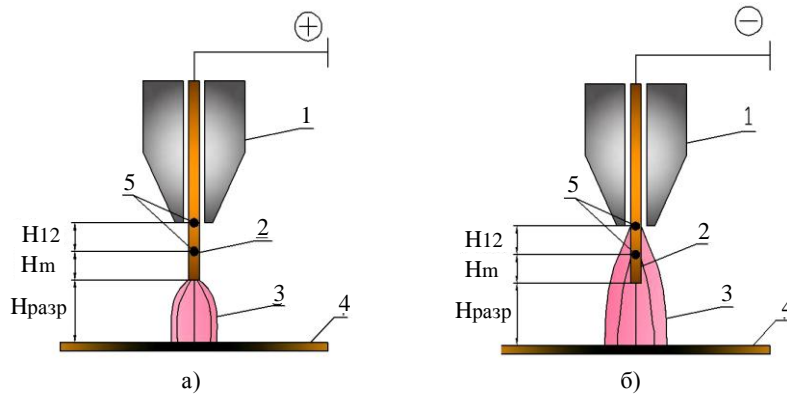


Рис. 8. Схема формирования шарика при отрицательной (а) и положительной (б) полярности напряжения разрядного электрода:
1 – керамический капилляр; 2 – проволока; 3 – разряд; 4 – разрядный электрод; 5 – термопары

Для измерения температуры использовали термопары типа К (хром-алюминий) диаметром 0,127 мм, встроенные в отверстия диаметром 0,33 мм, просверленные в проволоке. Термопары, предварительно покрытые изоляционным лаком, удерживались на нужном месте с помощью высокотемпературного цемента. Из-за того, что провода термопар были настолько хрупкие и располагались очень близко к дуге, кроме того, были защищены от расплавления керамическим капилляром. Разряд между электродом и проволокой происходил в воздушной среде при давлении, равном 18 мм ртутного столба. Форма импульса тока приведена на рисунке 9.

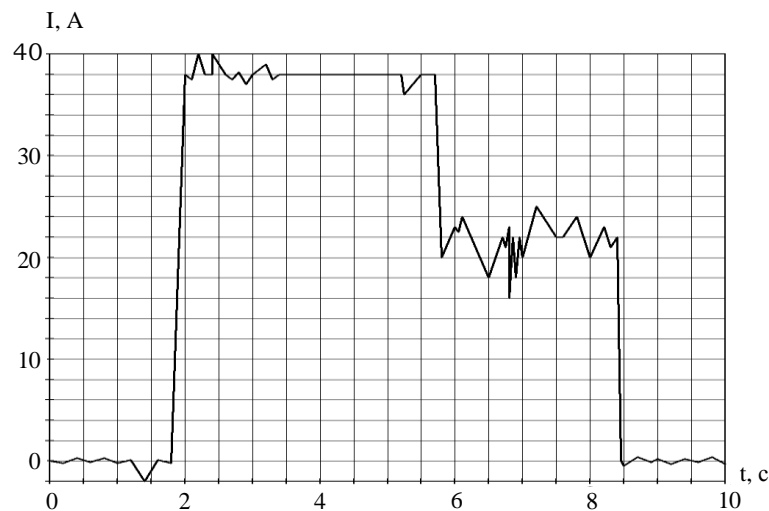


Рис. 9. Зависимость величины тока через проволоку от времени

Для зажигания дуги проволока приводилась предварительно в контакт с электродом. При контакте проволоки и электрода ток короткого замыкания в цепи составлял 38,6 А. Из-за несовершенства поверхностей контакта отмечена разность напряжения 0,87 В. По истечении промежутка времени, равного 5,25 с, проволока приподнималась (отрывалась от электрода), и зажигалась дуга в разрядном промежутке, равном 8 мм. Ток дуги составлял 21 А, а напряжение разрядного промежутка 38 В. С помощью термопар T_1 и T_2 определены температуры проволоки как в момент зажигания дуги $t_1 = 5,25$ с, так и в момент достижения максимального значения температуры $t_2 = 8,00$ с. Очевидно, что тепловое сопротивление длины проволоки между T_1 и T_2 (Н12 на рис. 8) определяет разность температур. Одновременные температурные профили T_1 и T_2 (рис. 10) позволяют представить картину передачи тепла и предсказать среднюю плотность тепла, передаваемую концу проволоки в течение полного цикла формирования шарика.

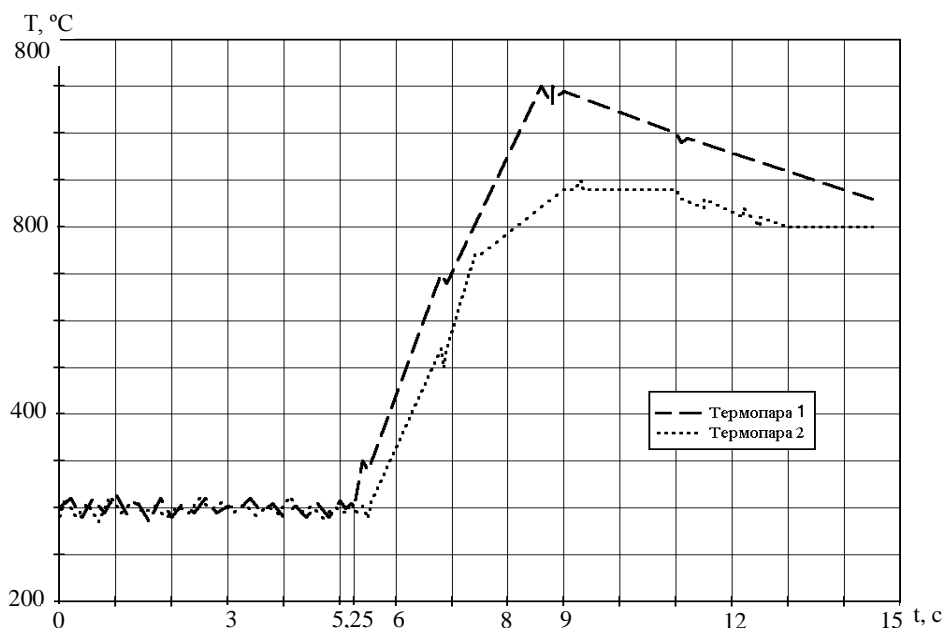


Рис. 10. Зависимости температуры в точках измерения от времени

Тепло, затраченное в процессе термозвуковой сварки Q_{cp} , включает следующие составляющие [7]:

$$Q_{cp} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \tag{5}$$

где Q_1 – тепло, переданное за счёт теплопроводности проволоки; Q_2 – энергия, расходуемая для нагрева проволоки; Q_3 – энергия, расходуемая на расплавление проволоки; Q_4 – тепло, рассеянное конвекцией и радиационным излучением с поверхности проволоки.

$$Q_1 = k_{cp} \Delta T_{cp} / H_{12}. \tag{6}$$

Здесь k_{cp} – средняя теплопроводность проволоки за время нагрева; ΔT_{cp} – средняя разность температур в местах нахождения термопар; H_{12} – расстояние между термопарами.

$$Q_2 = H_m \rho c_p \Delta Th_{cp} / \Delta t. \tag{7}$$

Здесь ΔTh_{cp} – разница между начальной и конечной температурами; H_m – расстояние между кончиком проволоки и первой термопарой T_1 ; ρ – плотность проволоки; c_p – теплоёмкость; Δt – длительность импульса.

$$Q_3 = H_m \rho L / \Delta t, \tag{8}$$

где L – скрытая теплота.

$$Q_4 = S_b [h(T - T_\infty) + \varepsilon \delta (T^4 - T_\infty^4)] / \pi R_w^2. \tag{9}$$

Здесь S_b – площадь поверхности шарика; h – коэффициент передачи тепла; ε – излучательная способность; δ – постоянная Стефана – Больцмана; R_w^2 – радиус поперечного сечения проволоки.

Тогда общая энергия, переданная проволоке, будет:

$$Q_w = Q_{cp} \pi R_w^2 \Delta t, \quad (10)$$

а общая энергия дуги

$$Q_a = I \Delta U \Delta t, \quad (11)$$

где I – ток разряда; ΔU – напряжение разряда.

Расчёт энергии в MathCAD, необходимой для формирования шарика, показал, что для золотой проволоки требуется 4,2...5,6 мДж, а для медной – 16,6...22,2 мДж.

Выводы. Установлено, что отрицательная полярность электрода разрядника по отношению к проволоке при формировании шарика в установках присоединения выводов методом «шарик – клин» позволяет эффективно дозировать подводимую энергию разряда за счет стабилизации разрядного тока и минимизировать отжиг проволоки над шариком. Выбор данной полярности позволяет получать шарики стабильного диаметра и формы на золотой и медной проволоке диаметром менее 20 мкм.

Положительную полярность электрода разрядника эффективно использовать для формирования шариков на золотой и медной проволоке диаметром выше 50 мкм для последующего присоединения объемных контактов при Flip-chip монтаже за счет более простого источника высоковольтного разряда.

Энергия разряда в обоих случаях одинакова для образования шарика одного и того же диаметра, но при использовании положительной полярности на электроде ток разряда в 2...3 раза меньше, что упрощает конструкцию источника высоковольтного разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Harmann, G.G. Wire bonding in microelectronics / G.G. Harmann. – 2-d edition. – N.Y.: McGraw Hill, 1997. – P. 23 – 69.
2. Study of 6 mil Cu Wire Replacing 10 – 15 mil Al Wire for Maximizing Wire – Bonding Process on Power ICs / Y. Jiang [et al.] // IEEE Transaction on Electronics Packaging Manufacturing. – 2010. – V. 33, № 2. – P. 135 – 142.
3. Concurrent optimization of crescent bond pull force and tail breaking force in thermosonic Cu wire bonding process / J. Lee [et al.] // IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing. – 2009. – July. – Vol. 32, № 3. – P. 157 – 163.
4. Jog, M.A. Electrode heating in wire to plane arc / M.A. Jog, I.M. Cohen, P.S. Ayyaswamy // Phys. Fluids B4. – 1992. – February(2).
5. [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.tanaka-bondingwire.com/guide_Au.pdf.
6. Ультразвуковая микросварка ленточных выводов при монтаже мощных полупроводниковых приборов / В.Л. Ланин [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 2. – С. 127 – 132.
7. Effect of polarity on heat transfer in the ball formation process / L.J. Huang [et al.] // Journal of Electronic Packaging. – 1991. – March. – Vol. 113/33.

Поступила 27.12.2010

THE CHOICE OF POLARITY OF THE ELECTRIC DISCHARGE UNDER THE BALL FORMATION IN THE WIRE BONDING INSTALLATIONS

V. LANIN, A. TSINMAN, I. PETUKHOV

Methods of joining “ball – wedge” for ball formation in the up-to-date installations using custom devices of electrosparking discharge are regarded. Recommendations of a choice of polarity of the electric discharge are given at ball formation on a gold and copper wire in installations of thermosonic microwelding of conclusions by a method “ball – wedge”. Negative polarity of an electrode in relation to a wire at ball formation allows to dose out effectively energy of the category at the expense of stabilization of a digit current and to minimize thermal influence on a wire. Carried out calculations testify that in case of delivery of high-voltage pulse of positive polarity to the electrode the heat transmission to the wire takes place through lateral surfaces of the outstanding end of the wire.