

Рубрика: Лазерные технологии

УДК 621.791.16

ВАК 05.27.06

Оптимизация технологических режимов лазерной пайки бессвинцовых припойных шариков в 3D структурах микроэлектроники

И.Б. Петухов, к.т.н.¹, В.Л. Ланин, д.т.н.², И.Д. Тычинская³, Г.Е. Ретюхин⁴

DOI: 10.22184/1992-4178.2020.199.8.144.148

¹ОАО «Планар-СО», начальник научно-технического центра,

petuchov@kbtem.by

²Белорусский государственный университет информатики и радиозлектроники, профессор, vlanin@bsuir.by

³ОАО «Планар-СО», начальник сектора научно-технического центра

⁴НПООО «Прецизионные технологические системы», начальник лаборатории

При сборке многокристальных и многослойных 3-D конструкций изделий современной электроники для организации межслойных связей широко используются объемные выводы на основе припойных шариков малого диаметра (<100 мкм), установленных на контактах переходных отверстий подложек для последующего flip-chip монтажа. Для обеспечения присоединения таких объемных выводов создана оптико-механическая система новой установки лазерной пайки, которая отличается последовательным вакуумным захватом припойных шариков из вибробункера сварочным инструментом и переносом их в зону пайки. При подаче лазерного импульса на поверхность припойного шарика через сквозное отверстие сварочного инструмента происходит его оплавление и закрепление на контактной площадке. Проведена энергетическая оценка процесса лазерной пайки бессвинцовых припойных шариков. Экспериментально получен поправочный коэффициент для вычисления мощности лазерного источника с длиной волны 1064 нм для оплавления припойного шарика заданного диаметра.

Лазерная пайка припойных шариков в микроэлектронике

Создание межсоединений между многослойными структурами 2,5 и 3D конструкций современной микроэлектроники посредством объемных припойных шариковых выводов, является сложной технологической задачей, особенно для припойных шариков малого диаметра (< 100 мкм) [1,2,3]. Для реализации формирования шариковых выводов для технологии flip-chip необходимо не только правильно выбрать материалы, но и выбрать способы нагрева, обеспечивающие высокую локализацию мощности в зоне нагрева и малые зоны термического влияния. Монтаж шариков припоя необходимо осуществлять в инертной атмосфере без использования флюса как на кремниевую пластину, так и на коммутационную плату BGA. Наиболее перспективным методом формирования шариковых выводов, обеспечивающим возможность решения этой технологической задачи, является использование лазерного нагрева. Отличительной особенностью данного процесса является локальность теплового воздействия, высокая стабильность температурно-временных режимов, гибкое регулирование подводимой тепловой энергии, отсутствие контакта с шариком припоя, высокая производительность процесса, возможность автоматизации, высокое качество и надежность сформированных соединений.

Автоматизация процесса лазерной пайки предполагает две основные операции:

- подача припойного шарика в сквозной сужающийся к торцу канал сварочного инструмента (рис. 1а), либо захват шарика под торец инструмента подачей вакуума в полость сварочного инструмента (рис. 2 а);

- расплав припоя в канале инструмента лазерным импульсом и его выброс (solder jetting) на контактную площадку (рис.1 б), либо расплав шарикового припоя под торцем сварочного инструмента практически в контакте с поверхностью под небольшим давлением защитного газа, например, азота (рисунок 2б).



а) б)
Рис. 1. Припойный шарик перед присоединением в канале сварочного инструмента (а); припойный шарик в позиции присоединения (б)

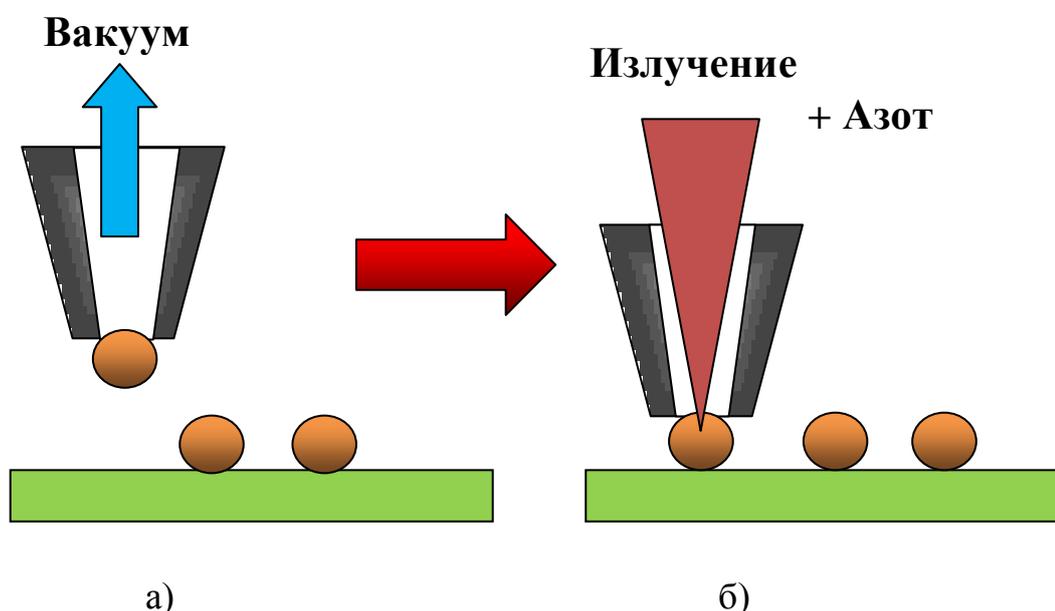


Рис. 2. Припойный шарик перед присоединением под торцом сварочного инструмента (а); припойный шарик в позиции присоединения (б)

При работе по методу на рис.1 необходим прецизионный механизм подачи шарика в инструмент и исключение попадания дополнительного шарика, что приводит к необходимости зачистки инструмента. Метод установки припойных шариков на рис. 2, проще, но менее производительный, требующий перемещения координатного стола в позицию захвата из вибробункера, исключая слипание шариков из-за электростатики и обеспечивающего «облако» подсаживающих шариков над общей массой шариков и легкий одиночный захват.

Достижения технологии лазерной пайки припойных шариков позволяют присоединять шарики диаметром 40 мкм, например, на установке модели SB²-Jet фирмы RasTech, при этом максимальный диаметр используемых шариков составляет 760 мкм [4]. «Сердцем» данной модели установки является механизм поодиночной подачи припойных шариков малого диаметра (40 мкм) из бункера в сварочный инструмент по методу на рис. 1.

Физические процессы при лазерной пайке и оценка энергетических составляющих при расплавлении припойных шариков

Лазерная пайка основана на поглощении поверхностью припойного шарика дозированного импульса лазерного излучения. При этом процесс включает следующие стадии:

- передача энергии сфокусированного лазерного излучения к верхней части поверхности припойного шарика под торцем сварочного инструмента, удерживаемого подачей вакуума, при этом площадь, подвергаемая излучению не превышает $2\pi r_{ш}^2$, где $r_{ш}$ - радиус припойного шарика;

- разогрев объема припойного шарика до температуры плавления и его расплавление;

- выталкивание расплава на контактную площадку за счет подачи давления защитного газа в сварочный инструмент;

- смачивание и формирование силами поверхностного натяжения в процессе остывания шарообразного объемного контакта (рис. 3).

При выполнении данной последовательности операций и установки оптимальных энергетических режимов импульса лазерного излучения, необходимо предварительно определить следующие физические величины и их размерности [5]:

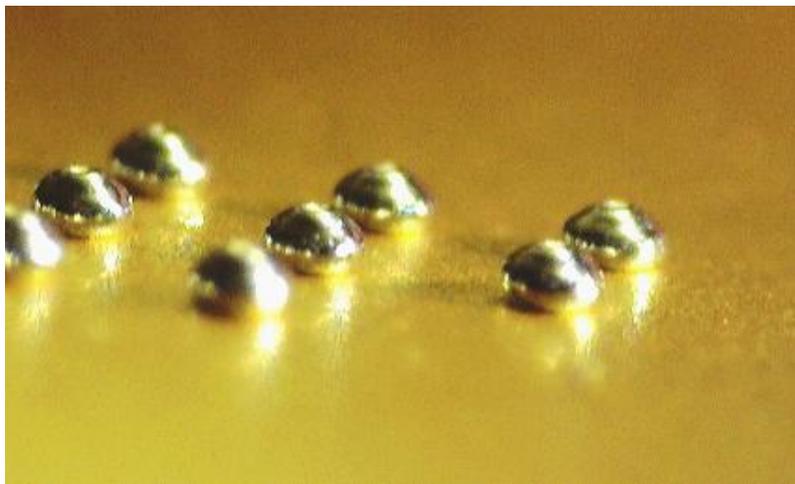


Рис. 3. Вид шарообразного объемного контакта

- максимальную плотность потока излучения на поверхности Q_{max} , [Вт/см²];
- длительность лазерного импульса t_i , [с];
- поглощенная доля потока $A = 1 - \rho_\lambda$, где ρ_λ -коэффициент отражения;
- длину волны излучения λ_0 ;
- диаметр лазерного пучка на поверхности образца d_b , [см];
- теплопроводность материала λ_T , [Вт/(см·град.)];
- удельную теплоемкость материала c , [Дж/(г·град.)];
- плотность материала ρ , [г/см³];
- температуропроводность материала $\alpha = \lambda_T / (c \cdot \rho)$ [см²/с];

Для оценки энергетических составляющих при расплавлении припойного шарика при воздействии лазерного излучения используем методики, описанные в [6, 7]. Количество энергии W_0 для расплава припойного шарика диаметром $d_{ш}$ определяется следующим соотношением [6]:

$$W_0 = c \cdot \rho \cdot \frac{4 \cdot \pi}{3} \left(\frac{d_{ш}}{2}\right)^3 \cdot \Delta T + q \cdot \rho \cdot \frac{4 \cdot \pi}{3} \left(\frac{d_{ш}}{2}\right)^3, \quad (1)$$

где c – теплоемкость припойного шарика; $\Delta T = T_{пл.} - T_{окр.}$ – изменение температуры от окружающей среды до температуры плавления; q – скрытая теплота плавления. Физические параметры материалов для расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физические параметры материалов

Материал	Параметры					
	$\lambda_T, [\text{Вт}/(\text{см} \cdot \text{град.})]$	$c, [\text{Дж}/(\text{г} \cdot \text{град.})]$	$\alpha, [\text{см}^2/\text{с}]$	$T_{\text{плавл.}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{кип.}}, ^\circ\text{C}$	$q, \text{Дж}/\text{г}$
Sn	0,64	0,227	0,41	232	2620	60,7
Ag	4,21	0,235	1,69	967	2170	105
Au	3,13	0,134	1,32	1060	2947	67
Cu	4,11	0,127	1,12	1084	2540	213
Pb	0,35	0,127	0,24	327	1745	25

Из соотношения (1) и параметров табл. 1 несложно получить, что необходимая энергия для расплава одного оловянного шарика диаметром 0,1 мм приблизительно равна 0,5 мДж.

Количество поглощенной энергии лазерного излучения в общем случае зависит от коэффициента отражения ρ_λ , чистоты поверхности шарика и длины волны излучения λ_0 . Известно также, что коэффициент отражения ρ_λ зависит от плотности излучения [5]. Для металлов ρ_λ растет с увеличением λ_0 для видимого диапазона излучения и ближнего инфракрасного диапазона. При этом при плотности потока лазерного излучения $Q < 10^6 \text{ Вт}/\text{см}^2$ коэффициент отражения не зависит от λ_0 . При $Q < 10^9 \text{ Вт}/\text{см}^2$ лазерное излучение рассматривается как источник тепла и распространение тепла в материале описывается законами теплопроводности. Количество поглощенной энергии лазерного излучения определяют из следующего соотношения:

$$W_{\text{погл.}} = A \cdot Q_{\text{max}} \cdot \varphi(r_{\text{beem}}) \cdot \pi \cdot (r_{\text{beem}})^2 \cdot t_i, \quad (2)$$

где r_{beem} – радиус сфокусированного лазерного пятна, $\varphi(r_{\text{beem}})$ – функция распределения интенсивности потока излучения на поверхности. При этом считается, что функция распределения является Гауссовым с максимумом в центре пятна.

Используя вычисленное выше значение энергии из соотношения (1) для расплавления припойного шарика диаметром 0,1 мм и выражение (2), получаем при $W_0 = W_{\text{погл.}}$ и установленном $t_i = 5 \text{ мс}$:

$$A \cdot Q_{\text{max}} \cdot \varphi(r_{\text{beem}}) = 0,5 \cdot 10^{-3} / 3,14 \cdot (0,004)^2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \approx 1990 \text{ Вт}/\text{см}^2 \quad (3)$$

Чтобы оценить значение максимального потока излучения Q_{max} , делаем следующие допущения. Коэффициент поглощения металлов A находится в пределах 0,1–0,15, неоднородность пятна $\varphi(r_{beam})$ примем равным 0,7. Из (3) получаем, что $Q_{max} \approx 28430$ Вт/см². Из полученного значения Q_{max} можем определить необходимую мощность лазерного источника, умножая Q_{max} на облучаемую площадь. В случае плоской поверхности это будет площадь круглого сфокусированного пятна. Для сферической поверхности припойного шарика в результате проведенных экспериментов получен поправочный коэффициент $\sim 3,5$ и тогда мощность лазерного источника $P_{ист.}$ равна:

$$P_{ист.} = 3,5 \cdot Q_{max} \cdot \pi \cdot r_{beam}^2 \quad (4)$$

Таким образом, необходимое значение мощности лазерного источника ~ 5 Вт соответствует припойному шарiku диаметром 0,1 мм. При избыточной мощности возникают реактивные силы паров вскипания материала, которые могут быть причиной смещений паяных соединений (а) и нарушения их формы (б) (рис. 4).

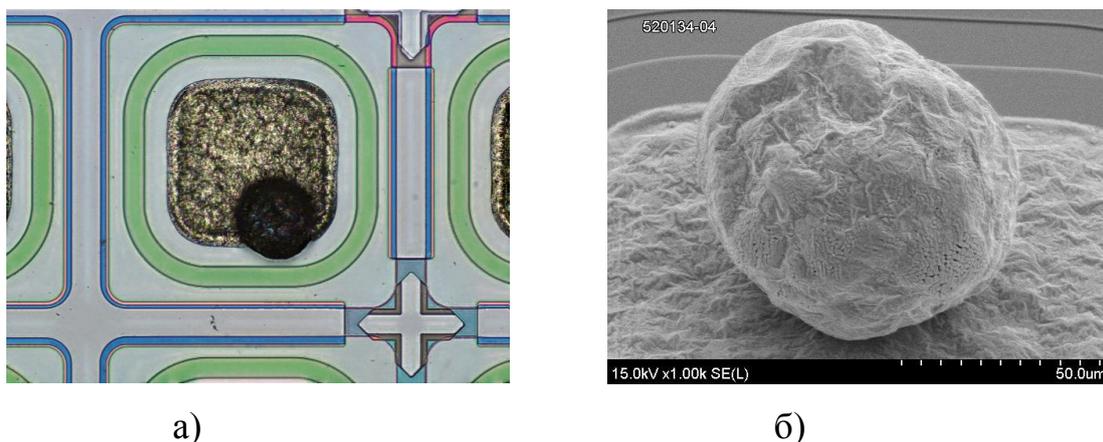


Рис. 4. Смещение припойного шарика относительно центра серебряной контактной площадки (а) и с дефектом формы верхней части (б)

Оценка энергетических составляющих для оплавления шариков диаметром 200, 300, 500, 600 и 760 мкм по вышеприведенной методике приведена в табл. 2.

Таблица 2. Параметры лазерной обработки припойных шариков

Диаметр шарика, мкм	Время импульса, мС	Мощность излучения, Вт	Энергия расплава шарика, мДж
200	15	10,5	3,1

300	30	17,6	11
500	80	31,5	49
600	100	42,5	85
760	150	57,3	172

Как видно из табл. 2, для припойных шариков диаметром 760 мкм необходим лазерный источник с выходной мощностью до 60 Вт, при этом плотность потока излучения достигает величины $4,89 \cdot 10^6$ Вт/см². Зависимости необходимой мощности лазерного излучения и времени импульса от диаметра припойного шарика показаны на рис. 5 при источнике лазерного излучения с максимальной мощностью 100 Вт.

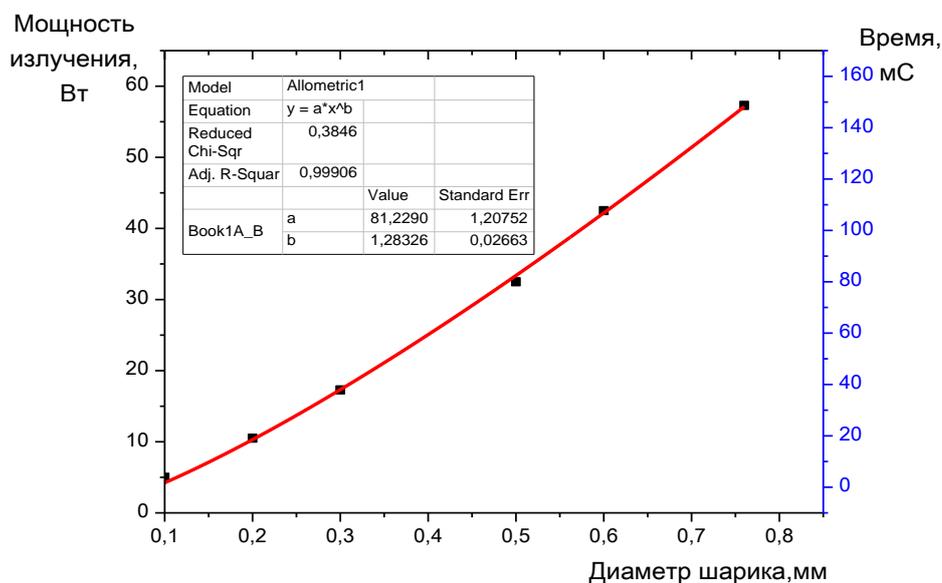


Рис. 5. Зависимости мощности и времени импульса лазерного излучения от диаметра припойного шарика

Автоматическая установка ЭМ-4452

В ОАО «Планар-СО» изготовлен опытный образец автоматической установки монтажа объемных выводов методом лазерной пайки ЭМ-4452, внешний вид которой представлен на рис. 6. Установка состоит из верхней части, где располагается оптико-механическая система, координатная система перемещений, устройство включения и блокировки, нижней части – тумба электрооборудования, которая включает систему управления лазером и промышленный компьютер. Для

управления установкой предусмотрен стол оператора, на котором размещены трекбол, клавиатура и монитор. Наблюдение за рабочим процессом производится по видеоизображению на мониторе.

Лазерная система создана на основе волоконного лазера мод. ЛК-100-ОМ-В сер. ЛК производства НТО «ИРЭ-Полус» (РФ) компании «IPG» с длиной волны 1064 нм, что соответствует ближнему ИК диапазону. В установке ЭМ-4452 имеется возможность выбрать мощность лазерного излучения и его длительность при пайке. Оптической системой установки ЭМ-4452 можно получить радиус сфокусированного лазерного пятна порядка 40 мкм. Время импульса лазерного излучения программируется в пределах 0,1–300 мс с дискретностью 0,1 мс. При работе с малыми уровнями мощности излучения (<10 Вт) может использоваться широтно-импульсная модуляция.



Рис. 6. Автоматическая установка присоединения припойных шариков лазерной пайкой ЭМ-4452

Основные технические характеристики установки ЭМ-4452 сведены в табл. 3.

Таблица 3. Техническая характеристика установки ЭМ-4452

Параметры	Технические характеристики
Типоразмеры припойных шариков, мм	0,04–0,76
Рабочее поле по координатам X, Y, мм	350x350
Перемещение рабочей головки по Z, мм	50
Материалы припойных шариков	AgCu, SnCu, Sn95.5Ag3.8Cu0.7, InSn
Фокусное расстояние от рабочего объектива до поверхности, мм	50
Максимальная выходная мощность, Вт	100

Выводы

1. Разработана технологическая система формирования объемных припойных выводов на контактных площадках 2,5 и 3D конструкций изделий электроники.
2. Проведена оценка энергетических составляющих процесса лазерной пайки припойных шариков и методика выбора мощности источника лазерного излучения с учетом поправочного коэффициента для оплавления припойного шарика заданного диаметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mausezahl, M. [and ets]** Mechanical properties of laser-jetting SAC305 solder on coated optical surfaces // *Physics Procedia*, 2016. Vol.83. P.532–539.
2. **Tian, Y.** Characteristics of laser reflow bumping of Sn3.5Ag and Sn3.5Ag0.5Cu lead-free solder balls / Y. Tian, C. Wang, Y. Chen // *Journal of Materials Science&Technology*, 2008, Vol. 24. № 2. P. 220–226.
3. **Муонио, Дж.** Лазерная пайка шариков припоя в BGA / Дж. Муонио, Р. Стадем // *Печатный монтаж* 2006. № 6. С. 20–21.
4. Laser solder jetting system /www.pactech.com/equipment/solder-ball-attach/sb2-jet.
5. **Лосев, В.Ф.** Физические основы лазерной обработки материалов: учебное пособие/ В.Ф. Лосев, Е.Ю. Морозова, В.П. Ципилев.– Томск.– Издательство Томского политехнического университета. 2011. 199 с.
6. **Ланин, В.Л.** Электроискровой процесс формирования шарика при термозвуковой микросварке в электронике/ В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // *Электронная обработка материалов*. 2013.49(2). С. 59–62.
7. **Рыжкин, А.** Лазерная микросварка в электронике: опыт использования и перспективы / А. Рыжкин, В. Ильясов, А. Чуларис // *Фотоника*. 2009. №2. С. 10–14.