

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

И. Петухов, к. т. н.¹, В. Ланин, д. т. н.²,
И. Тычинская³, Г. Ретюхин⁴

УДК 004.37:621.791.725 | ВАК 05.27.06

При сборке многокристальных и многослойных 3D-конструкций изделий современной электроники используются объемные выводы на основе припойных шариков малого диаметра (<100 мкм). Для обеспечения их присоединения 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 через сквозное отверстие сварочного инструмента на поверхность припойного шарика 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 в многослойных структурах 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 правильно выбрать не только материалы, но и способы нагрева, обеспечивающие высокую степень локализации мощности в зоне нагрева и малые зоны термического влияния. Монтаж шариков припоя как на кремниевую пластину, так и на коммутационную плату BGA необходимо осуществлять в инертной атмосфере без использования флюса.

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 непосредственного механического контакта источника тепла с шариком припоя, высокая производительность процесса, возможность автоматизации.

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 путем создания вакуума в полости сварочного инструмента (рис. 2а);
- расплавление припоя в канале инструмента лазерным импульсом и его выброс (solder jetting) на контактную площадку (рис. 1б) либо расплавление шарикового припоя под торцом сварочного инструмента практически в контакте с поверхностью под небольшим давлением защитного газа, например азота (рис. 2б).

¹ ОАО «Планар-СО», начальник научно-технического центра, petuchov@kbtcm.by.

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

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

⁴ НПО «Прецизионные технологические системы», начальник лаборатории.

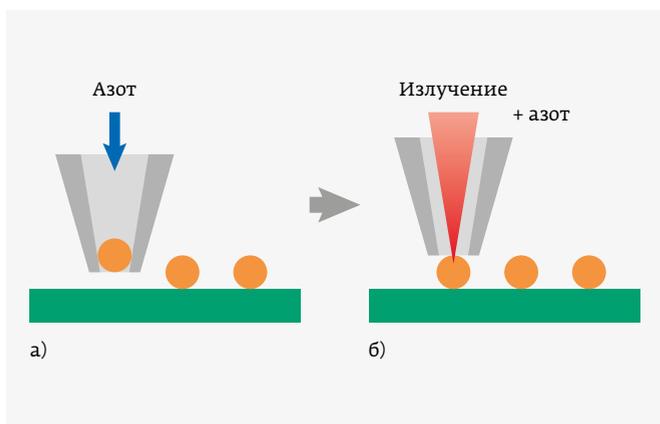


Рис. 1. Пайка с подачей припойного шарика в канал сварочного инструмента: а – шарик перед присоединением в канале сварочного инструмента; б – шарик в позиции присоединения

Для работы по методу, показанному на рис. 1, требуется прецизионный механизм подачи шарика в инструмент. Кроме того, возникает задача исключения одновременного нахождения двух шариков в канале инструмента, что приводит к необходимости зачистки последнего. Метод установки припойных шариков, схема работы которого приведена на рис. 2, проще, но его производительность меньше, поскольку он требует перемещения координатного стола в позицию захвата из вибробункера, исключаяющего слипание шариков из-за электростатики и обеспечивающего «облако» подсаживающихся шариков над их общим массивом 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 из бункера в сварочный инструмент по методу, показанному на рис. 1.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПАЙКЕ И ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАСПЛАВЛЕНИЯ ПРИПОЙНЫХ ШАРИКОВ

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

- передачу энергии сфокусированного лазерного излучения к верхней части поверхности припойного шарика под торцом сварочного инструмента, удерживаемого вакуумом, при этом площадь, на которую воздействует излучение, не превышает $2\pi r_{ш}^2$, где $r_{ш}$ – радиус припойного шарика;

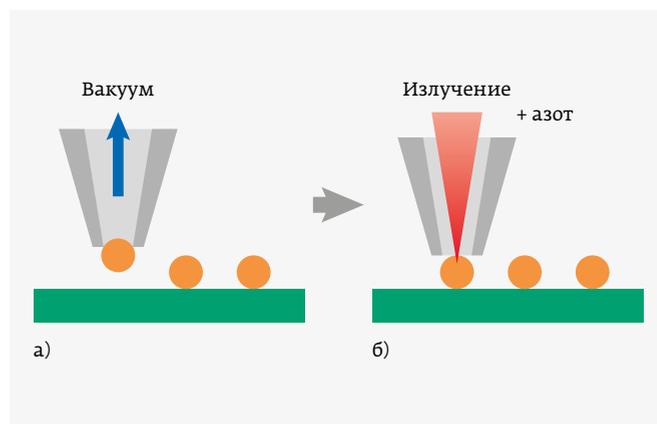


Рис. 2. Пайка с вакуумным захватом припойного шарика: а – шарик перед присоединением под торцом сварочного инструмента; б – шарик в позиции присоединения

- разогрев объема припойного шарика до температуры плавления и его расплавление;
- выталкивание расплава на контактную площадку за счет подачи под давлением защитного газа в сварочный инструмент;
- смачивание контактной площадки и формирование силами поверхностного натяжения в процессе остывания шарообразного объемного контакта (рис. 3).

Для установки оптимальных энергетических режимов импульса лазерного излучения при выполнении данной последовательности операций необходимо предварительно определить значения ряда физических величин, которые затем потребуются в расчетах. Особое внимание при этом следует обратить на их размерности: в различных справочниках значения физических величин могут быть указаны в разных системах единиц,

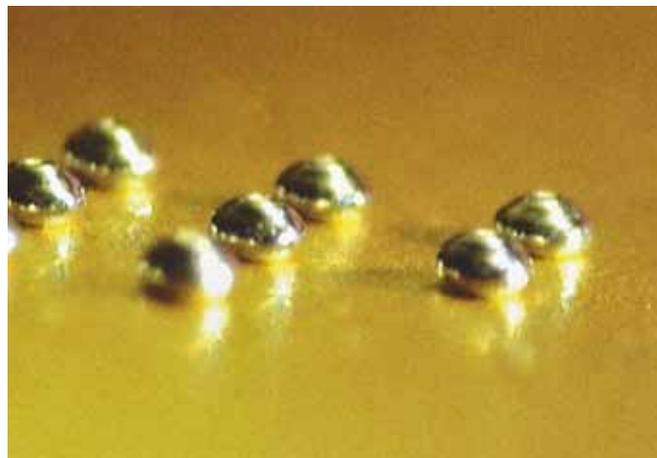


Рис. 3. Вид шарообразного объемного контакта

Таблица 1. Физические параметры материалов

Материал	Параметры					
	λ_T , Вт/(см·град.)	c , Дж/(г·град.)	α , см ² /с	$T_{\text{плавл.}}$, °С	$T_{\text{кип.}}$, °С	q , Дж/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

а размерность однозначно определяет принадлежность величины к той или другой системе. Для расчетов понадобятся [5]:

- максимальная 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;
- длина волны излучения λ_0 , нм;
- теплопроводность материала λ_T , Вт/(см·град.);
- удельная теплоемкость материала c , Дж/(г·град.);
- плотность материала ρ , г/см³;
- температуропроводность материала $\alpha=\lambda_T/(c \cdot \rho)$, см²/с.

Для оценки энергетических параметров процесса расплавления припойного шарика при воздействии

лазерного излучения используем методики, описанные в [6, 7]. Количество энергии W_0 для расплавления припойного шарика диаметром $d_{\text{ш}}$ определяется следующим соотношением [6]:

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

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

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

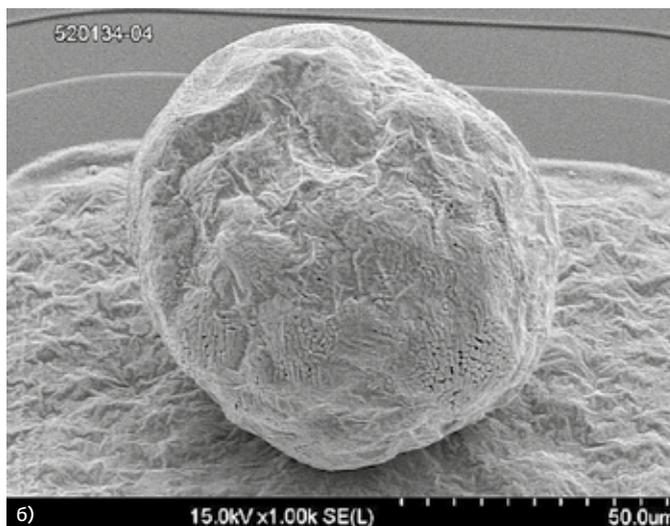
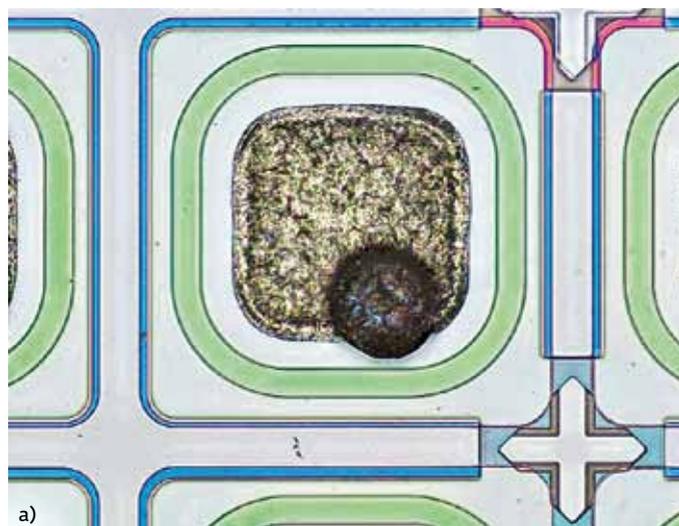


Рис. 4. Дефекты, связанные с превышением мощности лазерного источника нагрева: а – смещение припойного шарика относительно центра серебряной контактной площадки; б – дефект формы верхней части шарика

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]. У металлов ρ_λ растет с увеличением λ_0 для видимого и ближнего инфракрасного диапазонов излучения. При этом при плотности потока лазерного излучения $Q < 10^6$ Вт/см² коэффициент отражения не зависит от λ_0 . При $Q < 10^9$ Вт/см² лазерное излучение рассматривается как источник тепла, и распространение тепла в материале описывается законами теплопроводности. Количество поглощенной энергии лазерного излучения определяют из следующего соотношения:

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

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

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

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

Чтобы оценить значение максимального потока излучения Q_{max} , делаем следующие допущения. Коэффициент поглощения металлов A находится в пределах 0,1–0,15, неоднородность пятна $\varphi(r_{\text{beam}})$ примем равной 0,7. Из (3) получаем $Q_{\text{max}} \approx 28430$ Вт/см². Имея значение 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, равный ~3,5; тогда мощность лазерного источника $P_{\text{ист.}}$ равна:

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

Таким образом, припойному шару диаметром 0,1 мм соответствует необходимое значение мощности лазерного источника ~5 Вт. При избыточной мощности возникают реактивные силы паров вскипания

Таблица 2. Параметры лазерной обработки припойных шариков

Диаметр шарика, мкм	Длительность импульса, мс	Мощность излучения, Вт	Энергия расплавления 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

материала, которые могут быть причиной смещений паяных соединений и нарушения их формы (рис. 4а и рис. 4б соответственно).

Результаты оценки энергетических параметров для оплавления шариков диаметром 200, 300, 500, 600 и 760 мкм по вышеописанной методике приведены в табл. 2.

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 длительности импульса от диаметра припойного шарика показаны на рис. 5 при источнике лазерного излучения с максимальной мощностью 100 Вт.

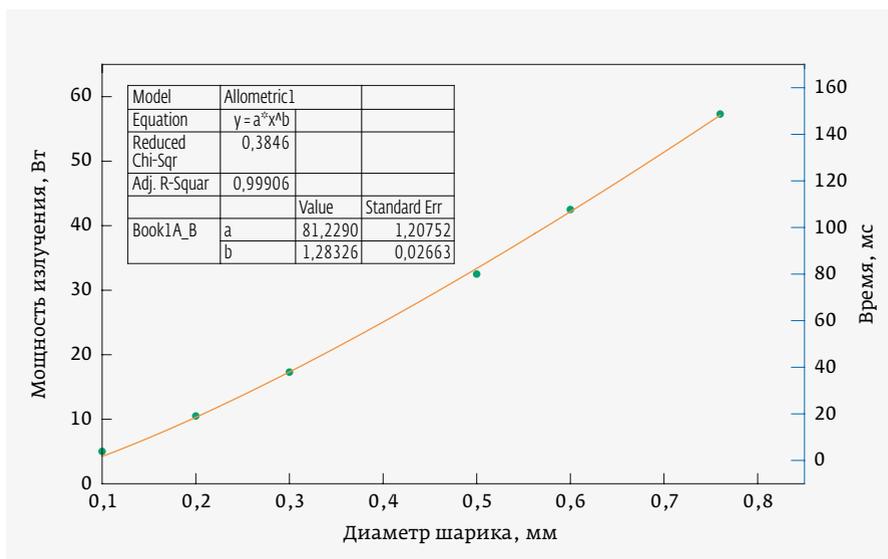


Рис. 5. Зависимости мощности и длительности импульса лазерного излучения от диаметра припойного шарика

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 и нижней частей. В верхней части располагается оптико-механическая система, координатная система перемещений, устройство включения и блокировки. Нижняя часть представляет собой тумбу электрооборудования, содержащую систему управления лазером и промышленный компьютер. Для управления установкой и наблюдения за рабочим процессом предусмотрен стол оператора, на котором размещены трекбол, клавиатура и монитор.

Лазерная система создана на основе волоконного лазера мод. ЛК-100-ОМ-В сер. ЛК производства НТО «ИРЭ-Полус» (РФ), входящего в Группу ИРГ, с длиной волны 1064 нм, что соответствует ближнему ИК-диапазону. Оптическая система установки ЭМ-4452 позволяет получить радиус сфокусированного лазерного пятна порядка 40 мкм. В установке предусмотрена возможность выбирать мощность лазерного излучения и его продолжительность при пайке. Длительность 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.

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



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

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	350 × 350
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 параметров процесса лазерной пайки припойных шариков, предложена методика выбора мощности источника лазерного излучения с учетом поправочного коэффициента для оплавления припойного шарика заданного диаметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mauezahl M. [and ets].** Mechanical properties of laser-jetting SAC305 solder on coated optical surfaces // *Physics Procedia*. 2016. Vol. 83. PP. 532–539.
2. **Tian Y., Wang C., Chen Y.** Characteristics of laser reflow bumping of Sn3.5Ag and Sn3.5Ag0.5Cu lead-free solder balls // *Journal of Materials Science&Technology*. 2008. Vol. 24. No. 2. PP. 220–226.
3. **Муонио Дж., Стадем Р.** Лазерная пайка шариков припоя в BGA // *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., Морозова Е. Ю., Ципилев В. П.** Физические основы лазерной обработки материалов: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 199 с.
6. **Ланин В. Л., Петухов И. Б.** Электроискровой процесс формирования шарика при термовзвучковой микросварке в электронике // *Электронная обработка материалов*. 2013. № 49 (2). С. 59–62.
7. **Рыжкин А., Ильясов В., Чуларис А.** Лазерная микросварка в электронике: опыт использования и перспективы // *Фотоника*. 2009. № 2. С. 10–14.