

Формирование шариковых микровыводов припоя с использованием лазерного излучения для Flip-Chip-монтажа

В технологии Flip-Chip ключевым моментом является формирование шариковых выводов припоя на контактных площадках кристалла и подложки. Предложена технология и оборудование создания бампов припоя посредством оплавления шариков лазерным излучением. Моделированием и экспериментальными исследованиями определены оптимальные параметры процесса.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.by

**Игорь Петухов
Фам Ван Тунг**

Технология Flip-Chip-монтажа

Технология Flip-Chip, также известная как C4 (Controlled Collapse Chip Connection — контролируемое соединение чипа методом самовыравнивающейся пайки), представляет собой метод межсоединения полупроводниковых устройств, таких как интегральные микросхемы и микроэлектромеханические системы (МЭМС). Технология Flip-Chip позволяет соединять контактные площадки кристаллов и подложек с помощью адгезионных паст, контактных бампов, медных столбиков или столбиков припоя [1]. Этот вид монтажа оптимизирует отвод тепла от изделий силовой электроники с большим количеством контактов, формируя подходящую топологию медных дорожек на подложке [2]. Таким образом, часть тепла будет выведена в окружающую среду через бампы, а их количество — обратно пропорционально эквивалентному термическому сопротивлению соединительного слоя.

Применение Flip-Chip-технологии монтажа кристалла в корпус методом перевернутого кристалла стало настоящим прорывом, позволившим добиться уменьшения габаритов и улучшения характеристик изделий, значительно снизить омическое сопротивление и индуктивность контактных соединений на частотах порядка 100 МГц (табл. 1) [3].

В качестве альтернативного метода проволочного монтажа кристалла с контактными площадками корпуса или платы применяют столбиковые либо

шариковые выводы. Кристалл в данном случае монтируется лицевой стороной к подложке (Flip-Chip) либо обычным способом, но со сквозными выводами (Through Silicon Vias, TSV). Такие способы монтажа позволяют распределить выводы по всей поверхности кристалла микросхемы, существенно экономя площадь конечного устройства по сравнению с проволочным монтажом (рис. 1) [4].

Основными преимуществами технологии сборки методом перевернутого кристалла являются возможность матричного расположения контактных площадок и очень малая протяженность межкомпонентных соединений, что сводит к минимуму величину их индуктивности [5]. Наиболее широко эта технология применяется в модулях для часов, смарт-картах, микроконтроллерах с количеством выводов до 200 и выше. Применение технологии Flip-Chip для процессоров и микросхем памяти постоянно растет в компьютерной и телекоммуникационной индустрии благодаря следующим достоинствам:

Таблица 1. Электрические параметры Flip-Chip- и проволочного монтажа

Параметр	Проволочный монтаж	Flip-Chip
Диаметры, мкм	Проволока 30	Шарик, 80
R, мОм	133	2,8
L, нГн	1,785	0,0002
C, пФ	18,8	14,8

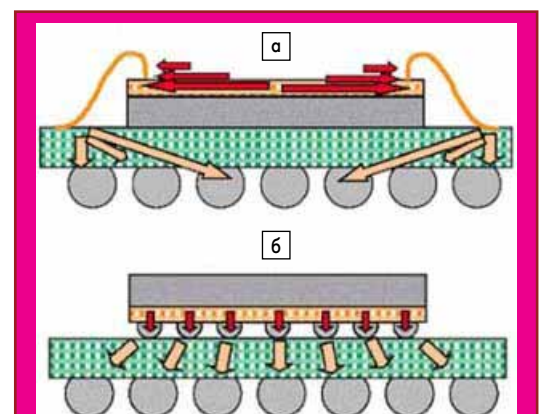


Рис. 1. Распределение тепловых потоков в BGA-корпусах: а) при монтаже проволокой; б) при Flip-chip-технологии

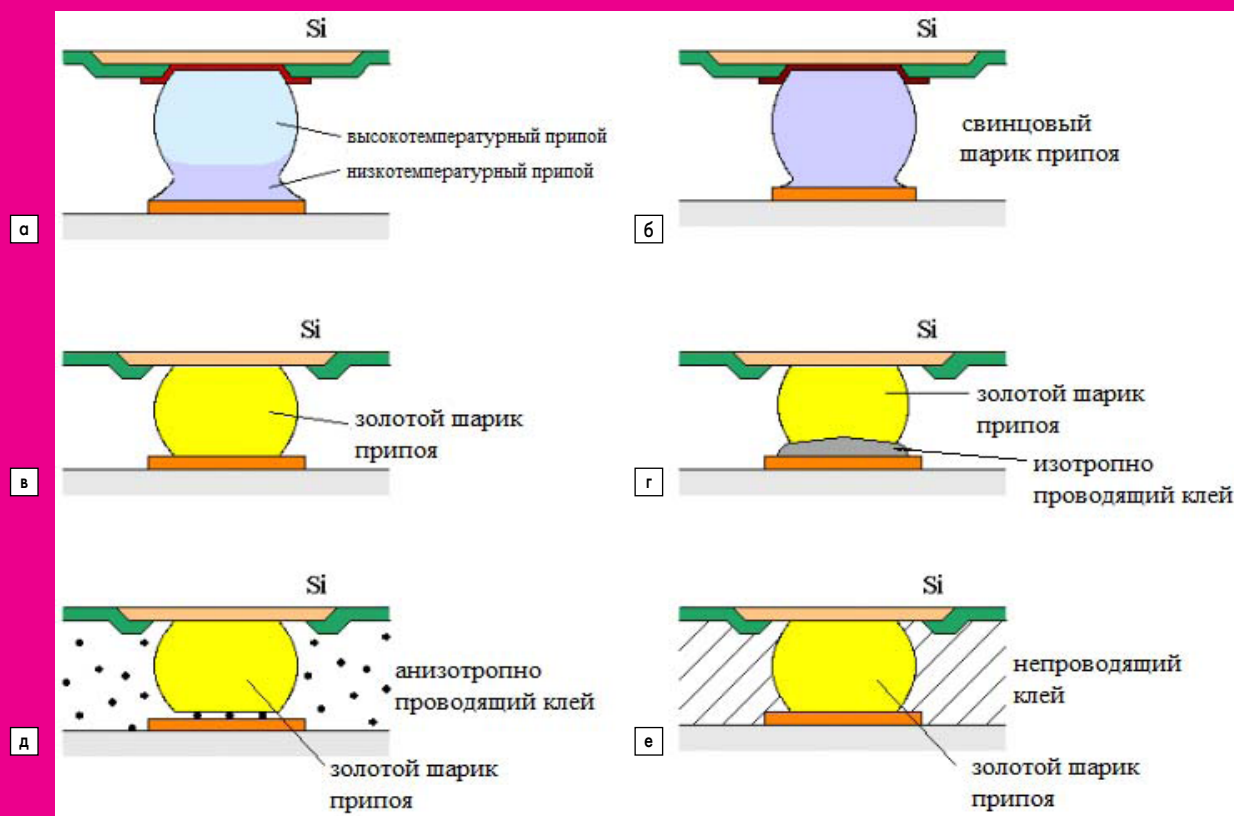


Рис. 2. Виды межсоединений Flip-Chip:

а) на основе смеси высоко- и низкотемпературного припоев; б, в) шариков припоя; г) изотропного и д) анизотропного проводящего адгезива; е) непроводящего адгезива

- повышение плотности выводов, так как бампы могут быть размещены по всей области чипа, а не только по периферии;
- самоцентрирующийся шаг процесса из-за поверхностного натяжения припоя;
- уменьшение размера кристалла для ранее ограниченных типов контактных площадок;
- малая протяженность межкомпонентных соединений, что сводит к минимуму величину их индуктивности;
- возможность отвода тепла с перевернутого кристалла непосредственно через внешнюю металлическую крышку с использованием термопасты;
- лучшие возможности распределения мощности, так как цепи в центре чипа напрямую достигают источника мощности;
- низкая стоимость и высокая производительность монтажа (все соединения для одного чипа выполняются одновременно, а не по одному, как при проволочном монтаже);
- сокращение длины проводов и меньшее количество общих проводов.

В настоящее время используется несколько направлений технологии Flip-Chip (рис. 2). Выводы кристалла могут быть выполнены из шариков оловянно-свинцового припоя (рис. 2б) либо из смеси высокотемпературного и низкотемпературного припоев (рис. 2а), даже из шариков бессвинцового припоя (золотой, медный и т. д.) (рис. 2в). Также используют методы, в которых применяются специальные адгезивы, в частности изотропный/анизотропный проводящий адгезив и непроводящий адгезив (рис. 2г–е).

Анизотропный проводящий адгезив содержит проводящие частицы, которые при определенных условиях создают контакт между площадками кристалла и подложки.

Хотя технология монтажа Flip-Chip применяется уже около 50 лет, ее распространение в производстве электроники довольно ограничено. Основные недостатки метода — худшие тепловые характеристики (по сравнению с кристаллом, присоединенным обычным способом) и трудность герметизации матрицы контактных площадок. Ограничения частично связаны с неполной совместимостью SMD-компонентов с доступным оборудованием для их монтажа. Кроме того, использование свинцового припоя становится причиной выброса альфа-частиц, что может привести к выходу из строя схемы в чувствительных цепях, таких как DRAM. Этот эффект можно минимизировать, ограничивая размещение припоя над чувствительными областями.

Методы присоединения кристаллов по технологии Flip-Chip включают ультразвуковую и термовозвукую сварку, присоединение с помощью анизотропных или изотропных проводящих клеев, пайку оплавлением. Для применений с мелким шагом припоя может быть нанесен гальваническим способом, струйной пайкой или в виде твердого припоя. Липкий флюс наносится на области контакта с припоем либо погружением чипа в резервуар для флюса или распылением на подложку. При грубой обработке паяльная паста наносится на подложку методом трафаретной печати. Бампы чипов помещаются в липкую пасту и оплавляются в печи. После опла-

вления предпочтительна очистка от флюса. Герметизирующий материал наносится дозированием вдоль одной или двух сторон чипа, при этом эпоксидная смола низкой вязкости вытягивается капиллярными силами в пространство между чипом и подложкой, а затем отверждается под воздействием тепла.

Существует несколько решений для формирования на пластинах бампов, обеспечивающих Flip-Chip-монтаж. Для создания контактных бампов размером порядка 100–120 мкм гальваническим методом требуется магнетронное нанесение барьерного слоя Ti или TiW толщиной 0,1–0,2 мкм на всю поверхность пластины с последующим напылением меди толщиной 0,3–0,8 мкм. Слой Ti/TiW-Cu представляет собой наиболее распространенный вариант так называемой подбамповой металлизации (Under Bump Metallurgy, UBM). Далее на пластину наносится 40-мкм слой фоторезиста и выполняется операция фотолитографии для вскрытия окон к UBM. Затем следует гальваническое наращивание примерно 5-мкм слоя меди с дальнейшим дозаполнением гальваническим припоем. Для получения требуемого объема припойного бампа гальваническое осаждение материала продолжается до высоты 15–20 мкм над уровнем слоя фоторезиста с формированием характерной грибовидной структуры, показанной на рис. 3а. После этого производится плазменное или жидкостное химическое удаление фоторезиста и слоя UBM с последующим оплавлением бампов и формированием припойных шариков на пластине (рис. 3б) [6].



Рис. 3. Типовая структура бампов типа S4 на кремниевом кристалле: а) до удаления фоторезиста; б) после удаления фоторезиста и оплавления

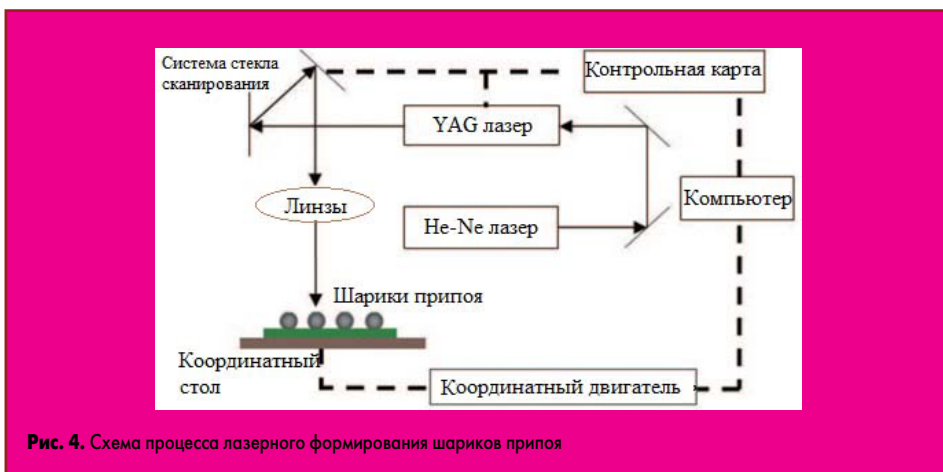


Рис. 4. Схема процесса лазерного формирования шариков припоя

Для реализации формирования микровыводов для технологии Flip-Chip необходимо правильно выбрать не только материалы, но и способы нагрева, обеспечивающие высокую локализацию мощности в зоне нагрева и его температурный профиль. Монтаж шариков припоя следует осуществлять в инертной атмосфере без использования флюса — как на кремниевую пластину, так и на коммутационную плату BGA. Наиболее перспективным методом формирования микровыводов, обеспечивающим возможность решения этой задачи, представляется лазерный нагрев. К особенностям данного процесса следует отнести локальность теплового воздействия, высокую стабильность температурно-временных режимов, гибкое регулирование подводимой тепловой энергии, отсутствие контакта с шариком припоя, высокую производительность, возможность автоматизации, высокое качество и надежность сформированных соединений.

Лазерное излучение обладает высокой степенью когерентности, то есть является монохроматическим и узко направленным, вследствие чего может быть сфокусировано в пятно малого размера, теоретический предел которого — длина волны света [7]. Это позволяет легко получать плотности энергии, обеспечивающие плавление припоя, используя оптический квантовый генератор (ОКГ) в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн ($\lambda = 1,06$ мкм). Однако для обеспечения высокого качества припойных выводов необходимо получить сведения по воспроизводимости диаметра шариков припоя и прочности соединения с контактными площадками подложки.

На рис. 4 показана схема процесса пайки лазерным оплавлением шариков припоя [8]. Лазерное устройство представляло собой иттербиевый волоконный лазер с цифровой модуляцией излучения с диаметром сфокусированного луча 80–100 мкм. Выходная мощность лазера составляла от 1–50 Вт. Время лазерного облучения и выходная мощность лазера программируются на мониторе компьютера. Исследованы бессвинцовые шарик припоя (диаметром 80–100 мкм) из сплавов Sn3,5Ag и Sn3,5Ag0,5Cu.

Исследование усилия на сдвиг сформированных микровыводов проводилось с использованием тестера прочности на сдвиг (рис. 5). В каждой партии протестировано десять образцов, их значения усреднены по средней прочности на сдвиг. Поверхности разрушения паяных соединений после испытания шариков на сдвиг исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа.

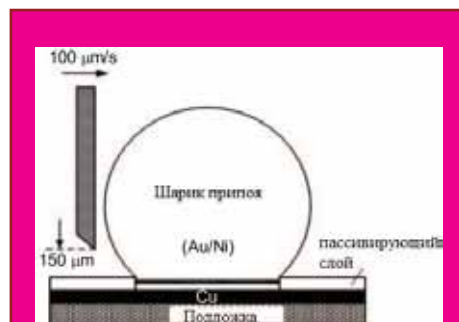


Рис. 5. Пример испытания на сдвиг шарика припоя

Моделирование термопрофилей лазерного нагрева

Моделирование термопрофилей процесса лазерного нагрева шариковых выводов припоя в пакете COMSOL Multiphysics позволило получить зависимости температуры шарика от времени воздействия лазерного излучения. Для оптимизации термопрофиля требуется выбрать мощность лазера для каждой массы шарика припоя. Мощность должна обеспечивать достаточную энергию для расплава шарика в течение одного импульса. Для шариков припоя SAC305 диаметром 200, 500 и 760 мкм были выбраны конкретные параметры лазерного нагрева, приведенные в таблице 2. Тепловые характеристики припоя SAC305 указаны в таблице 3.

Таблица 2. Варианты моделирования в пакете COMSOL Multiphysics

Диаметр шарика D, мкм	Длительность импульса, мс	Мощность излучения, Вт	Состояние припоя после воздействия лазера
100	10	5	Расплавлен
200	15	10	Расплавлен
500	100	30	Расплавлен
760	150	50	Расплавлен

Таблица 3. Характеристики шариковых выводов припоя

Параметр	Значение
Диаметр шарика припоя, мкм	760, 500, 200
Тип припоя	SAC305
Коэффициент поглощения A	0,05–0,2
Температура плавления	+217 °C
Температуропроводность материала	$3,10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$
Теплопроводность материала	0,18 Вт/(м·K)

Моделирование проводилось при использовании следующих параметров лазера: мощность лазера P 1–50 Вт, длительность импульса $\tau_i = 15–150$ мс, диаметр сфокусированного луча 45 мкм для длины волны 532 и 80 мкм для длины волны 1064 нм. Импульс имеет колоколообразную форму с пологой хвостовой частью. Распределение энергии в зоне нагрева описывается гауссовским выражением [9]:

$$E(x,y) = \frac{E_{cp}}{\pi \times r_{laser}^2} \times e^{-\frac{[(x-x_{laser})^2 + (y-y_{laser})^2]}{r_{laser}^2}}, \quad (1)$$

где E_{cp} — средняя энергия лазерного излучения, $E_{cp} = P \cdot \tau_i$; r_{laser} — радиус лазерного луча; x_{laser} , y_{laser} — x-y, местоположение лазерной фокальной точки.

Поглощение лазерного излучения в металле рассчитывалось по закону Бугера [10], где величина $A = 1-R$ показывает поглощательную способность металлов, являющуюся одним из важнейших для практики параметров. Ее можно оценить, используя из экспериментальных исследований зависимости от длины волны λ воздействующего излучения. Для благородных металлов и для олова величина $A \approx 0,05–0,2$.

Зависимости температурных профилей шариков припоя от времени и длины волны

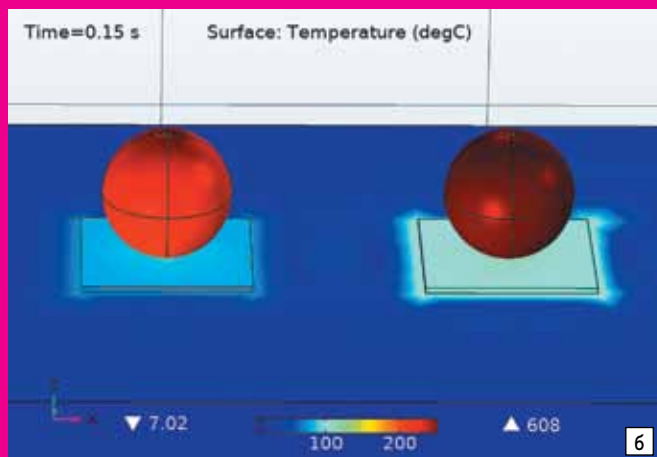
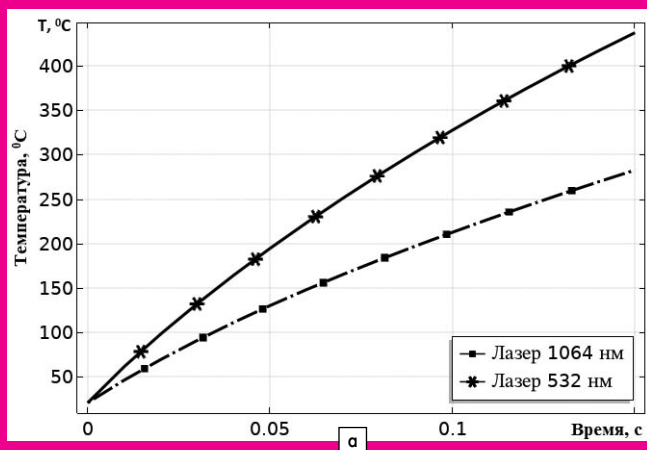


Рис. 6. а) Зависимость температуры нагрева и б) тепловые зоны нагрева шарика припоя (D = 760 мкм) от времени и длины волны лазера

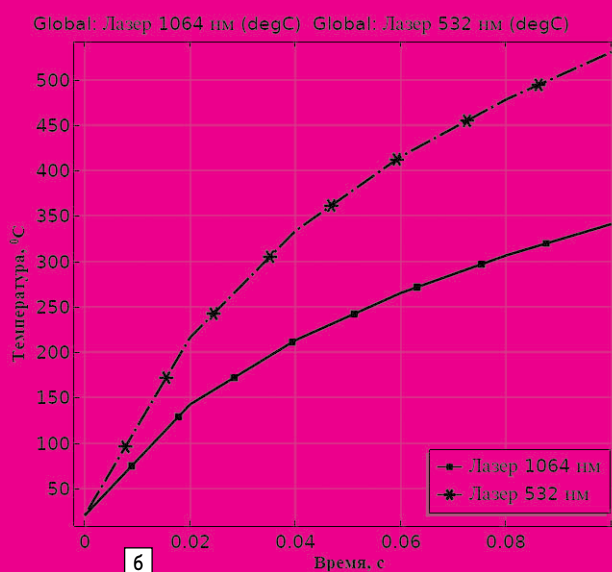
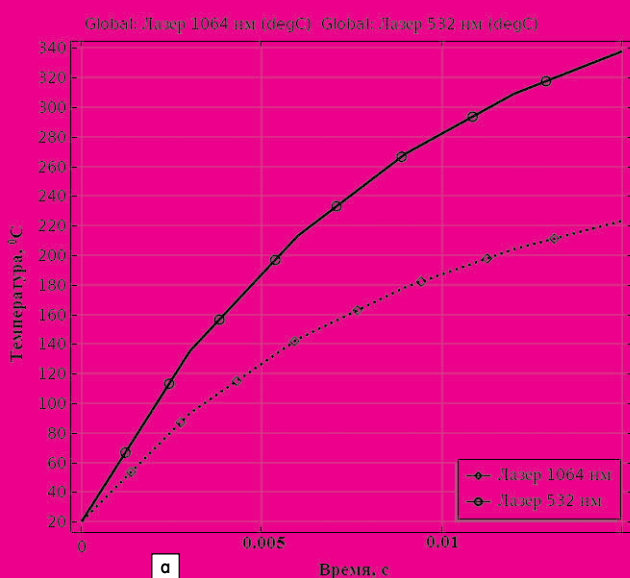


Рис. 7. Зависимости температуры нагрева шариков припоя (от времени и длины волны лазера): а) диаметром 200 мкм; б) диаметром 500 мкм

лазера для шарика диаметром 760 мкм показаны на рис. 6, а шариков с диаметром 200 и 500 мкм — на рис. 7. Выбранная мощность нагрева в каждом варианте оптимальна для расплавления шариков припоя и достаточна для применения в существующем оборудовании.

В результате моделирования установлено, что лазерное излучение с длиной волны 532 нм позволяет достигать температуры плавления припоя быстрее почти в 2 раза, чем с длиной волны 1064 нм. Количество поглощенной энергии лазерного излучения определено из соотношения:

$$W_{\text{полел}} = A \times Q_{\text{max}} \times \varphi(r_{\text{лазер}}) \times \pi \times r_{\text{лазер}} \quad (2)$$

где $\varphi(r_{\text{лазер}})$ — функция распределения интенсивности потока излучения на поверхности; A — поглощенная доля потока. Считается, что функция распределения является Гауссовым с максимумом в центре пятна.

Повышение скорости достижения температуры плавления на длине волны 532 нм по сравнению с длиной волны 1064 нм можно объяснить увеличением плотности потока за счет возможности получить лазерное

сфокусированное пятно меньшей площади. Однако на практике надо учитывать возможность вскипания припоя при высокой плотности потока излучения, что может привести к дефектам поверхности шарика, особенно малого диаметра (<100 мкм).

Современное лазерное оборудование

В настоящее время на мировом рынке представлено лазерное оборудование компаний RasPech, Laservall, Лотис ТИИ и других. Для российских сборщиков микроэлектроники может представлять интерес установка лазерного монтажа шариков припоя SB2-SMs Quantum фирмы RasPech. Конструкция установки с системой видеосцентрирования «на лету» позволяет совместить процессы загрузки/выгрузки изделий и достигать высокой скорости лазерной пайки. Бесфлюсовая и бесконтактная лазерная пайка может применяться при сборке компонентов по технологии 3D-монтажа (рис. 8а) [11]. SB2-SMs Quantum — это компактная система для автоматической последовательной лазерной пайки, обладающая достаточной гибкостью

для успешного применения при сборке различного рода изделий микроэлектроники, в особенности оптических приборов и фото/видеокамер. Основные возможности: бесконтактный монтаж шариков припоя методом лазерного оплавления; материалы припоя: SnAgCu, SnAg, SnPb, AuSn, InSn, SnBi; диаметры шариков припоя 40–760 мкм.

Установки MLS-1000 компании Laservall (рис. 8б) [12] и Datacon 2200evo компании Besi (рис. 8в) [13] вместе с оборудованием для пайки (конвейерная печь оплавления или установка вакуумной пайки) могут составить основу современного автоматизированного мелкосерийного производственного участка изготовления микроэлектронных устройств по технологии Flip-Chip.

В ОАО «Планар-СО» изготовлен опытный образец автоматической установки монтажа объемных выводов методом лазерной пайки ЭМ-4452, внешний вид которой представлен на рис. 9.

Установка состоит из верхней и нижней частей, в верхней — располагается оптико-механическая система, координатная система перемещений, устройство включения и блокировки.


Рис. 8. Оборудование для монтажа Flip-chip: а) SB2-SMs, б) MLS-1500; в) Datacon 2200evo

Таблица 4. Оценка энергии оплавления шариков припоя

Диаметр шарика, мкм	Время импульса, мс	Мощность излучения, Вт	Энергия плавления, мДж
100	10	4,46	0,5
200	15	10,5	3,1
300	30	18,3	11
500	80	30,5	49
600	100	42,5	85
760	150	57,3	172

Для того чтобы оценить значение максимального потока излучения Q_{\max} , делаем следующие допущения. Коэффициент поглощения металлов A находится в пределах 0,1–0,15, неоднородность пятна $\phi(r_{\text{laser}})$ примем равной 0,7. Из (3) получаем, что $Q_{\max} \approx 28\,430$ Вт/см². Из полученного значения Q_{\max} можем определить необходимую мощность лазерного источника, умножая Q_{\max} на облучаемую площадь.

Для плоской площади можно брать площадь круглого сфокусированного пятна. В нашем случае воздействию излучения подвергается часть сферической поверхности припойного шарика. В результате проведенных экспериментов получен поправочный коэффициент $\sim 3,5$. Таким образом, необходимое значение мощности лазерного источника ~ 5 Вт для припойного шарика диаметром 100 мкм. Оценка энергетических составляющих для оплавления шариков диаметром 100–760 мкм приведена в таблице 4.

Для выполнения высокоточных измерений размеров припойных микровыводов и поверхностей подложек применен оптический измерительный профилометр MicroProf. Благодаря своему простому и понятному пользовательскому интерфейсу система является оптимальным измерительным прибором для задач, связанных с контрольными измерениями, встроенными в производственную линию. Максимальный диапазон может составлять 300 мкм – 10 мм в зависимости от типа датчика и его положения [15].

Результаты измерений диаметров и высоты припойных микровыводов обработаны аналитическим программным обеспечением MarkIII, которое позволяет вести анализ любых двухмерных и трехмерных данных.

Измерения выполнялись следующим образом. Образец освещался сфокусированным лучом белого света. Пассивная линза с большой хроматической аберрацией рассеивала луч белого света вертикально в различные цветовые фокусные точки и высоты. Встречаясь с поверхностью, сфокусированный луч света отражается в отличие от несфокусированных компонентов пучка (рис. 10а). Он попадает в спектрометр через ту же линзу и волоконнооптический кабель.

Длина волны (цвет) отраженного луча света, а также результаты калибровочной таблицы зависят от расстояния между датчиком и образцом (рис. 10б). Поскольку обнаружение всех сигналов измерений происходит мгновенно с высоким разрешением от одной точки измерений к другой,


Рис. 9. Установка лазерной пайки ЭМ-4452

Нижняя часть представляет собой тумбу электрооборудования, которая содержит систему управления лазером и промышленный компьютер. Для управления установкой и наблюдения за рабочим процессом предусмотрен стол оператора, на котором размещены трекбол, клавиатура и монитор, операция выполняется по видеоизображению на мониторе.

Лазерная система создана на основе волоконного лазера модели ЛК-100-ОМ-В серии ЛК с длиной волны 1064 нм, что соответствует ближнему ИК-диапазону. Оптическая система установки ЭМ-4452 позволяет получить радиус сфокусированного лазерного пятна порядка 80 мкм. В установке ЭМ-4452 предусмотрена возможность программирования мощности лазерного излучения и его длительности 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. Лазерная система изготовлена в НТО «ИРЭ-Полус» (РФ) — компании, входящей в Группу IPG.

Экспериментальное исследование

Используя приведенное выше значение энергии в соотношении (1) для расплавления припойного шарика диаметром 0,1 мм и выражение (2), получаем:

$$A \times Q_{\max} \times \phi(r_{\text{laser}}) = \frac{0,5 \times 10^{-3}}{3,14 \times 0,004^2 \times 5 \times 10^{-3}} \approx 1990 \text{ Вт.} \quad (3)$$

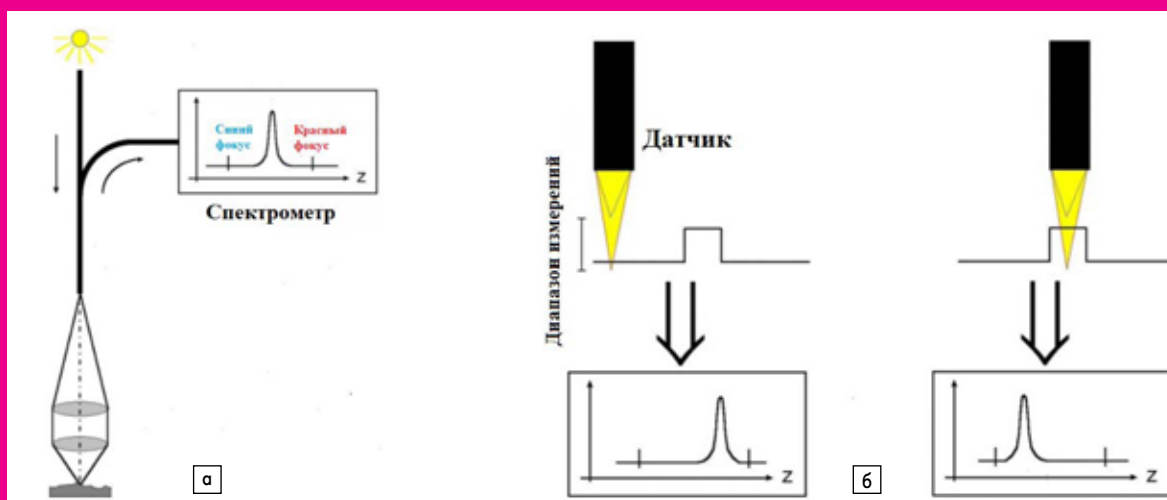


Рис. 10. Принцип измерений (а) и регистрации данных (б) с помощью оптического датчика

Таблица 5. Результат измерений усилия сдвига припойных шариков

Группа	Диаметр шарика, мкм	Высота шарика, мкм	Усилие сдвига, гс
1	74,5	70,1	19,3
2	73,4	72,2	14,3
3	76,4	73,1	14,7
4	72	71,2	21,7
5	74,5	72,9	22,4
6	74,1	71,7	14,3
7	72,3	70,9	22,3

то необходимость в перемещении сервомеханизма вслед за сигналом отсутствует. Благодаря этому измерения выполняются очень быстро вне зависимости от структуры образца.

Для исследования усилия сдвига лазерным нагревом сформировано семь групп шариков. Испытание на сдвиг выполнено при одинаковых условиях с учетом места расположения на пластине. Из каждой группы сдвигалось по три шарика, усилие сдвига считается средним значением для шариков этой группы. Высота шариков и усилие сдвига показаны в таблице 5.

Средняя высота шариков составляет 71,7 мкм, максимальная — 73,1 мкм, минимальная — 70,1 мкм. Среднее усилие сдвига шариков составляет 18,4 гс, максимальное и минимальное значения — 22,4 и 14,3 гс соответственно. Усилие сдвига шариков незначительно зависит от мощности лазера и времени нагрева, поскольку метод формирования шариков припоя был оптимизирован.

С помощью программного обеспечения Mark III получено изображение бампа, сформированного из шарика припоя диаметром 80 мкм (рис. 11). Размеры шарика в оптималь-

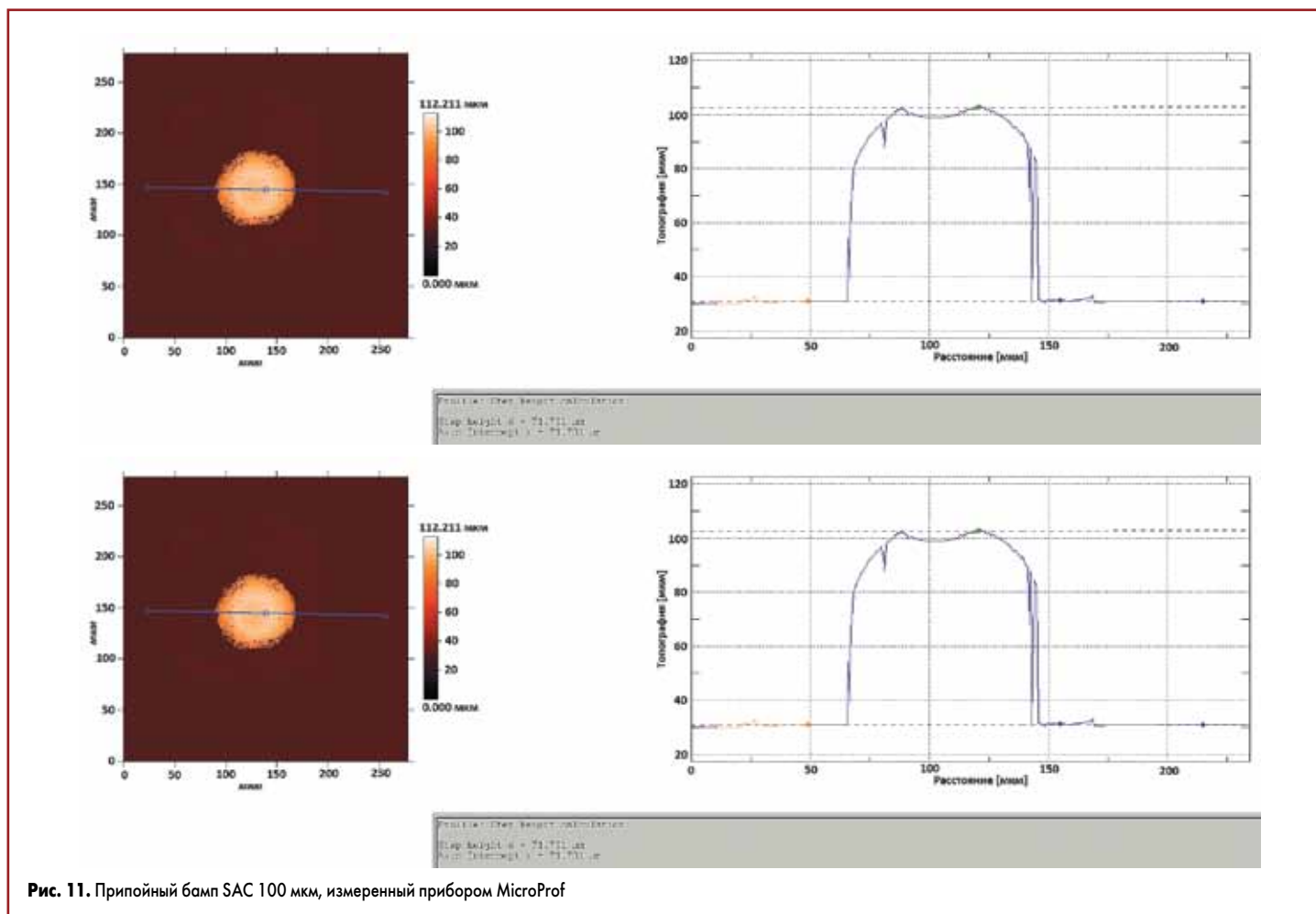


Рис. 11. Припойный бамп SAC 100 мкм, измеренный прибором MicroProf

Таблица 6. Усилия сдвига припойных шариков на пластине

Группа	Расположение шарика на пластине	Усилие сдвига, гс
1	Справа на пластине	6,9
2	Низ пластины	6,5
3	Верх пластины	6,8
4	Центр пластины	7,1
5	Слева на пластине	6,7

ных условиях определены с помощью профилометра, диаметр шарика 80 мкм, высота 71,7 мкм, разброс высоты шариков не превышал 5–6%.

При небольшой энергии лазера поверхность бампов припоя была гладкой и блестящей. При большой подводимой энергии лазера бампы припоя выглядели темными, а поверхности были шероховатыми. Некоторые бампы смещались от контактных площадок и выгорали. При перегреве наблюдались трещины на поверхности сформированных микровыводов, что, вероятно, связано с неравномерной по объему кристаллизацией припоя ввиду температурного градиента между твердой и жидкой фазой.

Усилие сдвига зависит от качества напыления и адгезии материала на поверхности пластины (табл. 6). В испытаниях использовались пластины с серебряными контактными площадками. Испытание на сдвиг припойных шариков показало, что разрыв шарика происходил на пластине (рис. 12), то есть существует металлургическая связь между площадкой и сформированным шариком. Если шарики бессвинцового припоя и металлизация хо-

рошо металлургически скреплены во время лазерного формирования, то прочность соединения на границе раздела выше, чем внутри паяного соединения.

Выводы

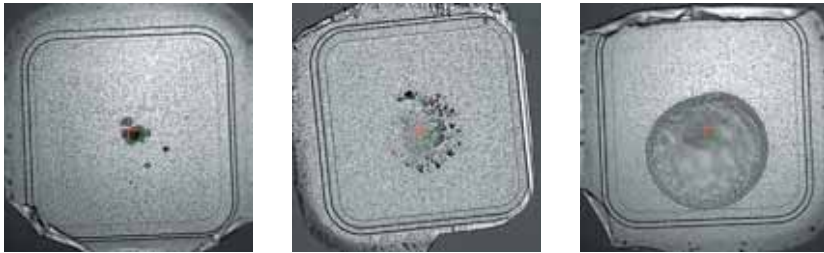
Лазерный нагрев является перспективным методом формирования шариковых выводов припоя при сборке электронных модулей с высокой плотностью выводов из-за его высокой удельной энергии и способности локального нагрева. Использование лазерного излучения с длиной волны 532 нм позволяет сократить время обработки и расход требуемой энергии на 20–25%, что связано с более высокой плотностью потока излучения за счет возможности получения лазерного сфокусированного пятна меньшей площади.

Средняя высота микровыводов, сформированных из шариков диаметром 80 мкм, составляет 71,7 мкм, разброс высоты шариков не превышал 5–6%. Усилие сдвига припойного микровывода зависит от площади смачивания и качества адгезии покрытия на пластине при среднем значении 18,4 гс.

Литература

1. Wong C. L., How J. Low cost flip chip bumping technologies. Electronic Packaging Technology Conference, 8–10 October, 1997.
2. Борисова Ю. Технологии флип-чип-монтажа кристаллов CMOS на органические подложки // Технологии в электронной промышленности. 2017. № 4.

3. Шкопкин М., Мякочин Ю., Девликанова С. Миниатюризация аппаратуры посредством применения специализированных микросборок на основе отечественных микросхем // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2019. № 2.
4. Хохлун А., Чигиринский С. Классификация основных технологий flip-chip для использования в современных системах в корпусе // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2019. № 7.
5. Ланин В., Петухов И., Волкенштейн С., Барбарчук Д. Технологические особенности монтажа Flip-chip // Силовая электроника. 2010. № 4.
6. Arshad M. K., Hashim U., Muzamir I. Under Bump Metallurgy (UBM) Technology Review for Flip Chip Packaging // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2007. Vol. 2. No. 1.
7. Аллас А. А., Вейко В. П., Новосадова В. С. Лазерная пайка в производстве радиоэлектронной аппаратуры. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007.
8. Tian Y., Wang C. Characteristics of Laser Reflow Bumping of Sn3.5Ag and Sn3.5Ag0.5Cu Lead-Free Solder Balls // J. Mater. Sci. Technol, 2008. No. 2.
9. Manca O., Minea A. A. Transient heat conduction in solids irradiated by a moving heat source with combined donut and gaussian distributions // International Review of Mechanical Engineering. 2010. No. 4.
10. Вакс Е. Д., Миленький М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013.
11. SB2-SMsQuantum — автоматическая установка монтажа шариков припоя и лазерной пайки. www.pactech.com/equipment/solder-ball-attach/sb2-sms/
12. Micro Laser Soldering System — MLS 1000 series. www.laservall.com
13. Datacon 2200 evo plus. www.besi.com/products-technology/product-details/product/datacon-2200-evonbsplplus/
14. ОАО «ПЛАНАР-СО». www.planar.by
15. www.frtmetrology.com/en/products/microprof/microprof100/


Рис. 12. Поверхность пластины после испытания на сдвиг шариков