

Лазерная пайка при сборке электронных модулей

Проблемы повышения плотности монтажных соединений в современных микромодулях заставляют обратить внимание на необходимость эффективного использования технологических лазеров и лазерных диодов в процессах пайки электронных компонентов. Лазерное излучение, являясь самым мощным источником тепловой энергии, обладает уникальными особенностями локального воздействия и возможностями программного управления зонами нагрева. Для сборки электронных модулей с плотным поверхностным монтажом необходимы рациональное использование лазерных технологических систем и оптимизация параметров процесса.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.unibel.by

Особенности процессов лазерной пайки

Микроминиатюризация элементов и создание функционально сложных микроэлектронных устройств, в частности СБИС и микропроцессоров, вызвали особые проблемы в области сборки электронных микромодулей. Согласно закону Г. Мура, число транзисторов на кристалле удваивается каждые два года и их плотность достигла 20 млн на 1 см². Высокую функциональную сложность и степень интеграции невозможно реализовать без совершенствования технологии монтажных соединений, так как, согласно правилу Рента, число сигнальных выводов изделий микроэлектроники определяется как $n = qN^R$, где q — коэффициент связности микроэлементов в структуре изделия, N — степень интеграции, R — показатель Рента (0,5–0,74) [1].

Разработка микропроцессоров с рабочей частотой сигнала до 3,5 ГГц увеличивает число выводов до 1000. Освоение электронных сборок V поколения — многокристальных модулей (МКМ) — тонкопленочных многослойных гибридных конструкций, выполненных на кремниевых или металлических подложках, к которым бескорпусные кристаллы присоединяются методами сварки или пайки, повысило плотность монтажных соединений до 200 млн на 1 см² [2]. Традиционные процессы монтажа не обеспечивают необходимой в настоящее время высокой производительности и высокого процента выхода годных изделий с плотным монтажом. Низкий уровень автоматизации процессов не способствует высокому качеству соединений. Статистические данные показывают, что 50–80% всех отказов в электронных изделиях происходит вследствие дефектов соединений, причем стоимость обнаружения и исправления отказа на этапе сборки блока в 100 раз меньше, чем при испытаниях аппаратуры [3].

При лазерной пайке, в отличие от групповых методов, проводится монтаж отдельных выводов или рядов выводов. Однако современные достижения в этой области позволили приблизить производи-

тельность монтажа к 10 соединениям в секунду и выше, что соответствует групповым методам. Кроме того, лазерная пайка отличается также следующими преимуществами [4]:

- в течение времени пайки корпус компонента и печатная плата практически не нагреваются, что позволяет вести монтаж термочувствительных элементов;
- локальность приложения тепловых нагрузок снижает возникающие при пайке температурные механические напряжения;
- кратковременное тепловое воздействие (20–30 мс) снижает степень окисления припоя и толщину слоя интерметаллидов, обеспечивает мелкозернистую структуру зоны соединения и более высокие механические свойства без применения подогрева и инертной атмосферы;
- возможна пайка модулей с высокой плотностью монтажа и малым шагом выводов без образования перемычек и шариков припоя;
- оборудование лазерной пайки имеет хорошие возможности для автоматизации всего технологического цикла с одновременным проведением лазерного контроля паяных соединений.

К недостаткам лазерной пайки можно отнести более высокую стоимость применяемого оборудования.

Технологический процесс лазерной пайки включает операции по нанесению припойной пасты, адгезива (при необходимости), установку компонентов и последовательную программированную пайку выводов компонентов. Локальность теплового воздействия не требует применения специальных высокотемпературных адгезивов. Возможна также частичная сборка с дополнительной установкой и пайкой определенных компонентов, что при пайке групповыми методами можно сделать только вручную.

Время пайки вывода средних размеров составляет примерно 30 мс при средней мощности луча лазера 20 Вт. Оптимальная мощность луча лазера зависит от массы паяного соединения. Например, для пайки выводов компонентов к контактными площадкам тре-

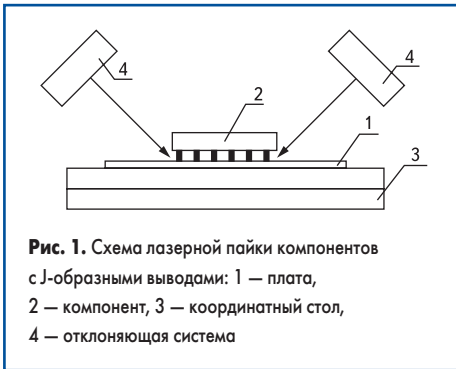


Рис. 1. Схема лазерной пайки компонентов с J-образными выводами: 1 — плата, 2 — компонент, 3 — координатный стол, 4 — отклоняющая система

буется лазер с мощностью не менее 10 Вт, в то время как для пайки компонентов к шинам питания и «земли», имеющим большой теплоотвод, может потребоваться мощность газовых лазеров до 150 Вт [5].

Для пайки корпусов электронных компонентов с J-образными выводами лазерный луч направляют под углом к перпендикуляру для того, чтобы эффективно нагреть контактную площадку на плате и припойную пасту на ней (рис. 1) [6]. Для повышения производительности используют двухлучевую схему нагрева.

Пайка с помощью твердотельных лазеров может проводиться и без применения флюса, что не требует дальнейшей очистки печатных плат.

Диодные лазеры становятся все более приемлемым выбором для локальной пайки в производстве микроэлектроники, в частности, благодаря их повышенной надежности, лучшему КПД и экономической эффективности. Спектр дуговой лампы Xeон распределен в диапазоне длин волн 350–1100 нм, тогда как лазерный диод излучает монохроматический свет с длинами волн 810 или 940 нм [7]. Поэтому лазерный диод имеет более высокую плотность и конвергенцию мощности по сравнению с дуговыми нагревательными лампами. Выход диодного лазера может фокусироваться на точке гораздо меньшего диаметра (~0,4 мм), чем «мягкий луч» (1 мм). Важным преимуществом пайки диодным лазером является его способность фокусировать энергию луча только на рабочем участке при минимальном нагреве близлежащих компонентов. Луч имеет малую зону термического влияния, что приводит к меньшему нагреву платы. Пайка диодным лазером предназначена для использования в тех случаях, когда чувствительные компоненты находятся вблизи места пайки. Технология позволяет избежать предварительного нагрева компонентов при пайке большой массы термического материала. Более того, результатом быстрого нагрева и охлаждения припоя является мелкозернистая микроструктура припоя с улучшенными механическими свойствами.

Физические основы лазерного нагрева в технологии пайки

Лазерное излучение в виде сфокусированного луча создает высокую концентрацию энергии (10⁸–10⁹ Вт/см²) на поверхности материалов, что обеспечивает локальный нагрев с высокой скоростью и незначительной зоной

термического влияния. Проблемы формирования микросоединений при лазерном воздействии связаны с необходимостью определения необходимой плотности мощности излучения, выбора оптимальных режимов, обеспечения заданного качества соединений. Энергетический баланс лазерного воздействия описывается уравнениями [8]:

$$\begin{aligned} E_l &= E_{\text{погл}} + E_{\text{отпр}}, \\ E_{\text{погл}} &= E_{\text{ж}} + E_m, \end{aligned} \quad (1)$$

где E_l — энергия лазерного луча в зоне обработки, $E_{\text{погл}}$ — энергия, поглощенная в процессе фотонно-электронных соударений, $E_{\text{отпр}}$ — энергия, отраженная от поверхности, $E_{\text{ж}}$ — полное теплосодержание расплавленного металла, E_m — энергия, отводимая теплопроводностью вглубь основного металла.

Интенсивность проникающего лазерного излучения убывает по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 k \times e^{-\gamma x}, \quad (2)$$

где x — глубина проникновения, I_0 — интенсивность лазерного излучения на поверхности, k — коэффициент поглощения, γ — степень поглощения.

В металлах кванты света поглощаются в основном электронами проводимости, которые рассеивают поглощенную энергию на тепловые колебания решетки за время 10⁻¹¹–10⁻¹⁰ с, благодаря чему поглощенная энергия быстро переходит в теплоту. Степень поглощения для металлов порядка 10⁷ м⁻¹, поэтому энергия выделяется в слое толщиной около 10⁻⁷ м и лазерное излучение можно рассматривать как локальный источник тепловой энергии на поверхности. Размер нагретой зоны на первом этапе определяется глубиной проникновения излучения в среду, а затем растет за счет теплопроводности. С ростом температуры поверхности значение коэффициента поглощения увеличивается и составляет для металлов при температуре 500 °С и длине волны излучения 1,06 мкм 0,35–0,40, что дает возможность нагревать их поверхность с возрастающей скоростью [9].

При импульсно-периодическом лазерном воздействии процесс нагрева тела описывается непрерывно действующим источником теплоты, который представляется в виде серии действующих друг за другом мгновенных источников тепла. Количество тепла, введенное в обрабатываемую поверхность за время t , равно:

$$Q = \int_0^{\tau_u} \eta P(t) dt, \quad (3)$$

где τ_u — длительность импульса, η — КПД лазерного нагрева, P — мощность лазерного излучения.

Плотность мощности лазерного воздействия зависит в значительной степени от диаметра луча d :

$$E = \frac{4W}{\pi \times d^2 \times \tau_u}, \quad (4)$$

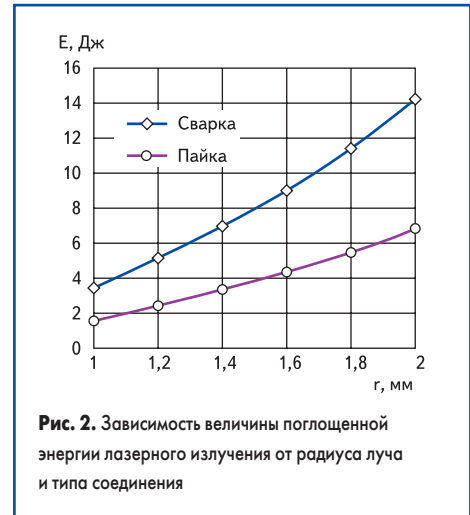


Рис. 2. Зависимость величины поглощенной энергии лазерного излучения от радиуса луча и типа соединения

где W — энергия в импульсе, которая для плавления материала без выплеска равна:

$$W = \frac{0,885 T_{\text{пл}} \times \lambda \times \pi \times r^2}{\sqrt{a \times \tau_u}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{пл}}$ — температура плавления материала, λ — коэффициент теплопроводности, $a = \lambda / c\gamma$ — коэффициент температуропроводности ($c\gamma$ — объемная теплоемкость), r — радиус пучка лазерного излучения.

Для импульсного лазерного источника энергия W находится в пределах 10⁻²–10⁻³ Дж. Теоретически рассчитана зависимость величины поглощаемой энергии лазерного излучения от радиуса луча в зоне формирования соединений лазерной пайкой и сваркой [10] (рис. 2). При радиусе луча 2 мм величина поглощаемой энергии отличается почти в 2 раза.

При лазерном нагреве сфокусированным излучением в виде отдельного импульса температурное поле может быть представлено в виде процесса распространения тепла мгновенного линейного источника с энергией Q , выделившейся в пластине с равномерным распределением по толщине в начальный момент времени $t = 0$:

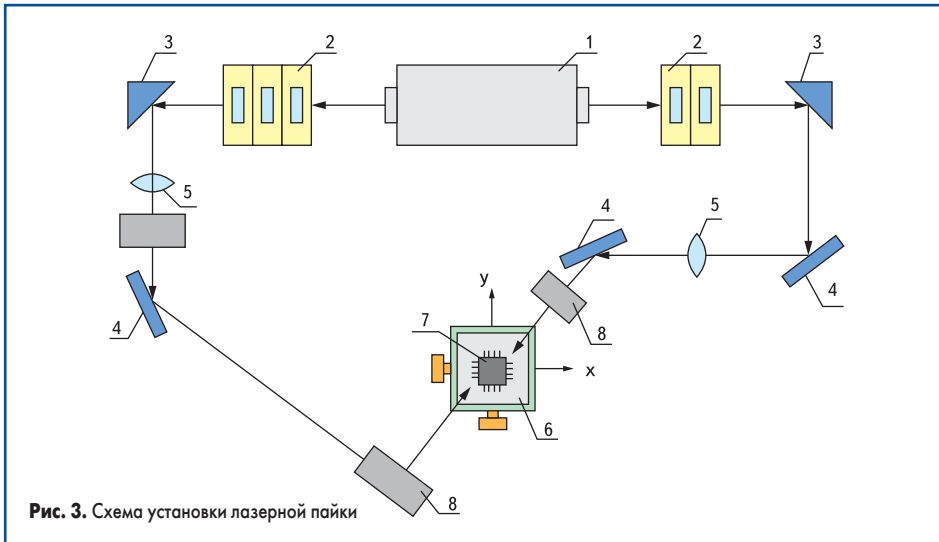
$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi \times \lambda \times \delta \times t} e^{-\frac{r^2}{4at} - bt}, \quad (6)$$

где r — расстояние от источника тепла до точки с координатами (x, y) , δ — толщина пластины, $b = 2a / (c\gamma\delta)$ — коэффициент температуропередачи, учитывающий поверхностную теплоотдачу в окружающую среду (a — коэффициент полной поверхностной теплоотдачи).

Приращение температуры в любой момент времени при нагреве импульсным источником лазерного излучения определяется следующим образом:

$$dT = \frac{q \times dt}{4\pi \times \lambda \times \delta \times t} \times e^{-\frac{r^2}{4at}}. \quad (7)$$

Используя выражение (7), можно рассчитать температуру в произвольной точке поверхности при воздействии на нее лазерного излучения. Для периодического лазерного воздействия процесс нагрева описывается в виде


Рис. 3. Схема установки лазерной пайки

серии непрерывно действующих мгновенных источников тепла.

При лазерной пайке поверхностно монтируемых компонентов с помощью паяльной пасты мощность лазерного излучения необходимо варьировать, обеспечивая оптимальный температурный профиль процесса [11]. Вначале, на стадии предварительного нагрева мощностью излучения 1,5–1,8 Вт достигают равномерного прогрева контактных площадок с пастой, удаляют растворитель из пасты, а затем при мощности 2,4–3,0 Вт в течение 45 с расплавляют пасту и формируют паяные соединения.

Конструкции установок лазерной пайки

Установки лазерной пайки должны соответствовать таким требованиям, как:

- универсальность в монтаже компонентов различных типоразмеров;
- применение двухлучевой схемы пайки (для предотвращения «вздыбливания» компонента);
- возможность независимого программирования траектории движения лучей и мощности излучения для каждой контактной площадки;
- программная совместимость и возможность встраивания в автоматизированные комплексы поверхностного монтажа;
- возможность параллельного контроля качества пайки.

Типовая двухлучевая установка для лазерной пайки включает лазер (1), затвор (2), призматическое зеркало (3), плоское зеркало (4), фокусирующую оптическую систему (5), двухкоординатный стол (6) с установленной на нем монтируемой платой (7). Элементы оптической системы 2–6 аналогичны для каждого луча лазера. Управление работой установки осуществляется от микроЭВМ (рис. 3).

В установке применен двухлучевой твердотельный лазер мощностью 60 Вт, работающий в непрерывном режиме. Твердотельные лазеры находят более широкое применение в сравнении с газовыми, так как они имеют более простую и дешевую оптическую систему, возможность фокусирования луча до

25 мкм и менее. Блоки сканирования (8) расположены диагонально относительно паяемого компонента и под углом к поверхности печатной платы, что позволяет проводить пайку корпусов с J-образными выводами и однорядных безвыводных компонентов. Позиционирование компонента относительно лучей лазера осуществляется с помощью программно управляемого координатного стола.

Большой интерес представляют также установки лазерной пайки со встроенной системой

контроля технологических режимов пайки, один из вариантов которых показан на рис. 4. Для пайки применен твердотельный лазер с одновременным сканированием зоны пайки камерой ИК-излучения, которая формирует на экране управляющего компьютера тепловую картину зоны пайки. Все системы установки программно управляемы.

Принцип контроля и управления мощностью луча лазера основан на сравнении с эталонными температурными полями различных выводов и компонентов, хранимых в базе данных компьютера. В процессе пайки осуществляется непрерывный мониторинг рабочей зоны ИК-камерой. Мощность и длительность излучения регулируется автоматически. Выключение луча лазера осуществляется при идентичности эталонного и текущего температурных полей паяемых выводов.

Оптимизация параметров лазерной пайки

Устройство лазерного формирования контактных соединений в микромодулях (рис. 5) состояло из источника оптического излучения, блоков регулирования энергии излучения, питания и управления, оптической системы и системы охлаждения лазера. В качестве источника оптического излучения применен

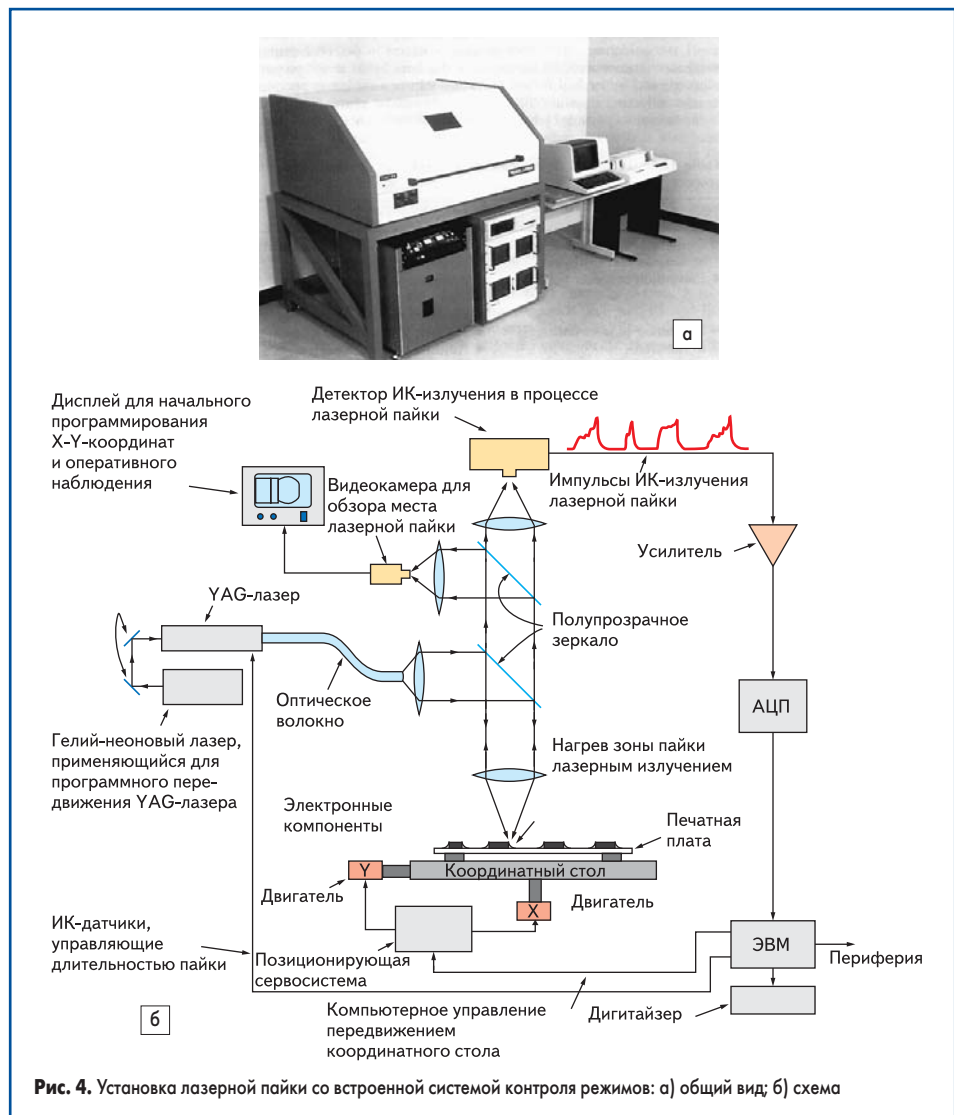

Рис. 4. Установка лазерной пайки со встроенной системой контроля режимов: а) общий вид; б) схема



Рис. 5. Лазерная установка для исследований процесса пайки

квантовый генератор на алюмоиттриевом гранате с неодимом с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульсов 0,1 с и частотой следования 1–50 Гц. Для накачки активного элемента применена ИК-лампа мощностью 2 кВт. Энергия импульса лазерного излучения составляла 0,75 Дж при напряжении на лампе ОКГ 900 В и частоте импульсов 3 Гц, а средняя мощность излучения в импульсе — 3,75 кВт [10].

Оптическая система формировала пространственные характеристики пучка как инструмента обработки. Фокусное расстояние оптической системы составляло 150 мм. Для наводки оптического излучения и юстировки оптической системы использовался маломощный газовый лазер, излучение от которого вводилось в оптическую систему формирования лазерного излучения с помощью полупрозрачного зеркала. Для позиционирования изделий применен координатный стол с двумя степенями свободы и точностью позиционирования $\pm 0,1$ мм. Управление работой лазера и координатного стола организовано от ПЭВМ с помощью управляющей программы. В установке применена двухконтурная система охлаждения лазера с теплообменным устройством типа «вода–вода» с термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру при помощи жидкостного насоса УО-1.

Плотность лазерного излучения определялась косвенным путем по температуре нагрева поверхности с помощью радиометра и двух измерителей температуры [6]. Радиометр представлял собой печатную плату с металлизированным отверстием, в котором закреплена термопара типа ХК с помощью теплопроводящего клея в глухом отверстии с обратной стороны платы. Прибор MASTECH MV64 регистрировал температуру с точностью ± 1 °C в диапазоне от 0 до 1000 °C. Температура нагрева контактных площадок и безвыводных элементов (резисторов, конденсаторов) измерялась термопарой, закрепленной в сквозном отверстии легкоплавким припоем. Для определения влияния лазерного излучения на термочувствительные элементы в зоне воздейст-

вия лазерного луча и на определенном расстоянии L от нее размещались две термопары типа ХК, подключенные к разным измерителям температуры.

При средней мощности излучения в импульсе 3,75 кВт и энергии излучения до 2 Дж температура 300 °C в зоне взаимодействия при диаметре пятна излучения 3 мм и частоте импульсов 10 Гц достигалась за 1–2 с.

Исследовались температурные зависимости паяных соединений от частоты следования импульсов оптического излучения (f , Гц), смещения зоны нагрева от осевой линии излучателя (X , мм), диаметра пятна лазерного излучения на исследуемом объекте (D , мм), степени черноты поверхности (ξ). Зависимость температуры нагрева от времени облучения и частоты импульсов при различных рабочих частотах ОКГ и напряжении питания ИК лампы накачки 700 В представлена на рис. 6а, от диаметра луча — на рис. 6б. Скорость нарастания температуры на начальном участке пропорциональна частоте импульсов излучения, однако с увеличением времени облучения до 20 с она уменьшается до 5 °C/с. Температура нагрева нелинейно растет с уменьшением диаметра луча в зоне пайки и с увеличением частоты импульсов, что может привести к перегреву, испарению припоя и повреждению изделий.

Исследовался процесс лазерной пайки ИМС в корпусах с планарными выводами типов

401.14, 402.16, а также матричных БИС (МаБИС) серии КА1843, имеющих 108 выводов с шагом 0,625 мм на контактные площадки двусторонних печатных плат. Мощность лазерного излучения регулировалась в пределах 20–120 Вт путем изменения тока поджига. Нестабильность мощности излучения была не более 3%, нестабильность размеров пятна на выводах ИМС — не более 3,5%. Координатный стол с помощью шаговых двигателей обеспечивал позиционирование выводов ИМС относительно луча не хуже $\pm 0,1$ мм с нестабильностью скорости перемещения не более 2,5%. Скорость перемещения платы программировалась и автоматически менялась в соответствии с программой. Фиксация коваровых выводов относительно контактных площадок обеспечивалась магнитной системой, расположенной под печатной платой и создающей магнитное поле с напряженностью $(16–20) \times 10^4$ А/м, которое обеспечивало фиксацию ИМС и МаБИС [12]. Для наблюдения использована малогабаритная телевизионная система на базе телевизора «Электроника-100», формирующая увеличенное в 15 раз изображение рабочей зоны. Это исключило необходимость прямого наблюдения через окуляр оптической системы СОК-1, а также позволило повысить удобство работы и безопасность оператора.

Подготовка выводов включала их формовку, опрессовку припоем ПОС 61 диаметром 0,4 мм; для других партий на места будущих паек через трафарет наносилась паяльная паста ПЛ-1 с содержанием припоя по массе 75% и максимальным диаметром частиц до 150 мкм. В процессе исследований диаметр луча изменялся в пределах 1–2,5 мм, скорость перемещения платы — 4–20 мм/с. Качество паяных соединений оценивали с помощью микроскопа МБС-2 при увеличении 32[×]. Результаты исследований качества паяных соединений показали, что хорошее качество соединений достигается в случае напессованного припоя при мощности 26 Вт и скорости 4 мм/с, а для пасты — при 24 Вт и 7 мм/с. Применение паяльной пасты снизило требуемую мощность энергии излучения. При пайке также важно обеспечить надежное контактирование всех выводов ИМС с контактными площадками платы, в противном случае нанесенный припой оплавляется вокруг вывода, а контакт с платой отсутствует.

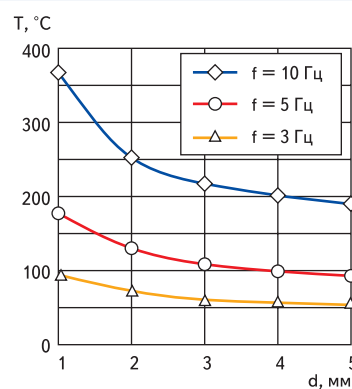
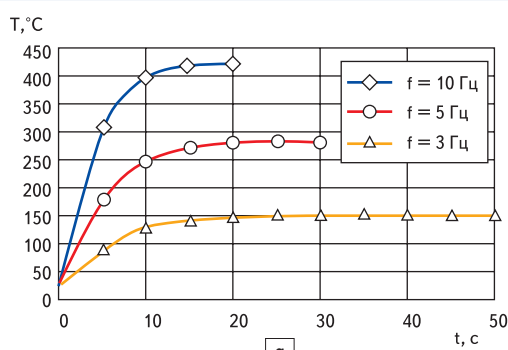


Рис. 6. Зависимость температуры зоны пайки: а) от времени облучения; б) от диаметра луча и частоты импульсов

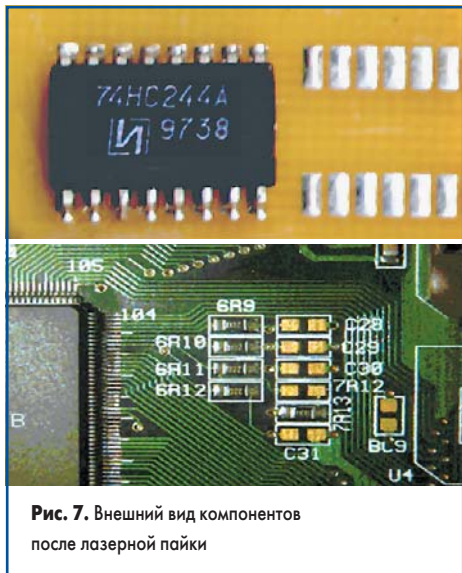


Рис. 7. Внешний вид компонентов после лазерной пайки

Тепловой режим, устанавливаемый в зоне пайки, зависит как от мощности лазерного излучения, скорости перемещения луча и его диаметра, так и от количества вносимого в зону пайки припоя. При толщине наносимой паяльной пасты свыше 200 мкм в результате ее разбрызгивания на поверхности платы образуются шарики припоя и перемычки между выводами ИМС. Установлена определенная зависимость массы расплавленной пасты припоя от времени и мощности лазерного излучения. Так, для скорости перемещения 4 мм/с и мощности лазера до 30 Вт масса расплава не превышает 2–3 мг в соединении. Увеличение мощности излучения с целью более полного расплавления всей нанесенной пасты приведет к повреждению диэлектрика платы. Отмечена также нестабильность характе-

ристик лазерного излучения в течение длительного срока работы, которая возрастает с увеличением мощности.

Оптимальными режимами процесса лазерной пайки являются: мощность 24 Вт, диаметр пучка 2,5 мм, скорость перемещения платы 7 мм/с, при которых обеспечивается высокое качество соединений; лазерное излучение не оказывает отрицательного влияния на электроизоляционные свойства диэлектрика печатных плат. Производительность пайки ИМС с шагом выводов 0,625 составляла до 300 соед./мин.

Таким образом, для сборки электронных микромодулей с плотным поверхностным монтажом все большее применение получают лазерные технологические установки, способные эффективно выполнять монтаж и демонтаж различных компонентов (рис. 7), в том числе в корпусах типа BGA, CSP, PGA, SOIC, QFP, PLCC [13].

Преимущества лазерного излучения, по сравнению с инфракрасным, заключаются в высокой локализации мощности в зоне нагрева, безынерционности воздействия, что позволяет вести нагрев импульсами малой длительности и точно дозировать энергию излучения, и малой зоне термического влияния (0,25–2,0 мм).

Оптимизация параметров импульсного лазерного излучения позволяет вести прецизионную скоростную пайку планарных выводов ИМС и многовыводных МАБИС к контактным площадкам печатных плат, безвыводных «чиповых» элементов на платы микромодулей с высоким качеством, автоматизировать процесс, что наиболее полно отвечает требованиям современной технологии поверхностного монтажа.

Литература

1. Медведев А. М. Современные компоновки микросхем // Компоненты и технологии. 2007. № 2.
2. Whitaker J. C. Microelectronics. N.Y.: CRC, 2006.
3. Manko H. H. Solders and Soldering: Materials, Design, Production and Analysis for Reliable Bonding. N.Y., 2000.
4. Wassink K. R. J. Soldering in Electronics. Ayr, Scotland, Electrochem. Publ., 2002.
5. Кундас С. П., Достанко А. П., Ануфриев Л. П. и др. Технология поверхностного монтажа. Минск: Армита, 2000.
6. Джуд М., Бриндли К. Пайка при сборке электронных модулей / Пер. с англ. М.: Издательский дом «Технологии», 2006.
7. Голдберг Г. Пайка диодным лазером: следующее поколение бесконтактной пайки // Электронные компоненты. 2004. № 11.
8. Лазерная техника и технология / Под ред. А. Г. Григорьевой. М.: Высш. школа, 1988.
9. Ланин В. Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов. 2002. № 2.
10. Ланин В. Л. Лазерная пайка и микросварка изделий электроники // Электронная обработка материалов. 2005. № 3.
11. Kordas K., Pap A. E., Toth G. and ets. Laser Soldering of Flip-Chips // Optics and Lasers in Engineering. 2006. № 2.
12. Абакумов А. В., Ланин В. Л. Лазерная пайка интегральных микросхем на печатные платы // Радиопромышленность. 1991. № 5.
13. Lanin V. L., Bondarik V. M, Zadrutskiy I. A. Laser Soldering Surface Mount Components // Elektronika ir Elektrotechnika. 1999. № 4 (22).