

# Лазерная управляемая пайка для монтажа электронных модулей

При решении проблем повышения плотности монтажных соединений в современных электронных модулях следует обращать внимание на необходимость применения лазерной управляемой пайки электронных компонентов. Лазерное излучение, как самый мощный источник тепловой энергии, обладает уникальными особенностями высокой локальности воздействия и возможностями программного управления нагревом. Для электронных модулей с плотным поверхностным монтажом перспективно использование лазерных управляемых технологических систем со встроенной системой контроля качества соединений.

Владимир Ланин,  
профессор

vlanin@bsuir.by

## Физико-технологические основы лазерной пайки

Источником лазерного излучения являются оптические квантовые генераторы (ОКГ), которые по агрегатному состоянию рабочего вещества подразделяются на газовые, жидкостные и на твердом теле. В зависимости от способов возбуждения рабочего вещества ОКГ работают с оптической или химической накачкой в непрерывном или импульсном режимах, а также в режиме синхронизации модуляции.

ОКГ на неодимовом стекле и рубине имеют высокую удельную мощность до  $10\,000\text{ МВт/м}^2$ , однако их не часто применяют из-за низкой эффективности и ограниченной частоты следования импульсов. ОКГ на алюмоиттриевом гранате (АИГ) с длиной волны  $1,06\text{ мкм}$  обеспечивают также высокое значение удельной мощности до  $1000\text{ МВт/м}^2$ , в сочетании с высокой частотой следования (до  $20\text{ Гц}$ ) вследствие низкого порога накачки и хорошей теплопроводности рабочего вещества. Газовый лазер на  $\text{CO}_2$  работает с еще большей эффективностью, как в непрерывном, так и в импульсном режимах, однако длина волны  $10,6\text{ мкм}$  хорошо отражается металлами [1].

Алюмоиттриевый гранат — монокристаллический материал, выращиваемый с ориентацией по кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ , представляет соединение  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  и отличается очень высокой теплопрово-

дностью ( $0,14\text{ Вт/см}^2$ ), малым коэффициентом теплового расширения ( $7,8 \times 10^{-6}\text{ К}$ ), высокой механической прочностью ( $175\text{ МПа}$ ), а также малым порогом возбуждения. Для генерации излучения в состав АИГ введены активизирующие ионы трехвалентного неодима — элемента из группы лантанидов — в количестве  $0,5\text{--}1\%$ .

Мощность лазерного излучения  $125\text{ Вт}$  достигается благодаря использованию двух активных элементов в излучателе. Коэффициент пропускания выходного зеркала (до  $20\%$ ) оптимален и обеспечивает максимальную мощность лазерного излучения при номинальном токе через лампу накачки. Активный элемент и лампа накачки размещаются в непосредственной близости друг от друга и помещаются в отражатель, повышающий долю энергии светового излучения лампы, которая подается внутрь активного элемента (рис. 1).

Основным элементом излучателя является квантрон, в состав которого входят активный элемент, отражатель, корпус, штуцеры охлаждения, фланцы и втулки крепления. Отражатель представляет собой моноблок из легированного европием кварцевого стекла в форме эллиптического цилиндра с полированной боковой поверхностью, покрытой слоем серебра. На внешний слой серебра нанесено защитное покрытие из меди и никеля.

Кварцевое стекло отражателя с легирующими добавками не пропускает вредное для активного элемента ультрафиолетовое излучение лампы накачки, что позволяет использовать во внутреннем контуре системы охлаждения лазера дистиллированную воду без каких-либо фильтрующих добавок, при этом значительно повышаются эксплуатационные свойства лазера. Благодаря эллиптической форме отражателя распределение накачки по сечению активного элемента имеет максимум в центральной части, что увеличивает эффективность генерации излучения.

Активный элемент ГП  $6,3 \times 100$  выполнен в виде круглого стержня диаметром  $6,3\text{ мм}$  и длиной  $100\text{ мм}$ , он изготовлен из монокристалла алюмоиттриевого гра-

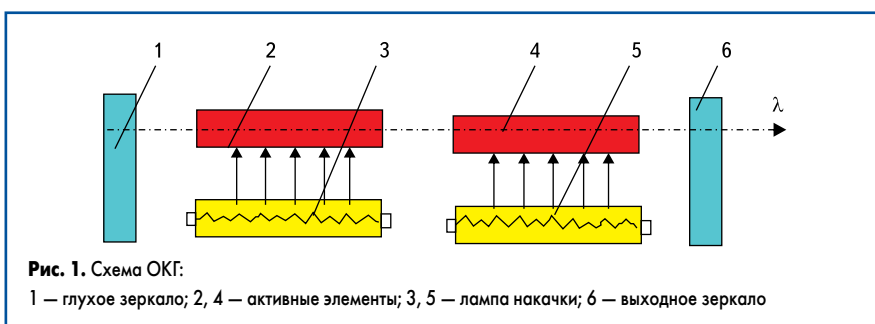


Рис. 1. Схема ОКГ:

1 — глухое зеркало; 2, 4 — активные элементы; 3, 5 — лампа накачки; 6 — выходное зеркало

ната, активированного трехвалентными ионами неодима. Резонатор излучателя образован двумя зеркалами с многослойными диэлектрическими отражающими покрытиями. Основу зеркал составляют подложки, имеющие вид шайб диаметром 40 мм, толщиной 4 мм, изготовленные из стекла КУ-1. Выходное зеркало имеет коэффициент пропускания  $20 \pm 2\%$ , а глухое — не менее 0,2%. Изменение положения поверхности зеркала относительно оси лазерного излучения осуществляют путем поворота юстировочных винтов.

Система охлаждения лазера — жидкостная 2-контурная с теплообменным устройством типа «вода-вода» с термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру при помощи жидкостного насоса. В качестве охлаждающей жидкости в лазере используется вода, которая наряду с хорошими теплофизическими характеристиками, доступностью и безопасностью имеет высокие стабильные коэффициенты пропускания излучения, оптической накачки и способность отфильтровывать инфракрасную часть спектра. Во внутреннем контуре используют только дистиллированную воду.

Средняя мощность излучения в импульсе определяется как:

$$P = E/\tau_{ip} \quad (1)$$

где  $E$  — энергия излучения,  $\tau_u$  — длительность импульса.

При непрерывном излучении лазера длительность воздействия определяется как:

$$t = d/V, \quad (2)$$

где  $d$  — диаметр луча;  $V$  — скорость сканирования платы относительно луча.

Тогда средняя мощность излучения равна:

$$P = (E \times V)/d, \quad (3)$$

а средняя плотность мощности излучения для луча круглой формы:

$$q = (1,27EV)/d^3. \quad (4)$$

Для оценки мощности лазерного излучения используют измеритель средней мощности и энергии импульсов ОКГ ИМО-2 с погрешностью 10%.

Лазерный луч вследствие уникальных технологических особенностей — узкая направленность, локальность теплового воздействия, высокая регулируемость — является универсальным инструментом бесконтактной пайки безвыводных элементов на платы микросборок. Энергия поглощенного излучения  $E_n$  равна:

$$E_n = qSt, \quad (5)$$

где  $q$  — плотность мощности излучения,  $S$  — площадь зоны воздействия.

Воздействие лазерным излучением в виде сфокусированного луча создает высокую концентрацию энергии ( $10^8$ – $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) на поверхности материалов, что обеспечивает ло-

кальный нагрев с высокой скоростью и значительной зоной термического влияния. Проблемы формирования микросоединений при лазерном воздействии связаны с определением необходимой плотности мощности излучения, выбором оптимальных режимов и обеспечением заданного качества соединений. Энергетический баланс лазерного воздействия описывается уравнениями [2]:

$$\begin{aligned} E_n &= E_{nozл} + E_{omp}, \\ E_{nozл} &= E_{ж} + E_m, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $E_n$  — энергия лазерного луча в зоне обработки;  $E_{nozл}$  — энергия, поглощенная в процессе фотонно-электронных соударений;  $E_{omp}$  — энергия, отраженная от поверхности;  $E_{ж}$  — полное теплосодержание расплавленного металла;  $E_m$  — энергия, отводимая теплопроводностью вглубь основного металла.

Интенсивность проникающего лазерного излучения убывает по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 k e^{-\gamma x}, \quad (7)$$

где  $x$  — глубина проникновения,  $I_0$  — интенсивность лазерного излучения на поверхности,  $k$  — коэффициент поглощения,  $\gamma$  — 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 излучения для металлов — порядка  $10^7$  м<sup>-1</sup>, 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 0,35–0,4 для металлов при температуре 500 °С и длине волны излучения 1,06 мкм, что дает возможность нагревать их поверхность с возрастающей скоростью.

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

$$Q = \int_0^{\tau_u} \eta P(t) dt, \quad (8)$$

где  $\eta$  — КПД лазерного нагрева.

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

$$q = \frac{4W}{\pi d^2 \tau_u}, \quad (9)$$

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

$$W = \frac{0,885 T_{пл} \times \lambda \times \pi \times r^2}{\sqrt{a \times \tau_u}}, \quad (10)$$

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

Поток лазерной энергии, падая на плоскую поверхность, нагревает ее до температуры  $T_H$  [3]:

$$T_H = T_o + \frac{2q(1-R)}{\lambda} \left( \frac{\alpha t}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (11)$$

где  $R$  — коэффициент отражения поверхности,  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности.

Уравнение справедливо до начала плавления, поскольку при плавлении поглощаемая энергия расходуется на скрытую температуру плавления. Ввиду нелинейности проникновения излучения задача вычисления границы продвижения расплава достаточно сложна. Приблизительно время достижения температуры плавления на поверхности под действием лазерного излучения можно оценить:

$$T_{пл} \approx \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\rho c T_H}{Aq} \right)^2, \quad (12)$$

где  $\rho$  — плотность металла;  $c$  — удельная теплоемкость;  $A$  — коэффициент поглощения излучения ( $A = 1-R$ ).

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

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi \times \lambda \times \delta \times t} \times e^{-\frac{r^2}{4at} - bt}, \quad (13)$$

где  $r$  — расстояние от источника теплоты до точки с координатами  $(x, y)$ ;  $\delta$  — толщина пластины;  $b = 2\alpha/c\gamma\delta$  — коэффициент температуропередачи, учитывающий поверхностную теплоотдачу в окружающую среду.

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

$$dT = \frac{q \times dt}{4\pi \times \lambda \times \delta \times t} \times e^{-\frac{r^2}{4at}}. \quad (14)$$

Используя выражение (14), можно рассчитать температуру в произвольной точке поверхности при воздействии на нее лазерного излучения. Для периодического лазерного воздействия процесс нагрева описывается в виде серии непрерывно действующих мгновенных источников теплоты.

### Особенности процессов лазерной пайки

При лазерной пайке, в отличие от групповых методов, проводится монтаж отдельных выводов или рядов выводов электронных компонентов. Лазерная пайка имеет следующие преимущества [4]:

- Кратковременность теплового воздействия (20–30 мс), что снижает степень окисления припоя и толщину слоя интерметаллидов, обеспечивает мелкозернистую структуру зоны соединения и более высокие механические свойства без применения подогрева и инертной атмосферы.
- В течение короткого времени пайки корпус компонента и печатная плата практически не нагреваются, что позволяет вести монтаж термочувствительных элементов.
- Локальность приложения тепловых нагрузок, что снижает возникающие при пайке температурные механические напряжения.
- Возможность формирования соединений с высокой плотностью и малым шагом выводов без образования перемычек и шариков припоя.
- Автоматизация всего технологического цикла с одновременным проведением лазерного контроля паяных соединений за счет применения программно-управляемого 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 контактным площадкам требуется лазер мощностью не менее 10 Вт, в то время как для пайки компонентов к шинам питания и «земли», имеющим большой теплоотвод, могут потребоваться газовые лазеры мощностью до 150 Вт [5].

Диодные лазеры в настоящее время широко применяются для локальной пайки в производстве микроэлектроники, в частности, благодаря их повышенной надежности, лучшему КПД и экономической эффективности. Спектр дуговой лампы Хеол распределен в диапазоне длин волн 350–1100 нм, тогда как лазерный диод излучает монохроматический свет с длинами волн 810 или 940 нм [6]. Поэтому лазерный диод имеет более высокую плотность 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 яв-

ляется 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 применяется в тех случаях, когда термочувствительные 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.

Современные достижения в области лазерной пайки позволили приблизить производительность монтажа до 10 соединений в секунду и выше, что соответствует групповым методам.

Для лазерной обработки используют твердотельные ОКГ, выполненные на ИАГ (иттриево-алюминиевом гранате) с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм и газовые лазеры на  $\text{CO}_2$  с длиной волны 10,6 мкм различной мощности. Уровень мощности — 5–10 Вт, время — 0,2–0,5 с, фокусировка в зону диаметром 0,3–1,5 мм. Предпочтительны одиночные импульсы или последовательности импульсов с частотой до 10 Гц.

Применение газовых лазеров на  $\text{CO}_2$  с длиной волны 10,6 мкм для процессов пайки электронных компонентов на платы неэффективно вследствие высокого коэффициента отражения блестящего слоя припоя (до 74%), в то время как материал платы и полиимидная пленка изоляции отражают всего 2% [7]. Кроме того, волоконно-оптические линии не прозрачны для этой длины волны, что затрудняет подачу излучения в зону пайки многовыводных компонентов.

Припой на выводы элементов и контактные площадки может наноситься дозированно на прессовкой проволочного припоя диаметром 0,4 мм либо трафаретной печатью паяльной пасты. Оптимальные параметры режима пайки лазером ЛТН-102А: скорость перемещения координатного стола — 4–7 мм/с, мощность излучения — 26–30 Вт, диаметр луча в фокальной плоскости — 2,5–4 мм. В таком режиме полное время пайки одного вывода — не более 1 с, припой в соединении имеет мелкодисперсную структуру, интерметаллиды не успевают образовываться. Мощность лазерного излучения составляет 16–125 Вт, нестабильность мощно-

сти луча — не более 3%, нестабильность размеров пятна — не более 3,5%. Координатные столы автоматов лазерной пайки обеспечивают погрешность позиционирования не хуже  $\pm 0,1$  мм. С увеличением диаметра вывода компонента от 0,5 до 1,3 мм время пайки растет от 0,7 до 1,3 мин при энергии излучения 50 Дж.

Установлено, что параметры оптимального режима процесса лазерной пайки ИМС с планарными выводами таковы: мощность излучения — 24 Вт, диаметр пятна нагрева — 3,0 мм, скорость перемещения платы — 7 мм/с. При таком режиме обеспечивается высокое качество паяных соединений, воздействие лазерного излучения не оказывает отрицательного влияния на электроизоляционные свойства диэлектрика печатных плат.

Лазерное излучение позволяет проводить прецизионную пайку «чиповых» конденсаторов, монтируемых поверхностью на платы. Размеры зоны пайки — 1,3×0,5 мм, время пайки — не более 0,6 с. Кратковременный нагрев и точное позиционирование лазерного луча ограничивает зону термического влияния при пайке безвыводных элементов на платы. Для пайки используется лазер на основе Nd с излучением в ближайшей ИК-области и с длиной волны 1,06 мкм (его энергия адсорбируется сплавами Pd-Sn, Sn-Ni в количестве 79% энергии излучения).

Оптимальный угол падения лазерного луча составляет 45–50°, что обеспечивает равномерный нагрев компонента и контактной площадки, а также расплавление припойной пасты. Паяные соединения, сформированные за весьма короткое время (0,2–0,6 с), почти не содержат хрупкого интерметаллида  $\text{Cu}_2\text{Sn}$  и поэтому выдерживают большие тепловые циклические нагрузки и имеют более высокую надежность [8].

Для низкотемпературной пайки используют установки многоточечной пайки с голографическим делением луча (рис. 2). В этом случае луч лазера 1, генерируемый ОКГ, с помощью телецентрической оптики 2 сначала расширяется до значительного диаметра, а затем направляется как плоскопараллельный на голограмму 3. Для каждого процесса пайки необходима специальная голограмма, содержащая информацию о том, на какое количество элементарных лучей должен быть разложен пучок и в каких точках сфокусирован каждый из них. Отражаясь от плоского зеркала 4, лучи лазера направляются на участки пайки с высокой степенью локальности.

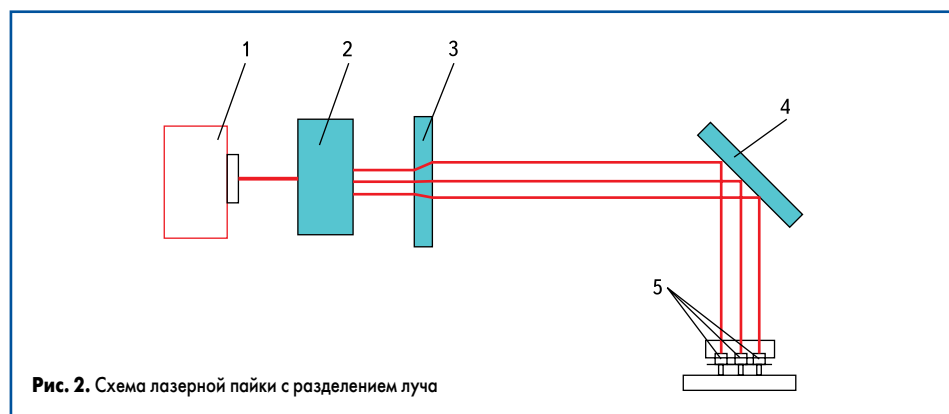


Рис. 2. Схема лазерной пайки с разделением луча



Рис. 3. Области допустимых режимов лазерной пайки



Рис. 4. Лазерная пайка: а) разделным пятном нагрева; б) расщеплением лазерного луча

Таблица 1. Технологические особенности лазерной пайки

Эскиз соединения	Особенности	Режимы	
	Пайка проводника 3 к поверхности 4, луч концентрируют на шарике припоя 2, нанесен флюс 1	Непрерывный $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ $P = 50-60 \text{ Вт}$ $\tau = 1-5 \text{ с}$	
	Выводы 2 элемента 1 закрепляют на контактных площадках 3 подложки 4. Припой в виде пасты. Луч — на вывод, вывод прижимают к подложке.	Непрерывный $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ $P - \text{до } 60 \text{ Вт}$ $\tau - \text{до } 5 \text{ с}$	
	Чип 1 закрепляют на контактных площадках 3. Луч направляют на пасту 2 под углом к подложке 4 или разделяют на 2 потока и направляют на торцы элемента	Импульсный $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ $E = 2-4 \text{ Дж}$ $f = 10 \text{ Гц}$ $\tau = 10 \text{ мс}$	Непрерывный $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ $\tau - \text{до } 5 \text{ с}$ $P = \text{до } 60 \text{ Вт}$
	Ленточные выводы 1 покрыты припоем 2, на зону 3 формируют излучение в виде контура прямоугольной формы	Импульсный $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ $E = 25-90 \text{ Дж}$ $\tau = 4 \text{ мс}$	
	Крышку 1 сжимают с корпусом 3 с усилием до 3 Н. Луч наводят на крышку в зоне нанесения припоя 2	Импульсный $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ $E - \text{до } 30 \text{ Дж}$ $\tau = 7 \text{ мс}, d = 5 \text{ мм}$	

Для пайки легкоплавкими припоями изделий электронной техники достаточна мощность 5 Вт, выделяемая в зоне протекания процесса. Одним импульсом промышленного лазера мощностью 20–50 Вт можно проводить пайку одновременно в нескольких точках. При лазерном нагреве целесообразно применять в качестве припоев покрытия, которые, оплавляясь, образуют соединения.

Для монтажа плоских квадратных корпусов ИМС, имеющих 100 выводов с шагом 0,65 мм и шириной 0,3 мм, на печатные платы фирмой NEC Corp. (Япония) разработана автоматизированная установка на базе ИАГ-лазера мощностью 270 Вт, связанного оптическим кабелем с системой, формирующей две зоны нагрева длиной 0–23 мм и шириной 12 мм на расстояниях 0–40 мм. В состав установки также входят автоматические загрузчики и укладчики изделий, конвейер, контроллеры, видеокамеры на ПЗС. Время пайки при мощности излучения 150 Вт составляло в среднем 3–7 с на корпус QFP [9].

Роботизированный технологический комплекс лазерной пайки, выполненный на базе малогабаритного сверлильно-зенковального станка ОФ-99 с программным управлением и твердотельного лазера непрерывного излучения ЛТН-102А [10], имеет микропроцессорную систему управления, смонтированную непосредственно в пульте управления станка. Схема синхронизации обеспечивает прерывание лазерного луча при его прохождении зоны пайки. Максимальная производительность при условии обеспечения требуемого качества достигнута при скорости перемещения лазерного луча 8,6 мм/с (область 2). При более низких или высоких скоростях процесс пайки становится нестабильным (область 1) (рис. 3).

Тепловой режим, устанавливаемый в зоне пайки, зависит как от мощности лазерного из-

лучения, 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 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 характеристик лазерного излучения в течение длительного срока работы, которая возрастает с увеличением мощности [11].

Параметры оптимального режима процесса лазерной пайки таковы: мощность — 25 Вт, диаметр пучка — 2–2,5 мм, скорость перемещения платы — 5–7 мм/с, при которых обеспечивается высокое качество соединений, и лазерное излучение не оказывает отрицательного влияния на электроизоляционные свойства диэлектрика печатных плат. Производительность пайки ИМС с шагом выводов 0,625 составляет до 330 соединений/мин [12].

Технологические особенности лазерной пайки различных изделий приведены в таблице 1. В отличие от способов групповой пайки, при лазерной пайке, как правило, осуществляется отдельное формирование последовательности соединений. Однако с учетом возможности автоматизации процессов контроля, а также ряда других факторов (более высокое качество пайки, расщепление луча и т. д.) (рис. 4) общее время монтажа при использовании лазерной управляемой пайки может быть сравнимо с групповой пайкой [13].

Максимальная плотность мощности лазерного воздействия ограничена процессами газовой деградации в зоне пайки и при применении стандартных паяльных паст составляет 3–5 Вт/мм<sup>2</sup>.

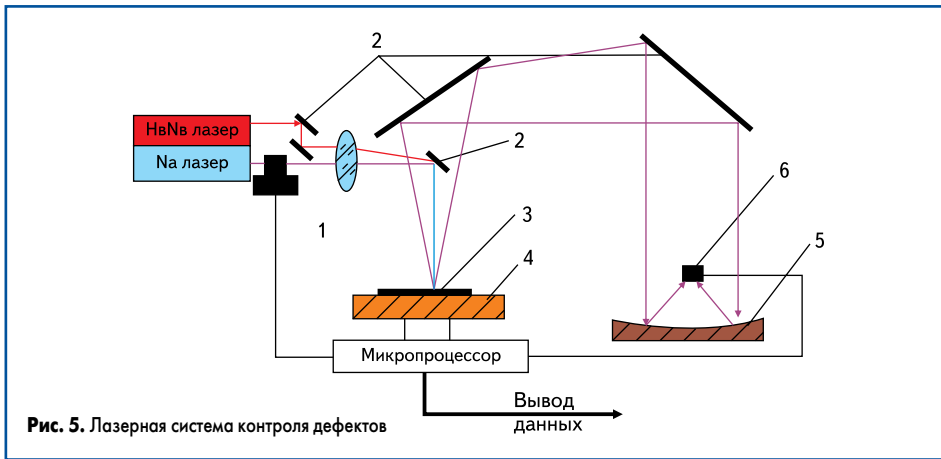
### Лазерная управляемая пайка

Большой интерес представляют также установки лазерной пайки со встроенной системой контроля технологических режимов. Для пайки применяют твердотельный лазер с одновременным сканированием зоны пайки камерой ИК-излучения, которая формирует на экране управляющего компьютера тепловую картину этой зоны. 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.

Лазерная система контроля дефектов значительно повышает качество паяных соединений в электронных модулях с плотным поверхностным монтажом. С помощью гелий-неонового лазера (рис. 5) устанавливают точное местоположение контролируемого элемента 3 в системе X-Y координат передвижного столика 4. Контрольные лучи излучает мощный Nd-лазер, работающий в инфракрасной области с длительностью излучения, которую задает микропроцессор, управляя штормкой 1.

Луч, управляемый зеркалом 2, падает на место пайки на контрольном элементе, причем большая часть света отражается, если поверхность пайки блестящая и однородная. Если структура пайки зернистая, то она начинает





Амплитуда и форма ИК-сигнала анализируется по заданной программе компьютером 8. Компьютер через блок управления 9 задает перемещение координатного стола 10 с изделием по заданным координатам. He-Ne лазер 11 применен для визуализации объекта воздействия. Для контроля качества соединений служит телекамера системы технического зрения 12.

Процесс пайки включает следующие стадии: нанесение через трафарет паяльной пасты и клея, установочные компоненты, автоматизированная пайка выводов, снятие временных характеристик теплового излучения паяных соединений и контроль по ним процесса во времени. При необходимости бракованные соединения допаяются на той же установке. При пайке электронных компонентов, на которые накладываются жесткие температурные условия, ИК-датчик следит за уровнем сигнала (температурой нагреваемого паяного соединения) и при достижении заданного значения отключает лазерный луч.

Оценка качества пайки осуществляется сравнением измеренных характеристик ИК-сигнала с ранее измеренными и заданными характеристиками эталонных паяк (рис. 8). Время отдельного измерения определяется типом компонента и находится в интервале 50–100 мс.

Начальному участку I отвечает нагрев до начала плавления паяльной пасты. При оплавлении пасты на участке II в силу энергозатрат, необходимых для плавления пасты определенной массы, и ее высокой теплопроводности скорость роста температуры замедляется. Дальнейший рост температуры на участке III с высокой скоростью связан с нагревом припоя выше температуры плавления. Дальнейшая динамика температуры определяется в основном тепловыми процессами, связанными с охлаждением паяного соединения. После короткого по времени участка IV, отвечающего интенсивной скорости спада до температуры кристаллизации припоя, следует продолжительный, более медленный спад температуры паяного соединения на участке V. Замедление спада обусловлено тем, что в процессе кристаллизации в припое происходит выделение скрытой теплоты, запасенной ранее при плавлении, а теплоотвод в керамику чипа замедлен в силу

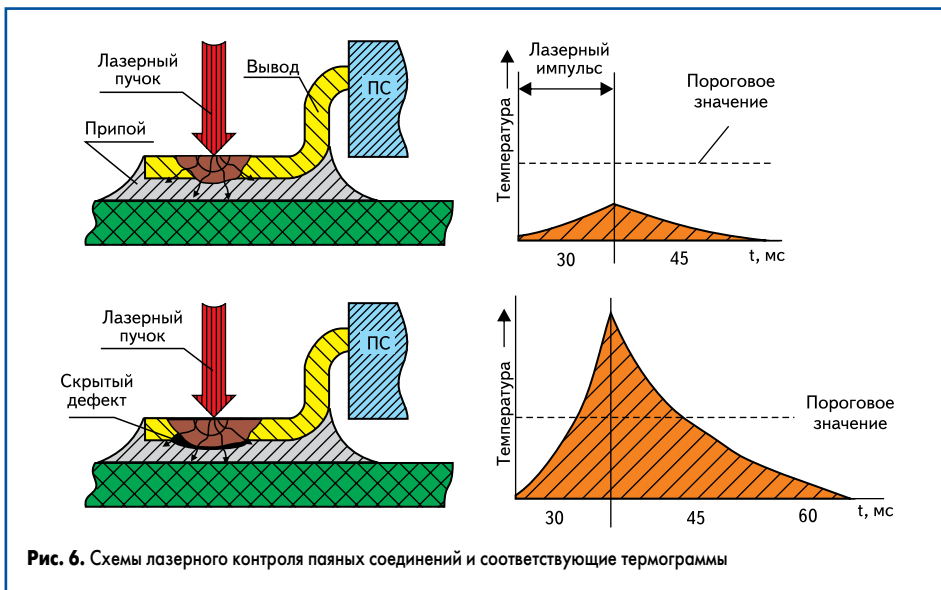


Рис. 6. Схемы лазерного контроля паяных соединений и соответствующие термограммы

поглощать энергию луча, нагревается и посылает инфракрасное вторичное излучение. Собранное в линзах 5 и отраженное зеркалом излучение воспринимается ИК-датчиком 6, сигнал с которого анализируется с помощью микропроцессора и подается на осциллограф в виде термограммы. С помощью лазерного контроля обнаруживаются такие дефектные соединения, как раковины и внутренние включения, поскольку они имеют меньшую массу и нагреваются по этой причине быстрее, чем сплошные паяные соединения (рис. 6) [14].

Наиболее перспективна лазерная управляемая пайка с автоматической системой контроля хода процесса (рис. 7) [15]. ИАГ-лазер 1 с внутрирезонаторным акустооптическим затвором 2 формирует импульс излучения. С помощью поворотного зеркала 3 и объектива 4 энергия излучения передается поверхности изделия 5, которое в ограниченной зоне нагревается до определенной температуры.

Во время процесса нагрева/охлаждения ИК-излучение от анализируемого участка линзой 6 передается на охлаждаемый приемник 7.

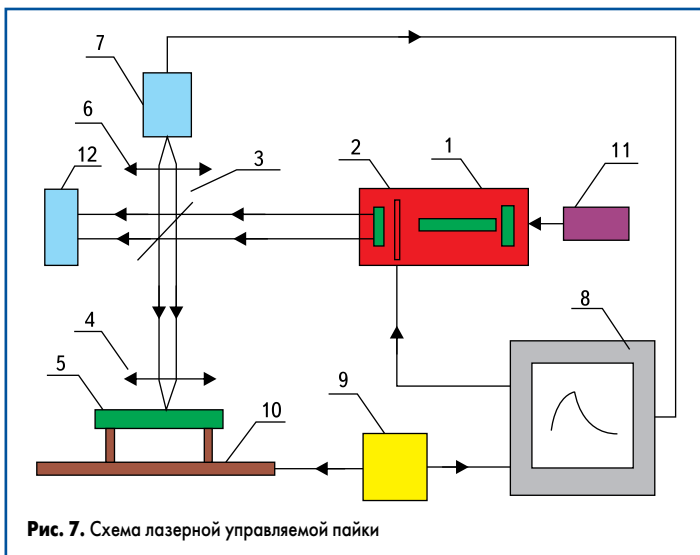


Рис. 7. Схема лазерной управляемой пайки

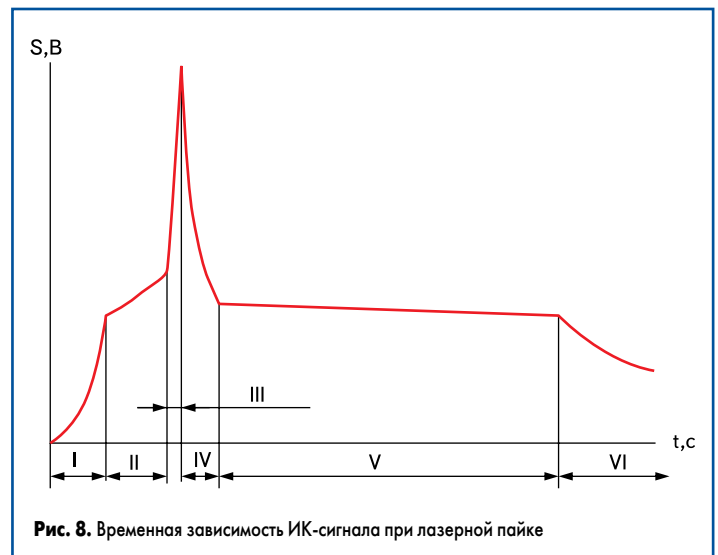
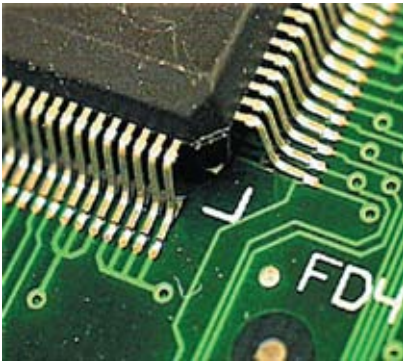


Рис. 8. Временная зависимость ИК-сигнала при лазерной пайке

**Таблица 2.** Параметры лазерной пайки чипов разных размеров

Размеры чип-компонента, мм	4×2,5×1	6×4×1,5	8,5×6×1
Масса чипа, мг	55	195	275
Размер контактной площадки, мм	1,5×4,5	1,8×6	2,3×8
Масса паяного соединения, мг	15	23	38
Высота галтели соединения, мм	0,4–0,6	0,4–0,6	0,4–0,6
Размер пятна воздействия, мм	3×2	4,5×2	4,5×2
Мощность излучения, Вт	20	30	30
Длительность лазерной пайки, мс	120	250	310

**Рис. 9.** Внешний вид соединений, выполненных лазерной пайкой

малой теплопроводности. После кристаллизации в начале участка VI, завершающем термический цикл пайки, скорость охлаждения паяного соединения возрастает.

Дозирование паяльной пасты оказывает влияние на длительность лазерного нагрева, необходимого для пайки. Качественное выполнение лазерной пайки, в условии разброса дозирования массы припоя, возникающего в реальном производстве, требует учета данного фактора. Одним из путей решения данной проблемы является использование автоматического отключения лазерного воздействия через обратные связи во время пайки.

Определена оптимальная длительность лазерного воздействия для чип-конденсаторов, существенно отличающихся по массе и габаритам. При этом руководствовались рекомендациями фирмы Philips, регламентирующими размеры контактных площадок и высоту галтели паяного соединения при пайке чипов (резисторов и конденсаторов) в зависимости от их габаритов (табл. 2).

Для сборки электронных микромодулей с плотным поверхностным монтажом все большее применение получают управляемые лазерные технологические установки, способные эффективно выполнять монтаж и демонтаж различных компонентов (рис. 9), в том числе в корпусах типа BGA, CSP, PGA, SOIC, QFP, PLCC [16].

### Заключение

Преимущества лазерного излучения, по сравнению с инфракрасным, заключаются в высокой локализации мощности в зоне нагрева и безынерционности воздействия, что позволяет вести нагрев импульсами малой длительности и точно дозировать энергию

излучения при малой зоне термического влияния (0,25–2 мм).

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

Для электронных модулей с плотным поверхностным монтажом перспективно использование лазерных управляемых технологических систем со встроенной системой контроля качества соединений.

### Литература

1. Веденов А. А., Глазун Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергия, 1985.
2. Лазерная техника и технология / Под ред. А. Г. Григорьевича. М.: Высшая школа, 1988.
3. Самаркин Ю. Д., Сурменко Л. А. Лазерная пайка в производстве изделий электронной техники. М.: ЦНИИ Электроника, 1986.
4. Кундас С. П., Достанко А. П., Ануфриев Л. П. и др. Технология поверхностного монтажа. Минск: Армита, 2000.
5. Джюд М., Бриндли К. Пайка при сборке электронных модулей. Пер. с англ. М.: ИД «Технологии», 2006.
6. Голдберг Г. Пайка диодным лазером: следующее поколение бесконтактной пайки // Электронные компоненты. 2004. № 11.
7. Аллас А. А. Лазерная пайка в производстве радиоэлектронной аппаратуры. СПб.: ИТМО, 2007.
8. Lish E. F., Marietta M. Laser Tackle tough Soldering Problems // Electron Packages and Prod. 1984. V. 24. № 6.
9. Okino K., Ishikawa K., Miura H. YAG Laser Soldering System for Fine Pitch Quad Flat Package // IEEE Intern. Electronic Manufacture Technology Symposium. San Francisco. 15–17 Sept. 1986.
10. Шамарин Ю. Е., Корнеев К. К., Наследник А. Д. Роботизированный технологический комплекс лазерной пайки интегральных схем // Технология и организация производства. 1987. № 3.
11. Ланин В. Л. Лазерная пайка и микросварка изделий электроники // Электронная обработка материалов. 2005. № 3.
12. Kordas K., Pap A. E., Toth G. and ets. Laser Soldering of Flip-Chips // Optics and Lasers in Engineering. 2006. № 2.
13. Lanin V. L., Bondarik V. M., Zadrutskiy I. A. Laser Soldering Surface Mount Components // Electronics and Electrical Engineering. 1999. № 4.
14. Vanzetti R. Intelligent Laser Soldering Inspection and Process Control — [www.ntrs.nasa.gov/archive](http://www.ntrs.nasa.gov/archive).
15. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии / Под общей ред. А. П. Достанко и Н. К. Толочко. Минск: Бестпринт, 2005.
16. Ланин В. Л. Лазерная пайка при сборке электронных модулей // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 6.