

Лазерная пайка SMD-компонентов при высокой плотности монтажа

В производстве электронной аппаратуры применение технологии монтажа поверхностно-монтажных компонентов на плату приводит к уменьшению габаритных размеров и массы изделий, потребляемой энергии. Одной из наиболее перспективных технологий монтажа электронных модулей с высокой плотностью компонентов является лазерная пайка. Эта технология позволяет избежать многих проблем, связанных с температурными процессами, затрагивающими электронные компоненты и платы.

**Владимир Ланин
Артем Первенецкий
Александр Лаппо**

Лазерные технологии критически важны для многих областей техники, к которым относятся электронная промышленность, телекоммуникации, авиакосмическая сфера, металлургия и медицина. Большое разнообразие интегральных микросхем (ИС) позволяет разработчикам электронной аппаратуры значительно сократить время на ее проектирование, снизить массогабаритные характеристики и повысить надежность. Применение ИС под поверхностный монтаж увеличивает плотность упаковки элементов в модулях за счет двухстороннего их размещения на плате и малого шага выводов.

Наиболее перспективным методом монтажа таких ИС считается лазерная пайка в сочетании с применением паяльных паст, дозирование которых возможно в автоматическом режиме пневматическим дозатором. К особенностям данного процесса относятся локальность теплового воздействия, высокая стабильность температурно-временных режимов, гибкое регулирование тепловой энергии, большая производительность, возможность автоматизации, высокое качество и надежность паяных соединений [1].

Короткий лазерный импульс позволяет получить качественное межсоединение элементов, создавая низкое термическое напряжение. Это достигается подачей точного количества тепловой энергии, нужного для формирования межсоединения, в одном коротком лазерном импульсе. Поскольку производимое лазерным излучением тепло локализовано, температура может достичь селективности в нужных областях межсоединений. В результате нет необходимости нагревать подложку до температуры оплавления припоя и создания межсоединений размером в несколько десятков микрон [2].

Лазерное излучение может быть сфокусировано в пятно диаметром около 0,1 мм, что в сочетании с высокой плотностью мощности излучения обеспечивает возможность пайки электронных компонентов, не допуская их перегрева и деформации пе-

Введение

чатных плат. Именно поэтому лазерная пайка стала единственным способом, обеспечивающим возможность пайки компонентов, монтируемых на платах, наклеенных на металлические теплоотводы для рассеивания тепла, выделяемого микросхемами при их функционировании.

Лазерная пайка — бесконтактный процесс, исключая внесение загрязнений в паяное соединение, что происходит при использовании контактных способов пайки. Гибкое регулирование и точное дозирование подводимой энергии позволяет в широких пределах варьировать температуру и время выполнения данной операции. Указанные особенности предопределили возможность создания лазерного паяльного оборудования, сочетающего автоматизированные пайку и контроль качества паяных соединений [3].

Известно, что полупроводники разрушаются при температуре кристалла выше +130 °С. В большинстве случаев паяные контакты между кристаллом и выводами создаются с использованием припоев при температурах порядка +200...+250 °С, так что при перегреве контакта может произойти разрушение компонента. Использование лазерной технологии пайки позволяет избежать этих проблем. Поскольку энергия лазерного луча воздействует на соединяемые элементы очень короткое время, корпус компонента и печатная плата в процессе пайки нагреваются слабо, значительно снижается степень окисления припоя и толщина слоя образующихся интерметаллидов.

Технологическое оборудование лазерной пайки

Для лазерной пайки, сварки и наплавки различных металлов и их сплавов предназначены малогабаритные лазерные технологические установки. Установку МУЛ-1 (рис. 1а) применяют для лазерной сварки и пайки ювелирных изделий, медицинских и прочих инструментов, а также других изделий и деталей небольшого размера, преимущественно

в ручном и полуавтоматическом режиме, для точечной и шовной сварки со швами небольшой протяженности и различной по сложности формы. Установка выпускается в четырех основных модификациях: «Старт», «Базовая», «Расширенная» и «Расширенная+» (табл. 1). Модификации отличаются друг от друга параметрами энергии, пиковой и средней мощности и имеют одинаковую конфигурацию [4].

Установка для лазерной пайки и наплавки LRS (рис. 1б) предназначена для операций по ручной лазерной сварке или наплавке деталей из металлов и их сплавов. Компактная, моноблочная и простая в использовании, установка подходит как для небольших производств и опытных отделов, так и для работы в условиях серийного выпуска деталей [5].

Технологическая установка LRS в базовой комплектации оснащается функцией изменения формы импульса, при этом девять наиболее часто используемых конфигураций уже заложены в память установки. Это позволяет оператору повысить качество сварного соединения и избежать растрескивания при работе с высокопрочными сплавами и покрытиями.

Для работы с цилиндрическими деталями установка может быть дополнена вращательным приводом. Потребуется лишь указать основные параметры, и устройство произведет сварку в автоматическом режиме. Установка LRS (табл. 2) обладает хорошей эргономикой и удобной системой управления. При настройке и работе оператор может наблюдать за деталью при помощи стереомикроскопа, в котором установлена двухуровневая защита глаз. В сочетании с импульсным режимом работы излучателя система наблюдения помогает контролировать процесс сварки, избегая ослепления от вспышек и повреждения глаз отраженным излучением.

С началом использования твердотельных лазеров стало возможным создание современных систем лазерной пайки, которые отвечают всем требованиям, предъявляемым к установкам подобного назначения. Пайка лазером была разработана благодаря его способности фокусировать мощный луч точно в нужном месте, не затрагивая диэлектрическое основание и расположенные рядом компоненты при использовании бессвинцовых припоев с более высокой температурой плавления. Прогрессивная миниатюризация электронных модулей и применение электронных компонентами с малым шагом выводов привела к развитию большого количества селективных процессов монтажной пайки.



Рис. 1. Установки для лазерной пайки и сварки: а) МУЛ-1; б) LRS



Рис. 2. Автоматические установки селективной пайки: а) Seica; б) Osa

Компания Seica разработала Firefly — систему селективной пайки лазерным лучом с высокими эксплуатационными характеристиками (рис. 2а) и возможностями пайки любых штыверных компонентов, а также компонентов особой формы. Получая данные из САПР

или Gerber-файлов (данные также могут быть введены вручную оператором), специальный алгоритм для каждого места пайки автоматически определяет температурный профиль, размер пятна лазера и объем припоя (выраженный через длину проволоки припоя).

Таблица 1. Технические характеристики установок МУЛ-1

	«Старт»	«Базовая»	«Расширенная»	«Расширенная+»
Длина волны излучения лазера, мкм	1,064	1,064	1,064	1,064
Максимальная энергия импульса, Дж	80	60	80	100
Максимальная импульсная (пиковая) мощность, кВт	10	8	10	12
Средняя мощность излучения (max), Вт	50	100	100	100
Длительность импульса излучения, мс	0,2–20	0,2–20	0,2–20	0,2–30
Частота повторения импульсов, Гц	1–20	1–20	1–20	1–20
Диаметр сфокусированного пучка, мм	0,2–2,5	0,2–2,5	0,2–2,5	0,2–2,5

Таблица 2. Технические характеристики установок LRS

	LRS 100	LRS 150	LRS 200	LRS 300	LRS 400
Средняя мощность, Вт	100	150	200	300	400
Максимальная мощность импульса, кВт	8	10	10	12	16
Максимальная энергия импульса, Дж	60	70	70	80	100
Длительность импульса, мс	0,2–20				
Частота повторения импульса, Гц	До 200				
Длина волны, мкм	1,064 (YAG:Nd ³⁺)				
Режим работы лазера	Импульсно-периодический				

Минимальный диаметр луча — 0,3 мм, размеры рабочей зоны — 406×580 мм [6].

Система лазерной пайки Neosold 400 компании Osai (рис. 26) автоматически выполняет надежное селективное формирование соединений SMD-компонентов. Тепловых перегрузок удается избежать за счет инновационной системы управления замкнутого контура, которая осуществляет контроль при монтаже с помощью индикатора питания и датчиков. Управляющие программы предусмотрены для различных панелей, поскольку программирование ПО может быть выполнено офлайн [7].

Тепловые процессы в металлах при лазерной обработке

В основе лазерной обработки материалов лежит способность лазерного излучения создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, достаточные для нагрева, плавления или испарения практически любого материала. Это связано с термическим эффектом поглощения излучения непрозрачными твердыми телами.

Световой поток лазерного излучения, направленный на поверхность обрабатываемого материала, частично отражается от нее, а частично проходит вглубь тела. Излучение, проникающее в металл, практически полностью поглощается свободными электронами проводимости в приповерхностном слое толщиной 0,1–1 мкм. Это приводит к повышению энергии электронов и, соответственно, к интенсификации их столкновений между собой. Интенсивность передачи энергии свободных электронов кристаллической решетке с течением времени возрастает.

Лазерное излучение в виде сфокусированного луча создает высокую концентрацию энергии (10^8 – 10^9 Вт/см²) на поверхности материалов, обеспечивая локальный нагрев с высокой скоростью и незначительной зоной термического влияния. Интенсивность проникающего лазерного излучения убывает по экспоненциальному закону [8]:

$$I(x) = I_0 k e^{-\gamma x}, \quad (1)$$

где x — глубина проникновения; I_0 — интенсивность лазерного излучения на поверхно-

сти; 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 составляет порядка 10^7 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.

При импульсно-периодическом лазерном воздействии процесс нагрева тела описывается непрерывно функционирующим источником теплоты, который представляется в виде серии работающих друг за другом мгновенных источников тепла. Количество тепла, введенное в поверхность за время t , равно [9]:

$$Q = \int_0^{\tau_n} \eta P(t) dt, \quad (2)$$

где τ_n — длительность импульса; η — КПД лазерного нагрева; P — мощность лазерного излучения.

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

$$E = 4W/(\pi d^2 \tau_n), \quad (3)$$

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

$$W = \frac{0,44 T_{пл} \lambda \pi d^2}{\sqrt{a \tau_n}}, \quad (4)$$

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

Модели тепловых полей лазерной пайки

В программном комплексе SolidWorks в расширении Simulation получены модели тепловых полей на печатной плате и выво-

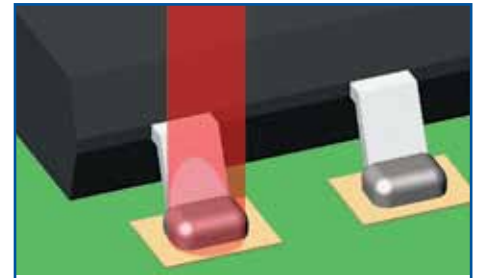


Рис. 3. Физическая модель лазерной пайки SMD-компонентов на плате

дах SMD-компонентов в процессе лазерного воздействия при пайке (рис. 3). Граничные условия: материал контактной площадки — медь, материал вывода элемента — сплав 29N18K (ковар), материал платы — стеклотекстолит FR4.

Результаты моделирования для мощности лазера 30 Вт и припою SAC 305 в виде теплового поля на выводе компонента представлены на рис. 4. Зависимости температуры в зоне пайки от времени и мощности лазерного луча приведены на рис. 5. Анализ зависимостей показывает, что необходимая температура пайки на контактной площадке и выводе электронного компонента может быть достигнута за 3–4 с при мощности лазера 30–40 Вт.

Экспериментальные исследования лазерной пайки

Устройство лазерного формирования контактных соединений в микромодулях (рис. 6) состояло из источника оптического излучения, блоков регулирования энергии излучения, управления шаговыми двигателями, оптической системы и системы охлаждения лазера. В качестве источника оптического излучения применен 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 использованы ИК-лампы мощностью 2 кВт.

Оптическая система формировала пространственные характеристики пучка как инструмента обработки. Фокусное расстояние оптической системы составляло 150 мм. Для наводки оптического излучения и юстировки

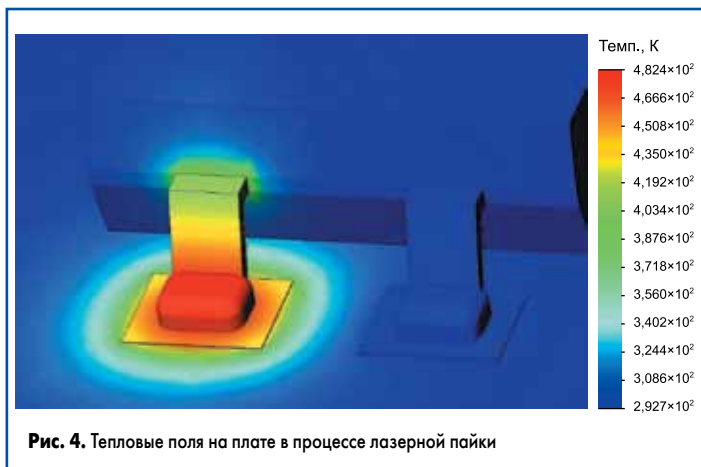


Рис. 4. Тепловые поля на плате в процессе лазерной пайки

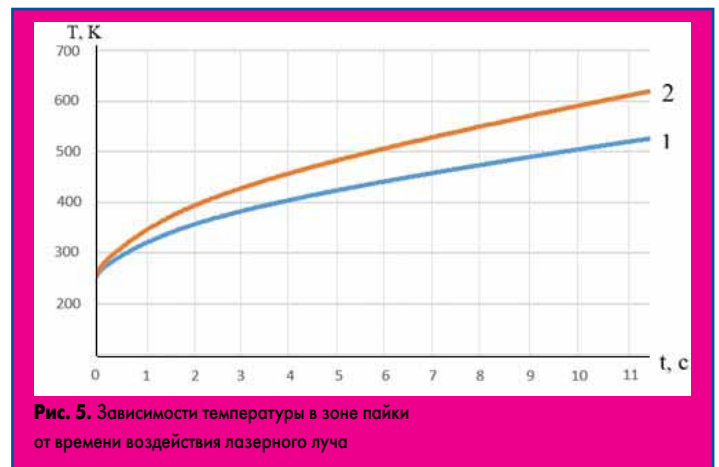


Рис. 5. Зависимости температуры в зоне пайки от времени воздействия лазерного луча

оптической системы использовался маломощный газовый лазер, излучение от которого вводилось в оптическую систему формирования лазерного излучения с помощью полупрозрачного зеркала. Для позиционирования изделий предусмотрен координатный стол с двумя степенями свободы и точностью позиционирования $\pm 0,1$ мм. Работа координатного стола контролируется блоком управления шаговым двигателем на микроконтроллере Arduino Uno. Микроконтроллерное управление осуществляется шаговыми двигателями серии ДШИ, которые отличаются высокими точностными и динамическими характеристиками, а также возможностью осуществления электрической редукции. В установке имеется 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 цифровых измерителей температуры. Радиометр представлял собой миниатюрную плату с металлизированным отверстием, в котором закреплена термопара типа ХК с помощью теплопроводящего клея в глухом отверстии с обратной стороны платы. Прибор ТРМ 210 регистрировал температуру с точностью ± 1 °С в диапазоне $0 \dots +400$ °С. Температура нагрева контактных площадок и SMD-элементов измерялась термопарой, закрепленной в сквозном отверстии среднеплавким припоем. Для того чтобы выяснить влияние лазерного излучения на термочувствительные элементы, в зоне воздействия лазерного луча и на определенном расстоянии от нее размещались две термопары типа ХК, подключенные к разным измерителям температуры.

Экспериментальные исследования проводились при следующих условиях:

- корпус типа QFP44;
- паяльная паста — SE5-M951X-9 фирмы KOKI;
- диаметр луча 0,5 мм;
- напряжение накачки $U = 0,8$ кВ;
- частота импульсов $f = 15, 20, 25, 33$ Гц.

Зависимости температуры от времени нагрева лазерным лучом представлены на рис. 7.

Анализ зависимостей показывает, что температура пайки SMD-компонентов $+230 \dots +240$ °С при и средней мощности излучения в импульсе 3,75 кВт и энергии излучения до 2 Дж достигалась на частоте импульсов 33 Гц за 4–5 с. Снижение частоты импульсов до 15 Гц приводит к уменьшению скорости нагрева.

Лазерная пайка позволяет избежать внесения загрязнения в соединение при пайке. Выполненные лазером паяные соединения имеют хорошо сформированные галтели, глянцевую поверхность, повышенные прочностные свойства. Внешний вид паяных соединений в электронных модулях показан на рис. 8 [10].

Заключение

Как перспективный метод монтажа лазерная пайка позволяет создавать межсоединения для SMD-элементов в электронных модулях с высокой плотностью компонентов, когда использование классических методов не предоставляет возможности достичь необходимого качества соединения либо этот процесс становится слишком трудоемким.

Моделирование тепловых полей на выводах компонентов и плате при пайке с использованием бессвинцового припоя помогло получить зависимости температуры припоя от времени воздействия тепловой энергии лазерного луча мощностью 30 и 40 Вт и определить допустимые интервалы технологических режимов. Результаты исследований показывают, что лазерный нагрев при пайке способен формировать паяные соединения высокой плотности и устраняет проблемы с перегревом платы и электронных компонентов.

Литература

1. Джюд М., Бриндли К. Пайка при сборке электронных модулей. М.: Издательский Дом «Технологии», 2006.
2. Teutsch T., Zakel E., Azdasht G. Pulsed-laser Heating for Flip Chip Assembly // Advanced Packaging. 2006 May/June.



Рис. 6. Лазерная установка для исследований процесса пайки

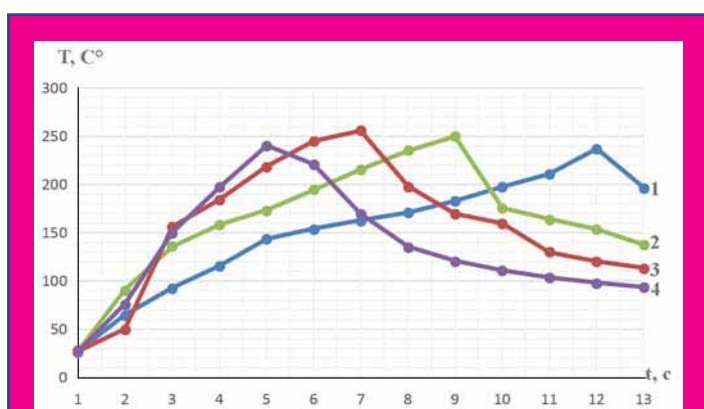


Рис. 7. Зависимости температуры от времени нагрева лазерным лучом и частоты следования импульсов



Рис. 8. Внешний вид: а) паяных соединений, выполненных лазером; б) электронного модуля с SMD-элементами

3. Аллас А. А. Лазерная пайка в производстве электронной аппаратуры. Под ред. В. П. Вейко. СПб, СПбГУ ИТМО, 2007.
4. Латиком-лазерные технологии и компоненты. www.laticom.ru/oborudovanie/
5. ОКБ «БУЛАТ». www.laser-bulat.ru
6. Гоззи Д. Селективная пайка лазером. Поворотный момент в технологии // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 2.
7. www.osai-as.com/neosold-400
8. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989.
9. Ланин В. Л. Лазерная пайка при сборке электронных модулей // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 6.
10. Subaru Opto Electronics, Co., Ltd. Micro laser soldering system. www.subaru-oe.co.jp