

# Пайка SMD-компонентов диодным лазером

**В современных электронных модулях с поверхностным монтажом повышение плотности монтажных соединений вызывает необходимость применения высокопроизводительных и бесконтактных методов нагрева для пайки. Лазерное излучение, как самый мощный источник тепловой энергии, обладает уникальными особенностями высокой локальности воздействия и управляемости процессом нагрева. Для пайки электронных модулей с плотным поверхностным монтажом перспективно использование компактных и энергоэффективных лазерных диодных систем.**

**Владимир Ланин**

vlanin@bsuir.by

**Сергей Полищук**

**Введение** легкокипящей жидкости (конденсационная пайка) и увеличивается при сокращении времени пайки, зоны теплового воздействия и снижении теплопроводности среды (пайка струей горячего газа).

В электронике массовым способом монтажа электронных компонентов на печатные платы является групповая автоматизированная пайка легкоплавкими припоями. Разработка новых технологических процессов осуществляется в связи с потребностью создания автоматизированного оборудования для производства аппаратуры с применением безвыводных компонентов, монтируемых на поверхности печатной платы. Условия современной микроминиатюризации в электронной промышленности привели к спросу на новый, полностью контролируемый способ селективной пайки лазерным излучением. Он позволяет выполнять пайку в труднодоступных местах изделий при 3D-компоновке модулей, а также паять термочувствительные компоненты, дозируя необходимую порцию энергии.

Способы пайки изделий электроники отличаются друг от друга источниками тепла, методом доставки тепловой энергии в зону пайки, локальностью и производительностью. В таблицах 1 и 2 приведены основные технологические характеристики способов пайки [1, 2]. Очевидно, что общий нагрев требует более длительного теплового воздействия, так как весь паяемый модуль нужно довести до температуры пайки. Достоинством способов пайки с общим нагревом является высокая производительность процесса формирования паяных соединений.

Недостатки групповой пайки связаны с необходимостью применения термостойких компонентов, образованием термомеханических напряжений в конструкции печатного модуля при остывании, формированием крупнозернистой структуры паяных соединений с возникновением интерметаллидных прослоек, что приводит к снижению надежности таких соединений. Недостатком локальных способов нагрева является значительно меньшая производительность процесса пайки, так как паяные соединения формируются последовательно.

Температурный интервал пайки при использовании припоя ПОС-61 находится в пределах +220...+250 °С. Этот интервал уменьшается при длительном общем нагреве при использовании паров

Лазерная пайка имеет ряд особенностей в сравнении с рассмотренными способами пайки. 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 печатных плат. Это создает возможность пайки электронных компонентов, монтируемых на платах, на металлических теплостоках для рассеивания тепла, выделяемого микросхемами при их функционировании. Основным недостатком импульсной лазерной пайки является высокая стоимость оборудования, однако ее можно снизить с применением диодных лазерных систем.








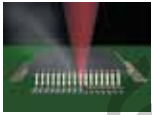
## Технология лазерной пайки

Лазерная пайка — бесконтактный процесс, что исключает внесение загрязнений в паяное соединение, как это происходит при использовании контактных

**Таблица 1.** Технологические режимы способов пайки

Способ пайки	Вид нагрева	Температура пайки, °С	Время пайки, с
Волной припоя	Общий	+220...+265	1,2–2,5
В жидком теплоносителе	Общий	+250...+260	15–20
Конденсационная	Общий	+215	40–90
В камере с нагретым газом	Общий	+250...+300	20–40
В инфракрасной конвейерной печи	Общий	+205...+210	15–20
Струей горячего газа	Локальный	+300...+400	5–10
Групповым паяльником	Локальный	+320...+340	0,8–1
Параллельными электродами	Локальный	+220...+250	0,3–0,5
Индукционная	Локальный	+220...+400	1–3
Сфокусированным ИК-излучением	Локальный	+220...+250	0,3–0,8
Лазерная непрерывная	Локальный	+220...+250	0,3–0,5
Лазерная импульсная	Локальный	+250...+300	0,02–0,08

Таблица 2. Характеристика методов пайки электронных изделий

Метод пайки	Иллюстрация процесса пайки	Нагреваемая площадь	Основные особенности
Кондукционная		Площадь контакта через теплопроводность	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Контактный нагрев.</li> <li>• Передача тепла зависит от площади поверхности контакта.</li> <li>• Наличие термодатчика.</li> </ul>
На термостоле		Вся плата посредством теплопроводности от горячего термостола	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Контактный нагрев.</li> <li>• Уровень нагрева зависит от площади контакта с термостолом.</li> <li>• Нагрев с нижней стороны.</li> </ul>
Сопротивлением		Проводящий материал между электродами	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Контактный нагрев.</li> <li>• Производительность зависит от площади соприкосновения между деталью и электродами.</li> </ul>
Паяльником		Точка контакта через теплопроводность	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Контактный нагрев.</li> <li>• Передача тепла зависит от площади соприкосновения.</li> </ul>
Пламенем горелки		Область фокусировки пламени, окрестности через теплопроводность	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Нет физического контакта.</li> <li>• Возможно пламя высокой энергоемкости.</li> <li>• Открытое пламя воспламеняет горючие материалы.</li> </ul>
Конвекционная печь		Вся плата	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Бесконтактный нагрев.</li> <li>• Точный контроль температуры.</li> </ul>
Потоком горячего воздуха		Площадь определяется конструкцией сопла; окрестности через теплопроводность	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Бесконтактный нагрев.</li> <li>• Более локальный нагрев, чем конвекционная печь.</li> <li>• Точный контроль температуры.</li> </ul>
Индукционная		* Все проводящие материалы в индуктивной области	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Бесконтактный нагрев.</li> <li>• Возможны очень энергоемкие нагреватели.</li> <li>• Избирательный нагрев материалов.</li> <li>• Форма поля является функцией формы катушки.</li> </ul>
Инфракрасная		* Область ИК-воздействия, окрестности через теплопроводность	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Бесконтактный нагрев.</li> <li>• Энергия поглощения зависит от облучаемого материала.</li> <li>• Область воздействия ИК-излучения большая.</li> </ul>
Лазерным диодом		Область фокуса лазерного излучения	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Бесконтактный нагрев.</li> <li>• Область фокуса может быть крайне малой.</li> <li>• Точный контроль выходной энергии.</li> <li>• Энергия поглощения зависит от облучаемого материала.</li> </ul>

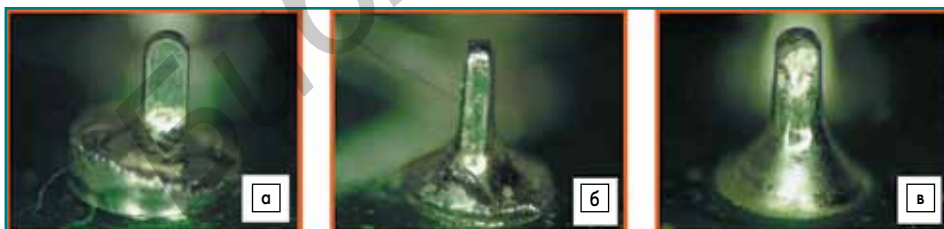


Рис. 1. Внешний вид паяного штыревого вывода при мощности лазера: а) 6 Вт; б) 8 Вт; в) 10 Вт



Рис. 2. Внутренняя структура паяного соединения при мощности лазера: а) 6 Вт; б) 8 Вт; в) 10 Вт

способов пайки. Паяные соединения, выполненные лазерной пайкой, имеют глянцевую поверхность, хорошо сформированные галтели, отличаются повышенными прочностными свойствами. Возможность гибкого регулирования и точного дозирования подводимой энергии позволяет в широких пределах варьировать температуру и время пайки [3].

Еще одна особенность непрерывной пайки твердотельными лазерами — отсутствие возгорания диэлектрической основы печатных плат, что наблюдается в процессе пайки сфокусированным ИК-излучением и CO<sub>2</sub>-лазером. Это объясняется различиями спектральных оптических характеристик нагреваемых материалов. В спектральном диапазоне излучения CO<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм) припой обладает более высоким коэффициентом отражения, чем диэлектрические материалы, которые нагреваются сильнее и начинают обугливаться раньше, чем припой достигнет плавления. В процессе пайки твердотельным лазером ( $\lambda = 1,06$  мкм) результат противоположный. Коэффициент отражения для диэлектрической основы печатных плат больше, поэтому припой нагревается быстрее и достигает плавления раньше, чем начнется возгорание диэлектрической основы платы.

Время пайки в импульсном режиме меньше, чем при непрерывной лазерной пайке, и составляет 0,02–0,08 с. Также очевидно, что скорость охлаждения при импульсной пайке значительно выше, нежели при непрерывной, поскольку окрестности зоны пайки в импульсном режиме имеют температуру значительно ниже, чем в режиме непрерывной пайки. Таким образом, режимы импульсной пайки в большей степени, чем другие, приближаются к идеальной пайке. Припой мгновенно оплавляється, смачивая паяемые поверхности, затекая в зазор, и мгновенно остывает, что способствует образованию прочной мелкодисперсной кристаллической структуры. Однако существует ряд технологических, технических и экономических проблем, сдерживающих широкое использование в промышленности импульсной лазерной пайки. Требуются новые флюсы и способы их дозирования, поскольку традиционные паяльные пасты, содержащие флюсующую связку и порошок припоя, уже не согласуются с режимами импульсной пайки. Происходит вскипание флюса и разбрызгивание припоя, что препятствует получению качественных паяных соединений. При сокращении времени пайки требуется еще более высокая химическая активность флюсов, чтобы обеспечить смачивание припоем паяемых поверхностей и заполнение зазора. А это в свою очередь увеличивает опасность коррозии плат.

В зависимости от мощности лазерного излучателя при одинаковом времени пайки, равном 800 мс, формируется разная структура паяного соединения (рис. 1) [4]. При малой мощности припой полностью не растекается, внутри соединения могут находиться флюсовые включения (рис. 2).

Пример пайки QFP-корпуса микросхемы лазерным диодом представлен на рис. 3 [5]. На рис. 4 показаны особенности при пайке

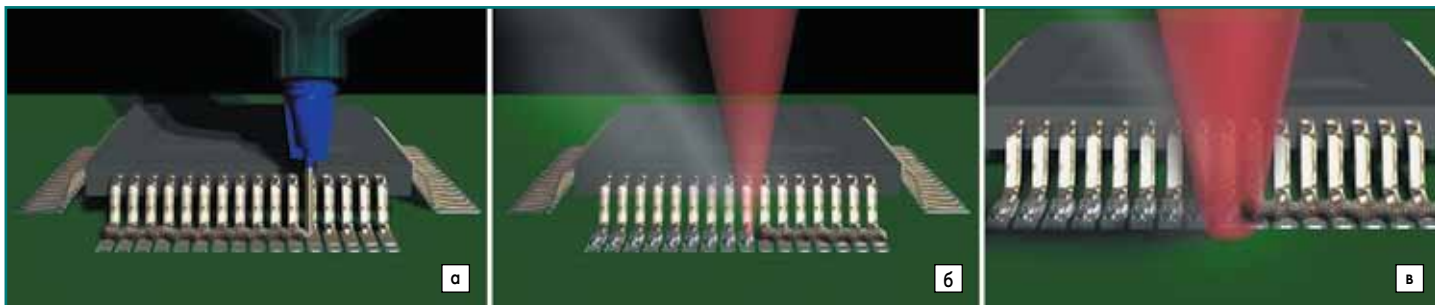


Рис. 3. Процесс пайки лазерным диодом: а) нанесение паяльной пасты; б) точечная пайка; в) непрерывная пайка

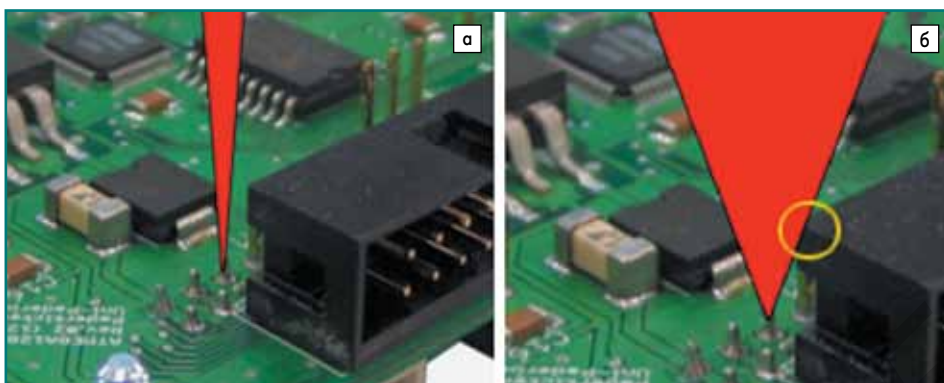


Рис. 4. Пайка контактов на плате лазерным лучом: а) угол схождения луча 12°; б) угол схождения луча 29°

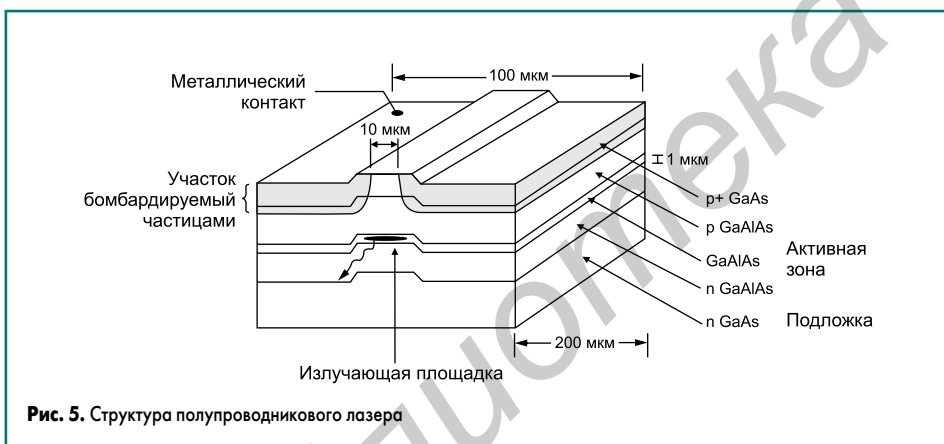


Рис. 5. Структура полупроводникового лазера

Таблица 3. Параметры полупроводниковых лазеров

Тип лазера	Длина волны $\lambda$ , мкм	Энергия в импульсе $W$ , Дж	Длительность импульса $\tau$ , с	Частота импульсов, Гц	Мощность (непр.) $P$ , Вт	Угловая расходимость $\alpha$ , мрад	КПД, %
GaAs	0,635–0,95	10 мВт – 20 Вт ( $P_n$ до 100 Вт) (stacks 5 кВт)		$10^3$	0,04	250×150	>10
InP	0,95–1,55	10–100 Вт					
InGaAs	0,75–0,98	Средняя мощность 100 Вт и более				250×150	>10

узким лучом (12°) и широким лучом (29°). Широкий луч может задевать другие компоненты печатного монтажа. Пайка штыревых компонентов может производиться как при вертикальном расположении лазерного луча, так и под углом. Это приводит к разным температурным профилям нагрева и, соответственно, к разному качеству паяного соединения.

Лазерная генерация в полупроводниковых лазерах возможна в активной среде, где преобладает излучательная рекомбинация, когда возникает неравновесное состояние с инверсией населенностей — большинство частиц находится в верхней зоне проводи-

мости. Существуют различные способы возбуждения в полупроводниковых лазерах. Для того чтобы получить инверсию населенностей, применяют инжекцию носителей в  $p-n$ -переход, возбуждение электронов пучком быстрых электронов, оптическую накачку, прямое электрическое возбуждение и т. д. Наибольший интерес представляет первый тип — инжекционные лазеры. Инверсия населенностей создается здесь приложением электрического напряжения в прямом направлении. На рис. 5 изображена структура такого лазера. В таблице 3 приведены основные параметры полупроводниковых лазеров различных структур.



Рис. 6. Лазерный диод мощностью 30 Вт



Рис. 7. Лазерный модуль мощностью 50 Вт

На рис. 6 и 7 представлены полупроводниковые лазеры мощностью 30 и 50 Вт соответственно [6]. Первый имеет кондуктивный тип охлаждения, устанавливается непосредственно на радиаторную пластину. Второй лазер оснащен водяным охлаждением.

Лазерные диоды имеют высокий КПД ( $\approx 50\%$ ), малые габариты, большую мощность (от 30 Вт до 2–4 кВт), совместимость длины волны с оптическим волокном, регулирование длины волны, малое время включения/выключения, удобство управления (временными характеристиками включительно).

Недостатки: плохое качество излучения — высокая асимметричная расходимость. В некоторых случаях необходимо производить пайку лазерным лучом, расположенным под углом к плоскости платы. На рис. 8 представлен внешний вид паяльной поворотной головки.

### Моделирование лазерного нагрева в технологии пайки

Проблемы формирования микросоединений при лазерном воздействии связаны с необходимостью определять нужную плотность мощности излучения, выбирать оптимальные режимы и обеспечивать заданное качество соединений. Температура поверхно-



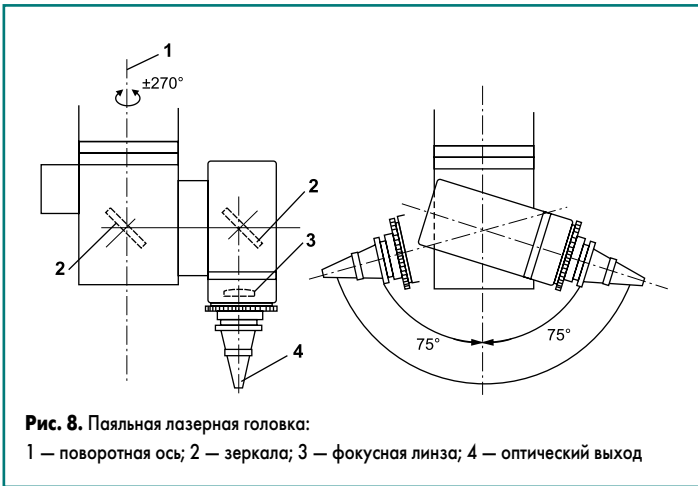


Рис. 8. Паяльная лазерная головка:  
1 — поворотная ось; 2 — зеркала; 3 — фокусная линза; 4 — оптический выход

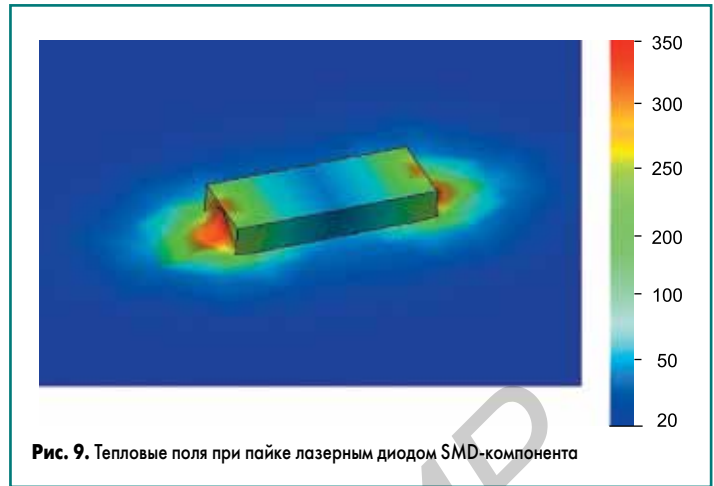


Рис. 9. Тепловые поля при пайке лазерным диодом SMD-компонента

сти  $T$  зависит от мощности  $P$ , поглощенной единицей площади  $S$ . Соотношение между  $T$  и плотностью мощности  $q$  может быть определено из уравнений теплопроводности типа:

$$\partial T / \partial t - a \Delta T = Q(x, y, z, t) / \rho c, \quad (1)$$

где  $\Delta$  — оператор Лапласа,  $Q$  — объемная плотность поглощенного светового потока,  $a$  — температуропроводность,  $\rho$  — плотность,  $c$  — теплоемкость.

Для того чтобы решить уравнение (1), надо задать начальные и граничные условия и определить  $Q(x, y, z, t)$ :

$$T_{x, y, z, 0} = T_H, \quad T_{x = \infty, t} = T_{y = \infty, t} = T_{z = \infty, t} = T_H,$$

$$\partial T / \partial x_{0, t} = \partial T / \partial y_{0, t} = \partial T / \partial z_{0, t}$$

$$Q = q_0(1-R)\alpha e^{-ax}. \quad (2)$$

Для металлов решение уравнения (1) при условиях (2) для круглого источника тепла — лазерного пятна с радиусом  $r$  имеет вид:

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left( 1/\sqrt{\pi} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_H, \quad (3)$$

при  $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$  (импульсный нагрев)

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_H, \quad (4)$$

при  $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$  (непрерывный нагрев)

$$T = (q_0(1-R)r_0)/k + T_H. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) позволяют определить пороговую плотность мощности, необходимую для нагрева поверхности до заданной температуры  $T$ :

$$q_{\text{имп}}^{\text{пор}} = \frac{(T - T_H)k\sqrt{\pi}}{2(1-R)\sqrt{a\tau}}, \quad (6)$$

$$q_{\text{непр}}^{\text{пор}} = \frac{(T - T_H)k}{(1-R)r_0}. \quad (7)$$

Интенсивность проникающего лазерного излучения убывает по экспоненциальному закону Бугера:

$$I(x) = I_0 k \times e^{-\gamma x}, \quad (8)$$

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

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 поверхность за время  $t$ , равно [7]:

$$Q = \int_0^{\tau_n} \eta P(t) dt, \quad (9)$$

где  $\tau_n$  — длительность импульса,  $\eta$  — КПД лазерного нагрева,  $P$  — мощность лазерного излучения.

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  $t = 0$ :

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi \times \lambda \times \delta \times t} e^{-(r^2/4at) - bt}, \quad (10)$$

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

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

$$dT = \frac{q \times dt}{4\pi \times \lambda \times \delta \times t} e^{-(r^2/4at)}. \quad (11)$$

Используя выражение (11), можно рассчитать температуру в произвольной точке поверхности при воздействии на нее лазерного излучения.

Моделирование процесса лазерной пайки проведено в программном продукте

SolidWorks Simulation в зависимости от диаметра лазерного луча и мощности лазерного излучения. В качестве паяемого компонента выбран SMD-резистор типоразмера 1206. Материалы нагреваемых объектов: резистора — керамика, платы — стеклоткань, токопроводящих дорожек — медь.

Анализ теплового поля при пайке SMD-компонента (рис. 9) показал, что в зонах контактных площадок происходит локальный нагрев компонента. Температура в зоне пайки достигает +350 °С. Данная температура является функцией двух параметров — мощности излучателя и времени воздействия лазерного луча. Как видно на рис. 10, температура нелинейно зависит от диаметра лазерного луча с некоторым допущением  $T_k \sim 1/r^2$ .

На рис. 11 представлена зависимость температуры зоны пайки от мощности лазерного излучателя, которая близка к линейной  $T_k \sim P$ .

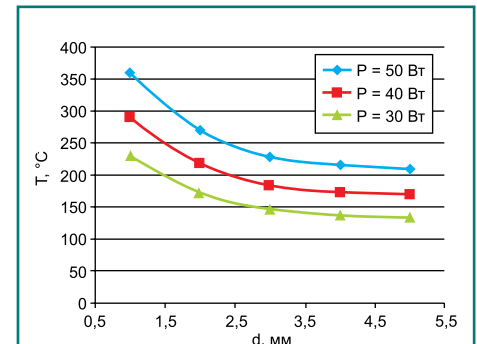


Рис. 10. Зависимости температуры на поверхности контактной площадки от диаметра лазерного пучка и мощности лазера

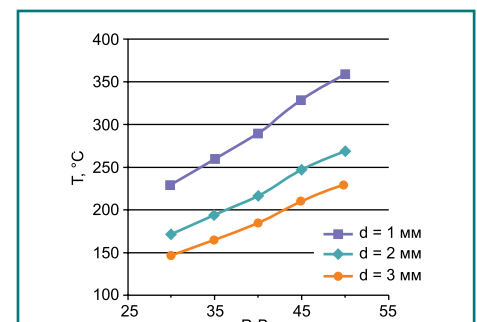


Рис. 11. Зависимости температуры пайки от мощности излучателя

Анализ температурно-временных режимов показывает, что в случае непрерывного лазерного излучения время пайки SMD-компонента составляет менее 1 с, а для ручной пайки паяльником находится в пределах 1–3 с. При кратковременных тепловых воздействиях, когда время пайки сравнимо со временем смачивания, существенное влияние на прочностные свойства будет оказывать активность флюса. Поэтому для повышения таких свойств паяных соединений необходимо обеспечить согласование времени смачивания с периодом пайки.

Для формирования надежных паяных соединений необходим выбор припойной пасты, содержащей в своем составе достаточно активный флюс, сокращение времени пайки с целью подавления массообмена на межфазных границах и получение мелкодисперсной структуры припоя в зазоре в результате увеличения скорости охлаждения паяных соединений.

### Заключение

Для пайки электронных модулей с плотным поверхностным монтажом перспективно использование компактных и энергоэффективных лазерных диодных систем. В настоящее время производительность лазерной пайки уже достигает двух тысяч паек в час. Дальнейшее увеличение производительности возможно за счет разложения лазерного луча в результате применения голографических фильтров. В этом случае лазерное излучение можно фокусировать одновременно на всех паяных соединениях, относящихся к одной микросхеме или на всей печатной плате, если использовать лазеры большой мощности. При лазерной пайке предпочтение отдают применению паяльных паст, которые содержат флюс и припой и позволяют автоматизировать процесс дозирования с помощью трафаретной печати либо пневмодозаторами.

### Литература

1. Аллас А. А. Лазерная пайка в производстве радиоэлектронной аппаратуры. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007.
2. Kasman A., Vivari J. Laser Solder Reflow: A Process Solution. Part I. 2007. [www.nordson.com/en-us](http://www.nordson.com/en-us)
3. Ланин В. Л. Лазерная пайка при сборке электронных модулей // Технологии в электронной промышленности, 2007. № 6.
4. Hoult T. Laser Solutions for Soldering // Circuits Assembly. 2004. № 2.
5. Kasman A., Vivari J. Laser Solder Reflow: A Process Solution. Part II. 2007. [www.nordson.com](http://www.nordson.com)
6. 50W CW Diode Pumped Nd: YAG Cavity (DPSS Laser Module). [www.ebay.com](http://www.ebay.com)
7. Ланин В. Л. Лазерная управляемая пайка для монтажа электронных модулей // Технологии в электронной промышленности, 2010. № 2.

Библиотека БГУИР