

Лазерные диодные системы для пайки электронных модулей

Проблема повышения плотности монтажных соединений в современных электронных модулях вызывает необходимость применения высокопроизводительных и бесконтактных методов нагрева для пайки. Лазерное излучение, как самый мощный источник тепловой энергии, обладает уникальными особенностями: это высокая локальность воздействия и управляемость процессом нагрева. Для пайки электронных модулей с плотным поверхностным монтажом перспективно использование компактных и энергоэффективных лазерных диодных систем.

Владимир Ланин,
профессор

vlanin@bsuir.by

Татьяна Вашурова

Лазерные технологии критически важны для многих областей промышленности. К отраслям, в наибольшей степени нуждающимся в лазерных технологиях, относятся радиоэлектронная промышленность, телекоммуникации, авиакосмическая сфера, металлургия и медицина.

Большое разнообразие интегральных микросхем (ИМС) позволяет разработчикам радиоэлектронной аппаратуры значительно сократить время на проектирование, снизить массо-габаритные характеристики и повысить надежность. Применение ИМС с планарными выводами и под поверхностный монтаж повышает плотность упаковки элементов в модулях за счет их двустороннего размещения на плате.

Наиболее перспективным методом монтажа таких ИМС является лазерная пайка в сочетании с применением паяльных паст, дозирование которых возможно в автоматическом режиме пневматическим дозатором. Особенности данного процесса: локальность теплового воздействия, высокая стабильность температурно-временных режимов, гибкое регулирование подводимой тепловой энергии, отсутствие контакта с паяемым изделием, высокая производительность, возможность автоматизации, высокое качество и надежность паяных соединений [1]. Лазерное излучение может быть сфокусировано в пятно диаметром около 0,1 мм, что в сочетании с высокой плотностью мощности излучения обе-

Введение

спечивает возможность пайки электронных компонентов, при этом не происходит их перегрев, а печатные платы не деформируются. Именно поэтому лазерная пайка — это единственный способ, который обеспечивает возможность пайки компонентов, монтируемых на платах, наклеенных на металлические теплоотводы для рассеивания тепла, выделяемого микросхемами при их функционировании.

Лазерная пайка является бесконтактным процессом. Это исключает внесение загрязнений в паяное соединение, что имеет место при использовании контактных способов пайки. Паяные соединения, выполненные лазером, имеют глянцевую поверхность, хорошо сформированные галтели и отличаются повышенными прочностными свойствами. Возможность гибкого регулирования и точного дозирования подводимой энергии позволяет варьировать температуру и время пайки в широких пределах. Эти особенности предопределили создание лазерного оборудования, сочетающего в себе автоматизированную пайку с автоматизированным контролем качества паяных соединений. Для пайки используют лазеры, работающие в режиме свободной генерации. Широко применяют как моноимпульсный, так и импульсно-периодический режимы.

Основные применения лазерной пайки в электронной промышленности следующие [2]:

1. Присоединение электрических проводников к поверхности.
2. Соединение электродной фольги с выводами электролитических конденсаторов.
3. Пайка выводов к видеоголовкам.
4. Пайка электронных чипов к контактам.
5. Соединение выводов ИМС с печатной платой (рис. 1а).
6. Соединение типа трубка-лента (рис. 1б).
7. Присоединение конденсаторов и резисторов к контактным площадкам микрополосковых линий.
8. Присоединение электрических выводов к тонкопленочным системам.
9. Герметизация малогабаритных корпусов полупроводниковых приборов.
10. Соединение нитей вольфрама с проволокой молибдена и др.

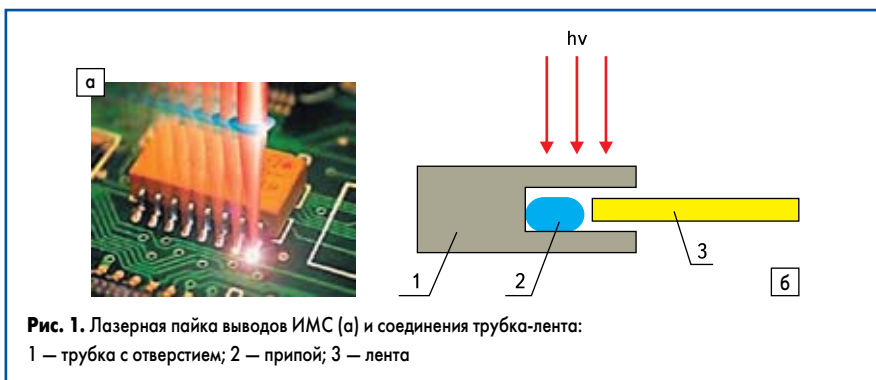


Рис. 1. Лазерная пайка выводов ИМС (а) и соединения трубка-лента:
1 — трубка с отверстием; 2 — припой; 3 — лента

Достоинства лазерной пайки: бесконтактность, высокая степень локальности, точность энергозатрат, высокая скорость нагрева (недостижимая в традиционных способах пайки), пайка в труднодоступных местах, возможность модернизации и механизации процесса. Лазерная пайка позволяет избежать перегрева электронных компонентов при монтаже.

Технологический процесс лазерной пайки включает в себя такие операции, как установка и приклейка компонентов на печатную плату; контроль физико-химических свойств припойной пасты; заправка дозатора припойной пасты; закрепление печатных плат; установка режимов пайки; дозирование припойной пасты; пайка лазерным излучением; отмычка остатков флюса; контроль качества паяных соединений [3].

Технические требования к лазерному технологическому оборудованию формулируются в зависимости от выполняемых оборудованьем функций. Поэтому оборудование в своем составе должно содержать:

- 2-координатный стол, на котором располагается плата с предварительно установленными на ней ИМС;
- лазерный излучатель;
- оптическую комбинированную систему для фокусировки излучения на выводы микросхемы и наблюдения оператора за процессом пайки;
- источник питания лазера;
- дозатор припойной пасты;
- систему управления технологическим процессом.

Особенности диодных лазеров

В настоящее время промышленности необходимы гибкие и компактные лазеры с оптимальной для конкретного применения геометрией пучка и распределением интенсивности излучения. Новое поколение мощных диодных лазеров (ДЛ) открывает новые области их применения в обработке материалов. Микрооптическое формирование пучка позволило создать компактные сверхъяркие ДЛ с высоким КПД, простым обслуживанием и широким диапазоном применения.

Мощные компактные ДЛ имеют высокую надежность. Так, непрерывные ДЛ мощностью до 1 кВт с вводом излучения в волокно с диаметром сердцевины 200–600 мкм широко используются при сварке пластмасс, нержавеющей стали, а также для пайки в электронной и автомобильной промышленности (рис. 2). Высокая мощность волоконного лазера основана на принципе увеличения силы лазерного пучка при помощи активированного оптического волокна. Источником излучения является полупроводниковый диод. Это новая технологическая платформа с огромным энергетическим потенциалом. Эти лазеры легко интегрируются в промышленные процессы благодаря компактности, низкому энергопотреблению, простоте и высокой надежности [3].

Однако этим их возможности далеко не исчерпаны. Заказчиков привлекают также возможности микросварки корпусов, функцио-



Рис. 2. Схема волоконного лазера с диодной накачкой

нальных элементов или электрических соединений при сборке электронных модулей; резки тонких листов металла; микросварки пластмассовых деталей; пайки и отжига в производстве полупроводников и дисплеев. Широкое внедрение ДЛ в промышленные установки требует простых интерфейсов и систем индивидуального формирования пучка. Масштабируемые по мощности сверхъяркие ДЛ с вводом излучения в волокно, а также мощные лазеры со свободным излучением открывают новые перспективы применения лазерных технологий.

Индивидуальное формирование пучка позволяет экономично обрабатывать материалы. Так, при использовании линейных лазеров одиночный лазерный импульс производит сварной шов по всему периметру сварки. Это значит, что процесс протекает за очень короткое время и требует относительно небольших капитальных затрат, а для установки ДЛ необходимо к тому же и меньшая, чем обычно, площадь.

Для пользователя решающие параметры — скорость и безопасность. Один интегрированный лазерный инструмент не только создает излучение, но и индивидуально формирует лазерный пучок в месте его применения. Для индивидуального формирования пучка используется микрооптика и требуется высококачественное гомогенное (равномерное по интенсивности) распределение лазерного излучения по обрабатываемой поверхности. Реализация такого распределения осуществляется с помощью гомогенизирующих модулей, которые производятся в виде микрооптических решеток. Это позволяет снизить уровень негомогенности до величины менее 1% при мощности излучения в несколько киловатт.

Больших перспектив применения ДЛ со свободным излучением в качестве генераторов линии можно ожидать при обработке поверхностей, например при отжиге, сварке, пайке или сушке. Например, технология линейных модулей LIMO позволяет производить модули линейных лазеров мощностью в несколько киловатт (как с вводом излучения в волокно, так и свободного излучения) (рис. 3). Формат кадра линейных лазеров может изменяться вплоть до 1:3000, а длина линии может меняться от 10 до 15000 мм (при высоте линии от 30 мкм до нескольких миллиметров).

На базе новых сверхъярких ДЛ удалось впервые создать системы ДЛ с качеством



Рис. 3. Модуль диодной лазерной накачки

пучка, как у обычных лазерных (CO_2 или Nd:YAG-лазеры) систем, при сохранении таких преимуществ, как малые размеры, прочность и гибкость ДЛ. Например, ДЛ свободного излучения с длиной волны 808–980 нм и мощностью 50 Вт позволяет получить качество пучка 5 мм·мрад. Улучшенная фокусировка подобных систем открывает новые возможности для их применения в процессах скрепления, резки и маркировки.

Даже использование микрооптики с ограниченным показателем преломления позволяет эффективно формировать пучок, что снижает рабочие токи и увеличивает срок эксплуатации диодов. В соответствии с ISO 17526 (2003) ожидаемый срок службы составляет 20 000 часов. Кроме того, малый рабочий ток — это малая тепловая нагрузка, позволяющая использовать компактные элементы охлаждения (лазерные модули могут охлаждаться элементами Пельтье или технической, а не дистиллированной, водой) [4].

ДЛ достигают качества излучения, характерного для обычных лазерных источников. Так, качество пучка (рис. 4) (Beam Parameter Product, BPP — произведение параметров пучка) мощных новейших ДЛ достигает 5 мм·мрад, что лежит в области традиционных лазерных источников излучения, таких как CO_2 или Nd:YAG-лазеров (рис. 5). В во-

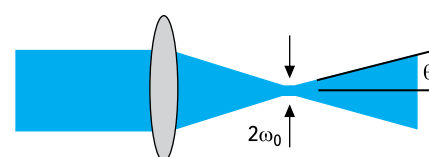
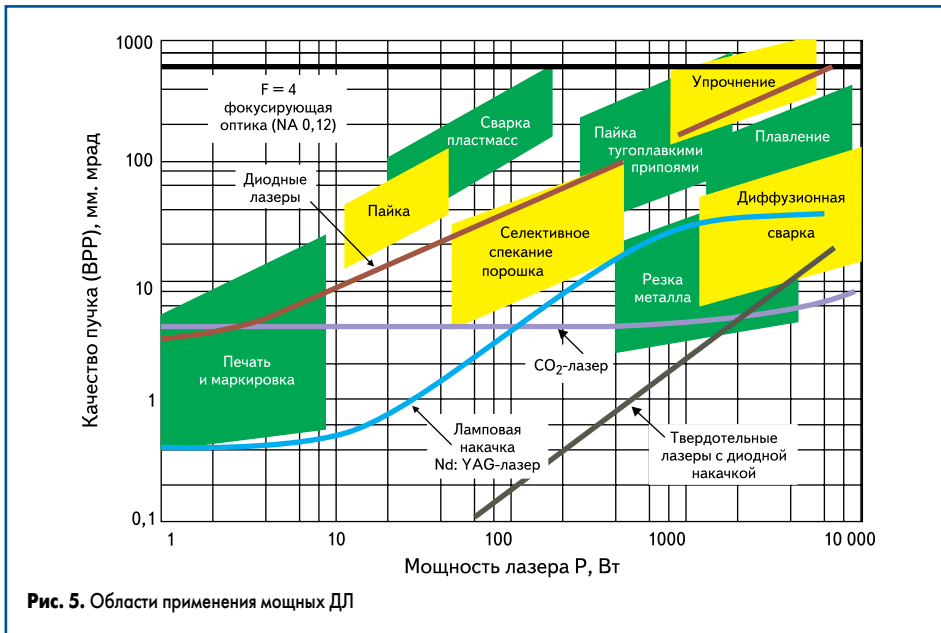


Рис. 4. Определение BPP (произведение диаметра пучка в перетяжке ($2\omega_0$) на половину угла расходимости (θ))



локно диаметром сердцевины 50 мкм можно ввести до 50 Вт. Достижимая плотность мощности открывает новые возможности применений, недоступные ранее для ДЛ [5].

Лазерные модули могут при этом иметь компактную конструкцию, а линейки ДЛ нового поколения высокой яркости можно комбинировать с эффективным формированием пучка с помощью микрооптики (яркость здесь означает высокую мощность при малых размерах и расходимости пучка).

Дополнительно можно повышать эффективность пассивного охлаждения, применяя новые материалы и улучшая конструкцию, что позволяет увеличить (до удвоения) выходную мощность при более высокой температуре и меньшей мощности охлаждения. Так, лазерный модуль LIMO200 F400 выходной мощностью 200 Вт с волокном 400 мкм при компактной конструкции, одинаковых размерах водяного охлаждения и той же мощности лазерного драйвера может выдавать мощность до 350 Вт [5].

КПД модулей ДЛ (то есть отношение подводимой электрической мощности к оптической мощности, выходящей из волокна) впервые превысил 50%. Эта величина достигается оптимизированным формированием пучка с помощью микрооптики, адаптированной

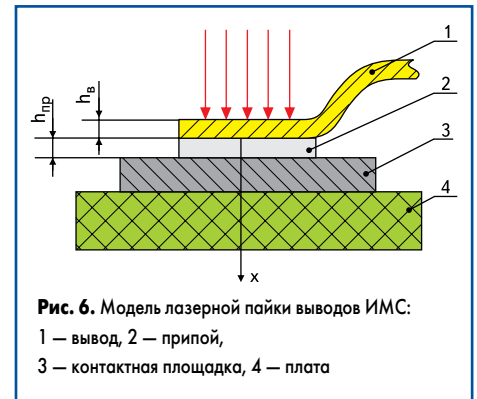
к параметрам излучения новых диодных линеек. Эффективность ввода излучения в волокно находится в пределах 85–92% (для волокон без просветляющего покрытия).

Моделирование воздействия энергии лазерного излучения на процессы формирования соединений

Качество лазерной пайки выводов ИМС зависит от плотности потока лазерного излучения и скорости перемещения лазерного луча по плате. В свою очередь плотность потока лазерного излучения определяется мощностью излучения и диаметром фокального пятна.

Для моделирования параметров лазерной пайки рассмотрена упрощенная модель, состоящая из трех пластин, нагреваемых лазерным лучом (рис. 6): пластина 1 — планарный вывод толщиной h_b , интегральной микросхемы, пластина 2 — напрессованный припой толщиной h_{np} . Теплопередача между припоем и контактной площадкой (пластина 3) при нагреве не учитывалась.

Использование лазерной энергии для пайки основано на поглощении излучения материалом выводов. Проникновение излучения в материал описывается экспоненциальным законом Бугера-Ламберта:



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

где $I(x)$ — интенсивность лазерного излучения на глубине x ; I_0 — интенсивность лазерного излучения на поверхности материала; R — коэффициент отражения; α — коэффициент поглощения.

Поток энергии, падая на плоскую поверхность, нагревает ее за время t до температуры T_s :

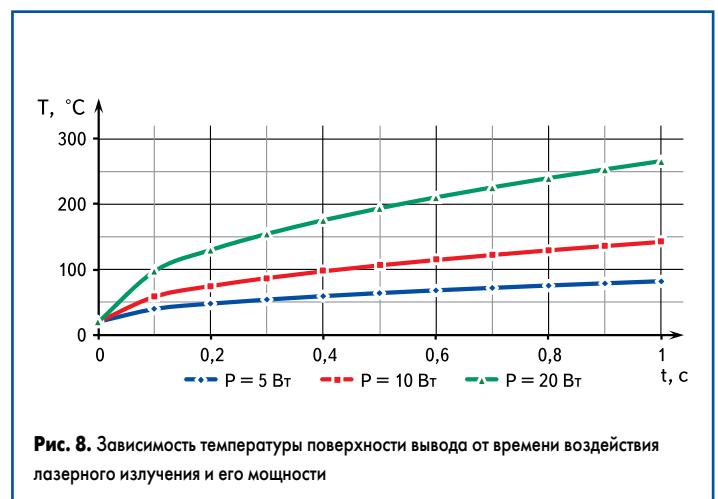
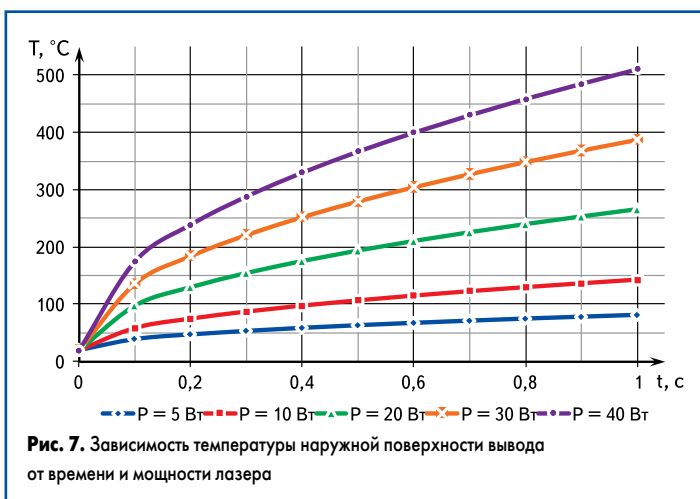
$$T_s = T_0 + \frac{2q(1-R)}{k} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}, \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура; $q = P/S$ — плотность мощности излучения; P — мощность поглощенного излучения; S — площадь контакта; k — коэффициент теплопроводности; α — удельная температуропроводности.

При лазерной пайке с уровнем мощности 5–40 Вт, времени 0,1–1 с и фокусировке луча в зону нагрева диаметром 0,3–2,5 мм предпочтительны одиночные импульсы или последовательности импульсов с частотой до 10 Гц. Изменяя время нагрева, получим различные значения температуры наружной поверхности вывода (рис. 7).

Для образования качественного паяного соединения необходимо, чтобы температура припоя была не менее 200 °С. Как видно на рис. 7, такой температуры за приемлемое время можно достичь при воздействии лазерного излучения мощностью более 20 Вт.

При расчете температуры нагрева припоя необходимо учесть теплоту, которая расходуется на его плавление:



$$E = cm\Delta T + \lambda m, \quad (3)$$

где c — удельная теплоемкость; m — масса припоя; ΔT — изменение температуры; λ — удельная теплота плавления припоя.

С учетом формулы (3) зависимость температуры поверхности вывода от времени воздействия лазерного излучения будет иметь вид, как на рис. 8.

Анализируя полученные данные можно сделать вывод, что при достижении температуры плавления (~200 °С) часть мощности будет затрачиваться на переход припоя в жидкую фазу, что несколько снижает скорость нагрева.

Для оптимизации процессов формирования микросоединений сфокусированным лазерным лучом следует учитывать такие критерии, как производительность, определяемая скоростью нагрева в зоне воздействия излучения, и воспроизводимость качества соединений. В данном случае предполагаем, что энергия излучения распределена равномерно по лазерному пятну, а при воздействии лазерного излучения длительностью $\tau_u \leq r_n^2/a$ (где r_n — радиус пятна нагрева лазерного излучения; a — коэффициент температуропроводности) задача теплопроводности рассматривается в одномерном приближении при условии, что основной поток теплоты в материале распространяется нормально поверхности в глубину тела по оси OZ (рис. 9).

Одномерное по оси OZ температурное поле, создаваемое в полубесконечном теле однородным излучением с равномерным распределением энергии излучения, описывается уравнением (при $t > \tau_u$) [6]:

$$T(z, t) = \frac{2q_n \sqrt{a}}{\lambda_m} \left[\sqrt{t} \operatorname{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right) - \sqrt{t - \tau_u} \operatorname{ierfc} \left(\frac{\sqrt{z^2 - r_n^2}}{2\sqrt{at - \tau_u}} \right) \right], \quad (4)$$

где z — расстояние по оси OZ; t — время действия лазерного излучения; q_n — плотность мощности излучения; $a = \lambda_m/(c\gamma)$ — коэффициент температуропроводности; λ_m — теплопроводность; $c\gamma$ — объемная теплоемкость; ierfc — функция интеграла вероятности.

Плотность мощности теплового источника вычисляется как $q_n = \eta_{\text{эф}} E$. В случае непрерывного воздействия плотность мощности $E = P/(\pi r_n^2)$ (где P_u — мощность излучения). При $0 < t < \tau_u$ уравнение (4) приводится к упрощенному виду:

$$T(z, t) = \frac{2q_n}{\lambda_m} \sqrt{at} \operatorname{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right). \quad (5)$$

Для плотного поверхностного монтажа в электронных модулях применяют более 13 типов QFP-корпусов, имеющих от 28 до 200 выводов с шагом от 0,4 до 1 мм (рис. 10). Исходные данные для моделирования процесса пайки лазерным излучением внешних выводов ИМС в корпусе QFP следующие:

- радиус пятна лазерного луча на поверхности $r_n = 0,8-1$ мм;

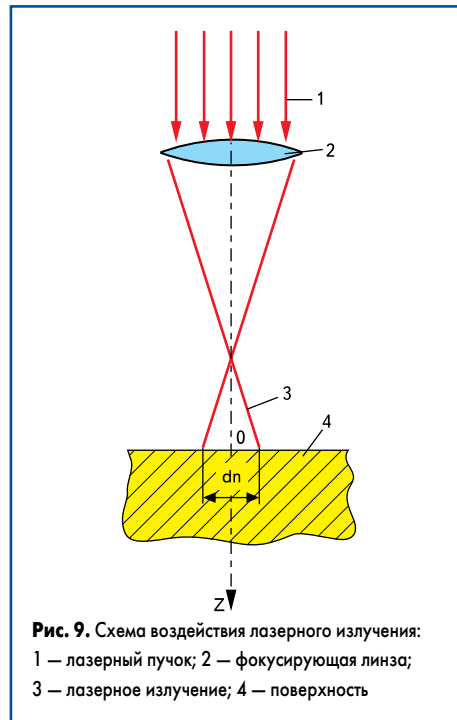


Рис. 9. Схема воздействия лазерного излучения: 1 — лазерный пучок; 2 — фокусирующая линза; 3 — лазерное излучение; 4 — поверхность

- КПД лазерного источника нагрева [6] $\eta_{\text{эф}} = 20\%$;
- мощность излучения диодного лазера $P_u = 20-30$ Вт;
- теплопроводность материала поверхности внешнего вывода (сплав 29Н18К) $\lambda_m = 0,18$ Вт/(м·К);
- теплоемкость материала вывода $c = 481$ Дж/(кг·К).

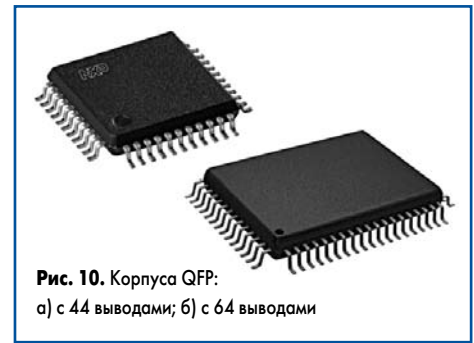


Рис. 10. Корпуса QFP: а) с 44 выводами; б) с 64 выводами

Используя формулу (5), получаем зависимость температуры в зоне нагрева при постоянной величине z от времени воздействия лазерного излучения (рис. 11). В том случае, если весь поток излучения отражается поверхностью ($z = 0$), поверхность тела практически не нагревается. С увеличением глубины проникновения лазерного луча ($z \geq 0,05$ мм) скорость нагрева растет до 1800 °С/с. При постоянном времени воздействия на участке ($0 < z \leq 0,04$ мм) (рис. 12) скорость роста температуры весьма значительна и составляет ≈ 2000 °С/мм. При дальнейшем проникновении вглубь материала скорость остается неизменной либо изменяется незначительно.

Таким образом, оптимальными параметрами воздействия лазерного излучения при формировании высокой плотности соединений внешних выводов интегральных микросхем являются следующие: $P_u = 20-30$ Вт; $r_n = 0,2-0,4$ мм; время действия лазерного излучения — 5–10 мс.

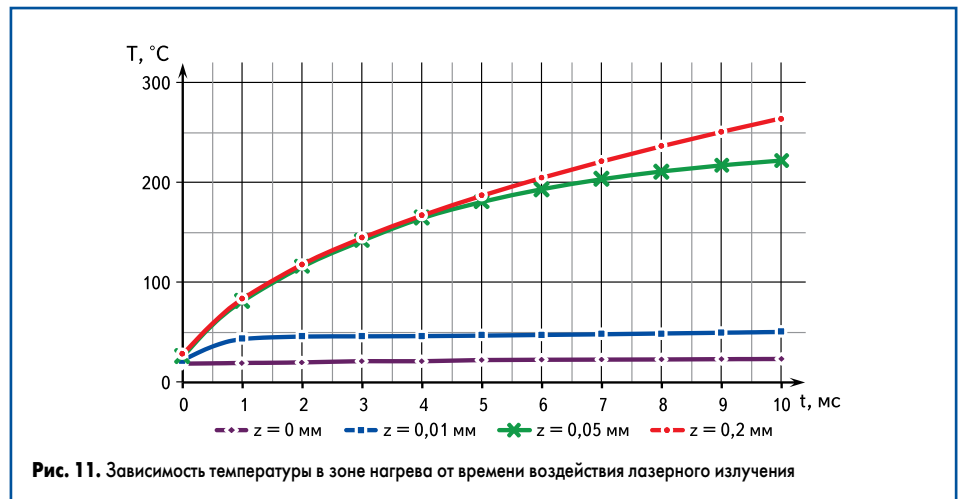


Рис. 11. Зависимость температуры в зоне нагрева от времени воздействия лазерного излучения

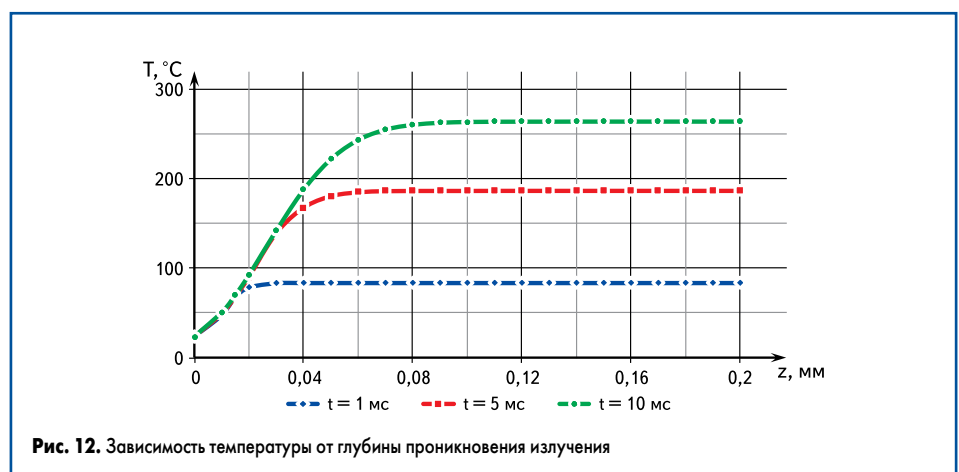


Рис. 12. Зависимость температуры от глубины проникновения излучения

Заключение

Современное состояние проблемы показывает, что в настоящее время технология лазерной пайки отработана, однако ее широкое применение в ряде случаев сдерживается соображениями экономического характера. Стоимость лазерных систем пока еще достаточно высока, что требует тщательного выбора области их применения. Экономически эффективное применение лазерного излучения определяется разумным выбором объекта пайки, где использование традиционных методов нецелесообразно.

Лазерную пайку следует применять, когда необходимо обеспечить стабильность температурно-временных режимов, гибкое регулирование подводимой тепловой энергии, отсутствие контакта с паяемым изделием, высокую производительность процесса, высокое качество и надежность паяных соединений. Лазерное излучение, сфокусированное в пятно диаметром около 0,8–1 мм, в сочетании с высокой плотностью мощности

излучения обеспечивает возможность пайки электронных компонентов, не допуская их перегрева и деформации печатных плат.

Литература

1. Джюд М., Бриндли К. Пайка при сборке электронных модулей. М.: ИД «Технологии», 2006.
2. Аллас А. А. Лазерная пайка в производстве электронной аппаратуры / Под ред. В. П. Вейко. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007.
3. Голдберг Г. Пайка диодным лазером: следующее поколение бесконтактной пайки // Электронные компоненты. 2004. № 11.
4. IPG Photonics — http://www.ipg.com/ire_polus
5. Брунс П., Кубаки Ф. Мощные диодные лазеры — новые возможности для применения // Фотоника. 2008. № 5.
6. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989.