

## ФИЗИКА

УДК 621.365.46:621.396.6

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНФРАКРАСНОГО НАГРЕВА ДЛЯ МОНТАЖА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

*д-р техн. наук, проф. В.Л. ЛАНИН, Т.Э. ЛАВОР, В.Т. ХОТЬКИН*  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Рассматривается применение современных электронных компонентов в микроминиатюрном исполнении, значительно повышающих плотность монтажных соединений в электронных модулях при монтаже компонентов на печатных платах, что заставляет применять бесконтактные методы нагрева, способные повысить качество соединений и устранить перегрев компонентов. Локальный нагрев инфракрасным излучением позволяет достаточно точно дозировать энергию нагрева в зоне пайки при условии оптимизации его параметров. Моделированием параметров инфракрасного нагрева в системе SolidWorks показана эффективность совместного применения кварцевого концентратора и защитной маски, что уменьшает потери излучаемой энергии и способствует ее концентрации в зоне монтажа электронных компонентов на плате.

**Введение.** В связи с прогрессирующей миниатюризацией электронных компонентов и модулей все большее значение приобретает качество монтажа компонентов на печатных платах. Несмотря на то, что технологии пайки постоянно совершенствуются, требования к качеству электромонтажных соединений растут еще быстрее. Большие трудности возникают для электронных модулей с плотным размещением поверхностно-монтажных компонентов SMD (Surface Mounted Devices) на печатной плате, что заставляет искать новые технологии, способные повысить качество пайки, увеличить ее скорость и снизить стоимость. Это особенно важно для корпусов BGA и печатных плат, которые нагреваются первыми, а затем тепло передается контактными площадкам и сферическим BGA-выводам для формирования паяных соединений (рис. 1). Во избежание теплового удара компоненты не должны перегреваться, а контактные площадки и плавкие выводы BGA должны быть нагреты до температуры, достаточной для образования паяного соединения [1].

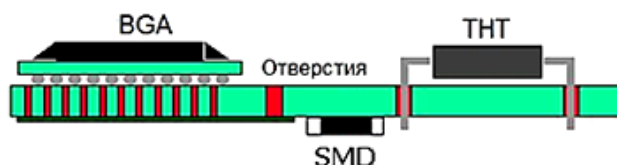


Рис. 1. Монтаж компонентов BGA, SMD и THT на плате

Одна из совершенных в настоящее время технологий пайки – локальная инфракрасная (ИК), когда нагрев производится сфокусированным пучком ИК-излучения только в местах пайки. Установки локальной ИК-пайки состоят из двух нагревателей, один из которых подогревает плату снизу до сравнительно невысокой температуры, а другой, верхний, осуществляет в нужный момент быстрый локальный нагрев требуемой области платы до температуры плавления припоя. Применение ИК-пайки является перспективным направлением в технологии поверхностного монтажа, так как обеспечивает уменьшение затрат на эксплуатацию оборудования при одновременном повышении качества паяных соединений [2].

Из всего спектра ИК-излучения с длинами волн в диапазоне 0,72...1000 мкм для пайки используется только малая часть этого диапазона: близкое излучение 0,7...1,5 мкм, среднее излучение 1,5...5,6 мкм и дальнее – 5,6...10,0 мкм. Длина волны ИК-излучения зависит от температуры источника излучения (при высоких температурах нагрева излучение имеет меньшую длину волны). Температура нагрева тела будет в общем случае зависеть от длины волны излучения, степени черноты или его отражающей способности, длительности облучения и от массы тела. Чем короче длина волны излучения, тем глубже оно проникает в тело, поэтому близкое ИК-излучение будет обеспечивать более глубокое его проникновение по сравнению со средним и дальним [3].

При практическом применении ИК-излучения возникли определенные проблемы:

- неравномерность нагрева различных компонентов на поверхности платы из-за разной степени поглощения энергии;

- невоспроизводимость режимов нагрева вследствие рассогласования спектра излучения источника и спектров поглощения компонентов и платы;
- наличие затененных участков платы, где нет прямого ИК-излучения;
- необходимость защиты ИК-излучателей от испаряющихся флюсов.

Первые разработки в области применения ИК-нагрева для пайки основывались на использовании в качестве излучателей ИК-ламп с температурой излучающего тела, превышающей 800...1100 °С. Так как температура пайки обычно находится в диапазоне 220...240 °С, то режимы нагрева значительно отличались от равновесных, что приводило к возникновению перегрева участков на поверхности платы, связанных с различной степенью черноты, массой компонентов и другими причинами [3]. Чаще всего ИК-установки работают в условиях воздушной атмосферы, однако присутствие кислорода в зоне пайки не всегда желательно, так как может происходить окисление припоя и разрушение органических материалов. Поэтому при пайке в воздушной атмосфере ограничивается длительность цикла нагрева, которая не должна превышать 100...150 с [4]. Перспективно применение при ИК-пайке азота с малым содержанием кислорода и водородно-азотной смеси. При этом улучшается качество пайки за счет исключения окисления припоя, повышения активности флюса, возрастает также краевой угол смачиваемости флюса, что уменьшает количество флюса, затекающего под корпуса элементов, остаточные ионные загрязнения на платах, упрощает очистку печатных плат.

**Моделирование параметров инфракрасного нагрева.** Экспериментальная проверка работоспособности ИК-устройств на реальных объектах довольно дорога, а зачастую невозможна не только по экономическим, но и по конструктивным соображениям. В таких случаях моделируют теплообмен с помощью прикладных пакетов. В модуле Flow Simulation, интегрированном в систему SolidWorks, можно моделировать геометрию ИК-нагревателей и выполнять тепловые расчеты и анализы «в одном окне». Это значительно снижает вероятность возникновения ошибок импорта/экспорта через промежуточный формат данных (SAT, IGES и т. д.).

Обычно ИК-излучатели имеют ограниченную площадь, при этом зона наибольшего нагрева находится непосредственно под нагревателем. Теплопередача излучением является эффективным и мощным механизмом передачи тепла:

$$T(K)E = bT^4, \tag{1}$$

где  $E$  – тепловая энергия излучения, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры;  $b$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $T$  – температура источника излучения.

Длину волны ИК-излучения источника нагрева обычно выбирают среднюю из диапазона, для которой рассчитывают интенсивность излучения:

$$I = \frac{C_1}{\lambda_5} \left( \frac{C_2}{e^{\lambda T} - 1} \right)^{-1}, \tag{2}$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные Планка;  $\lambda$  – длина волны излучения.

Методика анализа ИК-нагрева в SolidWorks включает: создание геометрической модели, задание свойств материалов и граничных условий, настройку опций расчета, настройку сетки и просмотр результатов. Для решения поставленной задачи в программном пакете SolidWorks используют метод конечных объемов [5]:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \nabla(\rho U_\varphi) - \nabla(D_\varphi \varphi) = S_\varphi, \tag{3}$$

где  $\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t}$  – изменение физической величины  $\varphi$ ;  $\nabla(\rho U_\varphi)$  – конвективное слагаемое в законе сохранения величины  $\varphi$ ;  $\nabla(D_\varphi \varphi)$  – диффузное слагаемое в законе сохранения величины  $\varphi$ ;  $S_\varphi$  – источниковое слагаемое в законе сохранения величины  $\varphi$ .

Первым этапом алгоритма моделирования нагрева является создание трехмерной модели ИК-нагрева печатной платы с установленными на ней электронными компонентами (рис. 2, а). Для моделирования выбраны керамические ИК-панели (рис. 2, б), которые обладают возможностью отдавать высокую мощность при хорошей равномерности нагрева. Для оптимизации работы расчетного модуля Flow Simulation пакета SolidWorks Premiumx64 Edition [6] необходимо построить геометрическую модель, состоящую из печатной платы, паяемого компонента, верхнего и нижнего ИК-нагревателей.

Для достижения более эффективного использования излучаемой энергии применен кварцевый концентратор энергии, который локализует ИК-излучение от нагревателя на печатной плате.

На этапе подготовки моделирования процесса ИК-пайки устанавливают параметры расчетного домена (Computational Domain), указывают область, заполненную воздухом (Fluid Subdomain), выбирают материалы каждой детали сборки с необходимыми для инженерного расчета параметрами. Источниками

тепла (Heat Sources) являются нижний и верхний нагреватели, для которых выбирают значения мощности из диапазона ее варьирования. Далее указываются поверхности, получающие ИК-излучение от нагревателей (Radiative Surfaces), типы источников излучения (Radiative Sources), интенсивность их излучения и мощность. В месте пайки электронного компонента на плату указывается контактное тепловое сопротивление (Contact Resistances) для адекватности анализа. Для ускорения моделирования устанавливают начальную температуру печатной платы, равную предполагаемой температуре предварительного нагрева (Initial Conditions).

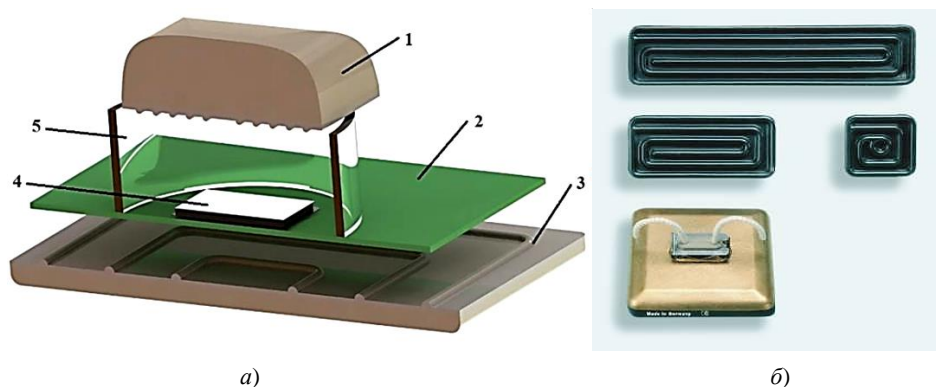


Рис. 2. Геометрическая модель ИК-нагрева (а) и керамические ИК-нагреватели (б):  
1 – верхний нагреватель; 2 – печатная плата; 3 – нижний нагреватель;  
4 – паяемый компонент; 5 – кварцевый концентратор энергии

Целевыми функциями оптимизации параметров ИК-нагревателей (при значениях мощности 500, 750 и 1000 Вт и на расстоянии от нагревателя до печатной платы 20 и 30 мм) являются более эффективное использование ИК-излучения и минимизация нагрева электронных компонентов для снижения теплового удара. Распределение температур на поверхности платы и на поверхности паяемого электронного компонента (на расстоянии до платы 20 мм) в обычном режиме приведено на рисунке 3 (а); при использовании кварцевого концентратора и маскирующей пластины – на рисунке 3, б.

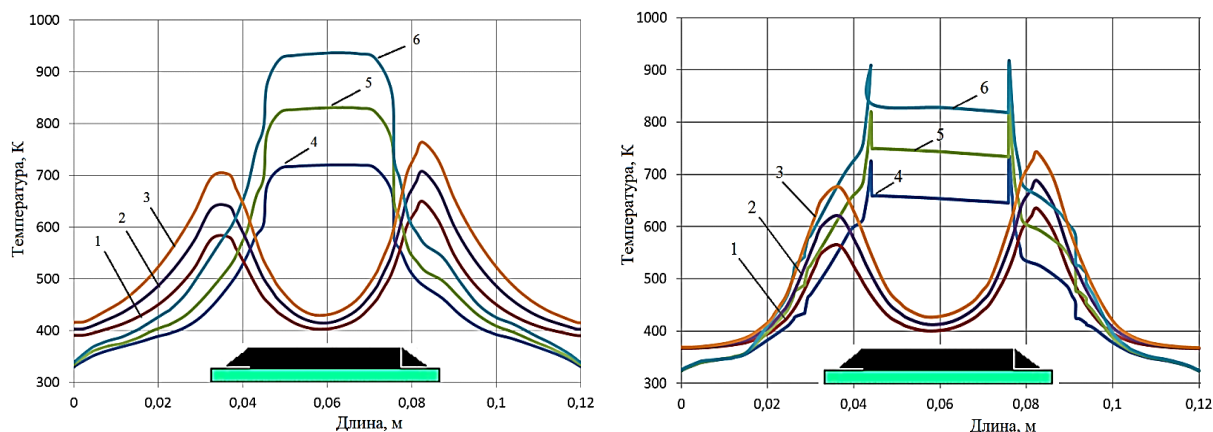


Рис. 3. Распределение температуры печатной платы (1, 2, 3) и электронного компонента (4, 5, 6) при мощности нагревателя 500, 750, 1000 Вт соответственно:  
а – в обычном режиме; б – при использовании кварцевого концентратора и маскирующей пластины

Задача оптимизации температуры нагрева электронного компонента решается с учетом комбинаций влияющих факторов:  $x_1$  – расстояния до платы,  $x_2$  – мощности нагревателя методом наименьших квадратов в MathCAD.

Влияние комбинаций факторов на нагрев электронного компонента

$x_1$ , мм	25,50	26,00	26,50	27,00	27,50	28,00	28,50	29,00	29,50
$x_2$ , Вт	445,76	477,29	513,77	556,09	605,47	663,70	733,52	819,65	931,58
y, К	659,26	664,91	671,45	679,08	688,10	698,92	712,22	729,17	752,17

Полученную таблицу комбинаций факторов решением функции в заданном диапазоне аргументов с заданным шагом подставляют в функцию нагрева электронных компонентов и определяют ее поведение при воздействии различных комбинаций влияющих факторов.

Уравнения регрессии для нагрева печатной платы, полученные методом наименьших квадратов в пакете MathCAD: в обычном режиме (а), с кварцевым концентратором (b) и с кварцевым концентратором и маской (с), имеют вид:

$$a) \quad a(x_1, x_2) = 36,97x_1 + 0,602x_2 - 0,015x_1x_2 - 0,813x_1^2 - 2,702 \cdot 10^{-5} x_2^2;$$

$$b) \quad b(x_1, x_2) = 35,198x_1 + 0,454x_2 - 0,011x_1x_2 - 0,673x_1^2 - 1,366 \cdot 10^{-6} x_2^2;$$

$$c) \quad c(x_1, x_2) = 40,624x_1 + 0,216x_2 - 8,094 \cdot 10^{-3} x_1x_2 - 0,811x_1^2 - 1,364 \cdot 10^{-4} x_2^2.$$

Получены уравнения равного выхода для нагрева печатной платы на уровне 523 К для тех же условий:

$$f_a(x_1) = 11143,61 - 18507,83\sqrt{1,33 \cdot 10^{-4} x_1^2 - 0,014x_1 + 0,307} - 275,28x_1;$$

$$f_b(x_1) = 166124,341 - 366139,43\sqrt{1,12 \cdot 10^{-4} x_1^2 - 0,0096x_1 - 0,203} - 394,97x_1;$$

$$f_c(x_1) = 29,67 + 3665,59\sqrt{5,08 \cdot 10^{-4} x_1^2 - 0,026x_1 + 0,328} - 791,1.$$

Минимум нагрева паяемого электронного компонента достигнут при использовании кварцевого концентратора и алюминиевой маскирующей пластины (рис. 4).

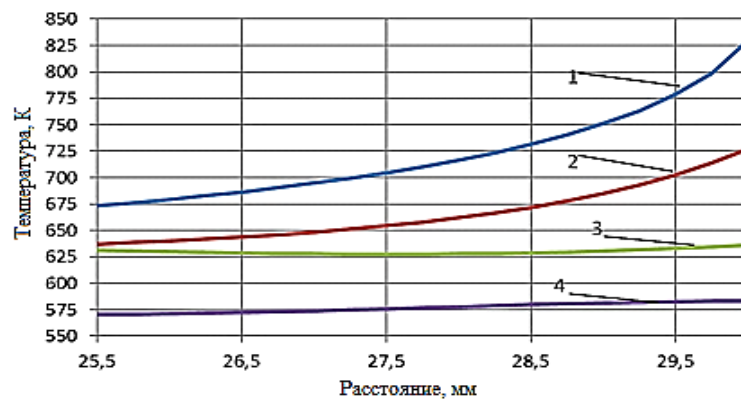


Рис. 4. Температура электронного компонента в зависимости от комбинаций влияющих факторов: 1 – обычный режим; 2 – с маской; 3 – с кварцевым концентратором; 4 – с кварцевым концентратором и маской

В диапазоне мощности ИК-нагревателя 500...1000 Вт оптимальное расстояние между нагревателем и платой равно 28,75 мм. Этому соответствует распределение температур, приведенное на рисунке 5.

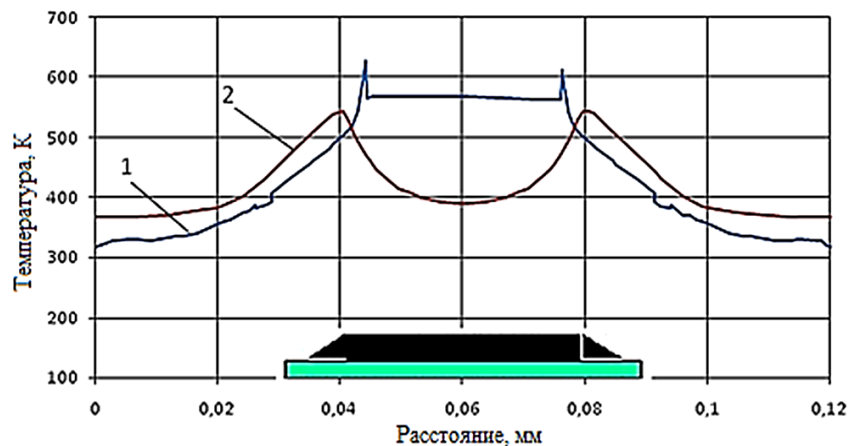


Рис. 5. Распределение температуры электронного компонента (1) и печатной платы (2) в оптимальном режиме

Таким образом, можно утверждать, что использование кварцевого концентратора уменьшает потери излучаемой ИК-энергии и способствует ее концентрированию на площадках для пайки. В результате температура нагрева в зоне монтажа компонента увеличивается на 13...15 %, а нагрев печатной платы снижается на 15...17 %.

#### **Выводы**

1. Бесконтактный нагрев инфракрасным излучением позволяет достаточно точно дозировать энергию нагрева в зоне пайки электронных компонентов при условии оптимизации его параметров. Применение SolidWorks для моделирования процесса нагрева ИК-излучением позволяет адекватно описывать реально происходящие процессы при пайке электронных компонентов на печатных платах, включая процессы нагрева компонентов, соединений и печатной платы.

2. В результате моделирования параметров инфракрасного нагрева установлено: применение кварцевого концентратора повышает эффективность процесса пайки, так как снижаются потери излучаемой ИК-энергии и происходит ее концентрация в рабочей зоне; в результате температура нагрева в зоне монтажа компонента увеличивается на 13...15 %, а нагрев платы снижается на 15...17 %; минимальный нагрев многовыводного электронного компонента в диапазоне мощности инфракрасного нагревателя 500...1000 Вт при оптимальном расстоянии от нагревателя до платы 28,75 мм и применении защитной маски.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Wassink, K.R. J. Soldering in Electronics / K.R.J. Wassink. – Ayr, Scotland. Electrochem. Publ. 2002. – 285 p.
2. Джюд, М., Пайка при сборке электронных модулей / М. Джюд, К. Бридли; пер. с англ. – М.: Издат. Дом «Технологии», 2006. – 416 с.
3. Ланин, В.Л. Электромонтажные соединения в электронике. Технология, оборудование, контроль качества / В.Л. Ланин, В.А. Емельянов. – Минск: Интегралполиграф, 2013. – 406 с.
4. Ланин, В.Л. Инфракрасный нагрев в технологии пайки изделий электроники / В.Л. Ланин // Электронная обработка материалов. – 2007. – № 5. – С. 91 – 96.
5. Патанкар, С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течи в каналах / С.В. Патанкар; пер. с англ. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 312 с.
6. SolidWorks 2007-2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.

*Поступила 13.09.2013*

#### **OPTIMIZATION OF INFRA-RED HEATING PARAMETERS FOR INSTALLATION OF ELECTRONIC COMPONENTS**

**V. LANIN, T. LAVOR, V. KHOTSKIN**

*Application of modern electronic components in micro miniature execution considerably raises density of assembly connections in electronic modules at installation of components on printed-circuit boards that forces to apply contactless methods of the heating, capable to raise quality of connections and to eliminate an overheat of components. Local heating by infra-red radiation allows to dose out precisely enough energy of heating to a zone of the soldering under condition of optimization of its parameters. By simulation of parameters of infra-red heating in SolidWorks efficiency of application of the quartz concentrator which reduces losses of radiated energy is shown and promotes its concentration in a zone of installation of electronic components on printed circuit board.*