

## ИНФРАКРАСНЫЙ НАГРЕВ В ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь*

Инфракрасное (ИК) излучение, обеспечивая высокую скорость локального бесконтактного нагрева и эффективность управления температурным профилем, наиболее перспективно для групповых технологий пайки. Из всего спектра ИК излучения с длинами волн в диапазоне 0,72–1000 мкм для пайки используется только небольшая часть диапазона: близкое – 0,72–1,5 мкм, среднее – 1,5–5,6 и дальнее излучение – 5,6–10,0 мкм. Температура нагрева тела зависит от длины волны излучения, степени черноты или его отражающей способности, длительности облучения и массы. Интенсивность спектрального излучения ИК источника определяется как [1]:

$$I_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} \left( e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\lambda}$  – спектральная степень черноты излучателя,  $C_1$ ,  $C_2$  – постоянные Планка,  $T$  – температура излучателя.

Чем короче длина волны излучения, тем глубже оно проникает в тело, поэтому близкое ИК излучение обеспечивает более глубокое его проникновение по сравнению со средним и дальним. Различные материалы по-разному адсорбируют ИК энергию. Различают четыре условия передачи ИК энергии телу: отражение, непрозрачность, прозрачность и полупрозрачность. Поток энергии ИК спектра, достигая поверхности тела, частично отражается, частично поглощается и частично проходит через тело:

$$\Phi_{\text{пад}} = \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{прох}}. \quad (2)$$

В прозрачном материале ИК энергия проходит через него, не вызывая нагрева, в полупрозрачном – проникает на определенную глубину, вызывая нагрев тела. Эффективная мощность нагрева ИК излучением [2]:

$$P = k \cdot \varepsilon \cdot S \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где  $k$  – константа Стефана-Больцмана,  $\varepsilon$  – излучательная способность тела,  $S$  – площадь тела,  $\Delta T$  – изменение температуры.

Из-за особенностей ИК излучения возникли проблемы в практическом применении его в групповой технологии пайки изделий электроники:

- неравномерность нагрева различных электронных компонентов вследствие разной степени поглощения энергии;
- невоспроизводимость режимов нагрева из-за рассогласования спектра излучения источника и спектров поглощения компонентов и платы;
- необходимость оптимизации режимов нагрева плат различной геометрии и массы, а также защиты поверхности ИК излучателей от испаряющихся флюсов;
- наличие затененных участков платы, где отсутствует прямое ИК излучение.

Первые разработки в области применения ИК нагрева для пайки основывались на использовании ИК ламп с температурой излучающего тела, превышающей 800–1100 °С. Так как температура пайки обычно находится в диапазоне 210–215 °С, то режимы нагрева значительно отличались от равновесных, что приводило к перегреву участков на поверхности платы, связанных с различной степенью черноты и массой компонентов.

Лампы ИК излучения представляют собой вольфрамовую спираль, размещенную внутри герметичной кварцевой трубки, наполненной инертным газом. Чаще всего они устанавливаются внутри рефлектора, отражающего излучение на нагреваемый объект. Лампы и рефлекторы излучают в основном ИК энергию среднего, меньше ближнего и совсем мало дальнего спектра. Эта энергия составляет более 90% энергии, идущей на нагрев тела. Так как воздух практически прозрачен для ИК излучения, то он практически не нагревается, поэтому конвективная составляющая минимальна. Основные достоинства нагрева лампами ИК излучения: высокая скорость, низкая инерционность, возможность оперативного изменения температурно-временного профиля нагрева, относительная простота оборудования.

Атмосфера в зоне ИК пайки также оказывает влияние на ее качество. Чаще всего ИК установки работают в условиях воздушной атмосферы, однако присутствие кислорода в зоне пайки не всегда желательно, так как могут происходить окисление припоя и разрушение органических материалов. Поэтому в воздушной атмосфере ограничивается длительность цикла нагрева, который не должен превышать 100–150 с. Перспективно применение инертной среды: азота с малым содержанием кислорода и водородно-азотной смеси, что улучшает качество пайки за счет исключения окисления припоя, увеличения активности флюса и уменьшения количества остаточных ионных загрязнений на платах [3].

В технологии ИК пайки применяют три разновидности конструкций установок, отличающихся видом излучателей: ламповые, панельные и комбинированные [4]. Первые содержат несколько зон нагрева, в них установлен ряд трубчатых ИК ламп снизу и сверху транспортера, на котором размещаются монтируемые платы (рис. 1). В зоне оплавления располагается большее количество ламп, заключенных в отражающие рефлекторы, что позволяет создать большую плотность ИК излучения. В зоне предварительного нагрева лампы располагаются реже, что обеспечивает плавный режим нагрева и выравнивание температуры компонентов. Для удаления летучих соединений, образующихся при пайке, на выходе и входе из зоны нагрева используется система вытяжной вентиляции. На выходе находится система принудительного охлаждения плат.

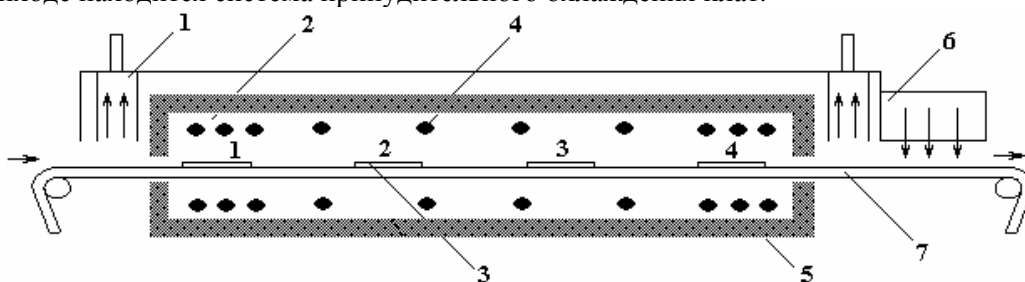


Рис. 1. Установка лампового ИК нагрева: 1 – вытяжная вентиляция, 2 – матрица ИК ламп, 3 – плата, 4 – ИК лампа, 5 – отражатель, 6 – устройство охлаждения, 7 – конвейер

Аналогичную конструкцию имеют установки с панельным ИК нагревом в виде керамических панелей различной мощности, что позволяет осуществлять формирование необходимого температурно-временного профиля нагрева, но с меньшей степенью гибкости. Конструкция ИК панельного нагревателя включает три слоя. Лицевая сторона изготавливается из стекла, керамики или металла, и в зависимости от применяемого материала она может выполнять функции вторичного излучателя или прозрачного окна. Второй слой, или первичный нагреватель, изготавливается в виде фольги или спирали из резистивного материала. Третий слой из тугоплавкой керамики является изоляционным.

Широкое применение нашли панельные излучатели Panel IR System, работающие в среднем и дальнем спектре излучения 3–10 мкм, которые конструктивно представляют собой нагреваемые керамические панели больших размеров, работающие при температуре 200–450 °С [5]. Такие установки содержат воздушные камеры или камеры с инертным газом, поэтому 60% тепловой энергии к нагреваемым объектам доставляется за счет конвекции, а 40% – за счет ИК излучения среднего и дальнего спектра. Малая разница температур излучателя и объекта обеспечивает нагрев в равновесном режиме, однако теряются такие достоинства, как безинерционность и гибкость регулирования режимов.

В установках панельного типа нагрев производится как за счет излучения, так и конвекции, потому что ИК излучение в спектре 5–8 мкм хорошо поглощается воздухом. Установки такого типа могут содержать несколько зон предварительного нагрева с расположением нагревателей с одной или двух сторон конвейера, что повышает скорость конвейера. Панельные нагреватели обеспечивают более равномерный нагрев плат, кроме того, средний и дальний ИК спектр не чувствителен к цвету

нагреваемых объектов (при температуре ниже 600°C). Такие нагреватели менее чувствительны к нагрузке зоны нагрева. Недостатком установок является их инерционность к изменению режимов и профиля зоны нагрева, так как каждая из панелей имеет неравномерное температурное поле по площади поверхности. В частности, панели с металлической лицевой частью имеют более низкую температуру по краям, в то время как панели с прозрачной для ИК излучений лицевой поверхностью имеют большую температуру в зоне кромок.

Большую гибкость и возможность использования преимуществ лампового и панельного нагрева обеспечивают комбинированные системы, в которых панельные и ламповые ИК нагреватели образуют необходимое количество зон нагрева. В первой и второй зонах осуществляется предварительный нагрев изделия с помощью панельных нагревателей, обеспечивающих равномерный нагрев и заданную температуру. Расплавление припойной пасты происходит в третьей зоне с помощью кварцевых ИК ламп, после чего изделие охлаждается в четвертой зоне. Печатные платы транспортируются через установку на ленточном конвейере. Установки снабжены встроенной микропроцессорной системой для программного управления режимами нагрева плат, контроля всех систем с отображением результатов на дисплее.

ИК установки типа “Радуга”, предназначенные для оплавления припойных паст при сборке плат с применением поверхностно монтируемых компонентов, позволяют осуществлять пайку как с одной стороны, так и одновременно с двух сторон печатной платы. Установки состоят из нагревательной камеры с регулируемой температурой плоских нагревателей 100–300 °С и пульта управления. Конструкция установки предусматривает ручную подачу печатных плат. Измеритель температуры, регулирующий ТРМ-10 совместно с микропроцессорным управлением, обеспечивает точность поддержания температуры. Значения температуры на поверхности нагревателей измеряются термопарой ХК и используются входными параметрами системы регулирования. Временной интервал пайки задается цифровым таймером МТЦ 3501. Измеритель температуры ИТ 2511 контролирует температурный режим печи во времени.

Конвейерная установка ИК пайки “Радуга-21” состоит из 5-зонной нагревательной камеры с регулируемой по зонам температурой пайки ИК нагревателей; конвейера с регулируемой скоростью для подачи печатных плат с установленными элементами в нагревательную камеру; пульта управления; загрузочного и разгрузочного устройств; электрооборудования. Установка с шириной конвейера 400 мм, длиной нагревательной камеры 1100 мм при скорости конвейера от 0,015 до 2 м/мин обеспечивает равномерность нагрева платы шириной 350 мм ± 2 °С в направлении, перпендикулярном движению.

В устройствах ИК пайки, состоящих из нижнего нагревателя, размещенного под платой и предназначенного для предварительного нагрева ее до температуры 100 °С, и верхнего излучателя с системой фокусировки теплового излучения для нагрева монтируемых компонентов до температуры оплавления припоя в пределах 220–260 °С, необходима оптимизация температурных профилей (рис. 2). Оптимизируются такие технологические параметры, как скорость нагрева в рабочей зоне в зависимости от мощности нагревателей и их расстояния до платы, интенсивность и локальность нагрева. Образцами паяемых изделий служат печатные платы, в металлизированные отверстия которых закрепляют микротермопары типа ХК, соединенные с цифровыми измерителями температуры, либо платы с установленными SMD, такими как чип резисторы, диоды, стабилитроны, конденсаторы, микросхемы.

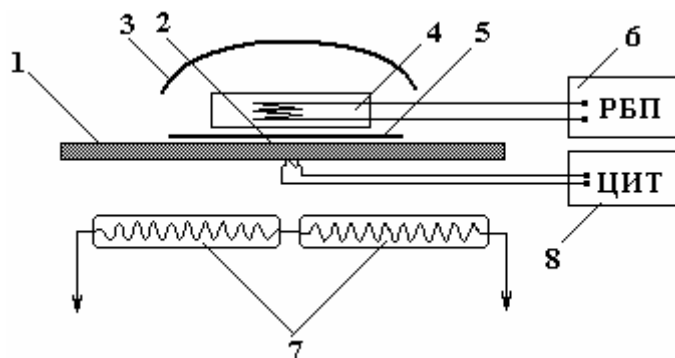


Рис. 2. Схема оптимизации профилей ИК нагрева: 1 – плата, 2 – термопара, 3 – рефлектор, 4 – верхний нагреватель, 5 – маска, 6 – регулируемый блок питания, 7 – нижний ИК нагревателя, 8 – цифровой измеритель температуры

Скорость нагрева верхнего нагревателя мощностью 500 Вт с рефлектором составляет 3–5 °С/с; верхнего и нижнего нагревателя мощностью 500 Вт – до 10 °С/с. Применение защитной маски повышает скорость нагрева до 15 °С/с за счет отражения, увеличивая степень локализации нагрева. Дальнейшее увеличение скорости нагрева возможно за счет улучшения качества параболических рефлекторов и повышения их отражающей способности. Скорость роста температуры в зоне пайки снижается с увеличением расстояния от ИК нагревателя до платы: для верхнего в 2 (рис. 3) и для нижнего в 3 раза (рис. 4).

Исследована равномерность зоны теплового поля нагрева верхних и нижних ИК нагревателей. Изотермические зоны: центральная со скоростью нагрева >5 °С/с имеет форму круга, последующие зоны – овальные, что обусловлено прямоугольной формой рефлектора (рис. 5,а). На рис. 5,б изображены зоны теплового поля ИК нагревателя с маской прямоугольной формы 4×4 мм. Изотермы имеют квадратную форму со стороной 6 мм при  $V > 3$  °С/с, 12 при  $V = 2,2$  и 18 мм при  $V < 1$  °С/с. Применение отражающих экранов различной формы увеличивает локальность нагрева. Наибольшая скорость нагрева 15 °С/с достигается при снижении расстояния от платы до верхнего ИК нагревателя. Применение качественного отражающего рефлектора для ИК источника позволяет при той же интенсивности нагрева вдвое уменьшить потребляемую мощность и заменить водяное охлаждение воздушным принудительным.

Повышение локальности ИК нагрева за счет светоотражающей маски не оказывает существенного влияния на скорость роста температуры, уменьшая в целом только нагрев платы. Оптимальные режимы ИК пайки следующие: предварительный нагрев нижним нагревателем платы до 90–110 °С со скоростью 6–8 °С/с, нагрев верхним и нижним нагревателями до температуры пайки со скоростью 10–14 °С/с. При необходимости локализации нагрева для термочувствительных элементов применяют светоотражающую маску.

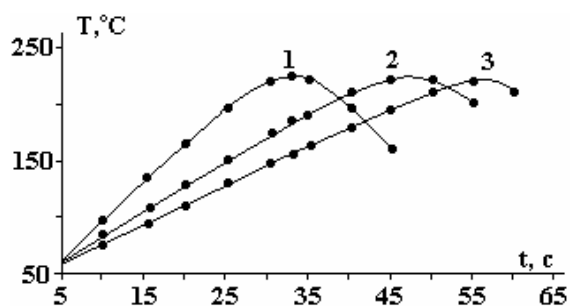


Рис. 3. Температурные зависимости в зоне нагрева верхнего ИК излучателя при расстояниях до платы, мм: 1 – 15, 2 – 25, 3 – 35

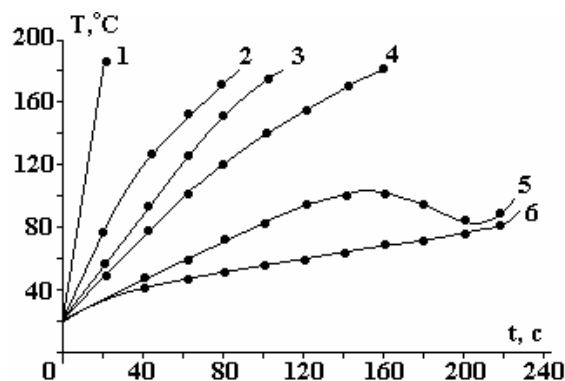


Рис. 4. Температурные зависимости в зоне нагрева нижнего ИК излучателя при расстояниях до платы, мм: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 40, 5 – 50, 6 – 60

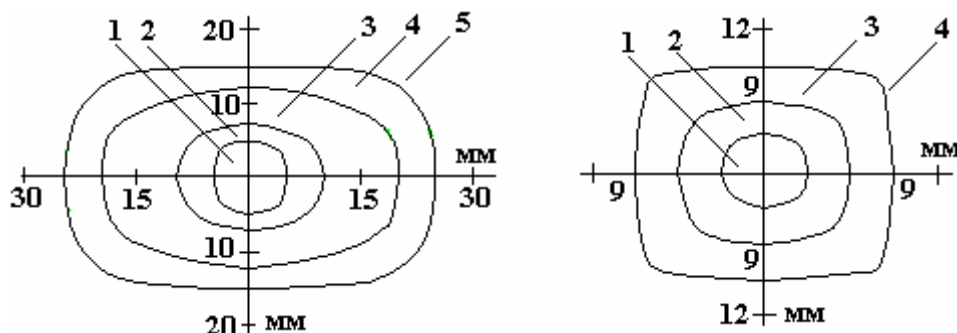


Рис. 5. Зоны теплового поля  $V$  верхнего излучателя, °С/с :  
 а): 1 – >5 ; 2 – =5 ; 3 – =3,8 ; 4 – =3,3 ; 5 – <2,2 ;  
 б): 1 – >4 ; 2 – =2,2 ; 3 – =1,1 ; 4 – <0,5

Режимы пайки оплавлением паяльных паст определяются температурным профилем, который оптимизирован для ИК печей (рис. 6). Стадия предварительного нагрева снижает тепловой удар на электронные компоненты и печатные платы. При скорости нагрева не более 1–3 °С/с происходит испарение растворителя из паяльной пасты. Высокая скорость нагрева приводит к преждевременному

испарению растворителя и целому ряду дефектов: повреждению компонентов за счет теплового удара, разбрызгивания шариков припоя и возникновению перемычек. Разница температур предварительного нагрева и оплавления не должна превышать 100 °С.

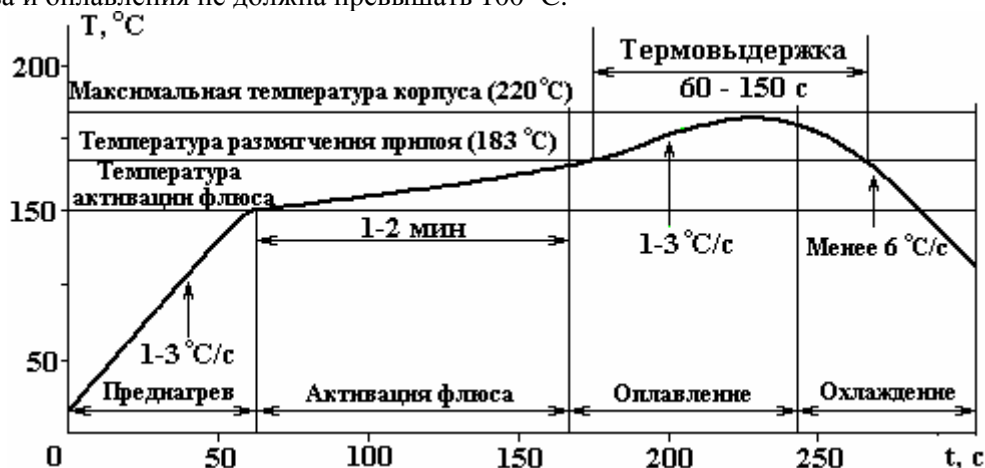


Рис. 6. Оптимальный температурный профиль пайки ИК нагревом для оловянно-свинцовых припоев

Стадия стабилизации активизирует флюсующую составляющую и удаляет избыток влаги из паяльной пасты. Повышение температуры на этой стадии происходит со скоростью 0,6 °С/с для нагрева всех компонентов на плате до одинаковой температуры. На стадии активации флюса (60–120 с) происходит удаление оксидной пленки с паяемых поверхностей. При более коротком времени могут образовываться дефекты типа «холодная пайка». На стадии оплавления температура повышается до расплавления паяльной пасты и происходит формирование паяного соединения. Для образования надежного паяного соединения максимальная температура пайки должна превышать на 30–40 °С температуру плавления пасты. Для предотвращения таких дефектов, как холодная пайка или перемычки припоя, необходимо выдержать температуру корпусов электронных компонентов выше температуры расплавления припоя в течение 10–30 с. Скорость нагрева от момента достижения платой температуры плавления припоя до максимальной не должна превышать 1–3 °С/с.

Быстрое охлаждение уменьшает образование интерметаллидных соединений, однако при слишком большой скорости охлаждения возникают термические напряжения, приводящие к повреждению компонентов. Скорость охлаждения платы не должна превышать 6 °С/с. Окончательный выбор режимов производится с учетом конструкции печатной платы, типа и размеров компонентов, количества компонентов на плате, особенностей оборудования, результатов экспериментальных паяк, типа паяльной пасты.

Для измерения температурного профиля ИК установки групповой пайки применен цифровой трехканальный термометр ТЕРМОСКОП ТА-570м, обеспечивающий построение термографиков в реальном масштабе времени на экране компьютера с передачей данных по каналу связи RS-232C и одновременной индикацией измеренных значений на встроенном дисплее. Датчиками температуры выбраны миниатюрные высокоточные платиновые терморезисторы стандарта DIN EN60751, которые в отличие от термопар подключаются без соблюдения полярности. Отпадает проблема с подгонкой термопар различного типа и не требуется дополнительно холодный спай. Термопары при установке на плоскую поверхность имеют точечный контакт, в отличие от этого терморезисторы, имеющие форму прямоугольника, обеспечивают хороший тепловой контакт по всей плоскости и поэтому более точно отображают температуру элементов. Прибор имеет диапазон измерения температуры до +500 °С и разрешающую способность: в автономном режиме 1 °С, при работе с компьютером 0,1 °С. Основная погрешность измерения прибора в диапазоне температур до (350 ± 2) °С; периодичность замеров в автономном режиме 1,5 с.

Анализ термопрофиля пайки показал, что общая длительность процесса составляет 240 с (рис. 7). Стадия предварительного нагрева длительностью 120 с с градиентом роста температуры 1 °С/с обеспечивает защиту электронных компонентов от теплового удара. Стадия термостабилизации в течение 70 с при градиенте температуры 0,5 °С/с создает равномерный прогрев всех компонентов на плате, что предотвратит появление таких дефектов, как «холодная пайка» и «надгробный камень». Стадию оплавления плата с компонентами проходит за 80 с. На всех паяемых элементах дос-

тигнуты одинаковые значения пиковой температуры, равной 225<sup>0</sup>С. Выдержка при пиковой температуре в течение 15 с обеспечивает качество всех паяных соединений.

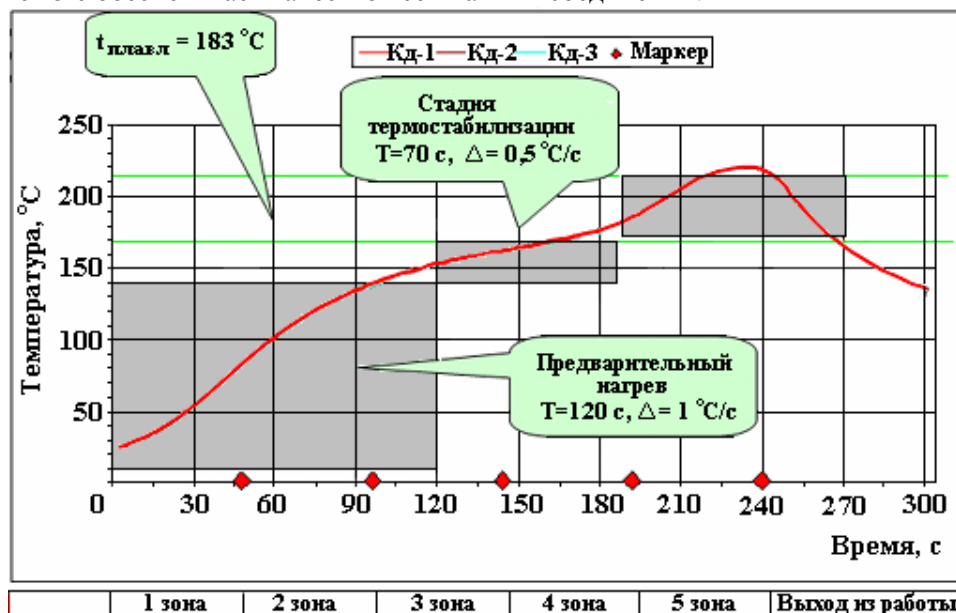


Рис. 7. Температурный профиль ИК нагрева установки “Радуга-21”

Стадия охлаждения имеет градиент снижения температуры 2<sup>0</sup>С/с, что приемлемо для припоев на основе сплавов олово–свинец. Однако для бессвинцовых припоев с содержанием олова до 96% для предотвращения образования интерметаллидных соединений и роста «усов» олова необходимо обеспечивать принудительное охлаждение платы с градиентом 4<sup>0</sup>С/с. Анализ причин возникновения дефектов поверхностного монтажа показывает, что одной из причин их образования является неоптимальность температурного профиля пайки.

Применение ИК пайки является новым перспективным направлением в технологии поверхностного монтажа (SMT), которое обеспечивает уменьшение затрат на эксплуатацию оборудования при одновременном повышении качества паяных соединений. ИК нагрев выгодно отличается тем, что имеет более простое оборудование, которое намного экономичнее и целесообразнее для поверхностного монтажа изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зворыкин Д.Б., Прохоров Ю.И. Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности. М.: Энергия, 1980.
2. Henderson I., Browne V. IR Plus Hot Platen Heating Offers Another Option for Reflow Soldering / EPP, 1989. V. 29, №9. P. 78–80.
3. Wassink K.R.J. Soldering in Electronics. Ayr, Scotland, Electrochem. Publ., 1989.
4. Технология поверхностного монтажа // С.П. Кундас, А.П. Достанко, Л.П. Ануфриев и др. Мн.: Армита, 2000.
5. Manko H.H. Solders and Soldering: Materials, design, production and analysis for reliable bonding. N.Y., 2000.
6. Ланин В.Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов. 2002. № 2. С.17–20.
7. Ланин В.Л., Капранов В.В. Инфракрасный нагрев в технологии поверхностного монтажа // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы III Международной научно–техн. конф., т. 1. Новополоцк, 2004. С.81–84.
8. Ланин В.Л., Хилькевич А.Н. Двусторонний поверхностный монтаж электронных модулей // Известия Белорусской инженерной академии. 2003. № 1(15)/4. С.145–147.

Поступила 05.04.07

## Summary

Parameters of infrared heating for the soldering of surface mount electronics devices are investigated and optimized. IR radiations heating have some advantages: high speed, low inertness, relative simplicity of the equipment, and an opportunity of operative change of a temperature-time structure of heating.