

Оптимизация профиля оплавления с помощью анализа возникающих дефектов. Часть 1

В статье рассматриваются механизмы образования дефектов, изучаются причины их появления. Это поможет спроектировать каждый этап процесса так, чтобы минимизировать количество дефектов и тем самым увеличить надежность пайки.

**Нинг-Ченг Ли
(Ning-Cheng Lee)**

Перевод: Ольга Очур

Температурный профиль оплавления создается для оптимизации процесса пайки, и его построение основано в первую очередь на анализе возникающих дефектов. Улучшить результаты операции пайки можно, минимизировав появление дефектов. Например, образование перемычек, «надгробных камней», шариков, брызг и вскрытий припоя, а также растрескивание и поломка компонентов устраняются при снижении скорости нагрева. А уменьшение времени выдержки снижает вероятность появления пустот и пор в припое, плохо смачиваемых участков, шариков и вскрытий припоя. Понижение максимума температуры нагрева позволяет избежать обугливания и расслоения печатной платы, образования лишних интерметаллических соединений и не смачиваемых припоем участков платы. Для этих же целей, а также для уменьшения размеров зерен можно использовать технологии быстрого охлаждения платы.

Введение

Оплавление паяльной пасты — это один из основных методов формирования паяных соединений при поверхностном монтаже на уровне печатной платы. Если оплавление выполнено корректно, пайка дает надежные результаты с высоким выходом годного и низкой стоимостью. Одним из самых важных параметров пайки оплавлением является температурный профиль оплавления, от него и зависит появление дефектов пайки. Типы дефектов, на которые влияет профиль, включают появление трещин или поломку компонента, образование эффекта «надгробного камня» (когда чип-компонент поднимается на торец), пустот, перекосов, несмачиваемых участков, затеканий, наплывов, осадков припоя, формирование шариков припоя и перемычек, образование «холодных» соединений и лишних интерметаллических соединений, обугливание или расслоение печатной платы, разъединение контактных площадок и платы и так далее. Таким образом, чтобы получить продукты с высокой надежностью и высоким выходом годного, очень важно иметь корректно построенный профиль оплавления.

Профиль оплавления может быть разбит на три основных этапа: нагревание, достижение максималь-

ной температуры, охлаждение. Каждый из них оказывает свое влияние на результаты пайки. Основываясь на понимании механизма образования дефектов, мы можем спроектировать каждый этап так, чтобы количество дефектов было минимизировано, тем самым увеличив надежность.

Флюсование

В технологии поверхностного монтажа пайка обычно начинается с нанесения флюса, необходимого для очистки поверхности, удаления окиси и улучшения паяемости в целом. Затем для формирования паяных соединений производится смачивание поверхности припоем. Поэтому, перед тем как начать построение профиля, нужно установить зависимость процесса флюсования от времени и температуры.

Величина времени/температуры для флюсования

Процесс флюсования может регулироваться контролем времени смачивания S с помощью метода баланса смачиваемости, как показано на рис. 1. Небольшое время смачивания обычно говорит о том, что флюсование слишком быстрое. Кроме того, оценить этот процесс можно с помощью наблюдения за поведением паяльной пасты: быстрое смешивание

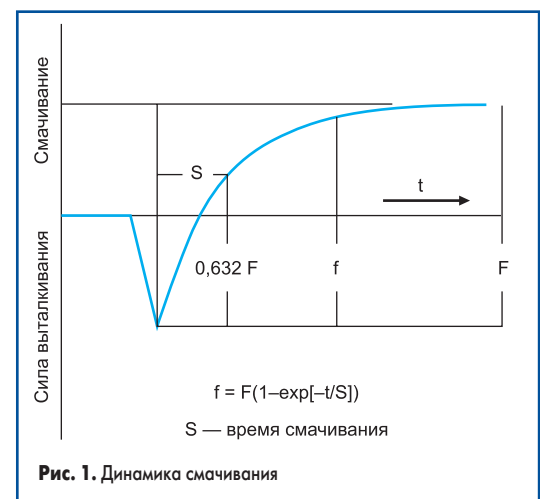


Таблица. Время смачивания флюсов при нагревании до +200 и +240 °С с использованием припоев Sn63Pb37 и Sn62Pb36Ag2

Флюсы	Время смачивания, с			
	Sn63Pb37		Sn62Pb36Ag2	
	+200 °С	+240 °С	+200 °С	+240 °С
A	2,87	1,48	4,68	2,52
B	1,03	0,5	1,44	0,63
C	1,65	1	2,6	1,03
D	2,5	1,44	3,48	2,1

(достижение однородного состояния) или оплавление паяльной пасты указывает на быструю реакцию при флюсовании.

Оплавление паяльной пасты обычно занимает очень короткое время. Это можно проиллюстрировать, нанеся небольшую точку паяльной пасты Sn63Pb37 на медный тест-купон, после чего произвести оплавление данного образца на горячей плате, нагрев ее поверхность до умеренной температуры. Паста оплавляется, и процесс распределения припоя обычно завершается в течение лишь нескольких секунд.

То, что процесс оплавления (а значит, и флюсования) происходит очень быстро, можно подтвердить также измерением времени смачивания флюса с использованием метода баланса смачивания. В таблице показано время смачивания для четырех флюсов А, В, С, и D нескольких паяльных паст Sn63Pb37 при нагреве до +200 и +240 °С. Для симуляции «сложной ситуации пайки» медные тест-купоны предварительно нагревались до +100 °С в течение 3 ч в термощкафу с помощью нагнетаемого воздуха. Для данного эксперимента были использованы припои Sn63Pb37 и Sn62Pb36Ag2. Результаты такой проверки показывают, что при нагреве до указанных температур время смачивания составляет всего несколько секунд. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс флюсования не занимает более нескольких секунд, то есть ровно столько времени, чтобы достичь температуры +200 °С или выше. Другими словами, очень быстрое простое нагревание подходит для выполнения флюсования и получения хороших результатов оплавления и смачивания.

Флюсование при температуре ниже температуры плавления

Для того чтобы изучить реакцию флюса при температуре ниже температуры плавления, измерялось время смачивания с применением флюсов F1, F2, F3 и F4 из четырех паяльных паст RMA, при этом использовался низкотемпературный припой (43Bi34Sn20Pb с температурой плавки +100 °С). Хотя этот припой в целом показывает более медленное смачивание, чем эвтектические припои на основе Sn-Pb, время смачивания, измеренное при разных температурах, все-таки отражает зависимость скорости флюсования от температуры нагрева. Результаты, представленные на рис. 2, указывают на то, что время смачивания пропорционально обратной величине абсолютной температуры. Это верно по крайней мере для диапазона температур +150...+240 °С. При

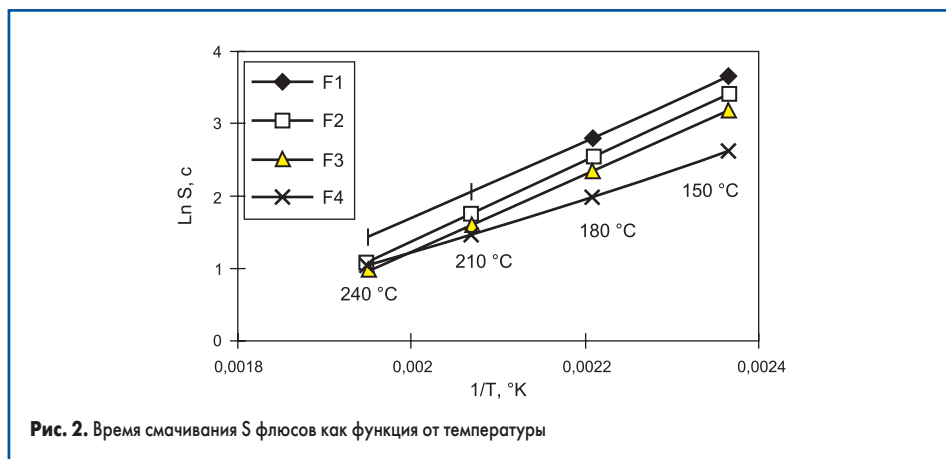


Рис. 2. Время смачивания 5 флюсов как функция от температуры

+150 °С время смачивания составляет на 1–2 порядка больше периода смачивания при температуре +210...+240 °С. Таким образом, можно заключить, что (1) температура — это главный фактор, влияющий на качество флюсования, (2) при одинаковом времени задержки качество флюсования при более низкой температуре хуже, чем при более высокой температуре.

Максимальная температура

«Холодные» соединения и плохое смачивание

Величина максимальной температуры в профиле оплавления обычно определяется температурой плавления припоя и допустимыми температурами нагрева платы и компонентов для монтажа. Изначально неоднородные паяльные пасты обычно требуют достаточно долгого времени для смешивания, больше, чем показывает тест на баланс смачивания. Соответственно, нижний порог максимума температуры должен быть примерно на 30 °С выше температуры плавления припоя. При оплавлении с максимальной температурой ниже, чем это значение, могут образоваться так называемые «холодные» соединения или произойти недостаточное смачивание. В случае эвтектического припоя на основе Sn-Pb это минимально возможное значение максимальной температуры составляет приблизительно +210 °С.

Обугливание, расслоение ПП и образование интерметаллических соединений

Необходимо, чтобы максимальная температура составляла примерно +235 °С. При более высокой температуре могут возникнуть обугливание и/или расслоение оксидных ПП и пластиковых частей. Более того, вероятно появление лишних интерметаллических соединений, что в свою очередь приводит к образованию хрупких паяных соединений.

Выщелачивание припоя

Выщелачивание припоя [2] — проблема в основном гибридных сборок, когда в припой экстрагируется слишком большое количество основного металла. Объем выщелачивания обуславливается величиной максимальной температуры и может быть уменьшен с помощью снижения максимума.

Сокращение времени выдержки выше температуры ликвидуса также поможет уменьшить выщелачивание припоя.

Этап охлаждения

Интерметаллические соединения

Оптимальное время продолжения этапа охлаждения тоже определяется достаточно просто. Низкая скорость охлаждения при температуре выше температуры плавления припоя даст образование лишних интерметаллических соединений. Чтобы этого избежать, требуется более быстрое охлаждение.

Размер зерна

Низкая скорость охлаждения часто становится причиной образования больших размеров зерна интерметаллических соединений из-за эффекта закалывания. За возникновение зерен большого размера «отвечает» начало этапа охлаждения, а именно область сразу после температуры плавления. Крупные зерна обычно указывают на низкую усталостную прочность, их появление нежелательно. Высокая же скорость охлаждения дает паяные соединения с мелкими зёрнами. Однако с увеличением перепада температуры воздействие скорости охлаждения уменьшается. Для снижения эффекта закалывания достаточно температурной разницы в 50 °С.

Внутреннее напряжение: поломка или растрескивание компонента

Максимальная скорость охлаждения часто определяется устойчивостью компонентов к тепловому удару. Для таких компонентов, как бескорпусные конденсаторы, максимальная допустимая скорость охлаждения составляет приблизительно 4 °С/мин.

Деформация соединений

Охлаждение печи оплавления обычно производится с помощью нагнетания холодного воздуха. Большая скорость охлаждения требует наличия мощных нагнетателей для быстрого выдува холодного воздуха на расплавленные паяные соединения. Но сильный поток воздуха способен деформировать соединения. Деформацию паяного соединения можно уменьшить, если установить скорость охлаждения не больше 4 °С/мин.

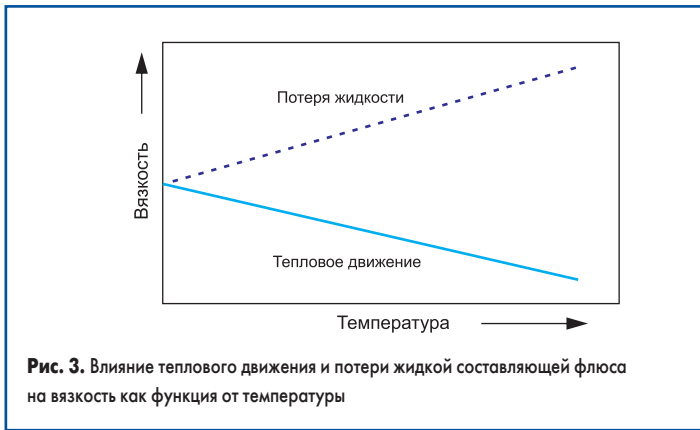


Рис. 3. Влияние теплового движения и потери жидкой составляющей флюса на вязкость как функция от температуры

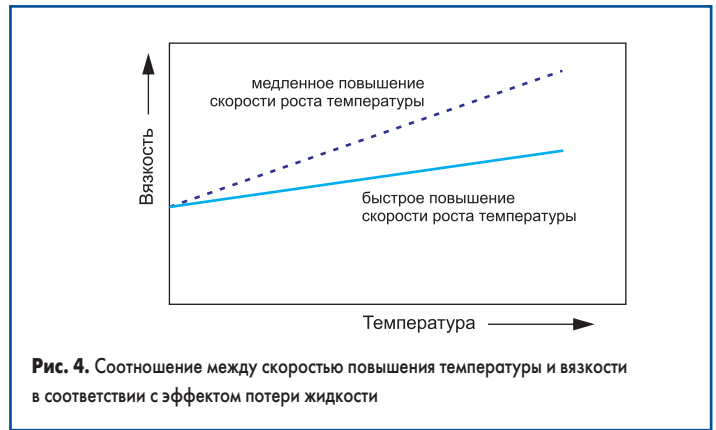


Рис. 4. Соотношение между скоростью повышения температуры и вязкости в соответствии с эффектом потери жидкости

Внутреннее напряжение: разьединение и отслоение припоя или площадки

Скорость охлаждения может влиять и на отслаивание площадок от платы или на разьединение паяных соединений. Высокая скорость охлаждения приводит к слишком большому перепаду температуры между компонентом и платой, а значит, и к несоответствию коэффициентов теплового расширения, которое создает внутреннее напряжение вокруг соединения, что в свою очередь может стать причиной отрыва паяного соединения от площадки или отслоения площадки от платы. Например, отсоединение угловых паяных соединений BGA-компонентов.

Этап нагрева

Возможно, этап нагрева является одним из самых сложных вопросов при построении профиля оплавления. Как и на этапе охлаждения, основные параметры здесь — время и температура.

Осадка и образование перемычек

Перемычки — прямой результат осадка пасты, а потому это весьма важная проблема. Поскольку осаждение паяльной пасты возникает только на этапе ее нанесения, то температура остается ниже точки плавления припоя.

Вязкость материала с фиксированным составом и химической структурой уменьшается в основном при повышении температуры из-за ускорения теплового движения на молекулярном уровне. Уменьшение вязкости при более высоких температурах приводит к большей осадке. С другой стороны, увеличение температуры обычно выпаривает растворитель из флюса и, таким образом, увеличивает содер-

жание сухого вещества, увеличивая вязкость. Эти два противоположных эффекта — ускорение теплового движения и потеря жидкой составляющей — поясняются на рис. 3.

Ускорение теплового движения — это собственное свойство материала, которое зависит только от температуры и не зависит от времени. Таким образом, повышение скорости роста температуры на него не влияет. Однако эффект потери жидкой составляющей флюса — явление динамическое, напрямую связанное со скоростью повышения температуры. Скорость испарения жидкости пропорциональна тепловой энергии (или температуре) жидкости. Количество потери жидкости в свою очередь пропорционально скорости и времени испарения. Другими словами, общая потеря жидкости — это функция от времени и температуры, а следовательно, может регулироваться скоростью увеличения температуры при оплавлении. При медленном росте температуры вязкость паяльной пасты окажется выше, чем при быстром росте температуры, поскольку объем испаренной жидкости будет больше (рис. 4)

Соответственно, при достаточно медленном росте температуры повышается количество испаряемой жидкости, а тепловое движение молекул остается незначительным и может не приниматься во внимание. Следовательно, со снижением скорости роста температуры уменьшается осадка (пояснение на рис. 5). В целом, рекомендуется скорость роста температуры от 0,5 до 1 °C/c от комнатной температуры до температуры плавления припоя.

Образование припойного бисера

Образование бисера припоя [3] вызвано испарением растворителя из флюса при предварительном нагревании. Испарение способ-

ствует возникновению областей оплавлений пасты, и паста, попавшая под компоненты с низкой посадкой (небольшим зазором между компонентом и платой), после нагрева как бы выдавливается из-под компонента. Скорость испарения может контролироваться регулировкой скорости повышения температуры на этапе нагрева перед тем, как произойдет плавление припоя. При очень медленном повышении температуры выход газов растворителя из флюса происходит из-за диффузии, а не в связи с сильным испарением, таким образом можно предотвратить образование областей оплавления паяльной пасты, а следовательно, и формирование шариков припоя.

Затекание припоя

Затекание припоя [4] — явление, при котором расплавленный припой смачивает вывод компонента и выталкивает его из отверстия, что приводит к снижению надежности соединения или даже разьединению. Это происходит из-за того, что на этапе плавки припоя вывод компонента более горячий, чем контактная площадка платы. Появления данного эффекта можно избежать, если сравнить оба значения температур, то есть или больше нагревать плату снизу, или очень медленно повышать скорость нагрева до температуры около точки плавления припоя. Таким образом перед смачиванием температуры выводов компонентов и площадок сравниваются. После попадания припоя на площадки и смачивания их форма кромки припоя (галтели) останется стабильной и больше не будет реагировать на скорость нагрева.

Образование дефекта

«надгробного камня» и перекосов

Образование дефекта «надгробного камня» [1] и различные перекосы вызваны неравно-

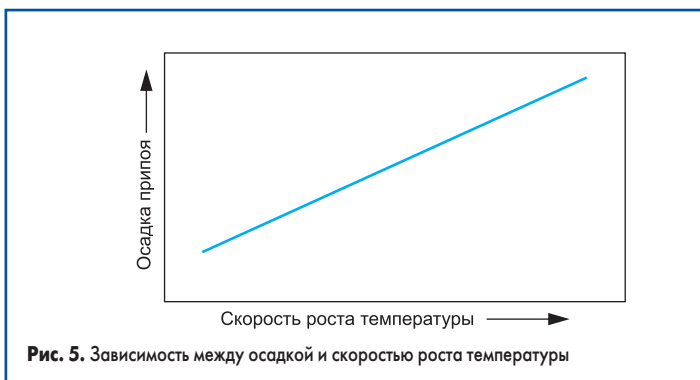


Рис. 5. Зависимость между осадкой и скоростью роста температуры

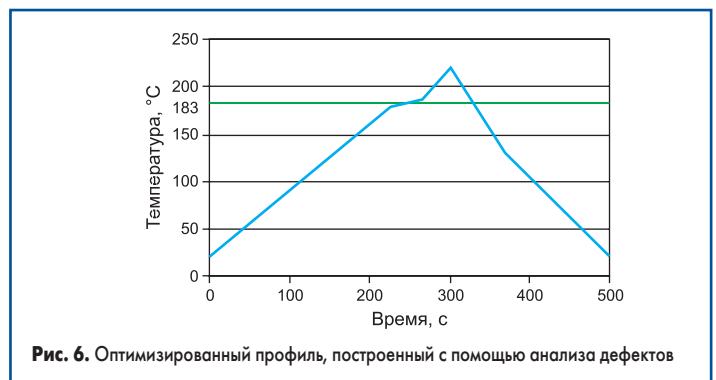


Рис. 6. Оптимизированный профиль, построенный с помощью анализа дефектов

мерным смачиванием обеих контактных площадок чип-компонента. Подобно эффекту затекания припоя, образование этих дефектов можно минимизировать с помощью медленной скорости нагрева до точки плавления припоя. Медленный нагрев позволит выравнять температуру обеих контактных площадок и будет способствовать равномерному оплавлению припоя (рис. 6).

Образование шариков припоя

Формирование шариков припоя происходит из-за его разбрызгивания. Во многих случаях разбрызгивание случается из-за большой скорости нагрева, выше $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, до момента смешивания припоя. Медленный нагрев — очень эффективное средство, предотвращающее разбрызгивание. Шарик припоя может также образовываться из-за чрезмерного или повторного окисления частиц припоя или паяемых компонентов при температуре, предшествующей температуре смешивания припоя. Для уменьшения окисления подача тепла перед плавлением припоя должна быть уменьшена. Если рассматривать оба фактора (и разбрызгивание, и окисление), оптимальным для минимизации образования шариков припоя станет нагрев с линейным повышением температуры до тех пор, пока не будет достигнута температура плавления припоя.

Плохое смачивание

Плохое смачивание может оказаться результатом чрезмерного окисления при температуре, предшествующей температуре смешивания припоя. И для уменьшения окисления также необходимо минимизировать подачу тепла перед плавлением припоя, то есть требуется как можно более короткое время нагревания. Если по какой-то причине время нагревания уменьшить нельзя, то для уменьшения окисления необходимо линейное увеличение нагрева от температуры окружающей среды до температуры плавления припоя.

Образование пустот и пор

Пустоты и поры [5] образуются в основном из-за испарений воздушных включений, появившихся там, где участки контакта «припой-подложка» или «припой-вывод контакта» плохо смачиваются. Количество и величину несмачиваемых участков можно снизить, уменьшив появление окислений, таким же способом, как описано в разделе о плохом смачивании, — или как можно больше сократить время нагрева, или отрегулировать скорость

роста температуры (чтобы она увеличивалась по линейному закону) от температуры окружающей среды до температуры плавления припоя. Если паяемость хорошая, как, например, у плат с горячим лужением с выравниванием воздушным ножом (HASL), то смачиваемость не будет проблемой и можно избежать появления пустот, уменьшив вязкость остатков флюса.

Вскрытия и окна

Окна и вскрытия образуются из-за затекания припоя или отсутствия смачивания. При затекании припоя его влияние можно уменьшить, как описано в разделе о затекании припоя (то есть при использовании направленного снизу нагрева или низкой скорости нагрева припоя до точки его плавления). Случай, когда отсутствует смачивание, обычно рассматривается как «эффект подушки», когда припой выдавливается из области соединения и при этом не формируется надежный контакт с выводом. Подобные проблемы решаются уменьшением окисления, как описано в разделе о смачивании, а именно получением линейного роста скорости нагрева до температуры плавления припоя.

Влияние времени

Этап нагрева

Как было сказано выше, на этапе нагрева для минимизации большинства дефектов пайки (таких как образование перемычек, шариков и брызг припоя и т. д.) необходимо медленное увеличение температуры от температуры окружающей среды до температуры плавления припоя. Это означает, что между двумя точками (комнатная температура и температура чуть ниже точки плавления) скорость нагрева должна изменяться по линейному закону.

Область выдержки температуры

Хотя технологии нагрева при пайке оплавлением все время модернизируются и улучшаются, небольшой температурный градиент платы все равно может присутствовать. Для минимизации дефектов, появляющихся из-за неэффективного нагрева (например, образование перекосов и «надгробных камней», затекание припоя), рекомендуется какое-то время выдерживать температуру плавления припоя. В целом, чем менее эффективен нагрев, тем больше должна быть выдержка. Однако при подборе длительности выдержки следует учитывать скорость нагрева, пред-

шествующего плавлению припоя. Поскольку вся длина профиля постоянна, то чем больше область выдержки, тем выше должна быть скорость нагрева до температуры плавления. Практика показала, что длительность выдержки около 30 с отвечает требованиям эффективности нагревания.

Область скачка температуры

Часть профиля около максимума температуры и области быстрого нагрева и быстрого остывания, находящиеся соответственно слева и справа от максимума, называют областью скачка. Учитывая возможность появления трещин в соединении компонента и платы, образовавшихся из-за внутреннего напряжения припоя, скорость нагрева и охлаждения должна составлять приблизительно $2,5\text{--}3,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, а максимальная скорость изменения температуры не должна превышать $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Данные значения помогут удержать перепад температур на плате в пределах $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Заключение

В первой части статьи автором рассматривались механизмы образования дефектов, изучались причины их появления. Во второй части статьи с помощью данного анализа мы рассмотрим оптимизацию профиля оплавления, где каждый этап процесса будет спроектирован так, чтобы минимизировать количество дефектов и увеличить надежность паяных соединений.

Литература

1. Lee N.-Ch. Reflow Soldering: Meeting the SMT Challenge. In Proc. of Nepcon West. Anaheim, CA, Feb. 1997.
2. Lee N.-Ch. How to make solder paste work in ultra-fine-pitch and non-CFC era. Short course of Nepcon West. Anaheim, CA, Feb. 1994.
3. Hance W., Lee N.-Ch. Solder Beading in SMT — Cause and Cure. In Proc. of SMI. San Jose, CA, 1991.
4. Lee N.-Ch., Evans G. Solder paste: meeting the SMT challenge. SITE Magazine, 1987.
5. Hance W., Lee N.-Ch. Voiding Mechanisms in SMT. In Proc. of China Lake's 17th Annual Electronics Manufacturing Seminar, 1993.
6. Hance W., Lee N.-Ch. Voiding Mechanism in BGA Assembly. In Proc. of ISHM, 1995.
7. Jaeger P., Lee N.-Ch. A Model Study of Low Residue No-Clean Solder Paste. In Proc. of Nepcon West. Anaheim, CA, 1992.