

Повышение эффективности отмывки корпусов MICRO-ARRAY с помощью направленных струй

Майк Биксенмэн (Mike Bixenman), главный технический директор, корпорация Kyzen

Стив Стэч (Steve Stach), исполнительный директор и президент, корпорация Austin American Corporation

При крупносерийном производстве устройств, использующих технологию перевернутого кристалла (flip chip) и другие методы корпусирования с матричным расположением контактов (micro-array) серьезной проблемой является очистка. Структура выводов корпуса настолько плотная, что для отмывки не остается достаточного пространства. В статье рассмотрены возможные пути повышения эффективности отмывки путем выбора таких параметров технологического процесса, как тип применяемого для пайки флюса, время отмывки и конструкция насадки, подающей очищающую жидкость на сборку.

Для сборок, выполненных по методу перевернутого кристалла с весьма плотной структурой выводов процесс выбора встроенной установки для отмывки, использующей технические жидкости на водной основе, может быть непросто. С уменьшением шага шариковых выводов стандартные системы перестали справляться с очисткой поверхности под матричными корпусами. Очевидным решением этой задачи является использование дозаторов большего размера и увеличение давления, однако в этом случае могут возникнуть дополнительные проблемы, например опасность повреждения компонентов и увеличение трудоемкости обслуживания установки.

Цель исследования, описываемого в данной статье, — установить, насколько оптимально направленные струи, вызывающие большие перепады давления вдоль поверхности чипа, способны улучшить условия проникновения моющей жидкости и увеличить производительность установки. В эксперименте был использован прозрачный макет перевернутого кристалла (flip chip) в натуральную величину, что обеспечило возможность визуального наблюдения за процессом отмывки. Кроме того, была проведена оценка эффективности применения безотмывных процессов с применением флюсов с низким содержанием твердых веществ, а также водорастворимых флюсов.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1965 г., когда Гордон Мур — соучредитель компании Intel — открыл свой эмпирический

закон, скорость обработки данных удваивалась примерно каждые два года [1]. Увеличение числа транзисторов на единицу площади современных микросхем обеспечивается благодаря усложнению технологических процессов и сопровождается увеличением плотности контактов, уменьшением шага между выводами, а также применением таких решений, как многоярусные массивы кристаллов, что в целом позволяет достигнуть более высокой производительности.

Директива WEEE (директива об отходах электрического и электронного оборудования), директива RoHS по снижению использования опасных химических веществ и регламент ЕС, предписывающий надлежащую проверку и регистрацию всех загрязняющих химических веществ (REACH), требуют замены материалов, которые могут нанести вред окружающей среде [2]. Эти требования вынуждают предприятия, специализирующиеся на корпусировании, использовать сплавы с более высокими температурами затвердевания, в результате чего возрастает остаточное напряжение после пайки [2]. Применение материалов с более низкой диэлектрической проницаемостью (low-k) при создании высокопроизводительных кристаллов требует, чтобы остаточное напряжение на чипе было меньше, тогда как использование бессвинцовых технологий подразумевает более высокое напряжение.

При увеличении плотности массива выводов кристалла высота шариковых выводов и шаг между контактами

сокращаются. Более высокое процентное содержание оксидов олова, используемых в бессвинцовой пайке кристалла, требует применения флюса с повышенной активностью [3]. В результате повышается остаточное напряжение около шариковых выводов и затрудняется нанесение герметизирующих материалов под корпус или кристалл, что может привести к увеличению пустот и плохой адгезии [2]. Для устранения этого недостатка при монтаже больших кристаллов используется водорастворимый флюс. Этот материал с повышенной активностью необходимо удалять после пайки. Использование водорастворимых материалов упрощает очистку, повышает адгезию герметизирующих материалов при нанесении их под корпус компонента и уменьшает расход флюса (см. рис. 1).

СУТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Развитие высококачественной технологии перевернутого кристалла (flip chip) идет в полном соответствии с кривой освоения производства, которая отражает закон Мура. Эта кривая позволяет производителям снижать стоимость изделий и повышать их качество.

Из-за высокой плотности выводов микросхем flip chip возникает проблема с устранением остатков флюса из-под кристалла. Эти остатки не должны препятствовать нанесению герметизирующих материалов под кристаллом с зазором 75 мкм и менее и с шагом выводов менее 150 мкм [2]. Для решения этой проблемы разработчики ищут

новые методы удаления остатков флюса после пайки. Обработка кристалла водорастворимыми флюсовыми пастами и удаление их остатков с помощью установки для непрерывной отмывки с помощью распыляемой чистящей жидкости является эффективным решением этой задачи.

Специализированные чистящие жидкости снижают коэффициент поверхностного натяжения воды. Они быстро растворяют отработанные остатки флюса на углах кристалла и в его центральной части, а также уменьшают пенообразование в результате механического напряжения от струй, распыляемых под большим давлением. Оказывается, что ополаскивание лишь деионизованной водой недостаточно для удаления окислов, образующихся из-за температурных градиентов между различными частями кристалла (см. рис. 2). Очистители на водной основе с невысокой концентрацией 2—10% растворяют эти остатки.

В течение последних пяти лет компании по производству отмывочных материалов и оборудования для очистки проводили совместные исследования по улучшению качества очистки пространства под компонентами, зазор между которыми и платой мал, с помощью распыляемой струи. Исследования показали, что очистка остатков материала под кристаллами больших размеров с помощью расходящихся веером струй неэффективна из-за потери их энергии. Чтобы улучшить качество очистки было предложено использовать V-образные струи жидкости под более высоким давлением.

Когерентные струи имеют меньший угол расходимости и сохраняют давление на большей длине. В этом исследовании изучалась эффективность принудительного удаления флюсов с низким содержанием твердых веществ и водорастворимых остатков под кристаллом с помощью двух конфигураций распылителя. Специальная насадка для распыления жидкости создавала тонкую веерообразную струю с четкими границами, которая с большой силой воздействовала на очищаемую поверхность. Для повышения качества очистки насадка располагалась под небольшим углом к осевой линии.

У кристаллов с высокой плотностью выводов шаг между контактно-

ми выводами и высота зазора сокращаются, что затрудняет устранение остатков флюса. Для решения этой задачи производители оборудования для отмывки увеличивают длину секции очистки и размер дозатора. В данной работе изучалась возможность применения оптимальной конструкции насадки, позволяющей направленной струе жидкости под давлением проникать под кристалл для удаления остатков флюса.

Оптимизация подачи струи на плату повышает качество очистки. Установка для отмывки кристаллов с высокой плотностью размещения выводов имеет более короткие секции очистки, меньший размер дозатора и более низкую температуру отмывки. Исследование, в котором изучалась динамика процесса отмывки с помощью когерентной и направляющей насадок (см. рис. 3), однозначно доказало высокую эффективность использования насадок второго типа.

Исследование также выявило различия в эффекте загрязнения различными видами материала. Обычно для монтажа кристаллов flip chip с высокой плотностью выводов используются безотмывные флюсы с низким содержанием твердых веществ. Специалисты, разрабатывающие процессы удаления остатков флюса после нанесения герметизирующих материалов, столкнулись с проблемой очистки поверхности под кристаллом от материалов с низким содержанием твердых веществ. В этом исследовании сравниваются результаты очистки поверхности после использования безотмывных флюсов и водорастворимых флюсов. Можно сделать однозначный вывод о том, что растворимые в воде остатки удаляются лучше (см. рис. 4).

СКОРОСТЬ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ

Согласно теоретическим представлениям [4], общая скорость очистки имеет статическую и динамическую

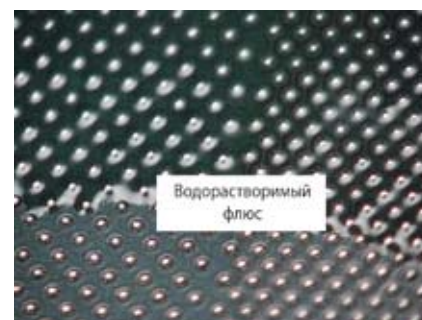


Рис. 1. Кристалл с высокой плотностью контактов ввода/вывода, обработанный водорастворимым флюсом



Рис. 2. Остаток флюса под кристаллом способствует увеличению пустот

составляющие в соответствии с формулой:

$$R_p = R_s + R_d,$$

где R_p — скорость процесса очистки; R_s — статическая скорость очистки; R_d — динамическая скорость очистки.

Статическая скорость очистки — это скорость, с которой очищающее вещество растворяет остатки флюса без использования принудительной энергии. Эта скорость определяется путем расчета времени, необходимого для растворения всех поверхностных остатков флюса при погружении сборок flip-chip в резервуар, в котором отсутствует перемешивание жидкости. Статическая скорость зависит от



Рис. 3. Процесс отмывки платы



Рис. 4. Сравнение результатов отмывки флюса

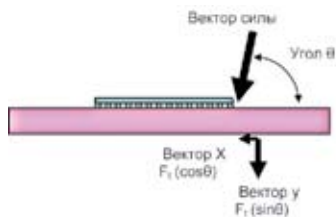


Рис. 5. Составляющие вектора силы струи

типа остатков и используемого чистящего вещества. Она также зависит от температуры, а при использовании водных растворов — от состава специальной чистящей жидкости и ее концентрации.

Специализированные чистящие вещества на водной основе изготавливаются с помощью сольватирующих материалов — моющих компонентов, которые размягчают флюсовый осадок или вступают с ним в реакцию, смачивающих веществ, снижающих поверхностное натяжение, и ингредиентов, вводимых в малых дозах для контроля пенообразования и защиты металлических сплавов. Состав чистящего вещества влияет на скорость растворения, омыление, пенообразование, совместимость материалов, срок эксплуатации резервуара и замедление коррозии металла. Лучшие в своем классе чистящие вещества растворяют все типы флюсовых отложений, включая обуглившиеся остатки, проникают в узкие зазоры и смачивают поверхность, обладают большой совместимостью с конструкционными материалами, разрушают поверхностную пену со скоростью выше, чем она образуется, обладают малой токсичностью и слабым запахом, а также защищают металлические сплавы в процессе очистки.

Динамическая скорость очистки обеспечивается за счет энергии установки и ее системы подачи жидкости.

Этот параметр непосредственно характеризует поток жидкости, его давление на поверхность платы и силу, направленную на очищаемые поверхности.

Установка по очистке снабжена платформой для подачи распыляемой жидкости перпендикулярно или под углом к очищаемой сборке flip-chip. Динамическая составляющая затрудняет процесс очистки. Время, требуемое для удаления всех остатков под кристаллом flip-chip с высокой плотностью выводов, у стандартного оборудования для очистки распылением составляет менее 10 мин, если струя направлена непосредственно на сборку. В отсутствие направленного воздействия струй жидкости на очищаемые поверхности сборки осадок в лучшем случае удаляется не полностью. Кроме того, флюсовые загрязнения под низкопосаженным корпусом кристалла flip-chip затрудняют очистку. Для их удаления и создания технологического окна требуется постоянная подача направленной струи жидкости.

МОДЕРНИЗАЦИЯ НАСАДКИ

Угол атаки направленной струи отличается от 90° в ту или иную сторону. Поэтому часть энергии переносит поперечная составляющая силы направленной струи. Предыдущие исследования показали, что чем больше поперечная сила, тем сильнее поток под близко расположенными элементами. Вектор силы имеет две составляющие — x и y. Струя, направленная на плату под углом 90°, имеет стопроцентную составляющую по оси y и нулевую — по оси x. По мере уменьшения угла наклона компонента y уменьшается, а x — возрастает. Величина силы по этим осям пропорциональна, соответственно, синусу и косинусу угла наклона струи относительно подложки (см. рис. 5).

Связь между вектором силы и ее компонентами выражается формулой:

$$F_t = F_y + F_x = F_t \cos\theta + F_t \sin\theta.$$

При уменьшении угла подачи струи увеличивается составляющая по оси x, что приводит к увеличению силы потока жидкости под компонентом. При угле в 30° вектор x равен половине прикладываемой силы.

Полная величина силы определяется скоростью и массой струи в точке ее воздействия на сборку. Давление коллектора, размер отверстия, тип насадки и взаимодействие струи с воздухом определяет массу жидкости на единицу площади.

Оказывается, что взаимодействие струи с воздухом заслуживает пристального внимания. Это взаимодействие зависит от типа струи, формируемой насадкой. Веерообразная насадка значительно замедляет скорость потока уже на сравнительно небольшом расстоянии в два дюйма. Сплошная когерентная струя не распадается на отдельные составляющие на большем расстоянии и меньше взаимодействует с воздухом.

В равной мере важно и взаимодействие между струями. При взаимодействии разнонаправленных струй уменьшаются поперечные силы, необходимые для создания потока под высоким давлением. И наоборот, струи с однонаправленными боковыми силами создают эффект сложения. Расстояние между отдельными струями, как и шаг отверстий распределительного коллектора, имеют критически важное значение.

Направленные струи, использовавшиеся в этом эксперименте, подавались под большим углом атаки, что приводило к возникновению эффекта сложения. Шаг отверстий коллектора был выбран таким, чтобы обеспечить направленную подачу потока. Диаметры отверстий когерентной насадки направляющих коллекторов схожи с диаметрами коллекторов, соответствующих нормам PED.

ГИПОТЕЗА

Проникновение жидкости в сборку flip-chip улучшится за счет направленных струй, и эффективность очистки повысится.

МЕТОДОЛОГИЯ

В исследовании изучалась динамика процесса отмывки с помощью когерентной и направляющей насадки. Стекланный чип установили на анизотропные адгезивные шариковые выводы высотой 2 мил (1 мил — 0,001 дюйма). Были приготовлены и расплавлены две пасты для монтажа компонентов flip chip — полимерный флюс, не требующий отмывки, и водорастворимый флюс. Концентрация

технической очищающей жидкости для обоих флюсов была определена по результатам исследования статической очистки. Были установлены следующие скорости конвейера для полимерного безотмывного флюса: 0,3; 0,5 и 0,75 фут/мин; а для водорастворимого флюса — 0,5; 1,0 и 1,5 фут/мин.

Удаление полимерного безотмывного флюса для компонентов flip chip требует большего времени и концентрации чистящего вещества. Статическое растворение всех остатков полимерного флюса под кристаллом заняло более четырех часов, тогда как для водорастворимого флюса это время составило около одного часа. Тесты проводились в химическом стакане с непрерывно перемешиваемой чистящей жидкостью относительно невысокой концентрации при температуре 150°F (около 65°C).

В проведенном эксперименте оценивались тип флюса, выбор насадки, время и температура отмывки, а также концентрация технической жидкости (см. табл. 1). Значения концентрации моющей жидкости и времени очистки оказались выше при устранении остатков полимерного безотмывного флюса, чем в случае с водорастворимыми пастами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Эксперимент проводился со стеклянными чипами размерами 2x2 дюйма с 1600-ми выводами. Высота шариковых выводов обеспечивала зазор в 2 мил. Результаты отмывки поверхности под кристаллом были зафиксированы на фотографиях. Экспериментальные данные показывают разницу между отмывкой остатков полимерного и водорастворимого флюсов, а также между использованием когерентной и направляющей насадок.

Первый набор данных по сравнительному тестированию относится к очистке остатков от полимерного безотмывного флюса. Такие флюсы не предназначены для отмывки. Технические чистящие вещества устраняют остатки этого материала, но для этого требуется увеличить такие параметры процесса как время, температура и концентрация очистителя. Из-за трудностей, связанных с удалением всех остатков из-под кристалла flip chip, технологи предпочитают использовать водорастворимые флюсовые пасты.

Рисунок 6 иллюстрирует экспериментальные результаты, позволяющие сравнить когерентное распыление струй с направленным при следующих параметрах процесса:

- флюс — полимер, не требующий отмывки;
- время отмывки — 4 мин;
- температура отмывки — 150°F;
- концентрация очистителя — 18%.

При использовании насадок обоих типов под кристаллом остался флюс, однако его содержание в случае с направляющей насадкой было меньшим.

Рисунок 7 иллюстрирует следующие экспериментальные результаты, позволяющие сравнить использование когерентной и направляющей насадок; время отмывки увеличилось до 6 мин:

- флюс — полимер, не требующий отмывки;
- время отмывки — 6 мин;
- температура отмывки — 150°F;
- концентрация очистителя — 18%.

При использовании насадок обоих типов под кристаллом остался флюс. Уровень его содержания в обоих случаях было одинаковым.

Рисунок 8 иллюстрирует следующие экспериментальные результаты, позволяющие сравнить использование когерентной и направляющей насадок; время отмывки увеличилось до 10 мин:

- флюс — полимер, не требующий отмывки;
- время отмывки — 10 мин;
- температура отмывки — 150°F;
- концентрация очистителя — 18%.

При использовании когерентной насадки под кристаллом остался



Рис. 6. Сравнение результатов отмывки с помощью когерентной и направляющей насадок (безотмывный флюс, время отмывки 4 мин)

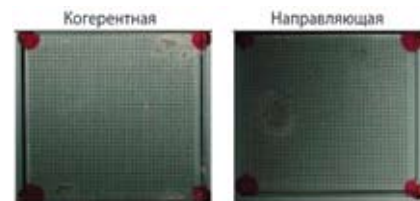


Рис. 7. Сравнение результатов отмывки с помощью когерентной и направляющей насадок (безотмывный флюс, время отмывки 6 мин)



Рис. 8. Сравнение результатов отмывки с помощью когерентной и направляющей насадок (безотмывный флюс, время отмывки 10 мин)

флюс и совсем немного флюса — при очистке с помощью направляющей насадки. Даже несмотря на повышение качества очистки за счет более продолжительного времени обработ-

Таблица 1. Условия эксперимента по отмывке остатков безотмывного и водорастворимого флюса

Тип насадки	Флюс	Время отмывки, мин	Температура отмывки, °F	Концентрация отмывающего вещества, %
Когерентная	Полимерный безотмывный	4	150	18
		6		
		10		
Направляющая		4		
		6		
		10		
Когерентная	Водорастворимый	2		6
		4		
		6		
Направляющая		2		
		4		
		6		

ки, результаты не носили устойчивого характера. Эксперимент выявил трудность очистки полимерного безотмывного флюса из-под кристалла flip chip.

Второй набор экспериментальных данных позволяет оценить качество удаления водорастворимой пасты. Эти флюсовые бессвинцовые пасты имеют повышенную активность и термостабильность. Их мягкие остатки удаляются с большей легкостью, чем остатки от полимерных безотмывных флюсов. Отраслевой опыт показывает, что специализированные чистящие вещества с низкой концентрацией повышают эффективность удаления водорастворимых остатков, особенно на краях и углах кристалла. Концентрация отмывающего раствора, необходимая для

эффективной очистки, меньше для водорастворимых остатков благодаря более высокой скорости статического удаления.

Рисунок 9 иллюстрирует следующие экспериментальные результаты, позволяющие сравнить использование когерентной и направляющей насадок при следующих параметрах процесса:

- флюс — водорастворимая паста;
- время отмывки — 2 мин;
- температура отмывки — 150°F;
- концентрация очистителя — 6%.

Экспериментальные результаты показывают, что использование направляющей насадки повышает качество очистки. Следует заметить, что время отмывки также стало меньшим при тестировании водорастворимых флюсов. При меньшей времени обработки с использованием направляющей насадки под кристаллом осталось меньше флюса, чем в случае с когерентной насадкой.

Рисунок 10 иллюстрирует следующие экспериментальные результаты, позволяющие сравнить использование когерентной и направляющей насадок; время отмывки увеличилось до 4 мин:

- флюс — водорастворимая паста;
- время отмывки — 4 мин.;
- температура отмывки — 150°F;
- концентрация очистителя — 6%.

При использовании когерентной насадки под кристаллом осталось намного больше флюса по сравнению с очисткой при помощи направляющей насадки. В результате использования направляющей насадки и указанных параметров процесса под кристаллом не было обнаружено каких-либо остатков.

Рисунок 11 иллюстрирует следующие экспериментальные результаты, позволяющие сравнить использование когерентной и направляющей насадок; время отмывки увеличилось до 6 мин:

- флюс — водорастворимая паста;
- время отмывки — 6 мин.;
- температура отмывки — 150°F;
- концентрация очистителя — 6%.

Экспериментальные результаты показывают, что при использовании когерентной насадки под кристаллом осталось минимальное количество флюса, тогда как после очистки с помощью направляющей насадки остатков обнаружено не было. Дан-

ные указывают на то, что при увеличении времени обработки повышается степень очистки и расширяется технологическое окно. Кроме того, направляющая насадка обеспечивает повторяемость результатов.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что очистка с помощью направленных струй улучшает проникновение жидкости под компоненты flip-chip и тем самым способствует повышению эффективности отмывки. Результаты исследования подтверждают выдвинутую гипотезу. На их основании также можно сделать уверенный вывод о том, что мягкие остатки удаляются с большей статической скоростью.

Качество очистки повышается за счет изменения угла атаки когерентных струй, подаваемых на плату с помощью направляющей насадки. Данные эксперимента говорят о том, что если поперечные составляющие распыляемой струи направлены на края кристалла, под него проникает больше жидкости за счет образования сильного потока. И наоборот, если когерентные струи подаются перпендикулярно поверхности кристалла, их большая часть отражается, не проникая под него.

Исследование выявило две переменные технологического процесса, играющие важную роль при очистке поверхности под корпусами микросхем типа micro-аггау. Во-первых, выбор флюсовой пасты влияет на скорость очистки. Водорастворимые мягкие остатки флюса растворяются в горячей воде с большей скоростью. Специализированные технические жидкости невысокой концентрации повышают статическую скорость отмывки. Повышение скорости удаления грязи является важным фактором при очистке поверхности под компонентами с небольшой высотой зазора, что усложняется тысячами шариковых выводов малого размера. Визуальные данные говорят о непредсказуемом характере процесса даже при увеличении времени очистки при устранении безотмывного полимерного флюса. Полученные визуальные данные убедительно свидетельствуют о том, что процесс отмывки кристалла на подложке улучшается при использовании водорастворимых флюсовых паст.

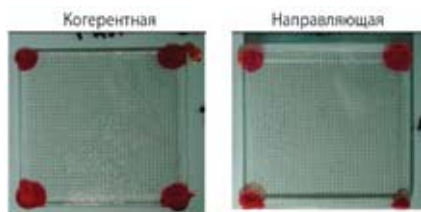


Рис. 9. Сравнение результатов отмывки с помощью когерентной и направляющей насадок (водорастворимый флюс, время отмывки 2 мин)

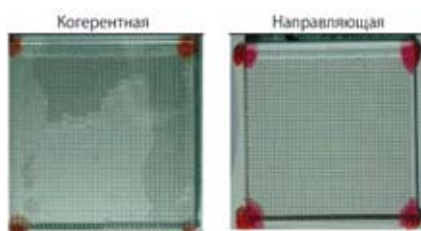


Рис. 10. Сравнение результатов отмывки с помощью когерентной и направляющей насадок (водорастворимый флюс, время отмывки 4 мин)

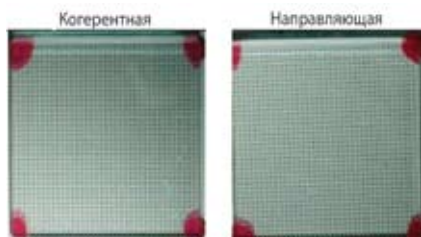


Рис. 11. Сравнение результатов отмывки с помощью когерентной и направляющей насадок (водорастворимый флюс, время отмывки 6 мин)

Результаты исследования также показали, что эффективность отмычки повышается при выборе насадки, которая увеличивает давление распыляемой жидкости и улучшает проникновение направленных струй под кристалл. Направляющая насадка подает струю отмывочной жидкости под высоким углом атаки и непрерывно направляет ее под кристалл. Благодаря использованию водорастворимых флюсовых паст удалось добиться повторяемости процесса очистки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Корпуса микросхем типа microBGA с высокой плотностью контактов имеют небольшую высоту выводов и

более мелкий шаг между выводами. Монтаж кристалла с помощью бессвинцовых припоев повышает уровень окислов олова, что приводит к необходимости использования флюса с повышенной активностью. Остатки флюса снижают адгезию, приводят к образованию пустот и к электрохимической миграции. Удаление остатков флюса перед нанесением герметизирующих материалов под корпус или кристалл компонентов повышает надежность сборки.

Исследование установило, что скорость очистки остатков водорастворимого флюса выше скорости удаления остатков безотмывочного полимерного флюса. Эксперимент однозначно продемонстрировал значение выбора

типа механической подачи жидкости для повышения эффективности отмычки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moore's Law. Retrieved 8-12-08 from http://en.wikipedia.org/wiki/Moores_Law
2. Byle, F. & Eichstadt, D. (2005, June). *Enhancing Flip Chip Reliability. Advanced Packaging*, 14(6), 22.
3. Lee, N.C. (2008). *Future lead-free solder alloys and fluxes — Meeting challenges of miniaturization. IPC Printed Circuits EXPO. Las Vegas, NV.*
4. Stach, S., & Bixenman, M. (2004, Sep). *Optimizing Cleaning Energy in Batch and Inline Spray Systems. SMTAI Technical Forum, Rosemont, IL: Donald Stephens Convention Center.*