

Нулевая дефектность: цель и средства

Статья открывает серию публикаций, посвященных проблемам обеспечения «нулевой дефектности» в микроэлектронном сборочном производстве. Двумя основными сборочными операциями являются посадка кристалла и формирование электрических связей методом ультразвуковой или термозвуковой сварки. В данной статье поставлена задача, объяснены основные понятия, используемые при анализе качества операций, и рассматривается уникальная система оптической инспекции качества проволочных соединений и посадки кристаллов. В последующих статьях цикла авторы рассмотрят существующие методики и критерии оценки качества ответственных по применению изделий.

**Фархад Фарассат,
д. т. н.
Йозеф Зедльмаер,
д. т. н.
Перевод: Сергей Валев**

valev@ivtec.ru

Каждый год в мире производится около 60 млн автомобилей. Большая их часть оснащается системами безопасности с применением надувных подушек. При аварии автомобиля ни одна из подушек не должна отказать, поскольку силовая структура кузова рассчитана на эффективную защиту пассажиров только при срабатывании подушек, преднатяжителей ремней безопасности и других систем. Этот пример хорошо поясняет термин «нулевая дефектность». В случае автомобильной электроники или электроники для специальных применений термин «качество» учитывает не только его кратковременную составляющую, но и работоспособность в течение всего срока жизни устройства, то есть 15 и более лет.

Устройства наподобие датчика автомобильной подушки безопасности невозможно тестировать электрическими или визуальными методами на этапе производства, поскольку они имеют одноразовое действие. К тому же в этом случае практически невозможно использовать стандартные статистические методы оценки качества в процентах или ppm — из-за крайне низкого количества потенциальных отказов. Для того чтобы вычислить вероятности отказов таких изделий и просто сертифицировать технологический процесс стандартными методами, придется провести исследование партии в десятки и сотни тысяч изделий. То же самое пришлось бы сделать для сравнения альтернативных процессов А и Б. Самое печальное, что даже после таких гигантских усилий результат исследования не будет достоверным: общеизвестно, что визуальная инспекция не дает хороших результатов в крупных партиях изделий с низким уровнем отклонений (велика доля ложной отбраковки и пропуска реальных дефектов вследствие усталости операторов). Известна и другая методика: в контрольную партию, проверяемую операторами визуального контроля, нарочно подкладывают бракованные изделия, чтобы провести поверку самого процесса визуального контроля.

Вывод очевиден: ручной отбор, испытания и статистический анализ, визуальный контроль не могут быть основой для производства изделий с нулевой дефектностью. Качество в этом случае надо получать не традиционным методом отбора, а закладывая еще на этапе производства. Для того чтобы изменить саму философию производства, необходимо для каждого этапа производства разработать и применять методики строгого контроля. Иными словами, иметь полный набор параметров и средств измерения. У этого подхода давняя история, и он вошел в литературу под названиями «Стратегия шести сигм», «Метод Ишикава», EVA, «Кайзен» и другими.

За исключением мелких различий в формулировках, все методики основаны на изучении законов статистики и кривой нормального распределения Гаусса. За основу берется предположение, что любая величина, будь то точность позиционирования, ток утечки или прочность соединения, статистически распределяется вокруг заданной величины, образуя кривую значений в форме колокола. Эта кривая характеризуется одним параметром: сигма стандартного отклонения. Чем ниже сигма, тем ближе значения параметра друг к другу, и результат изучаемого процесса более однороден. Чем уже график распределения значений, тем меньше значений лежит вне допустимого диапазона, то есть меньше количество несоответствующих изделий.

Проиллюстрировать ситуацию поможет приближающийся чемпионат мира по футболу, на котором игрок некоей футбольной команды выполняет серию пенальти. Форварду необходимо гарантированно попасть в ворота (это — наш диапазон значений параметра). Предположим, что очень хороший игрок выполнил 1000 ударов, метаясь точно в центр ворот, а мы, замерив реальные координаты входа мяча в ворота, определили стандартное отклонение сигма, равное 1 м. Кривая нормального распределения Гаусса (рис. 1) подскажет нам в этом случае, что 68,26% всех значений координат попадания мяча находится в пределах

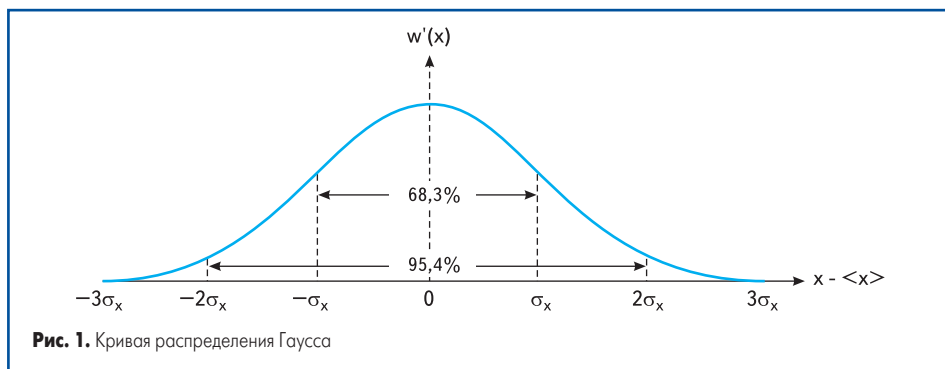


Рис. 1. Кривая распределения Гаусса

1 сигмы (1 м) от центра ворот, 95,44% значений — в пределах 2 м от центра и 99,73% — в пределах 3 м. Другими словами, только две трети ударов по центру ворот закончатся попаданием с точностью до 1 м. (1 м — стандартное отклонение вправо или влево от центра). Так сколько же ударов попадет в ворота? Простительно сказать «все», поскольку ворота имеют ширину 7,23 м — то есть 100%. Однако, если подсчитать результат точнее, приняв допустимое стандартное отклонение за 361,5 см, кривая нормального распределения Гаусса покажет уровень несоответствующих значений в 0,03%, или «выход годных», равный 99,97%. Такой результат — мечта для любого футболиста (один промах на 3000 ударов), но для производства с нулевой дефектностью такой результат неприемлем. Выход годных — 99,97% — равнозначен браку 300 ppm, или 3 изделия из каждых 10 тыс. Вспомним пример с нераскрывшейся подушкой безопасности — это означает, что ежегодно мы сознательно закладываем в процесс отказ системы безопасности в 18 тыс. новых автомобилях!

Способом построения системы качества является так называемое «управление процессами». Процесс следует охарактеризовать: должно быть собрано как можно большее количество параметров процесса. Затем созданы надежные методы измерения соответствующих параметров, записи и оценки результатов этих измерений. Такой метод позволяет заметить любое отклонение от нормы и скорректировать его задолго до того, как отклонение примет неприемлемый характер и проявит себя в форме отказа. Практика построения быстрой обратной связи на производстве давно оправдала себя и вошла во все рекомендации по построению системы качества. Однако чаще всего речь идет о выборочном контроле образцов. Для целей нулевой дефектности важные параметры должны контролироваться у 100% изделий.

В микроэлектронике наиболее технологически сложными для контроля представляются процессы посадки кристаллов и ультразвуковой/термозвуковой сварки. Контроль параметров этих процессов достаточно сложен. Поэтому любая система, позволяющая достоверно контролировать вышеперечисленные процессы, встречает живой интерес производителей электроники, особенно автомобильного и специального назначения. Фирма F&K Delvotec, являясь лидером в производстве сборочного оборудования (установки посадки кристаллов и установки сварки), в последнее

время уделяла огромное внимание созданию системы, которая смогла бы визуально контролировать выполняемые на установках посадки кристаллов и сварки процессы. Некоторые из методик и найденных решений, доступные потребителям, приводятся в нашей статье. В последней части мы попробуем определить пути дальнейшего развития философии нулевой дефектности.

Стандартные тесты, предписанные в процессе сборки, такие как тест на сдвиг кристалла после операции посадки кристалла или тест на подъем крючком после операции ультразвуковой сварки, носят разрушающий характер и могут быть использованы только для периодической проверки процесса. Таким образом, практическое применение непосредственно во время выполнения процесса может найти только метод оптической инспекции. Методы определения деформации, импеданса, встроенный пулл-тестер и другие методы, применяемые при ультразвуковой сварке, будут также обсуждены в этой статье.

Отделы качества и производственные участки предъявляют к идеальной системе оптического контроля следующие требования:

- Запись количественных значений физических величин параметров для возможности статистического анализа.
- Малая трудоемкость для снятия и записи значений параметров.
- Легкость перестройки и корректировки программ оптической инспекции, возможность программирования системы операторами пользователя на производстве.
- Недопустимость снижения производительности основного оборудования из-за введения операции оптической инспекции.
- Настраиваемый режим работы системы — от выборочного контроля (например, каждый сотый или случайно выбранный экземпляр изделия) до 100% контроля всех заданных параметров всех изделий.
- Возможность сбора образов оптической инспекции из системы удаленным компьютером с централизованным банком данных по изделиям отдельно от потока количественных данных, предназначенных для статистического анализа.
- Прослеживаемость результатов оптической инспекции вплоть до сортировки по отдельному соединению, компоненту, оператору, материалу, дате и т. п.
- Расположение системы оптической инспекции в непосредственной близости от контролируемой сборочной единицы для ми-



Рис. 2. Внешний вид рабочего поля установки PBIInspect

нимизации количества непроверенных изделий между ними (и, соответственно, снижения риска возможных потерь).

- Универсальность, позволяющая легко перестраивать систему на другую задачу (например, от анализа посадки кристаллов к анализу сварки тонкой проволокой) без капитальных вложений или дополнительного обучения персонала.

На рынке присутствуют десятки систем оптической инспекции, предназначенных для анализа качества трафаретной печати, установки поверхностью монтируемых компонентов и т. п. Такие установки могут иметь различную степень автоматизации, продвинутый алгоритм анализа изображения, большее или меньшее количество видеокамер. В отличие от систем для поверхностного монтажа специализированные системы оптической инспекции проволочных соединений и посадки кристаллов, напротив, только зарождаются. Фактически F&K Delvotec — первый поставщик интегрированной системы оптической инспекции и анализа качества сварных соединений и посадки кристаллов.

Система проводит анализ большого ряда параметров. В отношении посадки кристаллов это:

- Количество, положение, площадь нанесенного адгезива на подложке (анализируются как одиночные точки адгезива, так и сложные контуры) перед операцией посадки кристалла.
- Качество поверхности кристалла перед его посадкой (наличие царапин, пятен, сколов, пыли, других повреждений поверхности и краев).
- Положение кристалла после посадки по X, Y и углу поворота.
- Качество поверхности кристалла после посадки, в дополнение к вышеперечисленным



Рис. 3. Изображение годного соединения

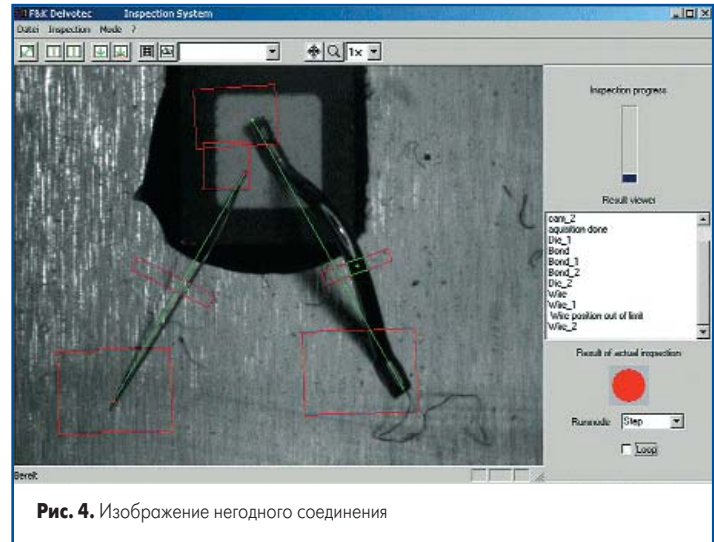


Рис. 4. Изображение негодного соединения

параметрам добавляется анализ на наличие повреждений от инструмента и частиц адгезива на поверхности кристалла.

- Распределение адгезива по периметру кристалла: объем, форма выдавленного адгезива. Система также анализирует качество ультразвуковой сварки. Выборочный или 100%-ный контроль соединений может быть проведен по следующим параметрам:

- Наличие и общее количество петель на контактных площадках.
- Расположение и прямота петли.
- Расположение соединений на контактной площадке (выборочная или 100%-я инспекция).
- Длина «хвостов» проволочного соединения.
- Степень деформации соединения.
- Симметрия деформации соединения (для сварки клин-клин).
- Высота петли, форма петли.
- Наклон и изгиб проволочной петли.

Далее мы рассмотрим более подробно систему PVIInspect (рис. 2) фирмы F&K Delvotec.

Как уже говорилось выше, цель создания системы PVIInspect — исполнение давнего желания производителей, занятых выпуском микросистемных компонентов и модулей, о неразрушающем контроле 100% соединений. К сожалению, до последнего момента такого оборудования не существовало. Система оптической инспекции PVIInspect от F&K Delvotec — первая в мире установка, математическая и аппаратная части которой изначально рассчитаны на специфику микросистемного сборочного производства. Далее параметры системы будут рассмотрены более подробно.

Установка PVIInspect оснащена машинным зрением с системой распознавания (PRU), позволяющей проводить контроль каждой заданной области изображения. В состав системы распознавания входят две или сколь угодно много миниатюрных ПЗС-камер со специальной оптикой. Оптимальная подсветка участков с различной отражающей способностью достигается мощными светодиодами разного цвета. Несколько типов освещения (прямое, рассеянное) можно комбинировать, достигая максимальной контрастности анализируемого участка. При работе системы распознавания делается снимок определенной области,

затем он передается для анализа и сравнения с эталонным изображением.

Камера № 1 установлена вертикально над позицией кристалла. Ее роль — передать с учетом установленного на объективе масштаба изображение целого проволочного соединения или кристалла. Система вычлняет из изображения поверхность кристалла, контактные площадки, сварные соединения. После этого система выполняет анализ изображения в соответствии с тем, как это запрограммировано, по очереди. Например, последовательно проверяется присутствие петли как таковой, ее прямота. Отсутствие перекручивания, наклона. Затем проверяется место сварки (степень проверки зависит от установленного увеличения). Особенно важными параметрами являются расположение сварного соединения на контактной площадке, степень деформации, симметричность соединения относительно продольной оси, длина «хвоста».

Камера № 2 расположена рядом с первой. Ее поле зрения совпадает с первой камерой, но вторая камера «видит» кристалл под углом. Таким образом, становится возможным измерять высоту петлю, проведя калибровку по полю зрения. Благодаря особому математическому аппарату стало возможным даже определять отрыв сварных точек от подложки. Данный тип анализа был недоступен до сегодняшнего дня.

Важной частью процесса оптического контроля является то, что результатом работы установки становится не только качественный анализ (да-нет), как в традиционных системах оптической инспекции, но и накопление массива численных значений измеряемых параметров. Накопление параметров позволяет, например, проанализировать положение сварного соединения на конкретном кристалле и установить допуски, применяемые в производстве, которые определяли бы коридор значений 100% выпускаемых изделий.

Система распознавания, использованная в установке, полностью независима и не связана с системой распознавания установки посадки кристалла или сварки. Такое разделение было выполнено намеренно и, несмотря на кажущееся дублирование основных узлов (камера, видеопроцессор системы), преследовало следующие цели:

- Инспекция соединений не зависит от самой установки монтажа или сварки, производительность которых не снижается с введением операции оптической инспекции.
- Статистические данные накапливаются и хранятся в независимом компьютере и могут быть использованы удаленным сервером (установка оптической инспекции использует программную среду Windows).
- Программирование установки оптической инспекции не занимает рабочего времени установки посадки или сварки.
- Установку оптической инспекции легко переставить на новую операцию (например, с установки посадки кристаллов на установку сварки или наоборот).

На практике использование установки PVIInspect аналогично любой другой системе оптического контроля. Пределы отклонений регламентируются заранее, а в ходе работы установка отмечает зеленым цветом годные (рис. 3) и красным (рис. 4) — негодные участки. При отбраковке того или иного соединения линия может быть остановлена, либо подан сигнал оператору, либо отбракованное изделие маркируется для дальнейшей сортировки и удаления из производственного процесса.

Система может выполнять параллельно с непосредственной работой следующие задачи:

- Руководитель производства может вывести текущие статистические данные как в виде общей таблицы, так и в виде сводных оценок (например, количество забракованных соединений) на своем рабочем месте.
- Результаты работы могут передаваться установкой для обработки и удаленного статистического анализа, как в виде таблицы абсолютных величин параметров за определенный отрезок времени, так и по выбранным параметрам.

Второй способ передачи данных позволяет наладчикам принимать корректирующие действия, как только величины начнут приближаться к предельно допустимым, как того требует система обеспечения качества. В перспективе такие измерения позволяют анализировать сам технологический процесс, например определять влияние тех или иных материалов, единиц оборудования и параметров их работы.

Для более сложных изделий, имеющих множество петель сварных соединений, расположенных в различном направлении, установка может быть оснащена дополнительными камерами, находящимися под необходимым углом. Наклонная камера может оценивать такие параметры петли, как высота или изгиб, только находясь поперек ее продольной оси. Чаще всего ограничиваются одной дополнительно камерой, установленной под углом 90° к основной наклонной камере. Обе камеры монтируются на поворотном кронштейне, который позволяет легко перестраиваться с изделия на изделие. Уже несколько лет аналогичный подход фирма F&K Delvotec использует для своих установок посадки кристалла и сварки, предлагая передвижную камеру внутренней оптической инспекции в качестве дополнительного оборудования.

Итак, производители электроники для ответственных применений получили универсальный инструмент, позволяющий численно определить значения параметров, которые прежде контролировались лишь выборочно и приблизительно. Вместе с тем эти параметры являются определяющими с точки зрения воспроизводимости и бездефектности технологического процесса. Численное определение параметров посадки кристаллов и сварки способно предоставить технологом, наладчикам, операторам и конструкторам важную информацию и о сопрягаемых технологических операциях, таких как трафаретная печать, дозирование, пайка. В связи со специфичностью задачи экстраполировать опыт применения установок оптической инспекции для поверхностного монтажа можно лишь отчасти, поэтому в одном из следующих номеров журнала нам потребуется еще раз вернуться к теме нулевой дефектности в электронном производстве.

В следующей публикации цикла мы также планируем определить критерии, которыми необходимо руководствоваться при внедрении принципа нулевой дефектности, и расскажем о реальном опыте внедрения такого принципа на ведущих предприятиях мира. ■