

Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта

Часть 9. Внедрение АПАК для автоматизации процесса обнаружения дефектов на металлокерамических корпусах типа 4

В ЭК №№2–9 2025 г. описаны методы и способы настройки изображений для видимого диапазона обнаружения дефектов, методы измерения, классификации и формирования базы данных (БД) дефектов с помощью автоматизированного программно-аппаратного комплекса (АПАК) для поиска дефектов изделий электронной техники (ИЭТ) с сохранением изображения дефекта в БД для дальнейшего применения, описано обнаружение дефектов полупроводниковых пластин в поляризованном свете, рассмотрена проверка качества порошковых материалов и микроструктур поверхностей, описан поиск дефектов микросварки с помощью электромагнитных устройств, представлены результаты проведенных исследований по поиску дефектов путем анализа их ключевых особенностей с помощью современных алгоритмов компьютерного зрения на основе особых точек, и предложен новый эффективный комбинированный метод поиска дефектов, эффективность которого подтверждена экспериментальными исследованиями. Кроме того, описана новая технология поиска дефектов на основе многоракурсной структуры. Эксперименты на изделиях микроэлектроники показали универсальность и надежность разработанной технологии, описан поиск дефектов методом гомографии. Эксперименты подтвердили его высокую точность и эффективность в обнаружении дефектов на корпусах интегральных микросхем. В этой части статьи описано внедрение АПАК для автоматизации процесса обнаружения дефектов на металлокерамических корпусах типа 4 (планарных), выводы которых расположены параллельно плоскости основания и выходят за границы проекции тела микросхемы. Перед ее монтажом выводы формируются, чтобы обеспечить плотное прилегание их к плоскости контактных площадок.

Кирилл АНТОНОВ,

инженер, АО «ЦКБ «Дейтон»,

Илья БОЙКОВ,

техник лаборатории АО «ЦКБ «Дейтон»,

Дарья ДОРМИДОШИНА,

заместитель генерального директора,

АО «ЦКБ «Дейтон»

Юрий ЕВСТИФЕЕВ,

к.т.н., старший научный сотрудник,

профессор, АО «ЦКБ «Дейтон»,

medved55@mail.ru

Валерий КЛЮЧНИКОВ,

генеральный директор, АО «Завод «Марс»,

Евгений КЛЮЧНИКОВ,

заместитель главного конструктора,

АО «ЦКБ «Дейтон»,

Юрий РУБЦОВ,

генеральный директор,

главный конструктор,

АО «ЦКБ «Дейтон»

Введение

Технология производства сложноинтегрированных металлокерамических корпусов (МКК) для интегральных микросхем (ИС) и печатных плат играет значимую роль в производстве изделий электронной техники (ИЭТ). МКК предназначены для герметизации ИС, транзисторных и диодных сборок малой и средней мощности для жестких

условий эксплуатации в авиакосмической, оборонной отраслях, ядерной энергетике, а также для соединения с внешними электрическими цепями с помощью выводов [1–2]. Таким образом, задача контроля качества МКК, является актуальной, как и задача контроля качества самих ИС, и важно выявить даже минимальные дефекты МКК.

При создании АПАК для обнаружения дефектов МКК разработчикам требовалось обеспечить контроль соответствия МКК норма-

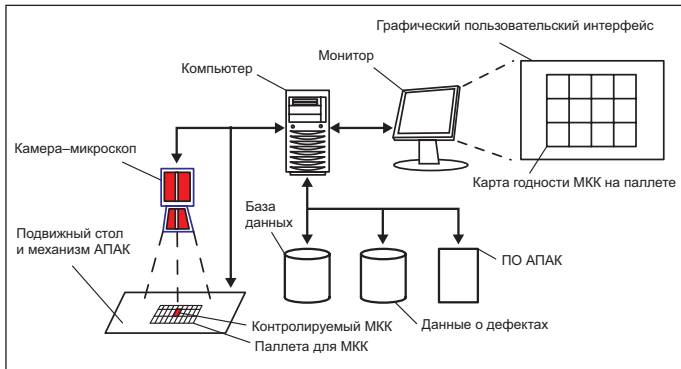


Рис. 1. Структурная схема АПАК

тивно-технической документации [3]. Основным параметром, количественную оценку которого должен осуществлять АПАК, является совокупность расстояний между выводами (шаг вывода) МКК на заданном удалении от монтажной площадки МКК. От этого параметра напрямую зависит совместимость ИС и плат, оснащенных МКК, с другими ИЭТ.

АПАК разработан и внедрен в сотрудничестве со специалистами АО «Завод «Марс», где налажен полный цикл производства МКК. Эта организация стремится к внедрению на производстве наиболее современных и эффективных технологий, что создало благоприятные условия для внедрения АПАК.

Основная часть

Для обеспечения контроля соответствия параметров (размеров) МКК нормативно-технической документации технологи-инспектора АО «Завод «Марс» применяли методы оптической микроскопии и непосредственного измерения элементов МКК [4], поступающих на контроль. При больших объемах производства такой подход требует большой штатной численности отдела контроля продукции, приводит к высокой утомляемости его специалистов, и даже с учетом их высокой квалификации высок риск не выявить дефектные МКК в поступающей для контроля партии [3].

Для решения этой задачи был разработан АПАК следующего состава:

- паллета, на которой закрепляются подлежащие контролю МКК;
- подвижный стол для установки паллеты;
- программно управляемый механизм, обеспечивающий движение стола и фиксатора камеры-микроскопа;
- камера-микроскоп, которая подает сигнал на ПК, управляющий АПАК;
- ПК с программным обеспечением (ПО), осуществляющим управление движением механизма АПАК, обработку изображения с камеры, взаимодействие с конфигурационной БД и окончательное принятие решения о годности МКК;
- база данных с информацией о взаиморасположении МКК на паллете, технологических особенностях МКК и конфигурации ПО АПАК (рис. 1).

ПО АПАК поддерживает стандартные принципы предварительной обработки изображений: пороговую обработку, настройку яркости, контрастности, зернистости, насыщенности и фильтрацию цветности [5]. Такая обработка позволяет наиболее явно выделить на изображении контуры выводов МКК для их дальнейшего измерения с помощью технологий компьютерного зрения [3].

В данной модификации ПО АПАК обрабатывает поступившие изображения с использованием традиционного 2D-зрения, предварительно выделяя область обнаружения дефектов (ООД) в зависимости от положения камеры-микроскопа относительно МКК. Согласно стандартной методике измерения, шаг выводов измеряется в двух областях – выше и ниже монтажной площадки (рис. 2).

К участку изображения, соответствующему ООД, применяется алгоритм выявления контуров Кэнни [6].

Пусть на вход алгоритма после пороговой обработки получен кадр F – матрица размерностью $n \times m$ пикселей, где i, j – координаты пикселя или его индексы в матрице F . Выполнено сглаживание кадра для устранения шума с использованием Гауссова фильтра G [7] с ядром 5×5 :

$$G_{i,j} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{i^2+j^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

$$F' = G \cdot F. \quad (2)$$

Результатом является сглаженный кадр F' . С помощью операторов Собеля [8] вычислены ядра G_X и G_Y матрицы силы M и направления θ -градиента с информацией о взаиморасположении и ориентации контуров:

$$G_X = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot F', \quad (3)$$

$$G_Y = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \cdot F', \quad (4)$$

$$M_{i,j} = \sqrt{G_{Xij}^2 + G_{Yij}^2}, \quad (5)$$

$$\theta_{i,j} = \arctg\left(\frac{G_{Yij}}{G_{Xij}}\right). \quad (6)$$

Выполнено подавление ложных максимумов для устранения влияния шума. Каждый пиксель в матрице направлений аппроксимируется к значению, кратному 45° , и сравнивается с соседними: если это выброс, то он не учитывался, если не выброс – добавляется в результирующую матрицу. Дополнительно выполнена двойная пороговая обработка [9]; в матрице контуров C оставлены только значения, не являющиеся слишком большими или малыми относительно порогов, и проверена окрестность этих элементов матрицы [6]:

$$C_{i,j} = \left\{ \begin{array}{l} M_{i,j}, M_{(i-1)j} \leq M_{i,j} \leq M_{(i+1)j} \\ 0, M_{i,j} > M_{(i-1)j}, M_{(i+1)j} \end{array} \right\}. \quad (7)$$

Далее матрица контуров C разделена на k компонентов связности, представляющих собой отдельные контуры. В результате этого алгоритма получен массив из k контуров, где k при правильной пороговой обработке соответствует числу выводов МКК. Далее с использованием обработки массивов пикселей внутри каждого контура рассчитаны координаты центров масс, соответствующие геометрическому центру выводов:

$$x_{Ц} = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ij}}{n}, y_{Ц} = \frac{\sum_{j=1}^m c_{ij}}{m}. \quad (8)$$

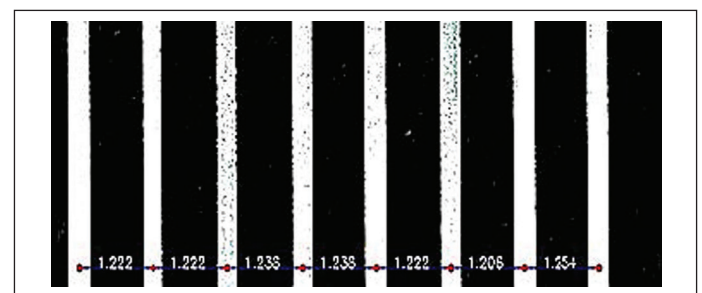


Рис. 2. Контролируемый участок выводов МКК в объективе камеры-микроскопа



После этого с учетом погрешности измерения и удаления камеры–микроскопа от паллеты вычислены расстояния между полученными точками, которые затем сверяются с данными из нормативно-технической документации, получаемыми из БД, и в случае соответствия МКК требованиям он признается годным в части этой проверки [3].

В ходе алгоритма инспекции МКК строится карта годности (рис. 3), представляющая собой матрицу из $t \times l$ элементов, где t – число МКК на паллете по горизонтали, l – по вертикали. Каждый элемент может принимать значение 0, 1 или «неопределенность» в зависимости от результата оценки качества МКК в двух точках [10]. На выходе алгоритма (рис. 4) пользователь АПАК получает готовую карту годности изделий, на основе которой принимается решение о годности МКК.

В процессе внедрения АПАК на производственных линиях графический интерфейс ПО АПАК улучшился. В результате исследова-

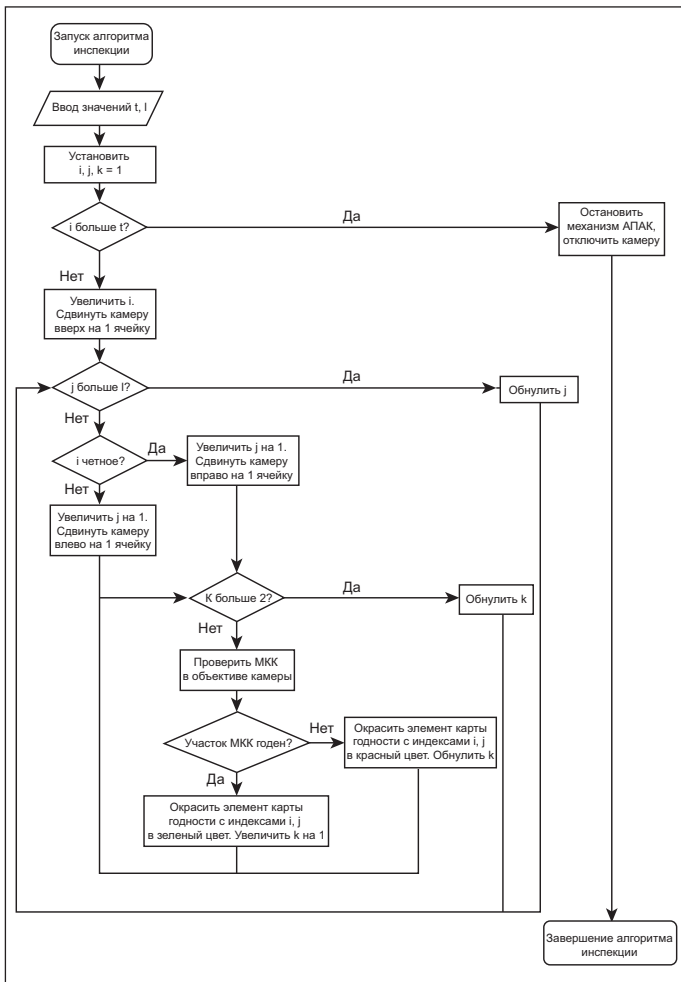


Рис. 4. Структурная схема алгоритма инспекции МКК

ния с участием специалистов АО «Завод «Марс» в области контроля качества МКК была разработана новая модель пользовательского интерфейса. Она учитывает особенности области применения АПАК, наиболее показательно представляет пользователю все возможности ПО АПАК и упрощает взаимодействие технолога-инспектора с АПАК в процессе инспекции МКК. Так, например, реализована интерактивная карта годности МКК, в режиме реального времени демонстрирующая ход алгоритма инспекции МКК, измерение размеров элементов МКК и результаты инспекции. В случае, если технолог-инспектор сочтет необходимым дополнительный контроль размеров МКК перед принятием решения о его годности, имеется возможность с помощью интерактивной карты вернуть камеру-микроскоп к конкретному МКК и повторить измерения.

Кроме того, реализована система непосредственного измерения размеров МКК с использованием стандартной для АПАК методики измерения [11] (рис. 5).

В ПО АПАК реализована возможность калибровки расположения камеры-микроскопа относительно первой ячейки паллеты с помощью пульта управления калибровкой (рис. 6). Для этого оператору необходимо вернуть камеру в аппаратно заданную точку отсчета, после чего, используя органы управления камерой, установить ее в стандартное положение. Эталонное изображение со стандартным положением МКК в объективе камеры-микроскопа загружается из БД.

Необходимость такой калибровки связана с возможностью внешнего воздействия на АПАК и смещения камеры или паллеты, а также с учетом внутренней погрешности механизма АПАК, вносимой им при движении камеры, и неизбежно накапливающейся со временем.

У использующего АПАК технолога-инспектора имеется возможность выполнить дополнительную проверку МКК в пограничных случаях, а алгоритм автоматического движения механизма АПАК позволяет технологу-инспектору сосредоточить свои усилия на контроле параметров МКК и анализе карт годности, в том числе – статистическом: ПО АПАК предоставляет возможность не только построения карты годности МКК, но и сбора статистических данных о проценте брака в рамках партии МКК. Анализ контрольных карт годности, построенных при обработке этих данных (строятся в ПО АПАК автоматически) позволяет специалистам АО «Завод «Марс» оказывать влияние на технологические процессы изготовления МКК с целью обеспечения качества продукции.

Выводы

В этой статье были рассмотрены:

- понятие МКК, область их применения и связанные с ней особенности МКК;
- особенности производства и контроля качества МКК, учтенные в процессе разработки АПАК;
- структурная схема АПАК, внедряемые на участок контроля МКК;
- математические и алгоритмические основы методов контроля качества МКК, применяемых в ПО АПАК;

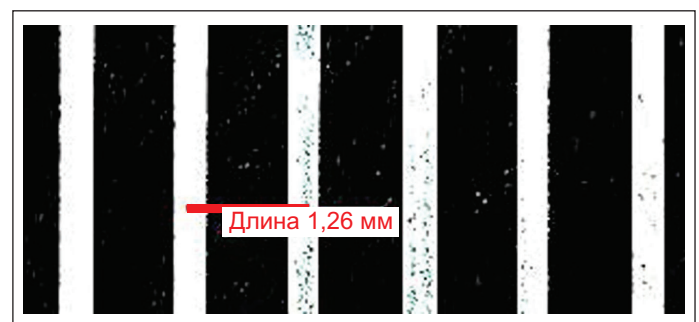


Рис. 5. Ручное измерение расстояния между выводами МКК средствами ПО АПАК

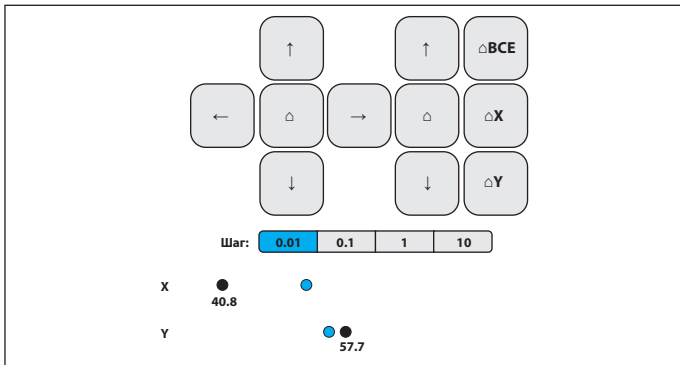


Рис. 6. Пульт управления калибровкой АПАК

- инженерные решения, впервые принятые при разработке ПО АПАК для расширения функциональных возможностей и удобства использования АПАК технологом-инспектором.

Установлено, что применение АПАК в процессе контроля качества МКК типа 4 на предприятии-изготовителе позволяет повысить точность обнаружения дефектов в видимом диапазоне, а используемый метод также годится для автоматизации оценки качества других типов МКК на разных производственных линиях. Определены перспективы дальнейших исследований применимости АПАК для более комплексной визуальной оценки МКК, повышения удобства использования АПАК технологами-инспекторами и статистической обработки полученных данных для развития технологических процессов изготовления МКК. ■

Литература

- ГОСТ Р 57435-2017 Микросхемы интегральные. Термины и определения.
- Pecht M. G. et al. (ed.). Quality Conformance and Qualification of Microelectronic Packages and Interconnects. John Wiley & Sons. 1994.
- Дормидошина Д. А. Ключевые преимущества компьютерного зрения в промышленности. Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2025. №3.
- Дормидошина Д. А., Рубцов Ю. В. Обзор и анализ методов предварительной обработки изображений в автоматическом оптическом контроле качества изделий электронной техники. Флагман науки. 2025. №8.
- Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 1. Технические средства настройки изображений для видимого диапазона обнаружения дефектов. Электронные компоненты. 2025. №2.
- John Canny. A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 8. #6. November 1986.
- Рубцов Ю. В., Мальшев В. Э., Назаренко А. А. Автоматизированный визуальный контроль качества изделий микроэлектроники методом сравнения шаблонов. Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2024. №1.
- Sobel I. et al. A 3×3 Isotropic Gradient Operator for Image Processing a Talk at the Stanford Artificial Project in 1968. Google Scholar. 1968.
- Duda R. O., Hart P. E. Pattern Classification and Scene Analysis. A Wiley-Interscience Publication. 1973.
- ГОСТ Р 54844-2011 Микросхемы интегральные. Основные размеры.
- Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 2. Измерение обнаруженных дефектов в видимом диапазоне. Электронные компоненты. 2025. №3.