

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

Часть 1. Технические средства настройки изображений для обнаружения дефектов в видимом диапазоне

Дарья ДОРМИДОШИНА,
заместитель генерального директора,
АО «ЦКБ «Дейтон»
Юрий ЕВСТИФЕЕВ,
к.т.н., старший научный сотрудник,
профессор, АО «ЦКБ «Дейтон»,
medved55@mail.ru
Юрий РУБЦОВ,
генеральный директор,
АО «ЦКБ «Дейтон»

Актуальность этой работы обусловлена кратным увеличением объемов производства и числа наименований изделий микроэлектроники в России в 2022–2024 гг. в условиях санкций, запрета легального доступа к лучшим дорогостоящим зарубежным системам поиска дефектов Cognex-Vidi и Visual Inspection AI (США) и отсутствием отечественных оптических автоматизированных программно-аппаратных комплексов (АПАК) для поиска дефектов изделий микроэлектроники. Эти три обстоятельства вдохновили разработчиков предприятия АО «ЦКБ «Дейтон» создать комплекс с технологиями искусственного интеллекта (ИИ) и открытой архитектурой, адаптирующийся под линейки изделий микроэлектроники и процессы их изготовления ведущими производителями России.

Введение

Программное обеспечение (ПО) АПАК включает в себя системное ПО и ПО баз данных от «Ред Софт» [1–3], языки программирования Java [4], Python [5], С# [6], компьютерное зрение, машинное обучение, нейронные сети, являющиеся технологиями ИИ.

Создание и внедрение АПАК обеспечивает следующий ряд преимуществ: сокращение времени машинного обучения за счет отработки технологий выборки изделий с дефектами (в настоящее время при 30 видах дефектов требуется 6 тыс. изображений образцов с дефектами или их описаний для одного оператора, что занимает более года по 8 ч ежедневной работы); сортировка изделий с дефектами, не являющимися браком, для отнесения к более низкой категории качества; создание глобальной базы дефектов; программный анализ роста числа дефектов; формирование предложений для внесения изменений в технологические процессы; документирование (стандартизация) и использование приобретаемого опыта в дальнейших разработках; обнаружение скрытых дефектов (прозрачные частицы); использование цветофильтров, зеркал; программирование интенсивности освещения; программирование скорости перемещения камеры-микроскопа (или изделия); обеспечение надежности электронных и механических частей; отработка методов аттестации устройств и порядка подтверждения результатов проверки качества изделий

ЭКБ; разработка устройств автоматической загрузки и выгрузки (сортировки) изделий; унификация и симплификация электронных и механических комплектующих. Прорабатываются вопросы о переходе от сверточных к капсульным нейронным сетям [7], обеспечения лучшего понимания контекста и повышения точности обнаружения дефектов.

Технолог-инспектор, специалист в возрасте 20–25 лет с опытом работы более года, со здоровым зрением с вероятностью в 85% отличает качественное изделие от некачественного, тогда как система автоматизации уже сейчас обеспечивает 90-% вероятность обнаружения дефектов. АПАК развивается. Ожидается, что вероятность обнаружения дефектов повысится.

Возможны варианты адаптации АПАК к поиску внешних и внутренних дефектов в кристаллах микросхем и полупроводниковых приборов, микроэлектронных механических систем (МЭМС), изделий пьезотехники, микросборок, модулей, резисторов и другой номенклатуры изделий электронной компонентной базы (ЭКБ).

Разработка и внедрение АПАК на ведущих предприятиях России и Белоруссии позволит значительно ускорить и увеличить выпуск изделий электронной техники (ИЭТ) высокого качества, уменьшить их стоимость и затраты на материалы, сократить трудоемкость производства. АПАК целесообразно использовать в системах входного контроля ИЭТ и поиска дефектов в результате их монтажа на пред-

приятных–изготовителях РЭА. АПАК в производственном режиме уже работает в цехах АО «Завод «Марс» для проверки корпусов микросхем и применяется в системах оценки качества микросварки конденсаторов производства АО «Электонд» на аппаратах микросварки с помощью электромагнитных датчиков в реальном производственном режиме. Планируется применение на других предприятиях, изготавливающих микроэлектронные изделия. Наряду с видимым оптическим диапазоном планируется применение лазерного, инфракрасного, ультрафиолетового, ультразвукового, рентгеновского способа обнаружения внешних и внутренних дефектов. При этом используются основные принципы настройки изображения, описанные в настоящей статье.

Исследования физических отклонений в изделиях обеспечит понимание возможного механизма образования дефектов, а полученные знания затем можно в дальнейшем использовать для усовершенствования процесса разработки, технологии и изготовления изделий.

Первую часть статьи по разработке АПАК мы начинаем с описания настройки изображения для обнаружения дефектов сложнointегрированных металл–стеклокерамических корпусов микросхем в видимом оптическом диапазоне излучения (оптическое излучение относится к электромагнитному излучению в диапазоне длин волн 100 нм...1 мм [8]; термины «свет» и «видимое излучение» относятся к диапазону длин волн 360–830 нм, который воспринимается человеческим глазом).

В следующих частях статьи мы опишем измерение обнаруженных дефектов, автоматизацию процессов обнаружения дефектов, требования к устройствам компьютерного зрения, систему управления роботизированными устройствами, примеры внедрения и эксплуатации на заводах–изготовителях.

Основная часть

В производственной среде изготовители, в основном, применяют методы видимого контроля для обнаружения дефектов продукции на сборочной или производственной линиях. Эти методы используют обработку и анализ изображений для поиска несоответствия продукции на основе заранее определенных критериев и успешно применяются для обнаружения дефектов поверхности. Методы видимого контроля также позволяют оценить неоднородности на поверхностях изделий. Получение изображения является важным процессом в видимом контроле. Традиционно оптическая микроскопия используется для поверхностного осмотра с целью получения изображений с высоким разрешением, хотя она имеет ограниченное поле зрения и больше подходит для определенного класса изделий микроэлектроники. Можно снять изображение изделия целиком благодаря большому полю зрения, однако разрешение полученных изображений намного ниже по сравнению с изображениями, полученными путем посегментного осмотра изделий.

В АПАК используется метод мезоскопии [9], который объединяет в себе большое поле зрения с возможностями высокого разрешения оптической микроскопии. Мезоскопия применяется для получения изображений с высоким разрешением для обнаружения дефектов на изделиях, например до 3 мкм на пиксель. Для анализа этих дефектов малого размера требуются изображения с очень высоким разрешением. Важным процессом при этом является пороговая обработка, которая преобразует цветное или полутоновое изображение в бинарное.

Пороговая обработка – простейший метод сегментации изображения на области с общими свойствами. Метод позволяет создать черно–белые бинарные изображения из полутоновых или цветных путем преобразования интенсивности всех пикселей в отдельные значения: один или ноль. Пороговое значение снижает интенсивность пикселей относительно определенного значения до нуля (черный), тогда как пикселям выше этого значения присваивается единица (белый). Пороговое значение полезно для быстрой оценки сегментации изображений благодаря своей простоте и высокой скорости обра-

ботки. Метод пороговой обработки является популярным способом обработки изображений и используется по умолчанию для порогового удержания в таком ПО как MATLAB. Пороговая обработка классифицирует сегменты на изображении. Зарубежные разработчики поиска дефектов используют метод пороговой обработки с минимальной ошибкой (Minimum Error Thresholding, MET), который, как было доказано, превосходит другие технологии пороговой обработки в обзоре 40 разных методов. Кроме того, были предложены модифицированные подходы с использованием этих методов, в которых вместо среднего значения используется медиана данных гистограммы яркости. Было обнаружено, что медианное расширение исходного метода MET работает лучше, чем их исходный аналог для изображений с сильно перекошенным и тяжелым хвостовым распределением яркости. Разработчики АПАК исследовали методы с коррекцией контраста и методы с коррекцией контраста на основе медианы для различения дефектов путем применения специфичных для изображения корректировок контраста, а затем использования метода Оцу (Nobuyuki Otsu) на основе медианы для пороговой обработки [10].

Метод Оцу – алгоритм вычисления порога бинаризации для полутонового изображения, применяемый для распознавания образов и обработки изображений. Назван в честь доктора инженерии Токийского университета Нобуюки Оцу.

Для настройки изображений в видимом диапазоне обнаружения дефектов разработаны средства, представленные внешним интерфейсом в разделе АПАК «Изображение» на странице «Пульт управления Системой», что позволяет настроить изображение для идентификации дефектов. Настройки выполняются по: размеру изображения, яркости, контрастности, зернистости, насыщенности, фильтрам цветности, контурности (рис. 1).

Окно с изображением изделия размещается в левом верхнем углу экрана монитора (дисплея), входящего в состав АПАК (рис. 2).

В верхней центральной части окна с изображением изделия находятся кнопки установки размера и перемещения изображения (рис. 3а–б). При превышении изображением размеров экрана предоставляется возможность выполнять навигацию, перемещая изображение: в правый верхний угол, в центр верхней части изображения, центральную часть, в правый нижний угол, в центр нижней части изображения, в левый нижний угол.

Аналогичные кнопки навигации находятся также в окне «Пульт управления Системой» на вкладке «Изображение» (см. рис. 1).

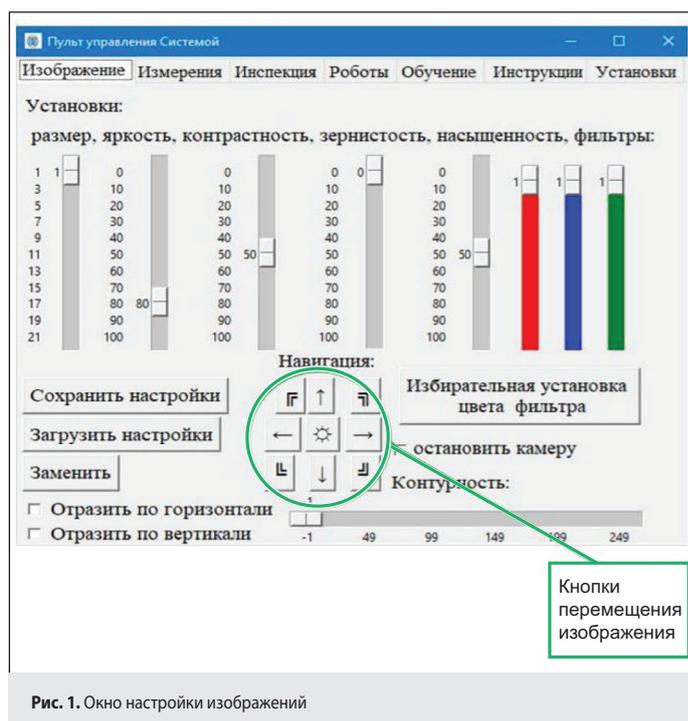


Рис. 1. Окно настройки изображений



Рис. 2. Окно с изображением изделия

Установки размера изображения в окнах с изображением изделия и на вкладке «Изображение» страницы «Пульт управления Системой» связаны синхронно. В результате проведенных исследований была определена наиболее оптимальная кратность (от 1 до 21) увеличения изображения для пользователей АПАК и для требований к камере-микроскопу, системе обработки изображений, дисплею, а также к обнаружению дефектов конкретного типа изделия. Съем изображения выполняется с помощью камер-микроскопов видимого диапазона. Просмотр – с помощью дисплеев. Параметры камер-микроскопов и дисплеев определяются постановкой задачи на обнаружение дефектов.

Изменение величины изображения, в процессе которого его размер изменяется по осям x и y (ширине и высоте), выполняется пропорционально. Если увеличение выполняется с кратностью 10, с этой же кратностью происходит увеличение как по оси x , так и y . Для формализации задачи увеличения изображения использована следующая формула (1):

$$F_{\text{вых}}(x, y) = F_{\text{вх}}(f_x(x, y), f_y(x, y)), \quad (1)$$

где $f_x(x, y)$ – функция обработки входного изображения по оси x ; $f_y(x, y)$ – функция обработки входного изображения по оси y ; $F_{\text{вх}}$ – входное изображение; $F_{\text{вых}}$ – результирующее изображение.

Размер изображения увеличивается для поиска дефектов на нем и измерения размеров дефектов, а также для машинного обучения [11]. Увеличение помогает изменить количество пикселей на изо-

бражении, изменив тем самым время для машинного обучения, количество входных узлов, что, в свою очередь, изменяет сложность модели нейронной сети.

Для выбора оптимального в конкретных условиях эксплуатации АПАК метода увеличения размера изображения были выполнены исследования со следующими приемами:

- интерполяции по ближайшему соседнему пикселю: округление координат обрабатываемых пикселей до ближайших целочисленных координат исходного изображения и использование их значений интенсивности. Это самый простой и быстрый метод, который, однако, дает пикселизованное изображение (пиксели становятся резкими границами вместо плавного изменения интенсивности участков изображения);
- аффинные преобразования: для каждого пикселя конечного изображения используется фиксированный набор точек исходного изображения и интерполируется в соответствии с их взаимным положением и выбранным способом (окна фильтров). Для билинейной интерполяции используется 2×2 исходных пикселя, для бикубической – 4×4 . Такой прием сглаживает изображение при увеличении. Время преобразования информации заметно больше, чем при интерполяции по ближайшему соседнему пикселю, и зависит от размера конечного изображения и способа интерполяции;
- суперсэмплинг: разбиение исходного изображения по сетке пикселей конечного изображения. Поскольку при использовании этого метода для увеличения на каждый пиксель конечного изображения приходится один пиксель исходного, результат увеличения равен ближайшему соседу.

Можно выделить два подвида этого приема: с округлением границ пикселей до ближайшего целого числа пикселей и без такового. В первом случае подвид этого приема используется в случаях, когда размер исходного изображения кратен размеру конечного. Отношение обработанных пикселей к исходным при округлении границ равно единице.

Подвид без округления при увеличении дает негативный эффект, когда большая часть исходного пикселя на конечном изображении выглядит однородной, но на краях виден переход. Отношение обработанных пикселей к исходным без округления границ может заключаться в пределах 1–4, потому что каждый исходный пиксель вносит вклад либо в один конечный, либо в два соседних, либо в четыре соседних пикселя.

Производительность этого приема ниже, чем у аффинных преобразований, потому что в расчете конечного изображения участвуют все пиксели исходного. Версия с округлением до ближайших границ работает быстрее;

- свертка: подобна аффинным преобразованиям, так как используются интерполяции, но имеет не фиксированное окно, а окно,

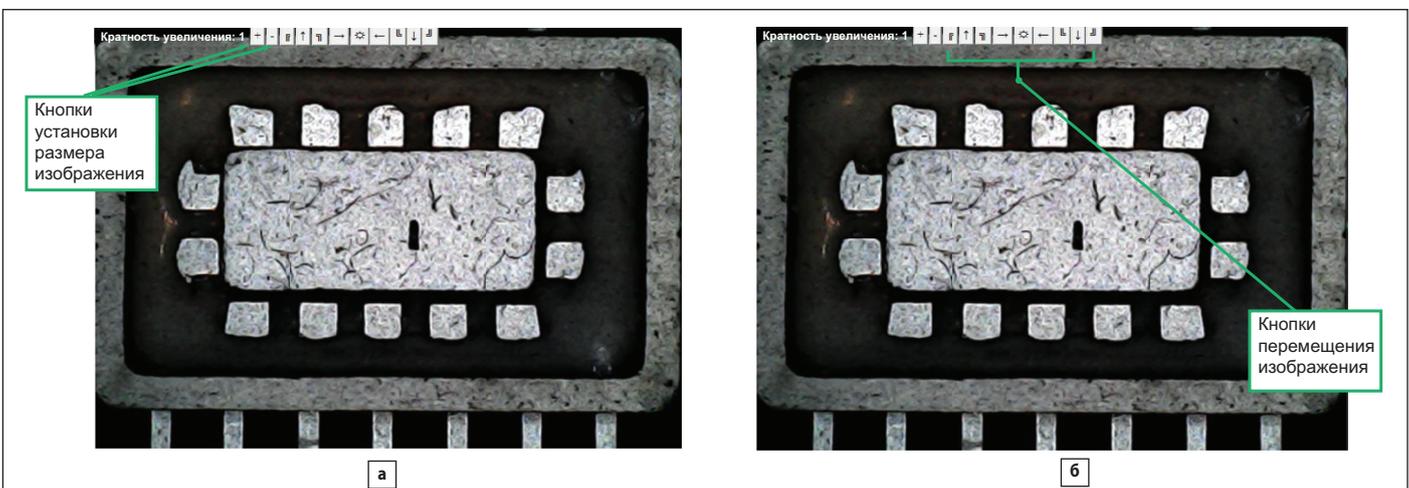


Рис. 3. Кнопки для: а) установки размера; б) перемещения изображения

пропорциональное масштабу. Вклад каждого исходного пикселя в конечный определяется фильтром. Отношение обработанных пикселей к исходным целиком определяется размером окна фильтра. Скорость работы этого метода зависит от размеров: исходного изображения, конечного изображения, окна фильтра.

Одно из преимуществ этого приема в том, что фильтры могут задаваться отдельной функцией, никак не привязанной к реализации метода. При этом функция самого фильтра может быть достаточно сложной без особой потери производительности, поскольку коэффициенты для всех пикселей в одном столбце и для всех пикселей в одной строке считаются только один раз. Таким образом, сама функция фильтра вызывается только $(a + b) \cdot c$ раз, где a и b – размеры конечного изображения, а c – размер окна фильтра.

В зависимости от требований к размерам и контрастности дефектов, скорости их обнаружения в АПАК применяются перечисленные выше приемы увеличения размера изображения; при этом учитывается их способность влиять на качество результирующего изображения в виде изменений яркости, контрастности, зернистости.

Это объясняется введением артефактов в изображение и устраняется регулировкой параметров изображения – яркости, контрастности, зернистости, насыщенности, цветности, контурности.

Яркость изображения характеризуется интенсивностью света, отраженного от изделий и дефектов. Камеры-микроскопы в АПАК могут принять только отраженный свет. Однако отражательная способность у всех элементов изображения – разная, в том числе у дефектов. Работа камеры-микроскопа АПАК настроена на основе яркости света, который мог бы быть отражен от нейтрально-серой поверхности. Камера-микроскоп АПАК определяет интенсивность света исходя из этого критерия. Соответственно, все элементы изображения могут быть темнее или светлее нейтрально-серой поверхности. При яркости, установленной в ноль на вкладке «Изображение» странички «Пульт управления Системой», все элементы изображения становятся темными и неразличимыми (рис. 4). При максимальной установке яркости часть элементов изображения проявляется достаточно четко и идентифицируется как дефект, а другая часть засвечивается и не определяется (рис. 5).

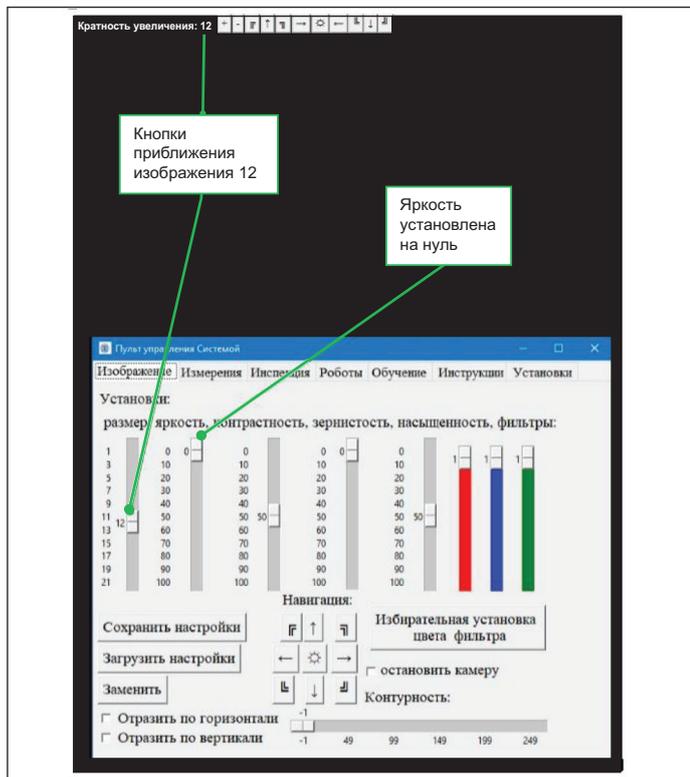


Рис. 4. При нулевой яркости все элементы изображения становятся неразличимыми

Поскольку дефекты в большинстве случаев отличаются по яркости от элементов изделия, представляется возможным определять области дефектов, которые темнее или светлее. Соответственно, предполагается, что яркость дефектов окажется в несколько другом интервале, чем яркость элементов изделия [12]. Пороговая обработка изображения осуществляется в том известном диапазоне яркости, в котором имеются дефекты. Пусть интервал (b_1, b_2) определяет диапазон изменения яркости пикселей. В таком случае можно преобразовать (бинаризовать) изображение в двухцветное черно-белое по двойному порогу:

$$f(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) \leq b_1 \\ 1, & b_1 < f(x, y) < b_2 \\ 0, & f(x, y) \geq b_2 \end{cases}$$

В том случае, когда яркость пикселя находится в заданном диапазоне, его значение приравнивается единице (на практике обычно 255, что равняется белому цвету). В иных случаях значение обращается в 0, и пикселю присваивается черный цвет.

Порог также может быть не двойным, а задаваться одной константой b . Если это верхний порог, то все значения больше b равны 255, а меньше b – нулю. В отношении нижнего порога действует в точности противоположное правило. Чтобы определить необходимый диапазон изменения яркости, вычисляется гистограмма яркости. Ее построение подразумевает распределение пикселей по уровням яркости. По ним выбирается тот самый интервал, в котором содержатся значения яркости областей дефектов. По найденному интервалу осуществляется сегментирование изображения по порогу. Такое бинарное изображение содержит в себе контуры искомым дефектов.

По оси абсцисс гистограммы откладываются числовые значения яркости, по оси ординат – число точек изображения (пикселей) с этой яркостью. Аргументы гистограммы упорядочиваются по возрастанию: чем правее расположена точка на горизонтальной оси, тем больше яркость у пикселя. Минимальное значение яркости, равное нулю соответствует началу координат гистограммы. Эта точка шкалы пред-



Рис. 5. Результат максимальной установки яркости

ставляет черный цвет. Самая правая точка (белый цвет со значением яркости равным 255) является самой яркой. Высота каждого столбца гистограммы равняется числу пикселей изображения с определенным значением яркости.

При обнаружении дефектов в рамках гистограммы рассчитываются и используются на изображении: средняя яркость всех пикселей изображения и отклонение от среднего значения. Это число показывает, насколько велики пределы изменения яркостных значений изображения или его фрагментов.

При построении гистограммы задается значение уровня кеширования (временное хранение некоторых часто читаемых данных в месте, откуда их можно прочитать). Чем выше это значение, тем быстрее и менее точно рассчитывается распределение яркостей пикселей изображения.

Для коррекции яркости изображения между входными значениями и выходными значениями изображений в АПАК используется гамма-коррекция (обозначаемая как γ). Применяется классическая функция, описанная формулой (2):

$$F_{\text{ВЫХ}} = (kF_{\text{ВХ}})^{\gamma}, \quad (2)$$

где $F_{\text{ВЫХ}}$ и $F_{\text{ВХ}}$ – неотрицательные вещественные числа; k – коэффициент гамма-коррекции.

Поскольку связь между входными и выходными значениями изображений нелинейная, эффект не одинаков для всех пикселей и зависит от их исходной величины. В разработке используются подтвержденные на практике результаты исследований разработчиков OpenCV Python; при этом формула (2) преобразована с учетом количества полутонов 255 (3):

$$F_{\text{ВЫХ}} = 255 \cdot \left(\frac{kF_{\text{ВХ}}}{255} \right)^{\gamma}. \quad (3)$$

Гистограмма таких расчетов при $\gamma = 2$ для изображения на рис. 2 показана на рис. 6.

При $\gamma < 1$ ухудшается распознавание элементов изделия (в том числе дефектов) на слабо освещенных участках. При $\gamma = 1$ и $k = 1$ характеристика передачи полутонов линейна, и перепады освещенности изделия в светах и тенях отображаются одинаково. При $\gamma > 1$ в тенях остается слишком мало информации, что снижает качество изображения; неизбежна постеризация (огрубление цветовых и тональных переходов) изображения. При этом оператор АПАК, обучающий средства распознавания, различает только ступенчатые тональные переходы. Следовательно, дефект на изделии может быть не обнаружен. Примеры изображения изделия для разных $\gamma < 1$, $\gamma = 1$ и $\gamma > 1$ показан на рис. 7.

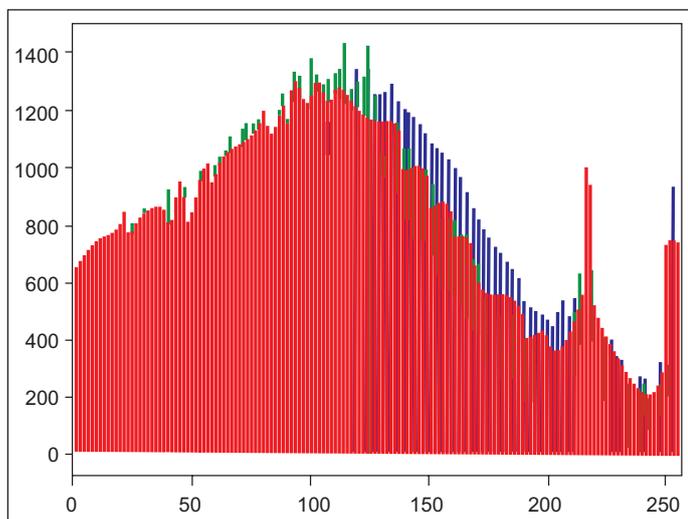


Рис. 6. Гистограмма расчетов при $\gamma = 2$

Яркость соответствующего пикселя, которая зависит от таких факторов как отражательные свойства поверхности изделия (определяемые материалом поверхности и микроструктурой), свойства освещения и поверхность изделия, ориентация по отношению к камере-микроскопу и источнику освещения является основным фактором изображения. Таким образом, остальные механизмы настройки в изображении АПАК – производные от яркости, но они также необходимы для настройки изображения и поиска на нем дефектов.

Итак, для определения дефектов необходима настройка яркости и запись ее значения для дальнейшей установки при проведении инспекции.

Контрастность изображения – разница в яркости между светлыми и темными областями изображения. Контрастность определяет количество оттенков на изображении. Изображения с низкой контрастностью выглядят детализованными, но им недостает объема, и они выглядят расплывчатыми. Изображения с нормальной контрастностью выглядят детализованными, четкими и объемными. Изображения с высокой контрастностью не выглядят детализованными, особенно в областях с градуированными тонами (переходами между двумя или более цветами или двумя оттенками одного цвета) и могут быть чрезмерно постеризованными. В результате получается обобщенное изображение с ограниченным количеством полутонов и трудно различимыми дефектами.

Изменение контрастности изображения подразумевает изменение значения каждого его пикселя. Изменение выполняется в АПАК путем умножения или деления значений пикселей изображения на соответствующую константу, значение которой было определено от абсолютно малой величины $1 \cdot 10^{-12}$ до 2 при апробировании АПАК.

Для увеличения уровня контрастности каждый пиксель изображения умножается на положительное значение больше 1, а для уменьшения ее уровня – на положительное значение меньше 1. При этом недопустимо выходить за пределы тонов яркости пикселей. Следовательно, максимально допустимый предел составляет 255; пикселю присваивается только максимально допустимое значение вместо нового увеличенного значения.

При уменьшении значения контрастности, значение любого пикселя не должно быть ниже минимально допустимого значения 0.

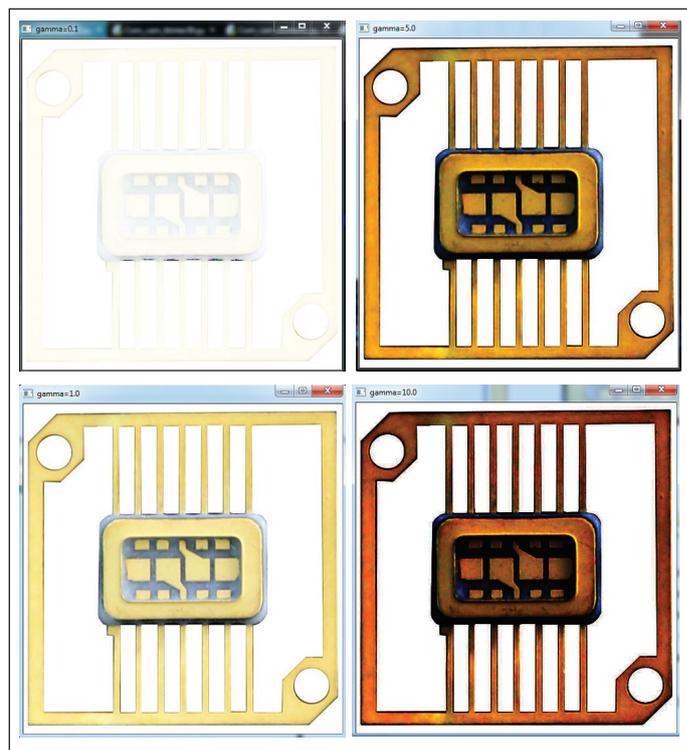


Рис. 7. Изображения изделия при $\gamma < 1$, $\gamma = 1$ и $\gamma > 1$

Таким образом может происходить искажение тонов яркости изображения. Для исключения подобного эффекта в АПАК вводится коэффициент, меняющийся при приближении результирующего значения к границам 0 и 255. Функция настройки контрастности в АПАК имеет следующий вид (4):

$$F_{\text{вых}} = F_{\text{вх}}k + b, \quad (4)$$

где $F_{\text{вых}}$ и $F_{\text{вх}}$ – неотрицательные вещественные числа; k – коэффициент настройки контрастности; b – величина коррекции контрастности для обеспечения целочисленного положительного значения и с учетом достижения границ 0 и 255.

На рис. 8 показана контрастность на низком и высоком уровнях после подключения функции выделения фрагментов. Явно видно, что при увеличении контрастности изображения шум и ложные срабатывания уменьшаются.

Зернистость изображения определяет чрезмерную избыточность видеосюмов на изображении. Эффект проявляется в виде разноцветных точек, хаотично разбросанных по всему изображению. Как фотопленка с небольшим зерном имеет лучшее разрешение, но меньшую чувствительность, так и камера-микроскоп с большим количеством элементов обеспечивает изображение с лучшим разрешением, но меньшим количеством света на пиксель. Таким образом, как и зерно фотопленки, физический размер пикселя представляет собой компромисс между разрешением и чувствительностью.

Если зерна фотопленки распределены случайным образом и имеют разный размер, ячейки датчика изображения имеют одинаковый размер и расположены в виде сетки. Настройки зернистости регулируют коэффициент усиления в программе обработки. В итоге, высокие значения зернистости дают шумное изображение, внешне сходное с традиционной фотопленкой.

Источниками зернистости изображения являются: процесс его получения, оцифровка, а также процесс передачи. Работа камер-микроскопов, реагирующих на электромагнитное излучение в видимом спектральном диапазоне, зависит не только от внешних условий в процессе получения изображения, но и от качества самих камер. Влияющими на величину шума факторами являются уровень освещенности и температура сенсоров камер-микроскопов. В процессе передачи изображения могут искажаться помехами, возникающими в каналах связи. При передаче изображения с использованием беспроводной связи оно может искажаться из-за внешних воздействий.

Как и в любом техническом приспособлении, в сенсорах и объективах камер-микроскопов иногда имеются производственные дефекты, повреждения, неработающие пиксели и т.д. При наличии такого недостатка на изображения может появиться зернистость в одних и тех же местах.

Зернистость изображения может быть яркостная. Это точки, которые выглядят светлее или темнее окружения. Такой шум похож на пыль, которой «присыпано» изображение. Темная зернистость возникает из-за съемки со слабым освещением изделия, а светлая – из-за очень интенсивного освещения.

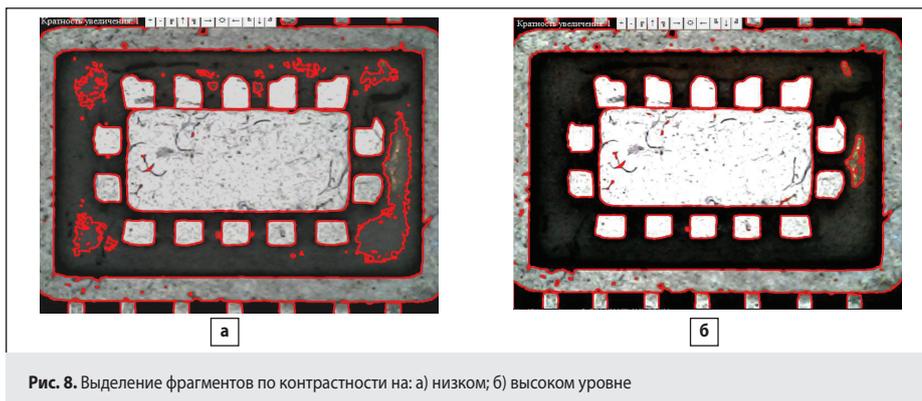


Рис. 8. Выделение фрагментов по контрастности на: а) низком; б) высоком уровне

Хроматическая зернистость изображения выглядит как цветные пятна, разводы или рябь на картинке. Если приблизить изображение, можно заметить пиксели, которые являются более красными, зелеными или синими, чем они должны быть. Одна из причин появления хроматической зернистости – разная чувствительность цветовых каналов сенсора камеры-микроскопа.

В промышленной визуализации точное обнаружение и различение дефектов изделий от шума является критически важным и трудным, особенно в сложных производственных средах.

Добавление зернистости изображения может оказаться желательным способом скрыть при необходимости артефакты, которые появились в результате съемки, сжатия или обработки изображения, и тем самым повысить вероятность обнаружения дефектов. На рис. 9 показан уровень зернистости, когда работа с поиском дефектов практически невозможна.

Для применения инструмента зернистости в АПАК используются следующие математические соображения. Пусть $f(x, y)$ – некоторое изображение, x, y – координаты. Фактическое растровое изображение имеет конечные размеры $A \leq x \leq B, C \leq y \leq D$ и состоит из отдельных пикселей, расположенных с некоторым шагом в узлах прямоугольной сетки. Линейное преобразование изображения описывается выражением (5):

$$f(x, y) = \iint (x', y') h_1(x, y, x', y') dx' dy' \quad (5)$$

Интегрирование в выражении (5) ведется по всей области определения x и y , характеризует преобразование всего изображения целиком (глобальное преобразование для изображения); преобразование $h_1(x, y, x', y')$ является функцией рассеяния. Это фрагмент изображения, который после преобразования является пятном. В соответствии с (5), все точки изображения $f(x, y)$ превращаются в пятна, происходит суммирование (интегрирование) всех пятен. Такая процедура позволяет сфокусировать изображение. Функция рассеяния определена на интервалах $(-\infty < x < \infty), (-\infty < y < \infty)$ и не должна меняться при изменении начала отсчета по x и y . Для этого она должна иметь вид: $h_1(x, y, x', y') = h_1(x-x', y-y')$. Кроме того, функция рассеяния обладает осевой симметрией. В этом случае все точки изображения «расплываются» одинаково равномерно во все стороны с помощью метода пространственной инвариантности. В АПАК используется локальная пространственная инвариантность, когда интегрирование и усреднение проводится не по всей области определения x и y , а по сравнительно небольшой окрестности каждой точки изображения. Функция рассеяния точки при этом имеет ограниченные размеры. Достоинством такого подхода является сокращение времени обработки изображения.

Регулировка зернистости изображения позволяет обрабатывать зернистость, которая распространена более или менее равномерно по всему изображению. Эффекты зернистости не устраняют проблемы с изображением, которые затрагивают только некоторые пиксели (пыль, чередование черных и белых частиц или выпадение точек растра на светлых участках).



Рис. 9. Поиск дефектов невозможен из-за высокого уровня зернистости

Насыщенность цвета изображения определяется характером распределения излучения в спектре видимого света. Наиболее насыщенный цвет образуется при существовании пика излучения на одной длине волны, тогда как более равномерное по спектру излучение воспринимается как менее насыщенный цвет. В субтрактивной модели формирования цвета, например при смешении красок на бумаге, снижение насыщенности наблюдается при добавлении белых, серых, черных красок, а также краски дополнительного хроматического тона. Насыщенный цвет можно назвать сочным, глубоким, менее насыщенный – приглушенным, приближенным к серому. Полностью ненасыщенный цвет является оттенком серого.

В теории цвета насыщенность цветового, или хроматического, тона характеризуется зрительными качествами ясности и чистоты, которые достигаются отсутствием или минимизацией примесей других тонов.

Таким образом, более насыщенными являются основные тона цветового спектра: красный, синий и желтый. Поскольку ахроматические тона (от белого до черного) насыщены в наименьшей степени, они обладают максимальной способностью поглощать тона хроматического ряда. Добавление в цветовой тон черного или белого снижает его насыщенность.

Степень насыщенности изображений определяется следующим образом (6):

$$S = \exp\left(-\frac{(M-\mu)^2}{2\sigma_g^2}\right), \quad (6)$$

где M – среднее значение градаций серого нормализованного изображения; μ – ожидаемое значение, когда среднее значение изображения равно 1 и оно достигает наивысшего уровня насыщенности; σ_g – стандартное отклонение.

Для нормализованного изображения в оттенках серого процесс насыщения представлен увеличением среднего значения в оттенках серого от 0 до 1 [13]. На рис. 10 показаны кривые степени насыщения в зависимости от среднего значения в оттенках серого для разных σ_g . При проведении эксперимента, когда σ_g принимает значение 0,3, кривая наиболее близка к обеспечению выявления дефектов для уровней описанных выше настроек параметров изображения.

На рис. 11 показано, как с помощью установки насыщенности выявляются ранее не определенные дефекты и удаляются ложные срабатывания.

Фильтры цветности (цветовые фильтры) меняют цветовую палитру на экране и могут помочь отличить друг от друга элементы, в том числе дефекты, различающиеся цветом. В разделе (вкладка пульта управления АПАК – Системой) «Изображение» разработан и имеется инструмент избирательной установки цветов фильтра (рис. 12), позволяющий более детально настраивать цвет фильтра для поиска трудно обнаруживаемых дефектов.

АПАК преобразует сложное обнаружение дефектов в простую пороговую сегментацию на изображении с применением фильтра. Экспериментальные результаты для ряда дефектов показали эффективность предлагаемого метода.

Установкой значений фильтров цветности выполнено преобразование цветовых каналов, а метод расчета преобразований описан следующим образом (7):

$$\begin{cases} R'_{(x,y)} = k_R R_{(x,y)} \\ G'_{(x,y)} = k_G G_{(x,y)} \\ B'_{(x,y)} = k_B B_{(x,y)} \end{cases} \quad (7)$$

где $R'_{(x,y)}$, $G'_{(x,y)}$ и $B'_{(x,y)}$ представляют изображение после преобразования каналов R , G , B ; k_R – коэффициент ограничения восприятия красного цвета; k_G – коэффициент ограничения восприятия зеленого цвета; k_B – коэффициент ограничения восприятия синего цвета.

Среднее значение коэффициентов восприятия изображений из цветного в полутоновый определены в [14] и равны 0,299, 0,587 и 0,114, соответственно для красного, зеленого и синего цветов.

Применение фильтров обеспечивает обнаружение дефектов, не поддающихся количественному измерению, но очевидных, таких как царапины, выпуклости другие плохо определенные дефекты. Размеры дефектов обычно невелики по сравнению с отображаемой поверхностью, что нарушает однородность фона. Многие из этих неподвижных дефектов с отклонениями цвета и структуры не могут быть описаны явными мерами, что затрудняет их автоматическое обнаружение дефектов. Метод применения фильтров позволяет упростить использования сложного процесса обучения на образцах.

Контурность ПО АПАК позволяет подчеркнуть перепады яркости и контуры изображений. Выделение вертикальных перепадов осуществляется дифференцированием по строкам, горизонтальных – по столбцам. Дифференцирование производится в цифровой форме (8):

$$\begin{aligned} g_{i,k} &= \Delta f_{i,k} / \Delta x = f_{i,k} - f_{i,(k-1)}, \\ g_{i,k} &= \Delta f_{i,k} / \Delta y = f_{i,k} - f_{(i-1),k}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Delta x = 1$ – приращение вдоль строки, равное одному пикселю; $\Delta y = 1$ – приращение вдоль столбца, тоже равное одному пикселю. Выделение перепадов по диагонали можно получить, вычисляя разности уровней диагональных пар элементов.

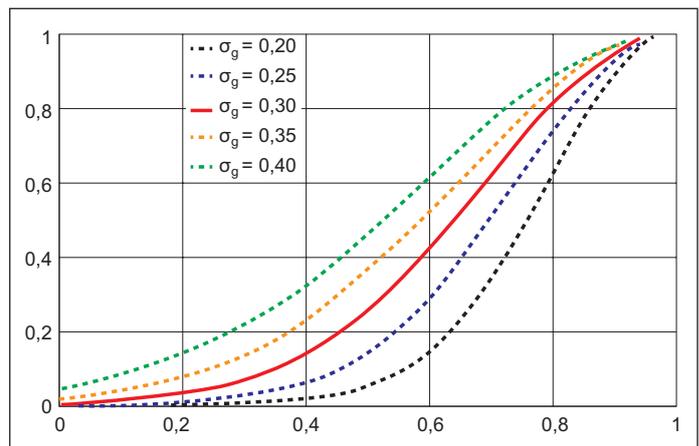


Рис. 10. Степени насыщения в зависимости от среднего значения в оттенках серого при разных σ_g



Рис. 11. Пример выявления не обнаруженного дефекта с помощью установки насыщенности

Выделение горизонтального перепада можно выполнить также путем вычисления приращения разности яркостей пикселей вдоль строки, что равноценно вычислению второй производной по направлению (оператор Лапласа) (9):

$$g_{i,k} = \Delta^2 f_{i,k} / \Delta x^2 = [f_{i,k} - f_{i,(k-1)}] - [f_{i,(k+1)} - f_{i,k}] = 2f_{i,k} - f_{i,(k-1)} - f_{i,(k+1)}, \quad (9)$$

Операторы Лапласа реагируют на перепады яркости в виде ступенчатого изменения. Они также позволяют выделять изолированные точки, тонкие линии, их концы и острые углы объектов. На рис. 8 показаны примеры таких выделений. Контурность позволяет более однозначно определять дефекты на изображении.

Отражение изображения. Флажок «Отразить по горизонтали» преобразует изображение изделия зеркально по горизонтали. Аналогично работает функция отражения изображения по вертикали (рис. 12).

Возможность сохранения настроек в файл. При нажатии кнопки «Сохранить установки» появляется диалоговое окно с установкой директории `ust_img` и файлами типа `.txt`. Имя файла формируется автоматически и состоит из идентификаторов: `ust_img` + текущие год, месяц, день, час, минута и секунда. Имя файла можно изменить в диалоговом окне «Имя файла».

Считывание настроек и их автоматическая установка выполняется при нажатии кнопки «Загрузить настройки». При этом открывается диалоговое окно, и указывается файл для считывания. Считываются и устанавливаются такие данные настройки как: размер изображения, яркость, контрастность, зернистость, насыщенность, фильтры.

Выводы

При создании программно-технических средств настройки изображений АПАК для обнаружения дефектов в видимом диапазоне получены следующие результаты:

- 1) выполнена формализация задачи исследования методов настройки изображений для компьютерного зрения;
- 2) определены и выбраны наиболее перспективные методы настройки изображений;
- 3) выбранные методы доработаны для применения в конкретных условиях;
- 4) предложены улучшения в части настройки изображений для компьютерного зрения.

Таким образом, примененные в АПАК методы настройки изображений для видимого диапазона обнаружения дефектов изделий микроэлектроники показали целесообразность своего применения, создан точный инструмент для определения дефектов, реализована обработка данных, что оптимизирует скорость работы.

Существующие методы при формализации задачи методов настройки изображений для компьютерного зрения модифицированы для решения более обширных задач поиска дефектов и будут использоваться в дальнейшей работе в разных приложениях. ■

Литература

1. Федотов А. С., Шагапов И. А. Новая российская операционная система РЕД ОС. Башкирский государственный университет. Сборник трудов конференции «Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия». Сборник материалов II Международной научно-практической конференции. Т. 2. 2019.
2. Симаков Р. СУБД «РЕД база данных» для серверных ОС. ООО «Ред Софт». Системный администратор. №7–8 (152–153). 2015.

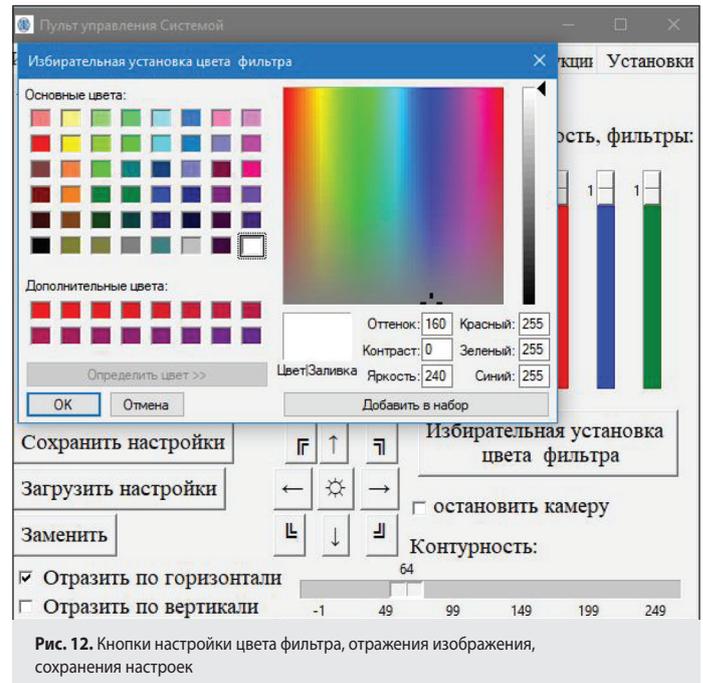


Рис. 12. Кнопки настройки цвета фильтра, отражения изображения, сохранения настроек

3. Симаков Р. Использование СУБД «РЕД база данных» в МИВЛГУ. ООО «Ред Софт». Муром. Статья в сборнике трудов четырнадцатой конференции «Свободное программное обеспечение в высшей школе». 2019.
4. Киященко В. В. Алгоритмы распознавания дефектов двухкомпонентных композиционных покрытий по их изображениям. Самарский государственный технический университет. Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. Самара. №1 (49). 2024.
5. Dainius Varna, Vytautas Abromavičius. A System for a Real-Time Electronic Component Detection and Classification on a Conveyor Belt. Applied Sciences 12 (11):5608. May. 2022.
6. Zhichen Liu, Lei Jiao, Yi Shi, Liang Li. C# – The System of Data Acquisition and Control. IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). December. 2017.
7. Karan Sood, Jinan Faiidhi. Capsule Networks: An Alternative Approach to Image Classification Using Convolutional Neural Networks. April. 2020.
8. ГОСТ 15049–2023 Источники света электрические. Термины и определения. Официальное издание. М. ФГБУ «РСТ». 2023.
9. Anna N. Morozovska, Eugene A. Eliseev, Dmitry V. Karpinsky, Maxim V. Silibin, Rama Vasudevan, Sergei V. Kalinin & Yuri A. Genenko. Mesoscopic Theory of Defect Ordering–Disordering Transitions in Thin Oxide Films. Scientific Reports. V.10. N. 22377. 2020.
10. Jonathan T. Barron. A Generalization of Otsu’s Method and Minimum Error Thresholding. October 2020. Lecture Notes in Computer Science.
11. Аваков С. М., Воронов А. А., Ганченко В. В. Принципы проектирования и разработки программного обеспечения для оборудования контроля качества топологических структур в микроэлектронике. ОАО «Планар». Минск. Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси. Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. № 2 (43). 2024.
12. Qiwu Luo, Xiaoxin Fang, Li Liu, Chunhua Yang. Automated Visual Defect Classification for Fat Steel Surface: A Survey. March. 2020. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020.
13. Yuanlong Deng, Xizhou Pan, Xiaopin Zhong, and Guangjun Huang. Improved Imaging of Extremely-Slight Transparent Aesthetic Defects Using a Saturation Level-Guided Method. Optics Express. Vol. 28. Issue 3. 2020.
14. Zhixi Wang, Wenqiang Xie, Huaixin Chen, Biyuan Liu and Lingyu Shuai. Color Point Defect Detection Method Based on Color Salient Features. Department of Resources and Environment. University of Electronic Science and Technology of China. Electronics. 2022. 11 (17).

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

Часть 2. Измерение обнаруженных дефектов в видимом диапазоне

Дарья ДОРМИДОШИНА,
заместитель генерального директора,
АО «ЦКБ «Дейтон»
Юрий ЕВСТИФЕЕВ,
к.т.н., старший научный сотрудник,
профессор, АО «ЦКБ «Дейтон»,
medved55@mail.ru
Юрий РУБЦОВ,
генеральный директор,
АО «ЦКБ «Дейтон»

В первой части статьи (см. ЭК №2, 2025 г.) были описаны методы и способы настройки изображений для видимого диапазона обнаружения дефектов. Во второй части рассматриваются методы измерения, классификации и формирования базы данных (БД) дефектов с помощью автоматизированного программно-аппаратного комплекса (АПАК) для поиска дефектов изделий электронной техники (ИЭТ). При этом изображение дефекта сохраняется в базе данных для дальнейшего применения.

В следующих частях статьи описываются функции автоматического опознавания дефектов, требования к устройствам компьютерного зрения, система управления роботизированными устройствами АПАК, примеры внедрения в производство из практики исследований, разработки и эксплуатации на заводах-изготовителях ИЭТ и перспективы развития АПАК.

Введение

Разработка и внедрение АПАК проведена специалистами АО «ЦКБ «Дейтон» в целях сокращения затрат и повышение качества продукции, выпускаемой предприятиями радиоэлектронной промышленности.

Обнаружение дефектов с помощью компьютерного зрения (КЗ) в производстве ИЭТ – автоматизированный процесс, в котором используются камеры–микроскопы высокого разрешения, программное обеспечение (ПО) для проверки наличия дефектов в видимом диапазоне и их анализа в режиме реального времени, узлы робототехнических средств для отбора ИЭТ, обеспечивая высокое качество и эффективность процессов производства.

Дефектом является каждое отдельное несоответствие ИЭТ требованиям, установленным нормативной документацией. Дефектами могут быть не только недопустимые нарушения поверхности в видимом диапазоне их обнаружения элементов ИЭТ, но и выход размера элемента ИЭТ за пределы допуска, несоответствие степени шероховатости поверхности изделия нормативам, наличие царапин и сколов на поверхности, содержание сторонних примесей и т. д.

Структура материала не является идеально сплошной и представляет собой химическую систему, состоящую из основного материала, внутри и по границам которой распределены примеси, а также дефекты, различающиеся размерами, формой и расположением [1].

В структуре материала можно наблюдать дислокации и вакансии (искажения и несовершенства кристаллической решетки материала).

В микроструктуре имеются микротрещины и микропоры. В макро-структуре – трещины, раковины, расслоения, рыхлости и пр.

В нормативной документации должны четко указываться предельные отклонения поверхности элементов ИЭТ от номинальных значений, при которых ИЭТ выполняют свои функции без снижения надежности.

Отклонение считается допустимым, если численное значение параметра изделия не выходит за пределы, установленные нормативной документацией. Выход этой величины за пределы означает, что ИЭТ имеет дефект.

ПО АПАК позволяет различать:

- критические отклонения при наличии которых нельзя использовать ИЭТ по назначению, так как она не отвечает требованиям безопасности;
- значительные отклонения влияют на использование ИЭТ по назначению и на ее долговечность, но не являются критическими;
- малозначительные отклонения существенно не влияют на использование ИЭТ.

Критические и значительные отклонения считаются дефектами и браком, для их выявления контроль должен быть сплошным и в отдельных случаях – неоднократным. Малозначительные отклонения считаются дефектами, но не браком, однако у некоторых ИЭТ совокупности отклонений, каждое из которых является малозначительным, могут быть эквивалентны значительному или критическому отклонению и относятся к соответствующей категории [2].

Работа АПАК на производственных линиях предприятий поддерживается и сопровождается специалистами предприятий и АО «ЦКБ «Дейтон» в части совершенствования новых технологий искусственного интеллекта (ИИ), функционирования средств робототехники и мехатроники.

На предприятиях радиоэлектронной промышленности контроль внешнего вида ИЭТ необходим для определения их качества, поскольку внешний вид влияет на функцию изделия. Однако такие характеристики ИЭТ как миниатюризация, точность, высокая плотность элементов ИЭТ (в многокристалльных модулях, гибридных микросхемах, микросборках и т. д.) представляют собой огромную проблему для ручного осмотра под микроскопом, полностью зависящую от зрения инспектора и субъективного суждения. Таким образом, для автоматизации контроля внешнего вида ИЭТ стало необходимым и обнаружение дефектов на основе обработки изображений с помощью технологий ИИ. АПАК имитирует восприятие человеческим глазом дефектов с использованием камеры–микроскопа и принимает решения с помощью компьютеров и ПО, реализуя безопасный, эффективный и бесконтактный неразрушающий контроль внешнего вида ИЭТ.

Развитие предприятий отечественной радиоэлектронной промышленности требует создания разных режимов контроля качества при смешанном серийном производстве, индивидуальном мелкосерийном производстве, а также применения систем оценки качества материалов и изделий на всех участках производственных процессов. Кроме того, следует применять возможности автоматизации многих традиционных процессов, к которым относятся вторичная выборка после производства или отслеживание качества с отдельной проверкой для многотипных изделий, совмещенных в одном ИЭТ. Эти производственные сценарии, как правило, представляют собой более сложные процессы, более высокую степень автоматизации, более строгие требования к качеству и в большей мере нуждаются в гибком систематизированном ПО для оценки качества. Однако анализ используемого КЗ за рубежом выявляет несколько заметных проблем в этой технологии, ограничивая ее применение с упомянутыми сценариями. Основные проблемы возникают при решении новых задач с использованием традиционных методов, включая адаптивность разных характеристик изображения, требования к многократному увеличению изображения, повышению производительности, обнаружению новых видов дефектов и т. д. [3].

Сложность и разнообразие характеристик изображения дефектов ИЭТ, в основном, являются результатом вмешательства факторов окружающей среды и непредсказуемости самих дефектов. Возникает ряд проблем, к которым относятся, например, разные варианты внешнего вида, неоптимальное освещение, дающее значительную информацию, которая не относится к поставленной задаче (фон или шум). Для традиционных алгоритмов обнаружения дефектов незначительные изменения изображения могут привести к сбою на любом этапе производства и появлению партии бракованных изделий.

Дефекты могут варьироваться от незначительных проблем, которые оказывают минимальное влияние на ИЭТ, до серьезных, которые делают ИЭТ непригодным для использования или процесс неэффективным. Определяя и классифицируя типы дефектов, которые имеют отношение к оцениваемому ИЭТ или процессу, предприятия обеспечивают согласованность в отчетности и сравнении.

АПАК разработан с надежным ПО для проверки наличия дефектов, основанном на методах обработки изображений, включая устранение фона, аппроксимацию границ, адаптацию к ИЭТ с разными материалами элементов. Это ПО обеспечивает использование бесконтактного метода, гарантирующего отсутствие загрязнений или повреждений во время осмотра и эффективно выявляющего визуальные искажения, отклонения поверхности и инородные предметы.

В АПАК сочетается применение традиционных 2D- и 3D-методов КЗ с мастерскими навыками инспектора, отвечающего за качество изделия. Традиционное 2D КЗ десятилетиями использовалось для автоматизированного контроля качества ИЭТ. В основном, оно состоит из одной или нескольких камер–микроскопов, которые захватывают

изображение, и компьютера, который обрабатывает это изображение и на основе ПО определяет соответствие проверяемого ИЭТ указанным требованиям к качеству.

В последние годы 3D-технология буквально добавила дополнительное измерение к возможностям КЗ. Такое обнаружение идеально применяется для проверки размеров и форм дефектов широкого спектра типов, которые можно описать и оптимизировать [4].

АПАК позволяет решать задачи, когда дефект становится трудно описать. Например, при обнаружении дефектных потертостей поверхности ИЭТ, задача отбраковки которых требует выявления и оценки опытным инспектором. Обучаясь с помощью изображений образцов дефектов ИЭТ, АПАК имитирует работу опытных инспекторов по обеспечению более последовательного и точного процесса проверки. Стандартные компоненты автоматизированного обнаружения дефектов стали доступными в готовом виде, но для получения оптимального результата необходимо глубокое понимание использования технологий и наличие навыков в области обнаружения дефектов, включая креативное мышление, управление камерой–микроскопом и освещением для захвата требуемых изображений.

АПАК предварительно обрабатывает поверхности ИЭТ с помощью 2D/3D-зрения. Чтобы оптимизировать процесс и избежать необходимости обработки нейронной сетью всего изображения, что является ресурсоемким и отнимает много времени, используется традиционная технология 2D/3D-зрения для выявления возможных дефектов на заданном участке поверхности или, другими словами, для указания областей, требующих дальнейшего исследования. Выбранные области затем передаются в нейронную сеть, обученную на большом количестве образцов, которая обрабатывает изображение и присваивает ему оценку, определяющую его соответствие установленному стандарту качества [5]. Если результат оценки находится на пограничном уровне, АПАК выполняет постобработку с использованием 2D/3D-зрения, выявив конкретные, предопределенные типы дефектов или, например, измерив их размеры.

Качество изображения имеет первостепенное значение для результата проверки и зависит от освещения, экспозиции, оптики камеры–микроскопа. Суть в том, что именно сочетание всех элементов позволяет раздвинуть границы возможностей АПАК.

Часто потребности в технологиях АПАК возрастают с усложнением задач. Особенно востребованы этих технологии для решения задач, которые в противном случае потребовали бы привлечения инспектора с большим опытом. Лучшим примером является проверка ИЭТ на предмет плохо обнаруживаемых дефектов, или «сомнительных дефектов». Обычно это оценка на основе такого количества параметров, когда сложно достаточно точно указать необходимый участок для проверки, чтобы выполнить ту же проверку, что и опытный инспектор.

В случае, когда речь идет о большом количестве микроучастков поверхностей ИЭТ, которые проверяются на наличие дефектов, обработка всего изображения с помощью КЗ часто становится ресурсоемкой. При этом используются методы 2D/3D-зрения для предварительной обработки изображений и определения областей изображения с потенциальными дефектами, чтобы через нейронную сеть проходили только соответствующие участки [6]. Такое гибридное решение целесообразно, когда 2D/3D-зрение и машинное обучение (МО) можно объединить для повышения надежности и для захвата подходящих изображений требуется более точная проверка качества поверхности ИЭТ. Применение гибридных методов часто происходит в условиях промышленной эксплуатации, где снижается возможность обнаружения дефектов из-за, например, высокой скорости конвейерной ленты, недостаточного освещения, неподходящей температуры, пыли и т. д. Если задача заключается всего лишь в «подсчете пикселей» и измерении размеров, количеств или чего-то подобного для оценки того, находится ли деталь в пределах указанных допусков, редко возникает необходимость в использовании методов МО. В таких случаях традиционное 2D/3D-зрение может оказаться единственным эффективным способом достижения цели. Аналогично, некоторые задачи решаются

стандартными способами. К ним обычно относятся сравнительно простые задачи, когда легко идентифицировать и аннотировать дефекты, а выборочное пространство по отношению к дефектам меньше. В стандартных решениях автоматизированного поиска дефектов предварительная обработка для выбора участков изображения не выполняется – обрабатывается все изображение. Следовательно, обычно предварительным условием является относительно низкая скорость обнаружения дефектов, что позволяет при автоматизированном поиске успеть обработать изображение и найти дефекты. Если объем производства невелик или состоит из небольших партий разных изделий, рекомендуется применять 2D/3D-зрение как наиболее подходящий метод.

Измерения дефектов относятся к количественным мерам, используемым для оценки и анализа качества ИЭТ. Они обеспечивают стандартизованный подход к выявлению, отслеживанию и анализу проблем качества, которые возникают при производстве, а также помогают предприятиям оценивать уровень несоответствия, определять основные причины и принимать решения на основе данных для улучшения качества и сокращения дефектов [7].

АПАК автоматически обнаруживает дефектные особенности, измеряет их размеры с помощью камеры-микроскопа и ПО. АПАК регистрирует параметры измерения одного и того же дефекта с некоторыми вариациями в положении, в основном потому, что получаются разные изображения. Это вызвано оптическими факторами, неравномерным освещением, случайными шумами и т. д. Для решения такой проблемы используются разные методы измерения дефектов на основе их размеров. Результаты показывают, что эти методы значительно повышают надежность и согласованность измерения размера дефекта. При условии надлежащего моделирования методы измерения применяются к дефектам разных типов.

Основная часть

Для измерения дефектов видимого диапазона их обнаружения разработаны средства, представленные внешним интерфейсом на вкладке «Измерения» страницы «Пульт управления Комплексом», что позволяет настроить идентификацию дефектов. Внешний интерфейс в разделе измерения дефектов с обозначением органов управления представлен на рис. 1.

Калибровка и юстировка камер-микроскопов

Калибровка – это задача получения внутренних и внешних параметров камеры по снятому ею изображению. Калибровка камеры используется на начальном этапе решения задач КЗ для учета особенностей существующей реальности и увеличения точности замера размеров дефектов [8].

В отличие от калибровки, которая позволяет корректировать показания камер-микроскопов с учетом их характеристик, юстировка направлена на оптимизацию параметров положения камер-микроскопов АПАК для получения наилучших результатов. АПАК при проведении инспекции выполняет постоянную проверку ориентации камер-микроскопов относительно поверхностей ИЭТ. АПАК выполняет юстировку камер-микроскопов для оптимизации взаиморасположения элементов камер-микроскопов и инспектируемых поверхностей ИЭТ. Для обозначения подобных действий в отношении разных приборов также используется термин «регулировка» или «градуировка». Юстировка камер-микроскопов, которая рассматривается в следующих частях цикла описаний процессов разработки и внедрения АПАК, выполняется непрерывно на этапах проверки качества ИЭТ с помощью ПО и узлов робототехнических средств АПАК.

Для проведения калибровки используется калибровочный шаблон. Он предназначен для калибровки камер-микроскопов и ПО КЗ для измерения размеров дефектов в реальных единицах. Калибровочный шаблон представляет собой прозрачную пленку с нанесенной на него метрической шкалой (рис. 2).

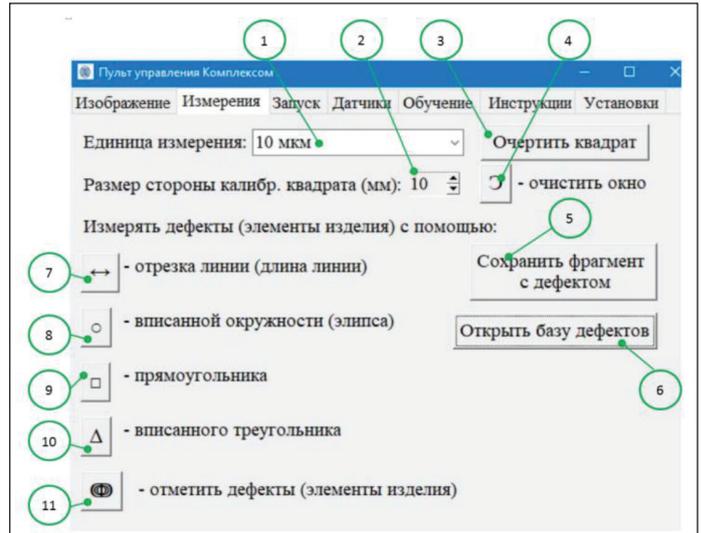


Рис. 1. Внешний интерфейс в разделе измерения дефектов с обозначением органов управления

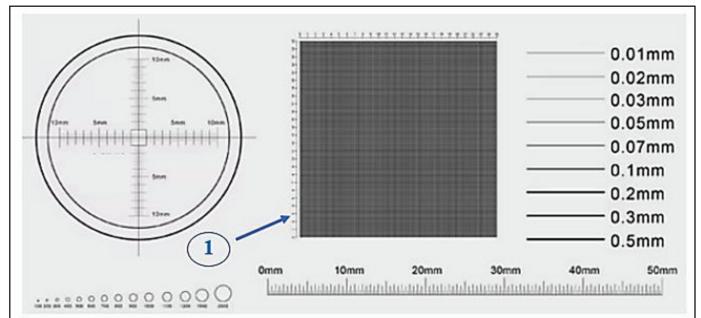


Рис. 2. Калибровочный шаблон

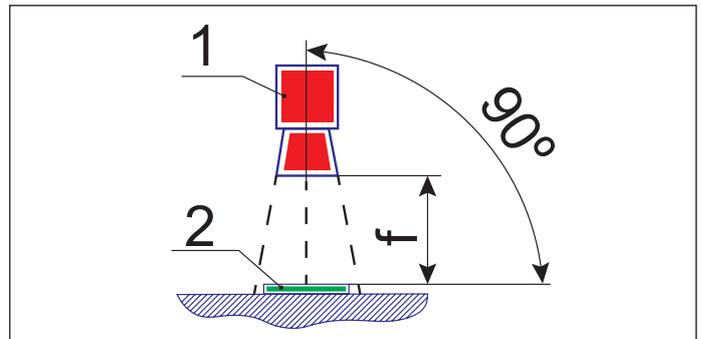


Рис. 3. Расположение камеры-микроскопа относительно шаблона

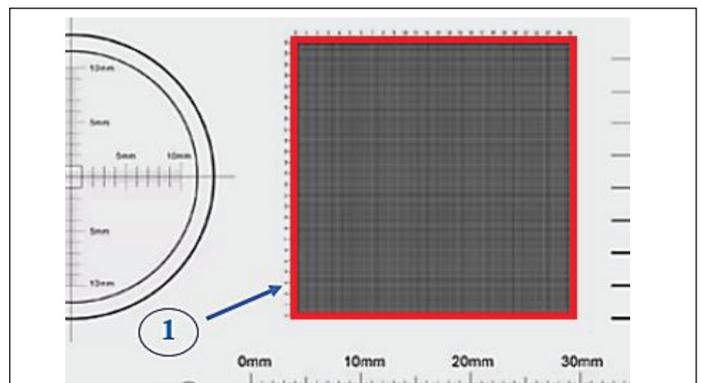


Рис. 4. Очерчивание квадрата на изображении нажатием кнопки 3

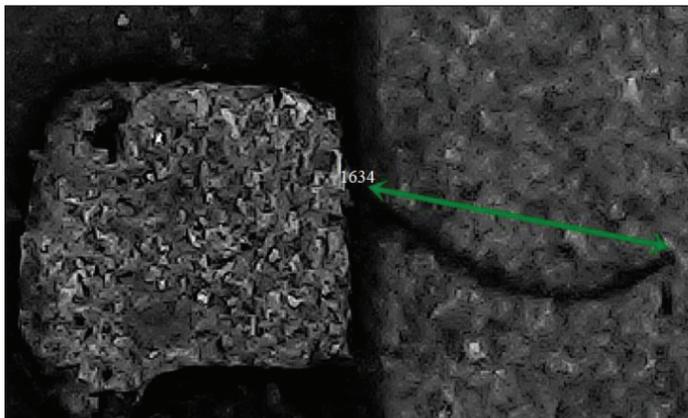


Рис. 5. Результат измерения дефекта – трещины в видимом диапазоне обнаружения с помощью стрелки (отрезка линии)

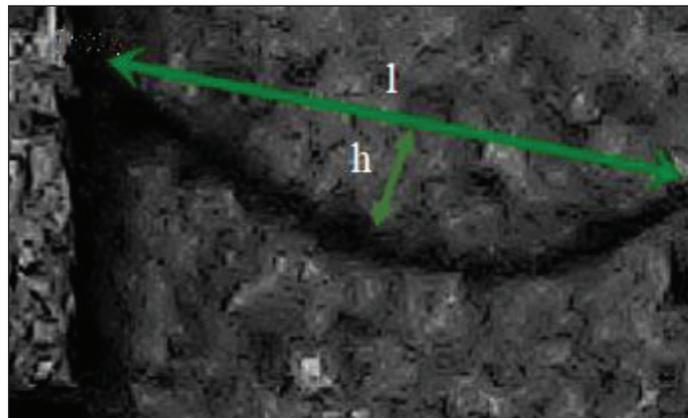


Рис. 6. Порядок измерения длины хорды (l) и высоты сегмента (h) для расчета овальности трещины

На рис. 3 показано расположение камеры–микроскопа относительно шаблона, где 1 – камера–микроскоп; 2 – шаблон; f – расстояние от камеры до шаблона. При таком положении проводится калибровка.

На шаблоне выбирается объект для калибровки камеры, например квадрат 1 на рис. 2, имеющий реальный заранее известен с точностью до микрометров, размер. Указывается единица измерения размеров дефектов в окне 1 рис. 1 и размер стороны квадрата шаблона, в окне 2, рис. 1.

На изображении квадрат очерчивается от верхнего левого угла до нижнего правого при нажатии кнопки 3, указатель 1 (рис. 4).

ПО АПАК рассчитывает количество пикселей, входящее в фактический размер стороны измеряемого квадрата. Исходя из полученных данных о реальном размере L квадрата и количестве находящихся в нем пикселей n определяется цена деления пикселя X по формуле

$$X = L / n. \tag{1}$$

Для определения размера дефектов необходимо полученное количество пикселей n умножить на цену пикселя X в соответствии с формулой

$$S = nX. \tag{2}$$

Измерение дефектов с помощью отрезка линии

Результат измерения дефектов в видимом диапазоне их обнаружения с помощью отрезка линии показан на рис. 5. В этом случае измеряется хорда трещины в виде дуги. Для некоторых изделий это частый случай, когда трещина образует дугу, а размер длины хорды

определяет критерий отнесения дефекта к браку, или снижение уровня качества изделий. Измерения после нажатия клавиши 7 (см. рис. 1) осуществляются мышью, с помощью которой создается стрелка зеленого цвета. Одновременно рассчитывается длина этой стрелки (линии).

Путем измерения длины хорды (l) и высоты сегмента (h) рассчитывается также овальность трещины (см. порядок измерения на рис. 6). Расчет производится ПО в соответствии с формулой

$$d = \frac{l^2}{4h} + h. \tag{3}$$

В этом случае овальность определяет критерий отнесения дефекта к браку, или снижению уровня качества изделий.

Кроме того, ПО АПАК рассчитывает радиус овальности трещины по формуле

$$R = \frac{h}{2} + \frac{l^2}{8h}. \tag{4}$$

Радиус в отдельных случаях играет решающую роль в оценке дефекта. Трещины с радиусом больше R1 и меньше R2 могут представлять опасность по причине возможных выпадений фрагментов изделия, нарушая его функциональность.

Отрезок линии в ПО АПАК формируется с помощью двух пар координат x1 y1 и x2 y2 – начальной и конечной точек, соответственно. Длина отрезка линии определяется с помощью формулы

$$l = \sqrt{(x2 - x1)^2 + (y2 - y1)^2}. \tag{5}$$



Рис. 7. Измерение дефектов с помощью вписанной окружности (овала)

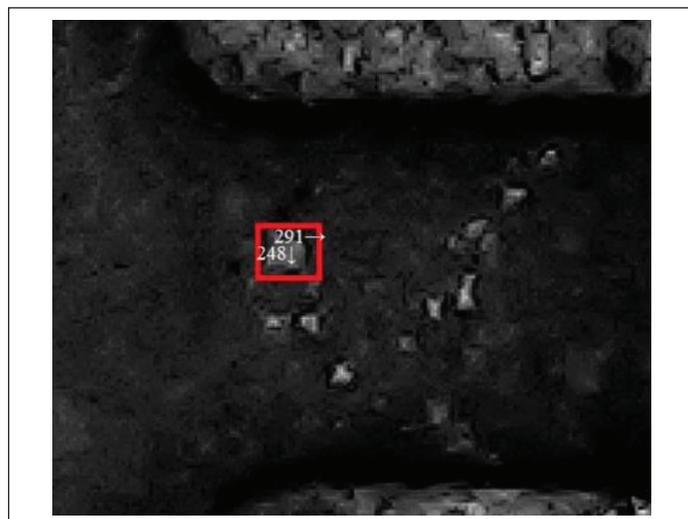


Рис. 8. Результат измерения дефектов в видимом диапазоне их обнаружения с помощью описанного прямоугольника

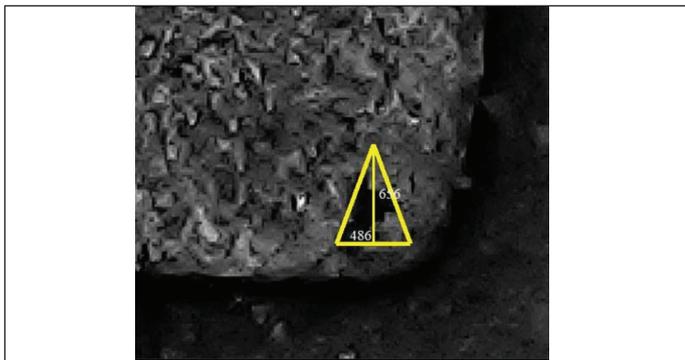


Рис. 9. Результат измерения дефектов для видимого диапазона их обнаружения с помощью описанного треугольника

Измерение дефектов с помощью вписанной окружности (овала)

Результат измерения дефектов в видимом диапазоне их обнаружения с помощью вписанной окружности (овала) показан на рис. 7.

Измерения начинаются после нажатия клавиши 8, показанной на рис. 1, после чего с помощью мыши чертится овал синего цвета. Одновременно в его левом верхнем углу указываются вертикальный и горизонтальный радиусы.

ПО АПАК при измерении дефектов с помощью вписанного овала рассчитывает два параметра: горизонтальный и вертикальный радиусы. Максимальная величина радиуса является критерием для отнесения дефекта к браку.

Горизонтальный и вертикальный радиусы в ПО АПАК формируются с помощью двух пар координат $x_1 y_1$ и $x_2 y_2$ – начальной и конечной точек, соответственно.

Горизонтальный радиус определяется с помощью формулы

$$R1 = \frac{(x2 - x1)}{2}. \quad (6)$$

Вертикальный радиус определяется с помощью формулы

$$R2 = \frac{(y2 - y1)}{2}. \quad (7)$$

Измерение дефектов с помощью описанного прямоугольника

Измерения начинаются после нажатия клавиши 9, показанной на рис. 1, после чего с помощью мыши чертится прямоугольник красного цвета. Одновременно в его левом верхнем углу указываются длина вертикальной и горизонтальной сторон. Результат измерения

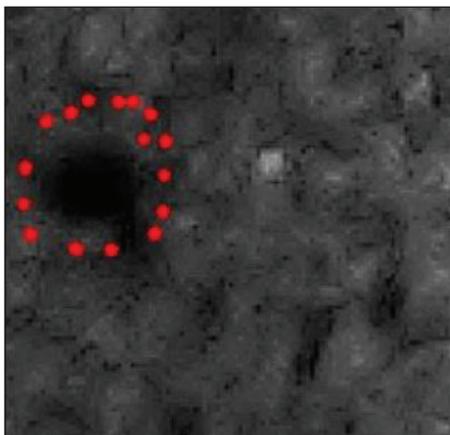


Рис. 10. Выделение дефекта с помощью совокупности точек

дефектов в видимом диапазоне их обнаружения с помощью описанного прямоугольника показан на рис. 8.

ПО АПАК при измерении дефектов с помощью описанного прямоугольника рассчитывает два параметра: длину горизонтальной и вертикальной сторон.

Горизонтальная и вертикальная стороны прямоугольника ПО АПАК формируются с помощью двух пар координат $x_1 y_1$ и $x_2 y_2$ – начальной и конечной точек, соответственно.

Горизонтальная сторона определяется с помощью формулы

$$A = x2 - x1. \quad (8)$$

Вертикальная сторона определяется с помощью формулы

$$B = y2 - y1. \quad (9)$$

Максимальная величина горизонтальной или вертикальной стороны является критерием для отнесения дефекта к браку.

Измерение дефектов с помощью описанного треугольника

Результат измерения дефектов для видимого диапазона их обнаружения с помощью описанного треугольника показан на рис. 9.

Измерения начинаются после нажатия клавиши 10, показанной на рис. 1, после чего с помощью мыши чертится треугольник желтого цвета. Одновременно в правом верхнем углу треугольника указывается высота, а в левом нижнем углу – основание треугольника.

Высота и основание ПО АПАК треугольника формируются с помощью двух пар координат $x_1 y_1$ и $x_2 y_2$ – начальной и конечной точек, соответственно.

Высота треугольника определяется с помощью формулы

$$h = y2 - y1. \quad (10)$$

Основание треугольника определяется с помощью формулы

$$a = x2 - x1. \quad (11)$$

Величины высоты и основания треугольника являются критерием для отнесения дефекта к браку [9].

Выделение дефектов с помощью совокупности точек

Для анализа дефекты помечаются совокупностью точек с помощью мыши после нажатия клавиши 11, показанной на рис. 1. Результат представлен на рис. 10.

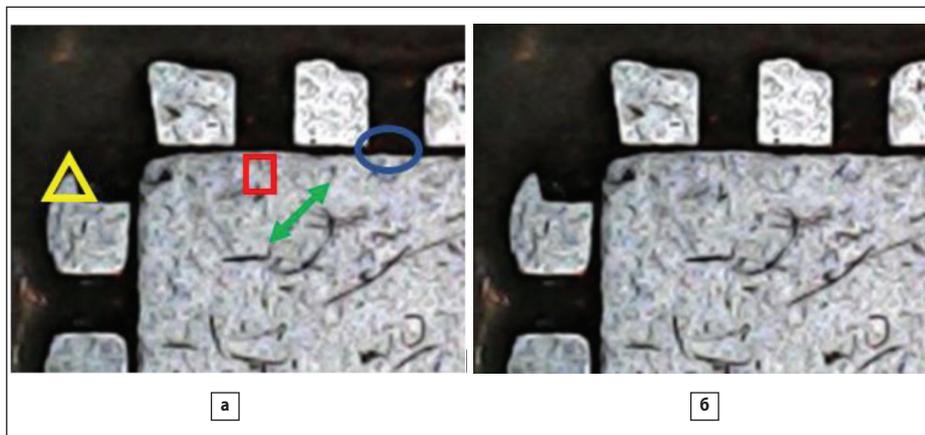


Рис. 11. а) объекты измерения дефектов на поверхности изображения изделия до нажатия клавиши «очистка»; б) после нажатия клавиши «очистка» с поверхности изделия удаляются дополнительные вышеперечисленные объекты

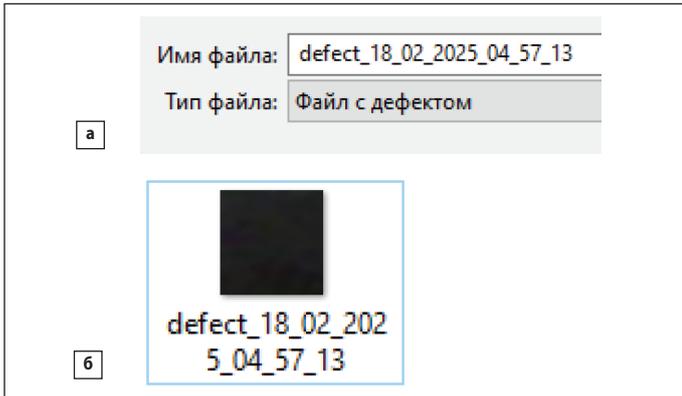


Рис. 12. а) изображению дефекта автоматически присваивается дата и время записи; б) идентификация и предоставление возможности дальнейшего просмотра дефекта

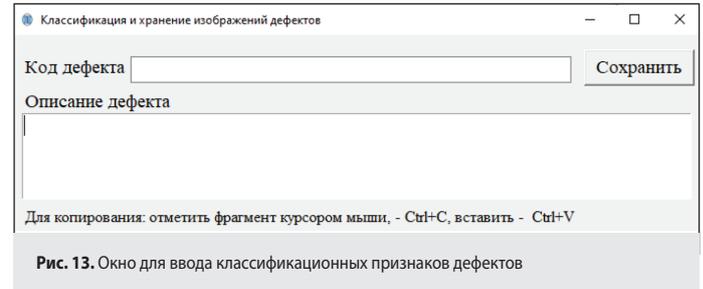


Рис. 13. Окно для ввода классификационных признаков дефектов

Очистка дополнительных объектов на изображении поверхности изделия

Очистка дополнительных объектов на изображении поверхности изделия выполняется после нажатия клавиши 4, показанной на рис. 1. Исходное изображение до нажатия этой кнопки представлено на рис. 11а), а на рис. 11б) – результат после очистки. Такая функция позволяет начать измерение дефектов на «чистом» изображении поверхности изделия.

Сохранение изображения изделия с дефектов и просмотр

ПО АПАК позволяет провести измерение дефектов одним из вышеперечисленных способов, убедиться в их классификации как бракованных и сохранить изображение дефекта с помощью клавиши 5, показанной на рис. 1. Оно сохраняется в базе данных для его применения при выполнении функции автоматического опознавания дефектов, описанной в следующих частях. Изображению дефекта автоматически присваивается дата и время записи, а пример ее идентификации и возможности ее дальнейшего просмотра показан на рис. 12а–б.

Для отнесения изображения с дефектом к тем или иным группам, перед записью выводится окно для его классификации (рис. 13).

Изображение с дефектами можно просмотреть с помощью клавиши 6, показанной на рис. 1.

Выводы

Измерение дефектов требует надежных инструментов и методологий, которые обеспечивают точный сбор, анализ и интерпретацию данных. Используя эти инструменты, предприятия могут эффективно отслеживать и оценивать показатели качества, выявлять тенденции и принимать обоснованные решения. Этот процесс имеет решающее значение для обеспечения выпуска высококачественных изделий микроэлектроники. При применении автоматизированного программно-аппаратного комплекса для поиска дефектов изделий микроэлектроники наряду с технологиями ИИ необходимо выполнить требования к методологии измерений. При этом следует учитывать несколько ключевых моментов для эффективного измерения, анализа и автоматизированного обнаружения дефектов. Они включают:

- установление процессов и механизмов для обнаружения и фиксации дефектов, обеспечение их точной регистрации и анализа;
- уровни проблематичности дефекта и их возможное влияние на качество изделий, безопасность или соответствие нормативным требованиям;
- определение и категоризацию типов дефектов по внешнему виду, которые имеют отношение к inspected изделию;
- определение процедур и корректирующих действий по устранению выявленных дефектов и предотвращению их повторения.

Такие требования обеспечивают такие характеристики изделия как надежность, долговечность, функциональность и производительность. Выполняя эти требования, предприятия могут использовать автоматизированную инспекцию изделий микроэлектроники на предмет обнаружения качества дефектов, которые обеспечат целостное представление о показателях качества и потенциальных возможностях для улучшения производства.

Эффективно анализируя и интерпретируя состояние дел с дефектами изделий, предприятия получают более глубокое представление о потенциальных областях улучшения, принимают решения на основе данных и обеспечивают постоянное совершенствование продукции. Этот итеративный процесс измерения дефектов, анализа их природы имеет важное значение для предприятий, которые стремятся предоставлять исключительные изделия, соответствующие или превосходящие ожидания заказчиков и потребителей.

Литература

1. Исмагилов И. Р., Алексеев И. П. Применение технологий машинного обучения для классификации дефектов при лазерно-акустическом контроле металлических изделий. Казанский государственный энергетический университет. Тинчуринские чтения. 2020. Энергетика и цифровая трансформация. Международная молодежная научная конференция. Т. 3. Казань. 2020.
2. Федоров П. А. Разработка алгоритмов и методики 3D-рендеринга в автоматизированных системах контроля изделий микроэлектроники. Диссертация. МИЭТ. Москва. 2016.
3. Евтихий Н. Н., Краснов В. В., Родин В. Г., Солякин И. В., Стариков С. Н., Черемхин П. А., Шапкарина Е. А. Увеличение отношения сигнал/шум за счет пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: математика, информатика, физика. №4. 2012.
4. Martin Pollák, Dominik Sabol, Karol Goryl. Measuring the Dimension Accuracy of Products Created by 3D Printing Technology with the Designed Measuring System. Faculty of Manufacturing Technologies. Technical University of Kosice. Presov. Slovakia. Machines. 5 December. 2024.
5. Силкина Г. Ю., Шевченко С. Ю. Искусственный интеллект в моделях функционирования и инновационного развития промышленных предприятий. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Глава к книге. Стратегическое управление развитием цифровой экономики на основе умных технологий под ред. Бабкина А. В. Санкт-Петербург. 2021.
6. Кантер А. Усовершенствованная 3D-инспекция – технология будущего для современных производств // Технологии в электронной промышленности. №8 (60). 2012.
7. Abd Al Rahman M., Alireza Mousavi. A Review and Analysis of Automatic Optical Inspection and Quality Monitoring Methods in Electronics Industry. IEEE Access. Volume 8. October. 2020.
8. Иванов Д. В., Иванова М. Ю. Метод калибровки систем ближней фотограмметрии. VI Всероссийская конференция «Молодежь и наука: начало XXI века». Секция «Информатика». Санкт-Петербург. 2011.
9. Николаев А. А. Распознавание неоднородностей, определение их геометрических характеристик и построение 3D геометрических моделей в задачах неразрушающего контроля // Математические методы распознавания образов. №1. Т. 13. Москва. 2007.