

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

Часть 18. Организационная система автоматизированной инспекции качества покрытий изделий электронной техники золотом и никелем методом рентгенофлуоресцентного анализа

Дарья ДОРМИДОШИНА,
технический директор, АО «ЦКБ «Дейтон»
Юрий ЕВСТИФЕЕВ,
к.т.н., с.н.с., профессор, АО «ЦКБ «Дейтон»,
Валерий КЛЮЧНИКОВ,
генеральный директор, АО «Завод «Марс»
Евгений КЛЮЧНИКОВ,
заместитель главного конструктора,
АО «ЦКБ «Дейтон»
Юрий РУБЦОВ,
генеральный директор –
главный конструктор, АО «ЦКБ «Дейтон»,

В отечественном производстве изделий электронной техники (ИЭТ) с автоматизированным программно-аппаратным комплексом (АПАК) визуального поиска дефектов применяют систему компьютерного зрения (КЗ) с технологией искусственного интеллекта для разных изделий ИЭТ: корпусов микросхем, пластин для производства микросхем, печатных плат и т.д. (см. ЭК2–12, 2025 г., ЭК1–3, 5–6 2026 г.). При таком подходе растет производительность труда и выход годных изделий, повышается репутация предприятия. В ЭК7 указаны проблемы при производстве ИЭТ, связанные со сдвигом конвейерной ленты, и реализовано программное обеспечение для устранения смещений изображений при смещении конвейерной ленты, внедренное на производстве корпусов микросхем. В этой части статьи представлены результаты создания и внедрения организационной системы автоматизированной инспекции качества покрытий ИЭТ золотом и никелем методом рентгенофлуоресцентного анализа.

Введение

Покрытие элементов ИЭТ золотом и никелем снижает контактное сопротивление, обеспечивает надежные соединения, долговременную защиту ИЭТ от коррозии, высокую тепло- и электропроводность, химическую стойкость, в том числе во внешних условиях эксплуатации с повышенной влажностью, серосодержащих или других агрессивных для элементов ИЭТ средах.

Инспекция покрытий золотом и никелем, является стандартной практикой в процессах разработки и производства ИЭТ [1–6]. Хотя роль золота хорошо изучена, необходимо отметить, что оно не образует оксида; оно защищает никель от окисления или пассивации. Никелевая поверхность обладает очень высокой паяемостью, но ее оксид трудно удалить стандартными флюсами. Золото практически мгновенно растворяется в большинстве припоев, что обеспечивает

высокую смачиваемость. Благодаря этому свойству оно широко применяется в процессах изготовления ИЭТ.

Распространенными дефектами золотого и никелевого покрытий ИЭТ являются:

- пористость – пустоты в золотом слое, обнажающие никелевый подслои;
- различия в толщине – недостаточное покрытие золотом или никелем;
- пятна окислов – локализованные коррозионные пятна, указывающие на разрушение барьерного слоя;
- загрязнение контактной зоны – образование оксидов на критически важных сопрягаемых поверхностях.

Для инспекции качества покрытия золотом по никелю должны учитываться:

- трещины – сквозной разрыв покрытия;

- риски – в виде продольного углубления или выступа различной длины и направления;
 - расслоения – в виде отделения слоя покрытия;
 - раковины – в виде одиночного углубления вытянутой или круглой формы;
 - посторонние включения – в виде включения инородного тела (частицы) различной формы и величины;
 - вмятины – в виде произвольно расположенного углубления разной формы и величины с пологими краями;
 - заусеницы, представляющий собой острые выступы в виде гребня.
- Визуальная проверка таких дефектов крайне ненадежна. У инспекторов после нескольких часов работы устают глаза, а незначительные изменения цвета покрытия практически невозможно стабильно обнаруживать в производственном темпе. Микроскопический масштаб дефектов пористости и диффузии на ранних стадиях находится ниже порога остроты зрения человека, особенно при изменяющихся условиях окружающего освещения.

Для автоматизации инспекции качества покрытий ИЭТ необходима организационная система, которая является составляющей организационной системы предприятия-изготовителя ИЭТ как целостная совокупность соединенных элементов инспекции и представляет собой многоуровневую инфраструктуру, состоящую из:

- организационной структуры, определяющей порядок управления структурными элементами и их взаимодействия, руководство и контроль за проведением инспекции;
- регламентов и алгоритмов действий (технологических процессов), определяющих порядок подготовки инспектируемых ИЭТ, проведения инспекции и порядок обращения с результатами проведения инспекции, порядок подготовки и применения ресурсов для инспекции;
- ресурсов, определяемых составом технических средств (ТС) и программного обеспечения (ПО), а также уровнями подготовки специалистов.

Ресурсы организационной системы проведения инспекции

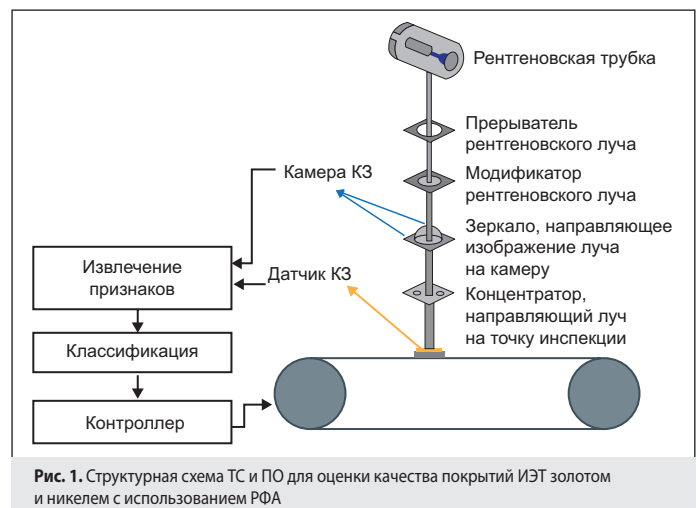
В качестве ТС и ПО для оценки качества покрытий ИЭТ золотом и никелем применяются средства рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Это самый распространенный неразрушающий способ контроля качества. Рентгеновская трубка генерирует лучи, и по обратному спектру определяется качество покрытия.

Когда начинается измерение, рентгеновская трубка направляет к точке контроля высокоэнергетические лучи (первичное излучение). Эти лучи попадают на атомы покрытия поверхности ИЭТ, выбивая из атома околоядерные электроны и создавая дисбаланс. Поскольку это состояние нестабильно, электроны с более высокого уровня переходят на освободившееся пространство и испускают флуоресцентное (отраженное) излучение. Энергетический уровень этого излучения характерен для соответствующего материала покрытия. Датчик, камера ТС и ПО являются компонентом компьютерного зрения (КЗ) системы автоматизированной инспекции (АПАК). Датчик КЗ измеряет флуоресцентное излучение и оцифровывает сигнал. ПО обрабатывает этот сигнал и формирует данные, которые позволяют сделать выводы о качестве покрытия. Камера КЗ формирует сигнал исходного излучения для сравнения с результирующим, полученным с датчика КЗ. Таким образом, выполняется анализ состава материала, качества и толщины покрытия.

По интенсивности отражения от покрытия ПО определяется концентрация покрытия и толщина нанесенного слоя по формуле (1):

$$\text{Инт} = I_0 \cdot (1 - e^{-\mu \cdot T}) \quad (1)$$

где: I_0 – интенсивность отражения от образца ИЭТ; μ – массовый коэффициент поглощения; T – искомая толщина покрытия.



Массовый коэффициент поглощения характеризует ослабление излучения, приходящегося на единицу площади поверхности покрытия. Плотность – это отношение массы покрытия к его объему. Искомая толщина покрытия рассчитывается как расстояние от поверхности слоя до следующего слоя, подложки или основания.

С помощью машинного обучения (МО) сравнивается интенсивность флуоресцентного излучения в реальном времени с синтетическими моделями для поиска дефектов. Нейронные сети, основанные на физических принципах, используют МО для уменьшения разницы между смоделированными обучающими наборами данных и экспериментальными тестами, обеспечивая более высокую точность инспекции.

Структурная схема ТС и ПО для оценки качества покрытий ИЭТ золотом и никелем с использованием РФА представлена на рис. 1.

Перед применением в АПАК полученные сигналы датчика КЗ и камеры КЗ проходят этапы улучшения (предобработки), которая выполняется непосредственно в датчике КЗ и камере КЗ. Затем используются методы извлечения и выбора признаков для сегментации дефектных областей и обнаружения важных дефектных характеристик. Следующий этап заключается в предоставлении обработанной информации алгоритму классификации.

В АПАК реализована возможность применения механизма сортировки для разделения ИЭТ на категории качества (например, брак или дефект, не являющийся браком, годные), как показано на рис. 1. Для этого используется контроллер, который отправляет команду (в соответствии с полученным от алгоритма инспекции решением) системе сортировки, состоящей из манипуляторов отбора, или конвейерной ленты. Подробное описание АПАК в этом режиме представлено в [7].

Данные о качестве ИЭТ поступают в централизованную систему управления производством (MES) [8] и в локальную базу данных для обеспечения отчетности в режиме реального времени.

Обучение специалистов по эксплуатации и обслуживанию АПАК с РФА проводится для получения ими знаний, навыков и гарантий того, что АПАК с РФА будет работать в соответствии со своим назначением и указанными в документации (формуляре, паспорте, технических условиях, руководстве по эксплуатации) требованиями. Обучение специалистов систематизирует знания, направлено на освоение эксплуатации и обслуживание АПАК с РФА и проведение контроля его функционирования, предварительную подготовку инспектируемых ИЭТ, формирование данных о результатах инспекции и направление их для анализа и учета, а также направление результатов инспекции: годных ИЭТ; бракованных и неопределенных по уровню качества ИЭТ.

Элемент радиационной безопасности объекта инспекции в организационной системе

Работа с АПАК с РФА регулируется санитарными правилами для работы с источниками рентгеновского излучения [8–9]. Для этого

АПАК с РФА в месте прохождения луча и отражения должен быть защищен экранами. Должны проводиться исследования представителями надзора, проведена классификация АПАК с РФА по потенциальной радиационной опасности, иметься санитарно-эпидемиологические заключения. Мощность дозы на установленных расстояниях от корпуса АПАК не должна превышать норму. Специалисты должны пройти обучение и быть аттестованы для работы с источниками ионизирующего излучения.

Организационная система АПАК с РФА должна обеспечиваться данными с контрольными уровнями воздействия радиационных факторов в санитарно-защитной зоне, а также инструкциями по радиационной безопасности и по действиям персонала в аварийных ситуациях. Должно проводиться планирование и осуществление мероприятий по обеспечению и совершенствованию радиационной безопасности на участке размещения АПАК с РФА; подготовка и аттестация по вопросам обеспечения радиационной безопасности руководителей и специалистов, специалистов, постоянно или временно выполняющих работы с АПАК с РФА; доведение до специалистов обязательства ставить в известность руководителя цеха, ответственных за радиационную безопасность лиц обо всех обнаруженных неисправностях в работе АПАК с РФА.

Регламенты и алгоритмы действий, определяющих порядок подготовки inspectируемых изделий, проведения инспекции и обращения с результатами инспекции

С помощью АПАК с РФА выбранная длина волны излучения характерна либо для золота, либо для никеля. Интенсивность выбранной длины волны измеряется с помощью датчика в сочетании с ТС и ПО подсчета импульсов. Интенсивность может быть выражена в «отсчетах в секунду», хотя часто удобнее выражать интенсивность в терминах общего количества отсчетов, накопленных на этапе масштабирования.

Интенсивность испускаемого вторичного рентгеновского излучения, как правило, зависит от энергии возбуждения, атомных номеров золота и никеля, площади образца, облученного первичным излучением, и толщины покрытия. Если все остальные переменные фиксированы, интенсивность или характерное вторичное излучение являются функцией толщины или массы на единицу площади покрытия. Точная зависимость между измеренной интенсивностью и соответствующей толщиной покрытия устанавливается с помощью шаблонов, имеющих тот же состав покрытия и подложки, что и inspectируемые ИЭТ.

Формула отношения интенсивности, подходящей для оценки качества, выглядит следующим образом (2):

$$\text{Инт} = \frac{I - I_0}{I_6 - I_0}, \quad (2)$$

где: I – интенсивность характеристического излучения от покрывающего металла – золота; I_0 – интенсивность излучения образца непокрытой подложки; I_6 – интенсивность излучения образца покрытия металла «бесконечной» толщины при той же настройке АПАК РФА.

Датчик (см. рис. 1) располагается таким образом, чтобы регистрировать интенсивность характерной для металла покрытия длины волны: золото; никель.

При работе с более тонкими покрытиями необходимо использовать более длинные интервалы расчетов для уменьшения погрешности. По мере увеличения толщины покрытий погрешность возрастала. Толстые покрытия (более 5 мкм для золота) становятся проблемой при попытке обеспечить их качество. В этом случае для уменьшения погрешности используются калибровочные наборы.

По мере увеличения диаметра луча датчик (см. рис. 1) реагирует на сигналы, которые включают фоновый шум, что приводит к увеличению погрешности.

Поскольку на выбор более точной фокусировки луча для каждого образца ИЭТ влияет множество факторов, общую зависимость между диаметром луча и погрешностью в настоящих исследованиях установить не удалось.

В исследованиях сравнивалась погрешность измерений, проведенных в фиксированных или случайных тестовых областях. Значимых различий между ошибками измерений в фиксированной и случайной областях теста обнаружено не было. Эти измерения часто имели небольшие стандартные отклонения даже несмотря на то, что они увеличивались при изменении конструкции модификатора (см. рис. 1).

Выводы

В статье представлены результаты создания и внедрения организационной системы автоматизированной инспекции качества покрытий ИЭТ золотом и никелем методом РФА. Представлены описания дефектов покрытий и их опасности в обеспечении надежности изделий, схема и порядок функционирования технических средств и программного обеспечения, регламентирующие документы и алгоритмы действий, определяющие порядок подготовки inspectируемых изделий, проведения инспекции и порядок обращения с результатами проведения инспекции, порядок подготовки и применения ресурсов для проведения инспекции.

Метод РФА в АПАК может использоваться для измерения комбинаций покрытия и подложки, которые трудно измерить другими методами.

Низкая скорость инспекции (10–60 с для одного изделия) не позволила в должной мере применить АПАК с РФА в скоростных технологических линиях.

Метод требует эталонных калибровок при сложных ИЭТ.

Требования к радиационной безопасности повышает стоимость и создает дополнительные проблемы в разработке и эксплуатации АПАК с РФА.

Литература

- ГОСТ 9.302-88 (ИСО 1463-82, ИСО 2064-80, ИСО 2106-82, ИСО 2128-76, ИСО 2177-85, ИСО 2178-82, ИСО 2360-82, ИСО 2361-82, ИСО 2819-80, ИСО 3497-76, ИСО 3543-81, ИСО 3613-80, ИСО 3882-86, ИСО 3892-80, ИСО 4516-80, ИСО 4518-80, ИСО 4522-1-85, ИСО 4522-2-85, ИСО 4524-1-85, ИСО 4524-3-85, ИСО 4524-5-85, ИСО 8401-86) Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля (с поправками). М. ИПК Издательство стандартов. 2001.
- ASTM B568-98 (2021) Standard Test Method for Measurement of Coating Thickness by X-Ray Spectrometry // <https://store.astm.org/b0568-98r21.html>.
- ISO 3497:2000 Metallic coatings - Measurement of coating thickness - X-ray spectrometric methods // <https://cdn.standards.itech.ai>.
- T. D. Rolin, Y. Leszczuk. X-ray Fluorescence Spectroscopy Study of Coating Thickness and Base Metal Composition. Marshall Space Flight Center. Alabama. University of Michigan. Material Science Department. Ann Arbor. Michigan. NASA/TM-2008-215578 // <https://ntrs.nasa.gov>.
- ГОСТ 20.57.406-81 Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний (с изменениями №1–10). ИПК Издательство стандартов. 2003.
- Дормидошина Д. А., Рубцов Ю. В. Обзор и анализ методов автоматического оптического контроля качества изделий электронной техники // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. №4. 2025.
- Дормидошина Д. А. Компьютерное зрение в системах контроля качества продукции и связь с TQM и MES // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. №1. 2025.
- Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности // <https://base.garant.ru>.
- СанПиН 2.6.1.2748-10. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при работе с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения // <https://rg.ru>.