

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

Часть 19. Применение метода магнитной индукции для автоматизированной инспекции качества покрытий изделий электронной техники

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 др. (см. ЭК №№2–12, 2025, 1–3, 5–8 2026). При таком подходе растет производительность труда и выход годных изделий, повышается репутация предприятия. В этой части статьи показаны результаты создания и внедрения организационной системы автоматизированной инспекции качества покрытий ИЭТ с применением метода магнитной индукции.

Введение

Автоматизированная инспекция качества покрытий изделий электронной техники необходима для гарантированной надежности соединений элементов ИЭТ, снижения контактного сопротивления, защиты ИЭТ от коррозии, тепло- и электропроводности, химической стойкости, в том числе во внешних условиях эксплуатации с повышенной влажностью, солевыми туманами или другими агрессивными средами для элементов ИЭТ.

Визуальная инспекция покрытий ИЭТ силами специалиста в условиях растущей миниатюризации этих изделий и растущих требований к их качеству становится все более трудоемкой и порой невыполнимой. Незначительные изменения цвета и толщины покрытий невозможно обнаружить в производственном темпе с помощью рук, глаз и приборов визуальной инспекции. Микроскопический масштаб дефектов пористости и диффузии на ранних стадиях находится ниже порога остроты зрения человека.

Метод магнитной индукции [1–2] для инспекции качества покрытий ИЭТ является неразрушающим и применяется для немагнитизируемых покрытий на намагничиваемых основаниях (подложках). В исследованиях автоматизированной инспекции качества мы описали результаты исследований ИЭТ для немагнитизируемых (парамагнит-

ных) металлов на намагничиваемых основаниях (подложках) из ферромагнитных металлов с использованием основных положений [3].

В качестве намагничиваемых оснований в покрытиях ИЭТ применяется никель, что обосновано его высокой паяемостью. Однако никелевое покрытие быстро окисляется, и образуемую пленку оксида на никеле трудно удалить. Покрываемое никелью золото не образует оксида и защищает его от окисления. Золотое покрытие никеля растворяется в большинстве припоев, что обеспечивает высокую смачиваемость и надежную пайку элементов ИЭТ.

При использовании медных выводных рамок в ИЭТ покрытие никелем между золотым покрытием и медной выводной рамкой применяется в качестве барьерного (разделительного) подслоя (подложки) для защиты золотого покрытия на меди, что предотвращает диффузию (взаимопроникновение) атомов меди и золота. Без никелевой подложки медь диффундирует сквозь поры золота на его поверхность. Контактная с кислородом, медь окисляется, из-за чего золото покрывается темными пятнами. В дальнейшем происходит их коррозия и разрушение покрытий. Твердая подложка никеля обеспечивает механическую прочность, защищая тонкий слой золота от нанесения возможных дефектов. Покрытие никелем перед нанесением золота сглаживает микродефекты медной основы, значительно уменьшая количество пор в золотом слое.

В настоящих исследованиях учтено то, что золотое покрытие не является парамагнитным материалом – это диамагнетик. Оно слабо отталкивается магнитным полем и не притягивается магнитами. Внешнее магнитное поле наводит в слоях золотого покрытия микроскопические токи, которые создают собственное слабое поле, направленное против внешнего. При этом никель в нормальных условиях эксплуатации АПАК обладает выраженными ферромагнитными свойствами. Никелевое покрытие сильно притягивается к магнитам и способно само намагничиваться.

Для автоматизации инспекции качества покрытий ИЭТ методом магнитной индукции (МИ) необходима организационная система, которая является составляющей организационной системы предприятия-изготовителя ИЭТ. Она представляет целостную совокупность соединенных элементов инспекции и является многоуровневой инфраструктурой, состоящей из:

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

В [4] показаны результаты проведенных исследований, и выработаны рекомендации по организационной системе АПАК.

Технические средства автоматизированной инспекции качества покрытий ИЭТ методом магнитной индукции

Плотность магнитного потока вблизи источника магнитного поля зависит от расстояния до намагничиваемого никелевого основания. Это явление используется для определения толщины золотого покрытия, нанесенного на никелевое покрытие.

Величина плотности магнитного потока преобразуется в соответствующее электрическое напряжение, значения которого обрабатываются ТС и ПО. Структурная схема ТС и ПО для оценки качества покрытий ИЭТ золотом и никелем с использованием метода магнитной индукции приведена на рис. 1.

Источник МИ направляет на поверхность ИЭТ магнитный поток, часть которого отражается и поступает на датчик МИ. Изображение поверхности ИЭТ поступает на камеру компьютерного зрения (КЗ). Датчик МИ и камера КЗ являются компонентами КЗ системы автоматизированной инспекции (АПАК).

Отраженная от поверхности ИЭТ часть магнитного потока, поступающая на датчик МИ, преобразуется в электрическое напряжение,

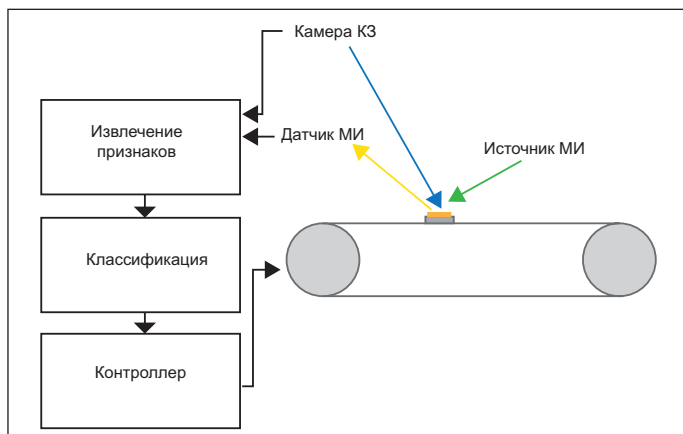


Рис. 1. Структурная схема ТС и ПО для оценки качества покрытий ИЭТ золотом и никелем с использованием метода магнитной индукции

которое имеет цифровое значение. Величина такого значения зависит от расстояния между источником МИ и никелевым слоем. Кроме измерения толщины слоя величина магнитного потока дает сведения о наличии дефектов на покрытии, дополняя информацию, получаемую камерой КЗ. ПО АПАК обрабатывает такую информацию и формирует данные, которые позволяют сделать выводы о качестве покрытия. Таким образом выполняется анализ качества и толщины покрытия.

В АПАК, перед применением, полученные сигналы датчика МИ и камеры КЗ проходят этапы стандартизации (предобработки), которая выполняется непосредственно в датчике МИ и камере КЗ. Затем используются методы извлечения и выбора признаков для сегментации дефектных областей и обнаружения важных дефектных характеристик. На следующем этапе данные о состоянии поверхности и покрытий классифицируются.

В АПАК реализована возможность применения механизма сортировки для разделения ИЭТ на категории качества (брак; дефект, не являющийся браком; годные). Для этого используется контроллер, который отправляет команду (в соответствии с решением ПО) системе сортировки, состоящей из манипуляторов отбора, или конвейерной ленты. Подробное описание АПАК в этом режиме приведено в [5].

Данные о толщине и качестве покрытий проходят обработку в нейронных сетях (НС) и сравниваются с данными, полученных с помощью синтетических моделей, сформированных с помощью технологий машинного обучения (МО). НС используют результаты МО для уменьшения разницы между смоделированными обучающими наборами данных и экспериментальными тестами. Это позволяет добиться более точной инспекции.

Данные о качестве ИЭТ поступают в автоматизированные системы TQM (Total Quality Management) и MES (Manufacturing Execution System), управления производством, этот процесс описан в [6], и в учетную систему для обеспечения отчетности о качестве ИЭТ в режиме реального времени.

Обучение специалистов по эксплуатации и обслуживанию АПАК с МИ проводится для получения ими знаний, навыков и умений и гарантий того, что АПАК с МИ будет применяться в соответствии со своим предназначением и требованиями, указанными в документации согласно ГОСТ [7]: формуляре, паспорте, технических условиях, руководстве по эксплуатации. Обучение специалистов систематизирует знания и направлено на освоение эксплуатации и обслуживание АПАК с МИ, проведение контроля функционирования АПАК, предварительную подготовку инспектируемых ИЭТ, формирование данных о результатах инспекции и направление их для анализа и учета результатов инспекции (годных ИЭТ, бракованных и неопределенных). По результатам инспекции выполняется оценка качества функционирования технологических процессов и качества применяемых материалов. Результаты исследований в этой области описаны в [8–9].

Факторы, влияющие на неопределенность результатов инспекции

Индуктивность обмотки изменяется при помещении ее у поверхности ИЭТ. Изменение индуктивности используется в качестве параметра, зависящего от расстояния между обмоткой и поверхностью ИЭТ с покрытиями золотом по никелю на основании медной выводной рамки.

В процессе работы были исследованы разные конструкции для оценки изменений индуктивности при проведении инспекции ИЭТ. В источниках МИ размещались от одной до двух обмоток. Источник МИ с двумя обмотками: первая (первичная) для формирования низкочастотного переменного магнитного поля и вторая (вторичная) для измерения результирующей наведенной электродвижущей силы (ЭДС). Если установить источник МИ над поверхностью, то плотность магнитного потока и наведенная ЭДС на вторичной обмотке изменятся в зависимости от толщины покрытия. Зависимость между наведенной ЭДС и толщиной покрытия нелинейная и определяется

магнитной проницаемостью покрытий и основания. Такая зависимость определяется калибровкой. Калибровочные зависимости, которые определяют толщину покрытия для наведенных ЭДС, формируются и хранятся в памяти АПАК. Калибровка входит в состав МО. Исследования в этой области приведены в [10].

В процессе выполнения исследований применялись разные конструкции и геометрии обмоток источников МИ: первая с одной обмоткой и вторая – с двумя. Первая конструкция повышает чувствительность инспекции, позволяет сконцентрировать поле и уменьшить площадь участка для инспекции, вторая имеет широкое и открытое распределение поля, ее чувствительность ниже.

В результате исследований определена частота генерируемого поля – в пределах одного килогерца, что позволяет избежать возникновения вихревых токов, которые могут исказить результаты инспекции. Плотность вихревого тока возрастает с увеличением частоты и при увеличении толщины покрытий.

Если толщина покрытий недостаточная, взаимодействие магнитного поля с поверхностью ИЭТ уменьшается. Таким образом, толщина покрытий должна превышать критическую минимальную толщину. При настройке в АПАК можно компенсировать погрешности, обусловленные критической минимальной толщиной. При этом любая вариация толщины может привести к увеличению неопределенности измерения.

Критическая минимальная толщина покрытий зависит от параметров источника МИ и датчика (интенсивности магнитного поля, геометрических характеристик), а также от магнитных свойств металлического основания. Ее значение определялось экспериментально.

Поскольку точности инспекции могут препятствовать краевые участки элементов ИЭТ (площадка под кристалл, контактные площадки и т. д.), измерения, выполненные слишком близко к краю или углу, могут быть недостоверными, если АПАК не был специально настроен для таких измерений. Необходимое расстояние для исключения краевого эффекта зависит от конструкции и размеров источника и датчика МИ.

На распределение магнитного поля влияет кривизна поверхности ИЭТ. Это влияние становится менее выраженным с уменьшением радиуса кривизны и толщины покрытия. Для уменьшения влияния кривизны необходимо, чтобы настройка АПАК выполнялась на образце ИЭТ с аналогичными геометрическими характеристиками.

Влияние кривизны поверхности существенно зависит от параметров источника и датчика МИ и может быть снижено за счет уменьшения зоны контроля.

Измерения, выполненные на участках с большим радиусом кривизны, могут привести к получению недостоверных результатов даже с учетом результатов МО. Полученная при этом неопределенность должна учитываться для определения приемлемости результатов инспекции.

Эти результаты зависят от шероховатости поверхности. Они могут вызывать как систематические, так и случайные ошибки инспекции. Случайные ошибки можно уменьшить путем проведения нескольких инспекций; при этом каждая инспекция проводится в другом месте, а затем рассчитывается среднее значение инспекций.

Для уменьшения влияния шероховатости, МО может проводиться с использованием образца ИЭТ без покрытия с шероховатостью, аналогичной с покрытием.

Зазоры между источником МИ и поверхностью ИЭТ, между датчиком МИ и поверхностью ИЭТ влияют на результаты инспекции. В зазоры могут попадать посторонние частицы. Необходимо осуществлять контроль чистоты поверхности ИЭТ и окружающей среды. Для очистки поверхности ИЭТ в АПАК монтируется очиститель.

Отклонение источника МИ, датчика МИ от нормали к поверхности ИЭТ вызывает ошибки инспекции, что необходимо учитывать при проведении МО.

Следует учитывать изменение температуры, так как оно влияет на характеристики компонентов АПАК. Разница температур компонентов АПАК, окружающей среды и ИЭТ может привести к появлению оши-

бок инспекции. Одним из примеров является инспекция микросхем с более высокой температурой после корпусирования в пластик.

На результаты инспекции могут влиять внешние электромагнитные поля. В случае необъяснимых результатов инспекции или их сильного разброса, которые не могут быть объяснены другими причинами, влияние внешних электромагнитных полей должно быть принято во внимание. Выполняется измерение внешних полей и экранизация АПАК.

Проведение машинного обучения

Перед использованием АПАК осуществляется МО в соответствии с использованием соответствующих эталонных шаблонов. Материал, геометрические параметры и шероховатость поверхности инспектируемых ИЭТ должны соответствовать образцам, в отношении которых проводится инспекция, для минимизации ее ошибок.

Во время проведения МО эталонные образцы имеют ту же температуру, что и измеряемые ИЭТ, благодаря чему минимизируются отклонения, вызванные различием температур.

Для исключения влияния инструментального дрейфа проводится периодическая инспекция с использованием эталонных контрольных образцов ИЭТ.

Методика МО должна наилучшим образом соответствовать применению и обеспечивать необходимый результат. Точность инспекции, которая достигается с помощью разных методик МО, зависит от алгоритмов работы АПАК, материалов ИЭТ, геометрических параметров и состояния инспектируемых поверхностей. Если требуемой точности нельзя достичь с помощью одной методики, отрабатывается другая, которая может привести к лучшим результатам. В общем случае неопределенность измерения можно уменьшить за счет усложнения МО, а также расположения источника МИ, датчика МИ, камеры КЗ таким образом, чтобы они точнее охватывали инспектируемую площадь поверхности и глубину инспекции.

Неопределенность инспекции, возникающая в результате МО, не может обобщаться. В каждом случае подробно рассматриваются все определенные и дополнительные влияющие параметры.

Инспекция и оценка результатов

Инспекция осуществляется в соответствии с инструкциями и с учетом параметров, влияющих на ее точность. После МО и после изменения параметров АПАК, влияющих на точность инспекции, проверяют его настройку.

Для уверенности в правильности проведения инспекции АПАК обучается с помощью эталонных шаблонных ИЭТ на месте проведения инспекции каждый раз, когда:

- 1) АПАК вводят в эксплуатацию;
- 2) изменяются материал и геометрические параметры ИЭТ, для которых проводят инспекцию;
- 3) изменяются другие условия проведения измерений (например, температура, чистота воздуха, освещение и т. д.).

Поскольку не все изменения условий проведения инспекции и их влияние на точность можно немедленно выявить (например, дрейф, износ компонентов манипуляторов), АПАК при использовании проверяют с регулярными временными интервалами.

Выполняется инспекция всей поверхности ИЭТ или по наиболее ответственным местам, определяемых методиками по обеспечению качества (например, для некоторых корпусов микросхем – площадка под кристалл и контактные площадки под приварку проволоки). Места инспекции указываются в методиках и реализуются в АПАК (например, в АПАК конвейерного типа с семью датчиками для инспекции наиболее контролируемых мест корпусов для микросхем).

Толщина покрытия определяется как минимальная и максимальная величина единичных результатов инспекции, а также среднее арифметическое единичных результатов инспекции, установленных методиками в областях поверхностей покрытий.

Достоверность инспекции оценивается ее неопределенностью. Случайная составляющая неопределенности инспекции уменьшается с увеличением числа проведенных инспекций. Функциональная зависимость между достоверностью инспекции Z_{out} и влияющими на ее результаты величинами X_i показана в (1):

$$Z_{out} = F(X_0, X_1, X_2 \dots X_i). \quad (1)$$

Каждой X_i соответствует коэффициент чувствительности k_i , который показывает, как изменение ΔX_i влияет на достоверность инспекции Z_{out} .

Когда функция F известна как аналитическое выражение – математическая формула, задающая определенную последовательность операций над переменными и константами, k_i вычисляется путем частного дифференцирования для нахождения частной производной функции в пределах отношения изменения ΔZ_{out} к изменению аргумента (ΔX_i), когда ΔX стремится к нулю (2):

$$k_i = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta Z_{out}}{\Delta X_i}. \quad (2)$$

Если тип функциональной зависимости неизвестен, используется аппроксимация с помощью полиномиальных функций как метод приближения к более простым многочленам.

В большинстве вариантов инспекции эта функциональная зависимость была линейной, k_i – постоянные величины. Такая ситуация характерна для участков в узком диапазоне изменения результатов инспекции.

Чтобы надлежащим образом просуммировать неопределенности, возникающие от разных влияющих величин, все составляющие относят к уровню доверия – стандартной неопределенности. Этот показатель, характеризующий разброс значений достоверности инспекции, выражается в виде стандартного отклонения. Такой показатель оценивался статистическими методами (серией многократных инспекций) и рассчитывался как среднее квадратическое отклонение по формуле (3):

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (3)$$

где: x_i – влияющая величина очередной инспекции; n – количество инспекций; $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение, которое рассчитывается по формуле (4):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}. \quad (4)$$

Значение σ из (3) отвечает на вопрос о том, насколько различаются эти средние значения от ожидаемого результата инспекции после n инспекций и усреднения результатов.

Для автоматизированной инспекции качества покрытий ИЭТ методом магнитной индукции одной инспекции на одном эталонном шаблоне ИЭТ недостаточно для оценки ее качества. Оценка σ по результатам проведения более 50 инспекций с использованием десяти эталонных условно однотипных шаблонов ИЭТ гарантирует, что данные не искажаются случайным электромагнитным шумом, несоответствием освещения или ошибками датчика МИ и камеры КЗ. Производители ИЭТ используют σ для расчета доверительных интервалов инспекции. Если критические размеры дефектов, толщина покрытия или шероховатость поверхности обнаружены с высокой точностью, появляется уверенность, что проверенная партия ИЭТ соответствует допускам.

Как уменьшить ошибку инспекции? Если стандартная ошибка слишком высока, это значит, что текущий размер выборки слишком мал или производственный процесс не соответствует требованиям качества. Чтобы снизить стандартную ошибку и повысить точность, необходимо:

- увеличить число инспекций;
- оптимизировать состав и размещение компонентов АПАК относительно inspected ИЭТ;
- снизить влияние внешних воздействующих факторов.

Выводы

В статье показаны результаты создания и внедрения организационной системы автоматизированной инспекции качества покрытий ИЭТ методом МИ. Представлены описания технических средств и программного обеспечения, регламентирующие документы и алгоритмы действий, определяющие порядок подготовки inspectируемых изделий, проведения инспекции и порядок обращения с результатами выполнения инспекции, порядок подготовки и применения ресурсов, необходимых для проведения инспекции, а также анализа качества ее осуществления. Показаны: основные принципы инспекции качества покрытий ИЭТ методом МИ, схема и порядок функционирования ТС и ПО, факторы, влияющие на неопределенность результатов инспекции, проведение машинного обучения инспекции и оценки результатов.

В работе представлены математические зависимости для определения среднего квадратического отклонения – показателя качества проведения инспекции и способы снижения ее ошибок.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 2178–2025 Немагнитные покрытия на магнитных основаниях. Измерение толщины покрытия. Магнитный метод. М. ФГБУ «РСТ». 2025.
2. DIN EN ISO 2178-2016 Non-Magnetic Coatings on Magnetic Substrates – Measurement of Coating Thickness – Magnetic Method (ISO 2178:2016) («Покрытия немагнитные на магнитных подложках. Измерение толщины покрытия. Магнитный метод»).
3. ISO 2064, Metallic and Other Inorganic Coatings – Definitions and Conventions Concerning the Measurement of Thickness («Металлические и другие неорганические покрытия. Определения и условные обозначения, касающиеся измерения толщины»).
4. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Валерий Ключников, Евгений Ключников, Юрий Рубцов. 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 // Электронные компоненты. №8. 2026.
5. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Валерий Ключников, Евгений Ключников, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 11. Современные тенденции в методах автоматизированного оптического контроля изделий электронной техники // Электронные компоненты. №12. 2025.
6. Дормидошина Д. А. Компьютерное зрение в системах контроля качества продукции и связь с TQM и MES. Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. №1. 2025.
7. ГОСТ Р 2.601-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эксплуатационные документы (переиздание). Стандартинформ. 2021.
8. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Валерий Ключников, Евгений Ключников, Юрий Рубцов, Юрий Юдахин. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 14. Методы инспекции покрытий поверхностей изделий электронной техники // Электронные компоненты. №3. 2026.
9. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Валерий Ключников, Евгений Ключников, Юрий Рубцов, Юрий Юдахин. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 13. Развитие автоматизированных систем оптической инспекции качества покрытия поверхностей изделий. Электронные компоненты. №2. 2026.
10. Алексеенко С. П., Антиликаторов А. Б., Чирков О. Н. Архитектура системы оптического контроля качества производства полупроводниковых пластин на машинном обучении. Вестник Воронежского института МВД России. №4. 2025.

