

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

## Часть 14. Методы инспекции покрытий поверхностей изделий электронной техники

**Дарья ДОРМИДОШИНА**,  
заместитель генерального директора,  
АО «ЦКБ «Дейтон»

**Юрий ЕВСТИФЕЕВ**,  
к.т.н., старший научный сотрудник,  
профессор, АО «ЦКБ «Дейтон»,  
medved55@mail.ru

**Валерий КЛЮЧНИКОВ**,  
генеральный директор,  
АО «Завод «Марс»

**Евгений КЛЮЧНИКОВ**,  
заместитель главного конструктора,  
АО «ЦКБ «Дейтон»

**Юрий РУБЦОВ**,  
генеральный директор,  
главный конструктор,  
АО «ЦКБ «Дейтон»

**Юрий ЮДАХИН**, д.и.н.,  
директор по научно-техническому развитию,  
АО «ЦКБ «Дейтон»

В ЭК2–12 2025 г. описаны методы и способы настройки изображений для видимого диапазона обнаружения дефектов, методы измерения, классификации и формирования базы данных (БД) дефектов с помощью автоматизированного программно-аппаратного комплекса (АПАК) поиска дефектов изделий электронной техники (ИЭТ) с сохранением изображения дефекта в БД для дальнейшего применения, описано обнаружение дефектов полупроводниковых пластин в поляризованном свете, рассмотрена проверка качества порошковых материалов и микроструктур поверхностей, описан поиск дефектов микросварки с помощью электромагнитных устройств, представлены результаты проведенных исследований. Эксперименты подтвердили высокую точность и эффективность в обнаружении дефектов на корпусах интегральных микросхем. Описано внедрение АПАК для обнаружения дефектов на металлокерамических корпусах типа 4, рассмотрены и обобщены тенденции 2025 г. в исследованиях и результатах обнаружения дефектов ИЭТ оптическим способом. В ЭК1 2026 г. рассмотрены и обобщены тенденции 2025 г. в исследованиях и результатах применения оптического обнаружения дефектов ИЭТ с помощью технологий освещения, в ЭК2 описаны тенденции развития автоматизированных систем оптической инспекции для анализа качества покрытия поверхностей изделий. В этой части статьи рассматриваются последние достижения в поиске дефектов покрытий, охватывающие методы контроля на основе физических свойств и подходы на основе глубокого обучения.

### Введение

Нанесение покрытий является критически важным процессом обработки поверхности ИЭТ. Поскольку качество покрытия напрямую влияет на эксплуатационные характеристики ИЭТ, эффективное и точное обнаружение его дефектов является важнейшим методом обеспечения качества изделий. За последнее десятилетие наблюдается быстрый прогресс в методах обнаружения дефектов покрытий. Однако большинство существующих исследований сосредоточено на конкретных методах или сценариях применения, и отсутствует систематический всесторонний обзор этой конкретной области исследований. Чтобы восполнить пробел, в этой статье систематически рассматриваются последние достижения в области методов обнаружения дефектов покрытий, охватывающих контроль на основе

физических свойств и подходы, основанные на глубоком обучении. Рассматриваются их фундаментальные принципы, применимость, а также обсуждаются ключевые проблемы и возможные решения. Кроме того, анализируется интеграция передовых технологий обнаружения дефектов покрытий для обеспечения эффективности на системном уровне. Наконец, исследуются и анализируются будущие тенденции развития, включая совместное восприятие, кросс-модальное слияние и автономное принятие решений. Ожидается, что результаты настоящих исследований помогут продвинуть и ускорить инженерные приложения в области обнаружения дефектов покрытий, предоставив исследователям всестороннее понимание существующих проблем и достижений.

Покрытие поверхностей ИЭТ – это процессы нанесения защитного материала [1]. Покрытие является важным этапом изготовления

ИЭТ путем нанесения тонкого слоя металла или других материалов на поверхность изделий и играет решающую роль в электронике, обеспечивая качество ИЭТ и их соответствие нормативным требованиям. Покрытие обеспечивает повышение проводимости и коррозионной стойкости ЭКБ.

На поверхность ИЭТ могут наноситься драгоценные и цветные металлы для повышения проводимости и защиты от коррозии. Помимо металлов в качестве покрытия ИЭТ могут использоваться разные материалы: акриловые, полиуретановые и эпоксидные; силиконовые, париленовые (тончайшие, конформные, равномерные), полимерные пленки, наносимые методом газофазной полимеризации для защиты ИЭТ от внешних воздействий, что достигается благодаря их уникальной способности проникать в мельчайшие детали и создавать беспористый барьер.

По мере того как ИЭТ становятся функциональнее и сложнее, растет потребность в технологиях для нанесения покрытий, способных к сверхтонкому осаждению и точному нанесению [2]. К этим технологиям относятся и атомное осаждение, позволяющие наносить покрытия с субмикронной точностью.

Таким образом, хотя спрос на ИЭТ растет, производители рассматривают покрытия как первостепенную задачу при разработке новой продукции. Они учитывают плотность, толщину и вес покрытия, чтобы защита не шла вразрез с другими техническими характеристиками ИЭТ.

Однако, как и любой производственный процесс, покрытие подвержено дефектам, которые могут ухудшить характеристики изделия. Раннее выявление этих дефектов имеет решающее значение, поскольку они могут привести к отказам ИЭТ, увеличению затрат на техническое обслуживание радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), ухудшению репутации изготовителя.

Эффективное обнаружение дефектов покрытия требует глубокого понимания как самого процесса нанесения покрытия, так и возникающих в нем распространенных проблем [3]. Эти проблемы могут варьироваться от визуальных недостатков, к которым относится изменение цвета и отслоение, до более технических – недостаточной адгезии или недостаточной (или избыточной, превышающей установленную) толщины покрытия. Ознакомившись с этими потенциальными проблемами, предприятия могут внедрить меры контроля качества, гарантирующие соответствие их ИЭТ самым высоким стандартам качества и надежности в части покрытия [4].

Для контроля покрытия могут применяться неразрушающие методы, основанные на физических свойствах материалов, – контактные и бесконтактные, включая ультразвуковой, электромагнитный, вихревой контроль (на основе дискретного вейвлет-преобразования [5]) и активную инфракрасную термографию. Эти методы обнаруживают дефекты путем анализа физических свойств исследуемой поверхности ИЭТ, используя такие механизмы, как распространение звуковых волн, электромагнитная индукция и теплопроводность. Однако их эффективность в значительной мере зависит от свойств материала и условий окружающей среды, в то время как точность и чувствительность обнаружения в большой степени зависят от характера дефекта. Рентгеновские системы контроля, хотя и более дорогостоящие, имеют решающее значение для обнаружения внутренних дефектов в сложных ИЭТ, в основном также применяемых в высокотехнологичных секторах, таких как оборонная и авиакосмическая промышленность. Лазерные сканирующие системы становятся перспективным методом обнаружения дефектов покрытий, обеспечивая высокую точность при работе со сложными геометрическими формами [6]. При этом доминирующим направлением остается оптический контроль.

В этой статье, состоящей из двух частей, мы рассмотрим наиболее распространенные методы инспекции покрытия, основные причины этих дефектов, их влияние на характеристики продукции, а также лучшие практики контроля и тестирования, а также предложим практические подходы и инструменты для эффективного выявления дефектов. Понимание того, как выявляются дефекты покрытия, имеет существенное значение для сохранения заявленных изготовителем

функций, параметров и показателей ИЭТ. Разработчики ИЭТ, технологи и контролеры качества, обладающие необходимыми знаниями и методами, могут гарантировать, что инвестиции предприятия в покрытие ЭКБ принесут максимальную выгоду, минимизировав риск снижения выхода годных изделий.

## Основная часть

### Визуальный контроль

Контроль специалистами покрытия – один из основных методов выявления дефектов, являющийся первой линией защиты в процессах контроля качества. Он включает в себя тщательное исследование покрытой поверхности для обнаружения таких любых очевидных дефектов, как отслоение, изменение цвета, низкая адгезия или неравномерное распределение слоя покрытия. Этот осмотр может проводиться невооруженным глазом или с использованием увеличительных инструментов – луп или микроскопов, позволяющих выявлять трудно различимые дефекты.

Во время визуального контроля проверяются изменения цвета и блеска, которые могут указывать на несоответствия толщины покрытия или наличие загрязнений. Например, тусклый или мутный вид может свидетельствовать о проблеме с процессом нанесения покрытия или о ненадлежащем удалении загрязнений перед нанесением покрытия. Кроме того, осмотр должен быть тщательным и предусматривать инспекцию краев и углов, где изделие могло быть плохо покрыто (иметь слабую адгезию).

При проведении визуального контроля крайне важно учитывать условия освещения. Адекватное освещение позволяет значительно улучшить видимость дефектов, а плохое освещение может скрыть важные недостатки и дефекты. Использование разных углов обзора поверхности способствует выявлению поначалу незамеченных микротрещин или издуг.

Включение контрольного списка в процесс проверки позволяет стандартизировать процесс, гарантируя охват всех соответствующих аспектов и снижая риск пропуска критических дефектов. В целом, методы визуального осмотра имеют решающее значение для выявления дефектов ЭКБ, поскольку они дают немедленное представление о качестве покрытия и выделяют области, которые могут потребовать дальнейшего тестирования или корректирующих мер. Надлежащая подготовка и опыт специалистов немаловажны в совершенствовании навыков, необходимых для эффективного визуального осмотра для обеспечения качества ЭКБ.

### Методы измерения толщины

Измерение толщины покрытия имеет решающее значение для обеспечения соответствия покрытия требуемым характеристикам ЭКБ. Поскольку покрытие наносится на элементы, его толщина может напрямую влиять на функциональность ЭКБ. Толщина покрытия может значительно варьироваться и, если оно слишком тонкое, оно не обеспечит достаточную защиту от коррозии или будет создавать проблемы с тепло- и электропроводностью.

Существует несколько методов измерения толщины покрытия, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения.

Одним из наиболее часто используемых методов является рентгенофлуоресцентная спектрометрия, обеспечивающая неразрушающий контроль. Она работает за счет излучения рентгеновских лучей, которые возбуждают атомы материалов, позволяя обнаруживать испускаемые характеристические рентгеновские лучи. Этот метод, дающий точные результаты измерений, особенно полезен для относительно «толстых» покрытий.

Другим эффективным методом оценки толщины покрытия является использование электрохимических методов, например кулонометрического метода. При его использовании осуществляется растворение слоя и измерение количества заряда, необходимого для полного удаления покрытия. Хотя этот метод также является неразрушающим, он может быть более сложным и потребовать калибров-

ки с использованием соответствующих стандартов для обеспечения точности.

Для измерения толщины применяются микрометры и штангенциркули, особенно в случаях, когда геометрия покрываемого объекта позволяет выполнять такие контактные измерения. Однако использование этих методов может оказаться непригодным для разных форм, привести к низкой точности и повреждению поверхности.

При проведении измерений толщины покрытия учитываются такие факторы, как материалы подложки и процессы нанесения покрытия, поскольку они влияют на точность показаний. Кроме того, установление стандарта допустимой толщины на основе предполагаемого использования тестируемого изделия имеет решающее значение для обеспечения контроля качества в процессах покрытия. Что бы ни использовалось – сложное оборудование или более простые методы, последовательное и точное измерение толщины покрытия является ключом к выявлению дефектов и обеспечению качества ЭКБ.

### **Проверка адгезии покрытия**

Прочность сцепления слоя покрытия и поверхности основания (основанная на межмолекулярном взаимодействии) имеет решающее значение для оценки качества покрытия. Цель проверки – определить, насколько надежно слой покрытия сцепляется с подложкой (основанием). Эффективная адгезия крайне важна, поскольку любые недостатки могут привести к расслоению, отслаиванию или шелушению, что, в конечном итоге, ухудшает качество ЭКБ.

Одним из распространенных методов проверки адгезии является тест с клейкой лентой, который включает в себя нанесение кусочка клейкой ленты на покрытую поверхность и ее последующее быстрое удаление. Если покрытие хорошо прилипло, оно не оставит на ней каких-либо следов, или отслоится очень небольшое количество материала. Этот простой тест позволяет быстро оценить качество адгезии, хотя и не предоставляет точных количественных данных.

Для более точных оценок специалисты используют тесты с попережными разрезами, делая ряд параллельных разрезов сквозь слой покрытия до подложки. После нанесения клейкой ленты на разрезы и ее удаления можно определить количество оставшегося покрытия, оценив адгезию по результатам теста.

Еще в одном методе проверки адгезии применяется тестер, который прикладывает усилие перпендикулярно поверхности покрытия до разрыва связи. Эти количественные данные обеспечивают более объективную оценку прочности адгезии, часто выражаемую в таких единицах, как МПа или кг/см<sup>2</sup>. Эти процедуры не только помогают выявить дефекты покрытия, но и гарантируют соответствие процесса нанесения покрытия отраслевым стандартам, повышая надежность продукции.

Кроме перечисленных применяются и другие методы, к которым относятся:

- решетчатые надрезы: нанесение сетки цапапин и последующая оценка отслаивания (с использованием скотча). Метод дает количественную балльную оценку (0–4), но менее точен, чем отрыв;
- X-образный надрез: аналогичен решетчатому;
- конусный надрез (изгиб): для оценки адгезии при деформации покрытия.

Выявление дефектов покрытия путем проверки адгезии – проактивный подход, который экономит время и снижает затраты, связанные с отказами ЭКБ в РЭА из-за недостаточной адгезии покрытия. Ее проверка позволяет изготовителям ЭКБ скорректировать технологические процессы для повышения качества и сохранения функциональности ЭКБ. Выявление и устранение проблем с адгезией до их обострения в конечном итоге повышает удовлетворенность потребителей и продлевает срок службы РЭА.

### **Оценка коррозионной стойкости**

Оценка коррозионной стойкости является важнейшим аспектом оценки качества и долговечности покрытия на разных подложках.

Однако срок службы и эксплуатационные характеристики покрытия в значительной степени зависят от того, насколько хорошо оно противостоит таким факторам воздействия окружающей среды, как влажность, соль, химические вещества, грибки. Для оценки коррозионной стойкости используется несколько методов и методик, позволяющих специалистам в большей мере контролировать долговечность и эффективность ЭКБ элементами покрытия.

Одним из распространенных методов оценки коррозионной стойкости является ускоренное тестирование, которое помогает имитировать длительное воздействие агрессивных сред в течение меньшего периода времени. Во время этих испытаний образцы ЭКБ (их элементы или комплектующие) с покрытием подвергаются воздействию агрессивных условий. Наблюдение за поведением слоя покрытия во время этих испытаний может показать, насколько оно восприимчиво к коррозии. Кроме того, после воздействия могут применяться дополнительные методы анализа, например оптическая или электронная микроскопия, для выявления таких признаков деградации, как точечная коррозия или отслаивание.

Еще одним важным аспектом оценки коррозионной стойкости является исследование материала подложки. Взаимодействие между подложкой и слоем покрытия может существенно влиять на общую коррозионную стойкость. Например, наличие загрязнений или дефектов на границе раздела приводит к ускоренной коррозии, особенно если материал подложки менее устойчив, чем материал покрытия. Проведение тщательного анализа поверхности ЭКБ перед покрытием дает дополнительное представление о качестве последующего покрытия.

Оценка коррозионной стойкости покрытия имеет важное значение для обеспечения долговечности и надежности ЭКБ. С помощью таких методов, как ускоренные испытания, микроскопический анализ и учет взаимодействия с подложкой изготовители получают ценную информацию о сроке службы и характеристиках изделий с покрытием. Такая форма оценки в конечном итоге способствует повышению качества ЭКБ и удовлетворенности потребителей, гарантируя соответствие покрытия стандартам и документам на поставку ЭКБ.

### **Проверка загрязнения поверхности перед покрытием**

Критически важным этапом в выявлении дефектов покрытия является проверка загрязнения (наличия дефектов) поверхности перед покрытием, которые снижают качество покрытия и ЭКБ в целом. Загрязнения могут препятствовать адгезии и однородности слоя покрытия, приводя к его преждевременному разрушению. К распространенным загрязнениям относятся масла, частицы пыли, отпечатки пальцев и даже остатки химических веществ от самого процесса нанесения покрытия. Выявление этих загрязнений требует сочетания визуальных и инструментальных методов.

Первым шагом при эффективном анализе загрязнения поверхности часто является визуальный осмотр – изучение поверхности покрытия под увеличением для выявления любых видимых признаков дефектов, к которым относятся неровности, изменение цвета или нерегулярные частицы. Однако одного визуального осмотра может оказаться недостаточно для выявления загрязнений всех типов, особенно микроскопических. По этой причине для получения количественных данных о чистоте поверхности применяются такие дополнительные методы, как измерение краевого угла смачивания и анализ поверхностной энергии, позволяющие определить смачиваемость и характеристики поверхности, которые имеют решающее значение для оценки качества адгезии.

В дополнение к этим методам для детального исследования поверхности применяются более совершенные методы – сканирующая электронная микроскопия или энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, позволяющие определить элементный состав загрязнений для выбора соответствующих процессов очистки. Крайне важно обеспечить эффективное удаление всех обнаруженных загрязнений до повторного нанесения покрытия или дальнейшей обработки изделия. Такой тщательный анализ не только увеличивает срок служ-

бы покрытия, но и повышает его эффективность, где важна функциональность изделия.

Для подготовки к покрытию изделие должно пройти через систему предварительной обработки, которая включает предварительное замачивание в щелочной жидкости, электрохимическую очистку, травление в кислоте, деоксидацию, процедуру удаления окислов, ультразвуковую очистку и активирующие зачистки. Эти процедуры различаются в зависимости от технологий нанесения покрытия. Предварительная обработка при значительном перерыве до нанесения покрытия теряет свою эффективность, может оказаться проблемной и привести к недостаточной адгезии.

### Автоматизация процессов

В настоящее время методы инспекции поверхностей ИЭТ претерпели значительные изменения [7–10]. Автоматизация процессов является ключевым фактором этих изменений в результате внедрения передовых технологий, которые оптимизируют и улучшают обнаружение дефектов. Благодаря автоматизации и применению технологий искусственного интеллекта (ИИ) процесс инспекции можно оптимизировать, повысив его эффективность и стабильность.

Компьютерное зрение (КЗ), машинное обучение (МО), нейронные сети (НС) [11] и устройства мехатроники, робототехника выполняют задачи, используя массивы данных, определяя наиболее эффективные параметры обнаружения, минимизируют вероятность пропуска дефектов, что является значительным достижением в электронике.

Более того, автоматизация процессов инспекции покрытий способствует масштабированию производства. Производители получают возможность удовлетворять возросшие требования заказчиков и потребителей ИЭТ без ущерба для качества. Автоматизированные процессы могут осуществляться круглосуточно, увеличивая производительность инспекции и снижая количество человеческих ошибок. Этот сдвиг напрямую влияет на сроки выполнения заказов, позволяя предприятиям оперативнее реагировать на потребности рынка. Кроме того, стабильность, обеспечиваемая автоматизацией инспекции, гарантирует поддержание высоких стандартов качества продукции, укрепляя репутацию предприятия. Автоматизация инспекции объединяется с системами MES (полное управление производственными процессами) и TQM (системой управления качеством) [12].

Оптический контроль дефектов покрытий – одно из наиболее распространенных применений КЗ в производстве ИЭТ. Камеры, установленные рядом с производственной линией, захватывают изображения каждого изделия по мере его перемещения по линии [13]. Алгоритмы МО анализируют эти изображения для обнаружения

дефектов [14]. Автоматизированные программно-аппаратные комплексы используют рассеянное или поляризованное освещение для устранения отражений и повышения контрастности [15–17], что позволяет повысить точность обнаружения дефектов на таких отражающих поверхностях, как металлы, керамика или обработанные лаком поверхности. На рис. 1 показан поиск дефектов покрытий для площадки под кристалл корпуса микросхемы.

Точность размеров имеет решающее значение в ИЭТ, где даже небольшие отклонения могут повлиять на производительность или совместимость компонентов. АПАК на основе ИИ использует данные с камер или 3D-сканеров и измеряет форму, размер и положение [18]. Затем АПАК сравнивает измерения с эталонными САПР-моделями и проверяет их соответствие допустимым отклонениям. На рис. 2 схематично показан поиск дефектов площади покрытия по геометрическим размерам.

Технологии ИИ позволяют обнаруживать несоответствия поверхности, связанные с цветом или оттенками. К таким дефектам относятся изменение цвета, неравномерное покрытие, пятна или проблемы с адгезией (рис. 3). АПАК анализируют различия на уровне пикселей по всему изображению и сравнивают их с базовыми шаблонами [19].

Технологии ИИ позволяют выявлять отсутствующие, лишние или неправильно расположенные элементы с покрытием или без покрытий, сравнивая изображения собранного изделия с цифровым эталоном (рис. 4). Этот подход широко используется в производстве, где ошибка сборки ИЭТ может привести к функциональному сбою или к браку.

Контроль плоскостности поверхности гарантирует правильное расположение всех элементов изделия с покрытием или без него. АПАК анализируют плоскостность и расстояние между элементами, что крайне важно для ИЭТ. На рис. 5 показан процесс обнаружения дефектов, связанных с нарушением плоскостности площадки под кристалл корпуса микросхемы.

Металлические поверхности могут быть отражающими, текстурированными или покрытыми, что затрудняет их анализ при стандартном освещении. Для повышения точности обнаружения дефектов используется рассеянное или поляризованное освещение, позволяющее минимизировать блики и выделить неровности поверхности, образовавшиеся из-за трещин, коррозии, царапин, или другие дефекты покрытий [15–17]. Инфракрасная съемка помогает выявить проблемы, связанные с нагревом, поскольку температурные аномалии указывают на внутренние дефекты или неполное соединение.

Покрытия бывают разных цветов, степеней прозрачности и обработки, что затрудняет их контроль. Специалисты используют подсветку или структурированный свет для выявления деформаций,

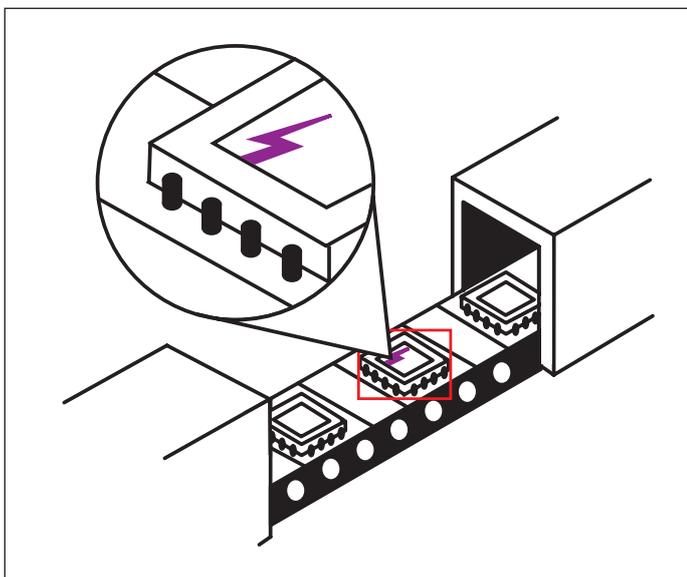


Рис. 1. Поиск дефектов покрытий для площадки под кристалл корпуса микросхемы

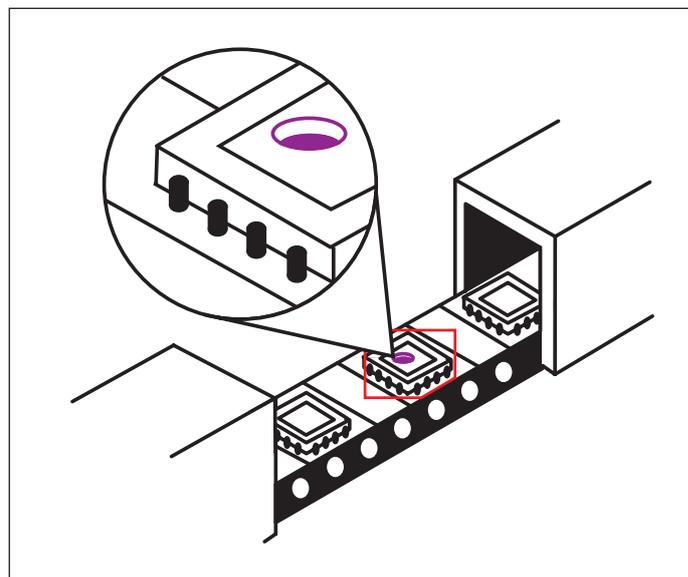


Рис. 2. Поиск дефектов площади покрытия по геометрическим размерам

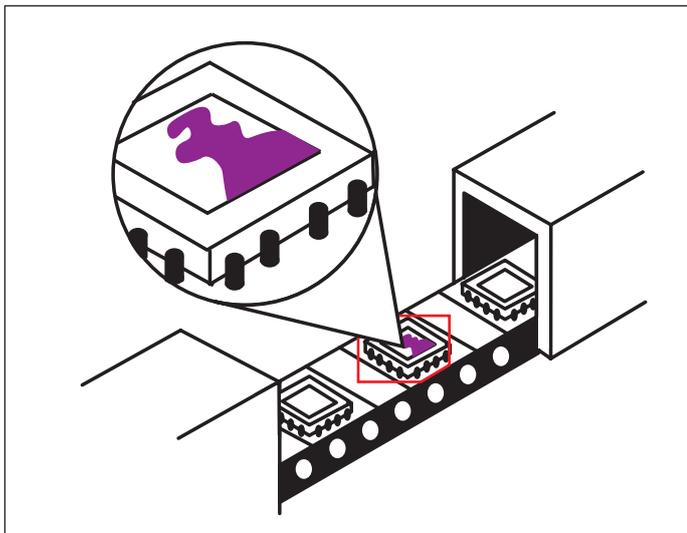


Рис. 3. Поиск дефектов, связанных с цветом или оттенками покрытия

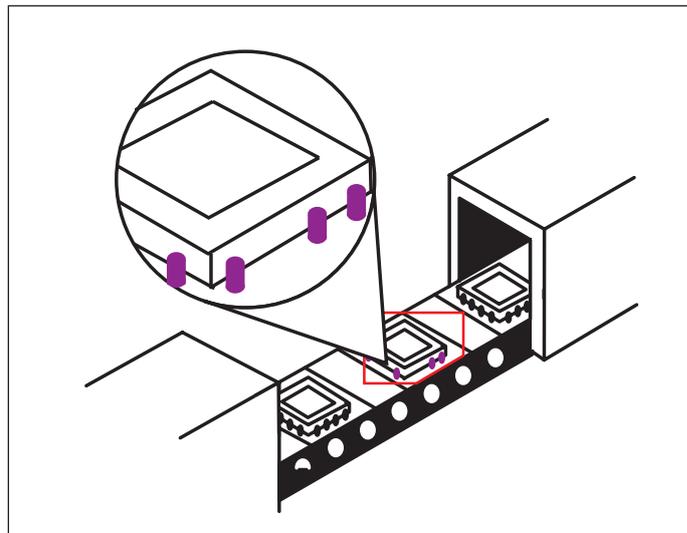


Рис. 4. Поиск дефектов, связанных с отсутствующими, лишними или неправильно расположенными элементами с покрытием или без покрытий

включений или воздушных полостей. Для тонких или прозрачных материалов покрытия поляризационные фильтры улучшают контрастность и уменьшают отражения. АПАК способен оценить однородность цвета и обнаружить такие незначительные дефекты поверхности, как усадочные раковины или линии потока, образовавшиеся в процессе покрытия.

С помощью автоматизации инспекции покрытий специалисты применяют алгоритмы, которые анализируют данные и обнаруживают незаметные для человеческих глаз мельчайшие несоответствия в толщине, адгезии и общем качестве покрытия с помощью КЗ. Методы машинного обучения позволяют автоматизированным средствам инспекции учиться на основе прошлых событий, улучшая их прогностические возможности и минимизируя вероятность дефектов в будущих партиях.

Автоматизированные системы способны непрерывно собирать данные на протяжении всего процесса инспекции изделий с покрытием. Они генерируют подробные отчеты, отслеживающие показатели качества с течением времени, предоставляя информацию о дефектах. В корректности внедрения и эксплуатации АПАК существенную роль играет технологический менеджмент [20].

Интеграция средств автоматизации в методы контроля качества покрытий трансформирует производственные процессы, повышая точность, снижая факторы человеческих ошибок и способствуя проактивному управлению качеством. По мере дальнейшего развития технологий можно ожидать ряд усовершенствований, которые не только улучшат качество ИЭТ, но и повысят общую эффективность и надежность процессов производства ИЭТ.

## Выводы

Методы автоматизированной обработки изображений очень чувствительны к изменениям условий освещения, свойств материала и внешних возмущений, что снижает их надежность в сложных промышленных условиях. В последние годы ИИ способствовал интеллектуальной эволюции в области обнаружения дефектов покрытий благодаря своим мощным возможностям извлечения признаков, достигая необходимой точности и надежности в сложных условиях по сравнению с традиционными методами. Несмотря на эти достижения, подходы на основе методов машинного обучения по-прежнему сталкиваются с рядом проблем.

Большинство существующих методов основано на контролируемом обучении, которое требует больших объемов высококачественных размеченных наборов данных. Однако дефицит стандартизированных наборов данных о дефектах покрытий ограничивает

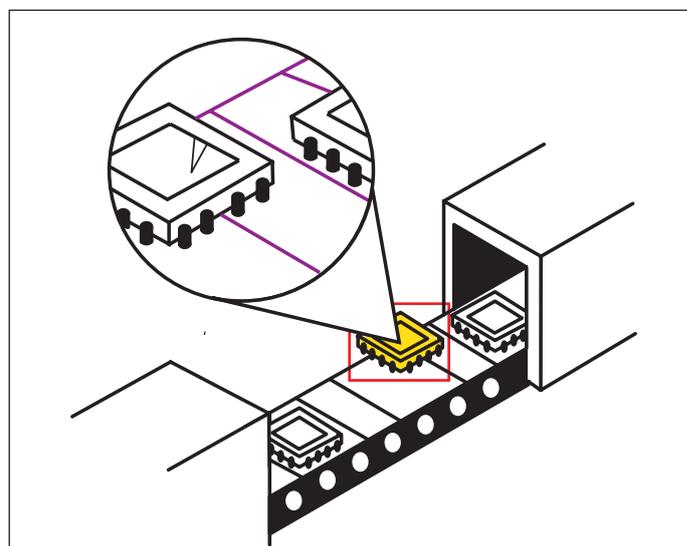


Рис. 5. Поиск дефектов, связанных с нарушением плоскости площадки под кристалл корпуса микросхемы

обобщающую способность моделей. Кроме того, разнообразный, сложный и непредсказуемый характер дефектов покрытий создает значительные проблемы для обучения с малым количеством примеров, затрудняя обучение модели с ограниченным количеством размеченных данных. К тому же, большинство существующих исследований, в основном, сосредоточено на конкретных промышленных приложениях; при этом исследования в области неконтролируемого обучения, многомодального слияния и проектирования облегченных моделей ограничены. Эти ограничения препятствуют широкому внедрению методов обнаружения дефектов покрытий в производство. Таким образом, предоставление всестороннего обзора и обсуждение будущих перспектив методов обнаружения дефектов покрытий имеет важное значение для продвижения исследований в этой области и предоставления ценных идей для дальнейшего развития интеллектуального производства. Необходим систематический обзор последних достижений в технологиях обнаружения дефектов покрытий, охватывающий фундаментальные принципы и области применения, начиная с неразрушающего контроля на основе физических свойств и заканчивая подходами на основе глубокого обучения.

При производстве ИЭТ необходимы: анализ текущей ситуации в электронике; всестороннее рассмотрение таких основных проблем обнаружения дефектов покрытий, как сложные условия детектирова-

ния, дефицит данных, разнообразие дефектов и ограниченная обобщающая способность моделей обнаружения, а также исследование возможных решений этих проблем. Кроме того, необходима проработка вопросов интеграции систем обнаружения дефектов покрытий в передовые технологии производства, проработка будущих направлений исследований, предоставление справочной информации для содействия развитию технологий в этой области.

Следующий рубеж в этой области заключается в интеграции интеллектуальных систем с использованием основанных на данных подходов, датчиков и вычислительных алгоритмов для достижения высококачественного контроля над процессом нанесения покрытий. ■

*В следующей части статьи мы продолжим всесторонний обзор и обсуждение будущих перспектив нанесения и контроля качества покрытий для изделий ИЭТ.*

## Литература

1. ГОСТ 9.301–2025. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования. ФГБУ «РСТ». 2025.
2. Сборник материалов XXVIII Международного научно-практического форума SMARTEX – 2025. Ивановский государственный политехнический университет, Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Институт химии растворов имени Г. А. Крестова Российской академии наук. 2025.
3. С. В. Спицын, С. С. Румянцев. Обнаружение дефектов керамических покрытий мелкогабаритных изделий с использованием сверточных нейронных сетей для промышленного контроля качества // Вестник РГРТУ №93. 2025.
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 13 Развитие автоматизированных систем оптической инспекции качества покрытия поверхностей изделий // Электронные компоненты №2 2026.
5. Zhengtao Xia, Jia Jia. Non-Destructive Eddy Current Testing System Based on Discrete Wavelet Transform. School of Automation, Jiangsu University of Science and Technology. China. 2025.
6. Jingjing Xia, Jinlong Zhang, Hongfei Jiao, Xinshang Niu, Xiaochuan, Tao He, Siyu Dong, Jingyuan Zhu, Xinbin Cheng, Zhanshan Wang. Research Progress and Prospects of Laser Coating Technology. Light: Advanced Manufacturing. Published. Review. 6 (4). 2025.
7. Д. А. Дормидошина, Ю. В. Рубцов. Обзор и анализ методов автоматического оптического контроля качества изделий электронной техники // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения №4 (20) 2025.
8. Д. А. Дормидошина, Ю. В. Рубцов. Технологические тенденции в оптическом обнаружении дефектов радиоэлектронных изделий в 2025 году // Вектор научной мысли. №11 (28). 2025.
9. Д. А. Дормидошина. Ключевые преимущества компьютерного зрения в промышленности // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения №3 (19). 2025.
10. Д. А. Дормидошина, Ю. В. Рубцов. Искусственный интеллект в визуальной проверке качества изделий: технологические и экономические аспекты // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения №2 (18). 2025.
11. Ю. В. Рубцов, В. Э. Малышев, А. А. Назаренко. Определение дефектов на изделиях микроэлектроники в режиме реального времени при помощи сверточной нейронной сети // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения №1 (17). 2025.
12. Д. А. Дормидошина. Компьютерное зрение в системах контроля качества продукции и связь с TQM и MES // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения №1 (17). 2025.
13. Д. А. Дормидошина, Ю. В. Рубцов. Методы позиционирования камер для обнаружения дефектов изделий электронной техники с помощью искусственного интеллекта // Вектор научной мысли №10 (27). 2025.
14. Д. А. Дормидошина, Ю. В. Рубцов. Обзор и анализ методов извлечения изображений дефектов в автоматическом оптическом контроле качества изделий электронной техники // Флагман науки. №10 (33). 2025.
15. Д. А. Дормидошина, Ю. В. Рубцов. Обзор и анализ методов управления освещением в автоматическом оптическом контроле качества изделий электронной техники // Флагман науки. №11 (34). 2025.
16. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Валерий Ключников, Евгений Ключников, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 12. Тенденции развития систем освещения в методах автоматизированного оптического обнаружения дефектов изделий электронной техники в 2025 г. // Электронные компоненты №1 2026.
17. Д. А. Дормидошина, Ю. В. Рубцов. Обзор, анализ и апробирование методов настройки контраста и освещения в автоматизированных системах обнаружения дефектов изделий электронной техники визуальным методом // Вектор научной мысли. №12 (29). 2025.
18. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 2. Измерение обнаруженных дефектов в видимом диапазоне // Электронные компоненты. №3. 2025.
19. Ю. В. Рубцов, В. Э. Малышев, А. А. Назаренко. Автоматизированный визуальный контроль качества изделий микроэлектроники методом сравнения шаблонов // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения №1 (13). 2024.
20. Д. А. Дормидошина. Роль технологического менеджмента в решении задач внедрения систем автоматизированного оптического контроля качества изделий электронной техники // Вестник Екатеринбургского института №1 (60). 2025.