

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Акционерное общество «Научно-исследовательский институт
полупроводниковых приборов»

На правах рукописи



Ширяев Борис Владимирович

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ
ПРОИЗВОДСТВЕ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Шурыгин Ю.А.

Томск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. РУЧНОЙ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ (ОБЗОР).....	11
1.1 Виды контроля при производстве СВЧ МИС	11
1.2 Визуальный контроль	13
1.3 Методы визуального контроля	17
1.4 Существующие установки автоматизированного визуального контроля	20
1.5 Зондовые станции	22
1.6 Программные решения автоматизированного визуального контроля	26
1.7 Подходы к автоматизации визуального контроля.....	27
1.8 Инструменты автоматизированного визуального контроля	28
Выводы	30
ГЛАВА 2. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.....	32
2.1 Классификация дефектов на микрофотографии МИС СВЧ.....	32
2.2 Предварительная обработка изображений	40
2.3 Алгоритм автоматизированного визуального контроля.....	40
2.3.1 Поиск точек совмещения.....	42
2.3.2 Вычисление матрицы аффинного преобразования фотошаблона	44
2.3.3 Растеризация векторного чертежа фотошаблона	48
2.3.4 Выделение области анализа	50
2.3.5 Преобразование микрофотографии.....	51
2.3.6 Вычисление карты дефектности.....	53
2.3.7 Поиск и определение наличия дефекта на карте дефектности	54
2.4 Подходы и методы реализации этапов алгоритма автоматизированного визуального контроля	55
2.4.1 Реализация поиска точек совмещения	55
2.4.2 Реализация преобразования векторного чертежа фотошаблона.....	57
2.4.3 Реализация классификатора на основе искусственной нейронной сети.....	57
2.4.4 Реализация расчёта карты дефектности	58
2.5 Асимптотика алгоритма автоматизированного визуального контроля	61

2.6 Программное обеспечение автоматизированного визуального контроля	63
Выводы	66
ГЛАВА 3. УСТАНОВКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.....	67
3.1 Требования к проектированию установки автоматизированного визуального контроля	67
3.2 Выбор основных функциональных компонентов.....	69
3.3 Разработанные образцы зондовых станций и станции визуального контроля	71
3.4 Программное обеспечение управления измерениями.....	76
3.5 Аппаратно-программная система температурной компенсации	77
3.6 Программно-аппаратный комплекс измерения электрофизических параметров МИС	80
Выводы	82
ГЛАВА 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ	84
4.1 Методика проведения экспериментов	84
4.2 Программное обеспечение автоматизированного проведения экспериментов	89
4.3 Проведение экспериментов и обсуждение результатов.....	91
4.3.1 Самые простые планарные линии СВЧ МИС	91
4.3.2 Простые СВЧ МИС	95
4.3.3 СВЧ МИС средней сложности.....	100
4.3.4 Сложные СВЧ МИС.....	104
4.3.5 СВЧ МИС высокой сложности.....	111
4.3.6 Фотонные МИС электрооптического модулятора	115
Выводы	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное).....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное)	137

ВВЕДЕНИЕ

Визуальный контроль – метод обнаружения и анализа внешних дефектов промышленных изделий, возникающих на различных этапах производства, осуществляемый оператором или специальным устройством с использованием оптических средств. Визуальный контроль является одним из этапов выходного контроля, позволяет отсортировать потенциально нерабочие СВЧ МИС, снизить степень износа СВЧ зондов посредством уменьшения числа касаний и оценить общий внешний вид выпускаемой продукции. Изготовленная СВЧ МИС по визуальному признаку оценивается в нескольких категориях: качественный анализ поверхностей элементов СВЧ МИС, отсутствие повреждений и загрязнений, точность повторения фотошаблона и другие.

Современные масштабы выпуска монолитных интегральных схем и полупроводниковых приборов настолько огромны, что визуальный контроль отнимает большое количество времени и требует значительных усилий со стороны контролирующего оператора. Длительная работа по осуществлению визуального контроля приводит к чрезмерной утомляемости зрения оператора и снижению качества контроля. Однако готовые решения в виде систем автоматизированного визуального контроля имеют высокую стоимость и являются импортной продукцией.

В соответствии с приказом №96 от 01.04.2015 Минкомсвязи России «Об утверждении плана импортозамещения программного обеспечения» разработка отечественного программно-аппаратного комплекса для автоматизации визуального контроля **является актуальной задачей.**

Степень разработанности темы исследования

Существуют системы автоматического и автоматизированного визуального контроля от таких производителей как MueTec GmbH (Германия), KLA-Tencor (США), Camtek (Китай), FormFactor (США), Hitachi (Япония). Также существуют исключительно программные решения для проведения визуального контроля различной продукции: automated optical inspection (AOI) – технология,

объединяющая подходы и методы контроля изготовления печатных плат; NI Vision Builder – программное обеспечение для создания скриптов процесса автоматизированного визуального контроля. Статьи последних лет по автоматизации дефектоскопии МИС посвящены детектированию дефектов с использованием свёрточных нейронных сетей. На основе обзора существующих аналогов были выделены следующие особенности:

- программное обеспечение автоматизированного визуального контроля, которое может решать вопрос визуального контроля МИС, интегрировано с аппаратным обеспечением и не может функционировать без него;

- системы автоматизированного визуального контроля имеют высокую стоимость для уровня мелкосерийного производства: стоимость систем на основе оптической микроскопии более 1 млн. долларов, стоимость систем на основе сканирующей электронной микроскопии более 6 млн. долларов;

- системы автоматизированного визуального контроля имеют следующий функционал: контроль размеров элементов топологии, поиск неравномерности подложки, классификация известных обнаруженных дефектов, измерение толщины диэлектрических слоёв, проведение анализа состава верхних слоёв;

- методы детектирования дефектов с использованием свёрточных нейронных сетей применимы исключительно для серийного производства, т.к. требуют существенных временных затрат для переобучения нейронной сети под каждую топологию МИС.

Таким образом, существующие решения автоматизированного визуального контроля не позволяют сравнивать топологию полученной МИС с исходным чертежом фотошаблона в электронном виде, зависят от аппаратных решений и имеют высокую стоимость для мелкосерийного производства. Так же следует отметить, что все программные и аппаратные решения автоматизированного визуального контроля являются импортными.

Цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка алгоритма автоматизированного визуального контроля полупроводниковых приборов и

монолитных интегральных схем, создания аппаратно-программного комплекса на его основе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) провести анализ существующих подходов и методов визуального контроля МИС;

2) провести классификацию дефектов МИС по сложности их детектирования и степени влияния на рабочие характеристики МИС;

3) разработать алгоритм автоматизированного визуального контроля МИС;

4) разработать программное обеспечение на основе разработанного алгоритма;

5) провести экспериментальное исследование предложенного алгоритма автоматизированного визуального контроля на существующих микрофотографиях МИС, полученных на полуавтоматической зондовой станции;

6) разработать установку автоматизированного визуального контроля с ЧПУ, разработать возможную модификацию в виде полуавтоматической зондовой станции;

7) провести внедрение разработанного программно-аппаратного комплекса автоматизированного визуального контроля.

Научная новизна

1. *Разработан* системный подход выбора группы точек совмещения, *отличающийся* критерием повторяемости геометрического взаиморасположения на микрофотографии МИС и фотошаблоне и *позволяющий* исключить дефектные точки совмещения.

2. *Впервые* применён классификатор на основе искусственной нейронной сети и метод вычисления пиксельного расстояния, *позволяющие* эффективно определять дефекты топологии разнородных покрытий.

3. *Разработана* специализированная аппаратно-программная система температурной компенсации, *отличающаяся* гибкостью программной настройки и *позволяющая* исключить влияние эффекта температурного расширения механических узлов под воздействием внешних факторов.

4. *Предложен* алгоритм автоматизированного визуального контроля, *отличающийся* методом сравнения микрофотографий МИС с фотошаблоном и *позволяющий* повысить производительность визуального контроля мелкосерийного производства.

Практическая значимость работы:

1) разработан программно-аппаратный комплекс автоматизированного визуального контроля. Программная часть комплекса работает по принципу повторно используемых проектов визуального контроля, включающих в себя настроенный алгоритм визуального контроля для оценки степени дефектности группы МИС. Аппаратная часть комплекса представляет собой установку визуального контроля с числовым программным управлением (далее – ЧПУ);

2) разработана, собрана и испытана полуавтоматическая зондовая станция для проведения контроля электрофизических параметров и визуального контроля.

Результаты диссертационного исследования использованы в следующих научно-исследовательских работах:

1) комплексный проект расширения измерительной базы АО «НИИПП» «Разработка базовой технологии производства комплексов программно-аппаратных для измерения параметров монолитных интегральных схем на пластине с использованием зондовых станций в диапазоне до 67 ГГц с возможностью расширения диапазона частот до 650 ГГц»;

2) научный проект «Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных оптоэлектронных устройств волоконно-оптических систем передачи информации и радиофотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки», выполняемый при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 1075-03-2020-237/1 от 05.03.2020, внутренний номер проекта FEWM-2020-0040.

Объектом исследования алгоритм автоматизированной отбраковки микрофотографий МИС.

Предметом исследования являются дефекты топологии МИС и методы их определения.

Теоретическую и методологическую базу исследования составили труды ведущих зарубежных специалистов в областях обработки изображений, эвристических алгоритмов в т.ч. искусственных нейронных сетях, конструирования систем с ЧПУ, проектирования сложного программного обеспечения. Информационной базой являются материалы, опубликованные в периодической литературе, ГОСТ, справочных изданиях, сети Интернет.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. *Использование* системного подхода к выбору точек совмещения, *отличающегося* использованием изменяемой группы точек совмещения и метода наименьших квадратов, *позволяет* улучшить устойчивость работы алгоритма на монолитных интегральных схемах допустимой дефектности.

2. *Применение* вычисления пиксельного расстояния совместно с классификатором на основе искусственной нейронной сети *позволяет* определить дефекты топологии разнородных покрытий.

3. *Использование* метода сравнения с фотошаблоном, *отличающегося* от метода сравнения с микрофотографией эталонной МИС исходным объектом сравнения, *повышает* производительность визуального контроля в условиях мелкосерийного производства.

4. *Использование* аппаратно-программной системы температурной компенсации держателя полупроводниковых пластин, *отличающейся* гибкостью программной настройки температурной зависимости, *позволяет* исключить уход фокусного расстояния и увеличить устойчивость алгоритма.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается: согласованием экспериментальных данных с результатами референтных методов; применением современного измерительного оборудования, поверенного в установленном порядке; совпадением экспериментальных результатов, полученных с применением разных методик; апробацией теоретических и экспериментальных результатов на конференциях, семинарах; публикацией статей в рецензируемых журналах; наличием свидетельств о регистрации программ для ЭВМ; внедрением результатов работы в производство.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на международных и всероссийских конференциях, среди них: XII Российская конференция с международным участием «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур», Алтай, 2018; XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2019; 29-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2019; XV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2019.

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объёма теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку и отладку алгоритма и программного обеспечения автоматизированного визуального контроля, конструирование, сборку и отладку работы полуавтоматической зондовой станции, проведение анализа разработанных частей программно-аппаратного комплекса, оформление полученных результатов исследований.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [1-3], 2 – индексируемые в Web of Science [4,5], 9 тезисов докладов [6-14], получено 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [15-17].

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 155 страниц, включая 109 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 105 наименований.

В первой главе произведён литературный обзор по теме диссертационного исследования, определены место и значимость визуального контроля в общем технологическом маршруте изготовления МИС. Описаны методы визуального контроля. Обзор современных систем визуального контроля: станций автоматизированного визуального контроля и программного обеспечения показал, что существующие методы автоматизированного визуального контроля позволяют

определять дефекты на изображениях МИС методом сравнения их с эталонным изображением МИС. Данный подход позволяет эффективно определять известные дефекты топологии МИС, но не позволяет определять дефекты, которые возникают при изготовлении фотошаблона. Такие дефекты характерны при мелкосерийном производстве.

Вторая глава содержит практическую часть разработки и реализации алгоритма и ПО автоматизированного визуального контроля. Приводится классификация возможных дефектов, показан интерфейс разработанного ПО автоматизированного визуального контроля полупроводниковых приборов и монолитных интегральных схем, подробно рассмотрен алгоритм автоматизированного визуального контроля и его шаги, описаны особенности реализации шагов алгоритма в ПО, выделены основные «бутылочные горла» реализованного алгоритма.

Третья глава посвящена разработке установки автоматизированного визуального контроля и полуавтоматической зондовой станции, описаны решения, принятые при конструировании, определены краткие технические характеристики разработанных станций.

В четвёртой главе представлены результаты тестирования ПО автоматизированного визуального контроля на примере МИС различной сложности: простые МИС – планарная линия СВЧ МИС и аттенюатор, МИС средней сложности с индуктивностями и конденсаторами – МИС смещения по постоянному току, сложные МИС с диодами – ограничитель мощности, МИС высокой сложности с транзисторами – переключатель на транзисторной технологии, сложные фотонные МИС электрооптических модуляторов с оптическим полупроводниковым каналом; сделаны выводы о работоспособности алгоритма автоматизированного визуального контроля.

В заключении подведены итоги и сформулированы основные выводы по проделанной работе.

ГЛАВА 1. РУЧНОЙ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ (ОБЗОР)

1.1 Виды контроля при производстве СВЧ МИС

СВЧ МИС – монолитная интегральная схема сверхвысокочастотного диапазона, предназначена для работы на частотах от 300 МГц до 300 ГГц [18], выполняет функции аттенуаторов, усилителей, смесителей, умножителей сигнала и др. СВЧ МИС изготавливаются на подложках из арсенида галлия (GaAs), кремния (Si), нитрида галлия (GaN), фосфида индия (InP) и др. Различия материала подложки и базовой технологии изготовления СВЧ МИС требует собственный технологический маршрут производства и отдельный подход к выходному контролю СВЧ МИС.

Существующая технология производства СВЧ МИС на предприятии позволяет изготавливать аттенуаторы (в т.ч. цифровые), ограничители, переключатели, фазовращатели, малошумящие усилители, детекторы, ответвители, смесители, умножители частоты на GaAs подложках по НЕМТ и p-i-n диодной технологиях в частотном диапазоне до 50 ГГц [19].

В технологическом маршруте производства СВЧ МИС существует множество этапов, которые контролируют качество выпускаемой продукции и отдельные технологические этапы. Этапы контроля можно классифицировать по нескольким признакам:

– *по расположению контроля в технологическом маршруте* этапы разделяют на входной контроль, межоперационный контроль и выходной контроль. Входной контроль обеспечивает высокое качество материалов (подложки, химические реактивы, металлы и др.), используемых в процессе производства СВЧ МИС. Межоперационный контроль обеспечивает постоянство получаемых характеристик СВЧ МИС от подложки к подложке, позволяет обнаружить отклонение технологического маршрута и скорректировать его при необходимости. Выходной контроль проверяет соответствие СВЧ МИС

техническому заданию или другой технической документации, отсеивает нерабочие и/или потенциально нерабочие СВЧ МИС;

– *по типу контролируемых параметров СВЧ МИС* различают контроль электрофизических параметров, испытания на надёжность, испытания на безотказность, испытание на сохраняемость, визуальный контроль и другие, в зависимости от технической документации [20,21].

Контроль электрофизических параметров [22,23] подтверждает функциональность выпускаемых СВЧ МИС: вольтамперные характеристики (ВАХ), амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ), коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), верхняя граница линейности амплитудной характеристики (ВГЛАХ), интермодуляционные искажения (IP) и многое другое в нормальных условиях и/или условиях, указанных в технической документации. Контроль электрофизических параметров часто выполняется последовательно для каждой СВЧ МИС в автоматическом режиме на полуавтоматических и автоматических зондовых станциях. Продолжительность испытания одной СВЧ МИС варьируется от нескольких секунд до часа, продолжительность испытания всей полупроводниковой пластины может занять от нескольких часов до нескольких рабочих дней.

Испытания на надёжность [24,25] подтверждают работоспособность СВЧ МИС в условиях, отличных от нормальных [26] в пределах, установленных в техническом задании, при повышенных и/или пониженных температуре, давлении, ускорении, стойкости к радиоизлучению. Испытания на надёжность чаще всего проводят сразу над группой СВЧ МИС в специальной технологической оснастке. Продолжительность испытания варьируется от нескольких минут до рабочего дня.

Испытание на безотказность подтверждает сохранение электрофизических параметров СВЧ МИС в пределах, установленных в техническом задании, в течение всего заявленного времени работы [27]. Испытание на безотказность проводят в специально разработанной технологической оснастке при повышенных температурах (для ускорения испытания) в рабочих режимах (при установленных

напряжениях и мощности). Продолжительность испытания занимает от 100 до 10000 и более часов, в том числе с учётом ускорения испытания.

Испытание на сохраняемость [28] подтверждает способность СВЧ МИС сохранять свои характеристики в пределах, установленных техническим заданием, в течение определённого времени при условиях хранения. Испытание на сохраняемость СВЧ МИС производится в упакованном виде при условиях хранения (отличается от нормальных). Данный тип испытаний является самым продолжительным и может проводиться до 25 лет.

Визуальный контроль позволяет оценить внешний вид выпускаемых СВЧ МИС [21,29] и провести предварительную отбраковку СВЧ МИС перед другими видами испытаний. Визуальный контроль позволяет снизить денежные затраты и сэкономить большое количество времени на других видах контроля. Продолжительность визуального контроля зависит от размера СВЧ МИС и от линейных размеров контролируемых элементов, может длиться от нескольких секунд до нескольких минут в ручном режиме и до долей секунды в автоматическом режиме.

1.2 Визуальный контроль

В зависимости от поставленных целей визуальный контроль используют для решения следующего круга задач:

- оценка соответствия формы и размеров изготовленных топологических элементов требованиям технического задания с требуемой точностью (соответствие фотошаблону) с последующей возможной корректировкой технологических операций [30];
- оценка совместимости топологических слоёв;
- поиск дефектов топологических элементов (например, разрывов линий межсоединений);
- обнаружение загрязнений поверхности готовой полупроводниковой пластины;
- определение процента выхода годных чипов по визуальному признаку;

– получение общей информации об эстетике выпускаемой продукции и другое.

Полноценный визуальный контроль позволяет выявить многие виды брака и во многом гарантировать получение положительного конечного результата.

Как и любой тип контроля визуальный контроль может быть входным, межоперационным и выходным.

В задачу входного визуального контроля входит проверка чистоты поверхности пустой полупроводниковой пластины, выполняется вращением полупроводниковой пластины под сканирующим лучом (в зависимости от размера дефекта используют лазер оптического диапазона, ультрафиолетовый лазер или электронный луч). Отражённый от поверхности полупроводниковой пластины луч непрерывно записывается детектором. В момент, когда отражённый луч прерывается, фиксируется наличие дефекта (рисунок 1.1) [31,32].

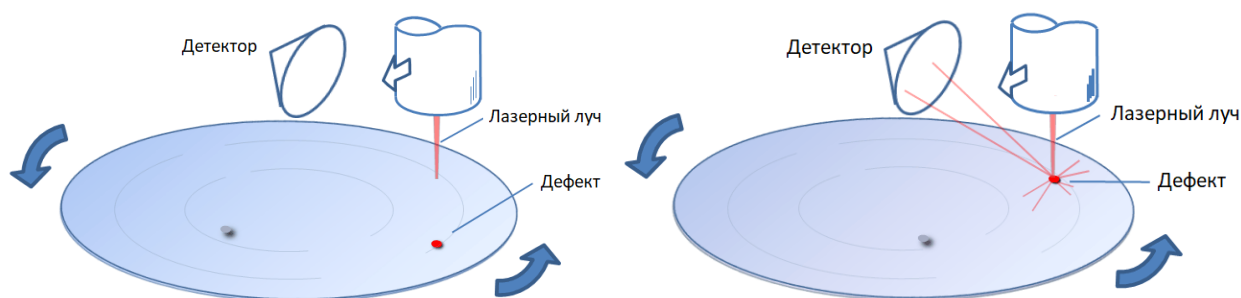


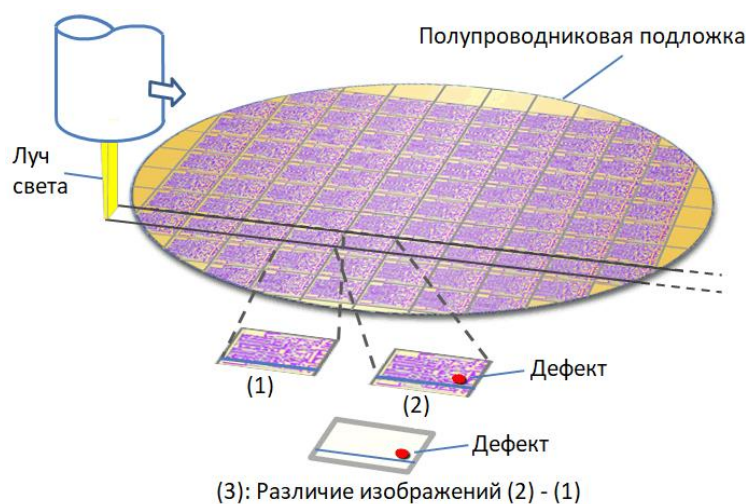
Рисунок 1.1 – Входной контроль полупроводниковых пластин с использованием лазера [31]

В задачу межоперационного визуального контроля входит проверка качества нанесения и проявления фоторезистивных масок для различных типов слоёв. Чаще всего ищутся точечные загрязнения, которые создают вокруг себя области неравномерности толщины фоторезиста. При обнаружении критических дефектов фоторезистивной маски, маску удаляют и повторно производят этап фотолитографии.

В задачи выходного визуального контроля входят отбраковка потенциально нерабочих изделий (наличие дефектов, которые могут повлиять на рабочие характеристики и надёжность СВЧ МИС), снижение износа дорогостоящих зондов

за счёт пропуска измерения электрофизических параметров бракованных СВЧ МИС, общая эстетическая оценка внешнего вида выпускаемой продукции.

Визуальный контроль готовых МИС чаще всего производится методом сравнения каждой МИС с обобщённой МИС по всей полупроводниковой пластине [31-33]. Такой подход объясняется случайностью возникновения дефекта: вероятность возникновения дефекта в любой части МИС одинаковая. Таким образом, при формировании обобщённой МИС (некоторого усреднённого изображения), изображения дефектных участков скроются, получится «усреднённая» МИС готовой полупроводниковой пластины. Эта МИС сравнивается с изображением каждой МИС данной пластины, находятся различия и принимаются решения о дефектности. Такой подход гарантирует качество визуального контроля вне зависимости от отклонений параметров технологического маршрута в допустимом диапазоне (при разной толщине прозрачных плёнок наблюдается различный оттенок их цвета из-за возникновения эффекта интерференции света в плёнке) [34]. В качестве модификации описанного метода используется сравнение каждой МИС с выбранной годной (годная МИС определяется вручную или по минимальному отклонению от «усреднённой» МИС) (рисунок 1.2).



1 – микрофотография эталонной МИС; 2 – микрофотография дефектной МИС; 3 – различие микрофотографий дефектной и эталонной МИС с отметкой дефекта

Рисунок 1.2 – Определение дефекта на МИС с использованием метода сравнения с годной МИС [31]

Другой подход при проведении визуального контроля заключается в сравнении микрофотографии готовой МИС с исходными фотошаблонами. Данный подход сложнее, т.к. следует решить множество других задач: совмещение векторного чертежа фотошаблона с растрованной микрофотографией МИС, проблема цветовой палитры микрофотографии, если она выполнена в цвете, метод оценки различия микрофотографии и фотошаблона.

Отдельно следует отметить проведение измерений критических размеров топологии готовой СВЧ МИС по микрофотографии. На этапе проектирования формируется список критически важных параметров элементов: площадь конденсатора, ширина и/или длина проводника, толщина слоя металлизации и др. К этим параметрам устанавливаются требования воспроизводимости – допустимое отклонение от номинала. В процессе визуального контроля на цифровом микроскопе с фиксированным известным масштабом производится измерение данных параметров и выносится решение о годности или о доработке пластины [35].

Визуальный контроль также проводят для полупроводниковой пластины готовых МИС в целом, для определения характера дефектов и поиска источника дефектов. В статье [36] описывается метод классификации типа дефектности полупроводниковой пластины по карте раскроя с указанием дефектных и годных МИС. Нейронная сеть анализирует изображение карты раскроя и классифицирует тип дефекта пластины: центральный, локальный, случайный или царапина. Точность такого определения характера дефекта составляет 98-99%.

Процедура контроля качества при производстве МИС разрабатывается и производится на основании нормативных документов, определяющих требования проводимого контроля качества. Например, в России визуальный контроль регламентируются ГОСТ 18725-83 [20] и ГОСТ 20.57.406-81 [21], за рубежом – MIL-STD-883E [29].

В стандарте MIL-STD-883E достаточно подробно описан метод визуального контроля (метод 2010.10): определены допустимые размеры дефектов топологии и структуры полупроводниковых изделий. Стандарт определяет требования к

аппаратному обеспечению визуального контроля с учётом топологической нормы МИС и приводит примеры допустимых и недопустимых дефектов для однозначного определения годности МИС по визуальному признаку (пример выдержки на рисунке 1.3).

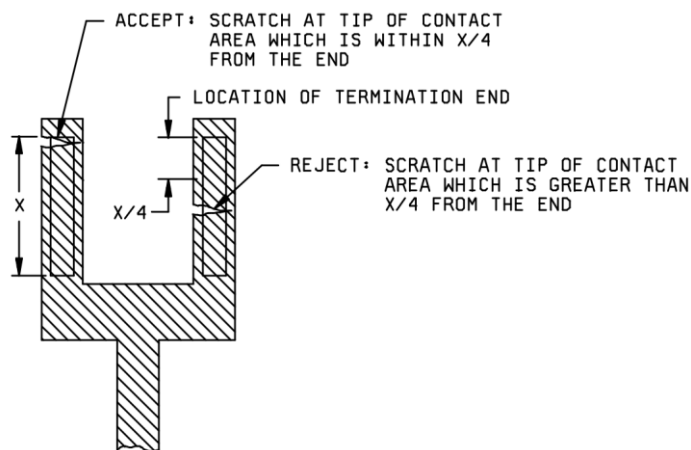


Рисунок 1.3 – Допустимое положение царапины в металлизации на стадии пассивации [29]

1.3 Методы визуального контроля

Оптические методы

Оптические методы контроля нашли широкое применение для входного, межоперационного и выходного контролей полупроводниковых пластин и структур, а также для технологического контроля процессов изготовления СВЧ МИС. К традиционному методу изучения качества изготовления топологии относится метод оптической микроскопии в отражённом и проходящем свете [37]. При помощи оптического микроскопа можно наблюдать объекты с увеличением до $\times 1000$.

Для изучения СВЧ МИС в видимом диапазоне используется, в основном, микроскопия в отражённом свете: в светлом и тёмном полях. Отличие методов состоит в способе подсветки образца. В светлопольной микроскопии образец подсвечивается таким образом, чтобы отражённый свет из области наблюдения попадал в объектив микроскопа. В темнопольной микроскопии объект подсвечивается «сбоку», чтобы прямой отражённый свет от области наблюдения

не попадал в объектив, а искажённый свет от дефектных участков попадал. Таким образом, светлопольная микроскопия позволяет наблюдать СВЧ МИС со всеми её элементами топологии, темнопольная эффективно используется для наблюдения мелких поверхностных нарушений, плохо выявляемых при светлопольной микроскопии.

Светлопольная микроскопия также может быть с боковым и осевым освещением. При боковом рассеянном освещении неровности поверхности готовой СВЧ МИС сливаются в один цвет (характерно для участка электрохимически осаждённого золота), при осевом освещении поверхность СВЧ МИС по-разному рассеивает падающий свет и контуры рельефа топологии СВЧ МИС отчётливо наблюдаются в микроскоп. Также поверхность подложки GaAs и поверхности SiO₂ хорошо отражают свет и при микроскопии с боковым освещением работа по осуществлению визуального контроля невозможна (рисунок 1.4).

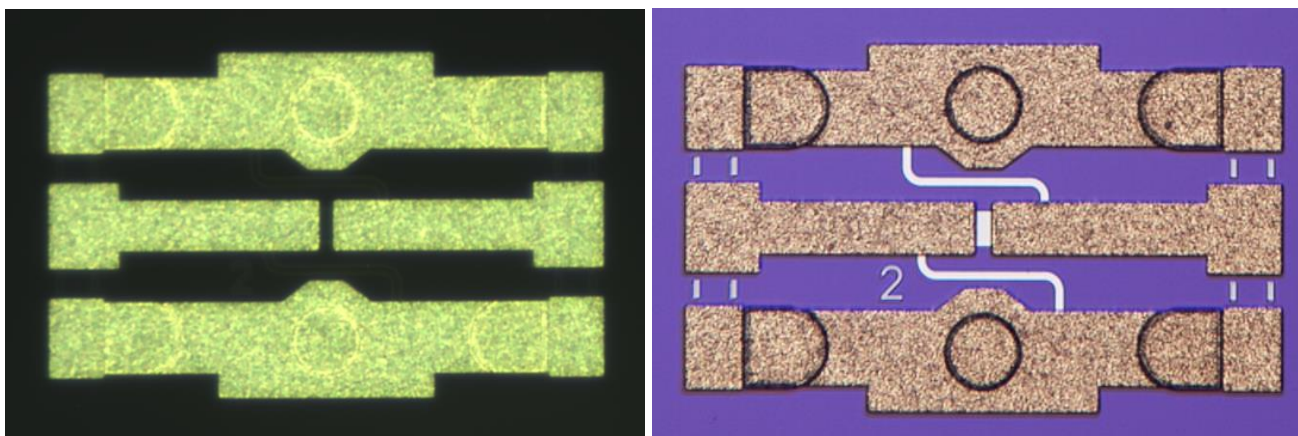


Рисунок 1.4 – Микрофотографии, полученные при боковом освещении (слева) и при осевом освещении (справа)

Отдельно следует выделить метод интерференционной микроскопии, позволяющий проводить профилометрию поверхности, контролировать шероховатость и строить трёхмерные карты поверхности изучаемого образца.

Принцип действия интерференционного микроскопа основан на интерференции световых пучков лазерного излучения, отраженного от эталонной поверхности и зеркала, на котором размещен изучаемый образец. Для автоматизации измерений используется метод дискретного фазового сдвига,

вносимого при помощи управляемого зеркала на пьезоэлементе (эталон). Интерферограммы при различных положениях эталона фиксируются с помощью встроенной ПЗС-матрицы и поступают в компьютер, где производится восстановление двумерного распределения оптической разности хода и формируется трёхмерная поверхность (рисунок 1.5) [38].

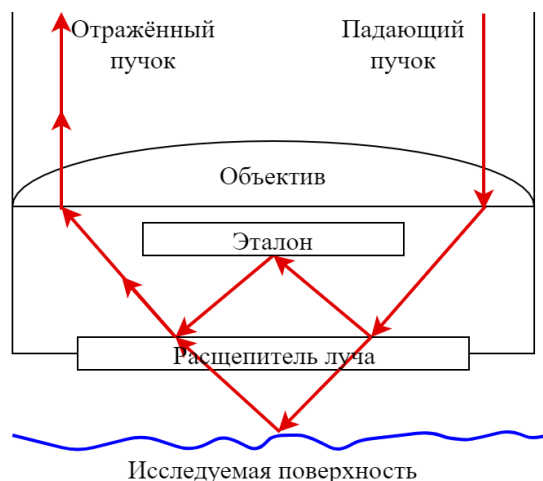


Рисунок 1.5 – Объектив со встроенной интерференционной вставкой

К отдельным методам оптического контроля можно отнести эллипсометрию, люминесцентные методы анализа, методы оптической спектроскопии [39].

Инфракрасную (ИК) микроскопию используют чаще всего для визуального контроля скрытых слоёв металлизации готовых МИС и не только на подложке из кремния за счёт оптической прозрачности в ИК спектре. Для других материалов не применим в области визуального контроля из-за большой длины волны [40].

Ультрафиолетовая (УФ) микроскопия пользуется большим спросом в визуальном контроле любых МИС на любых подложках [41]. За счёт малой длины волны можно детектировать дефекты затворов транзисторов (до десятков нм).

Рентгеновская микроскопия

Использование рентгеновских лучей в качестве источника излучения для проведения визуального контроля позволяет уменьшить размер наблюдаемого объекта до долей нанометров. Также при проведении визуального контроля на основе рентгеновских лучей, одновременно с микроскопией можно проводить

анализ состава поверхностного слоя методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией [42].

Электронная микроскопия, как и рентгеновская, позволяет наблюдать поверхность полупроводниковой пластины и оценивать состав поверхностного слоя подложки: детектирование вторичных и обратно рассеянных электронов с поверхности полупроводниковой пластины [43-45].

1.4 Существующие установки автоматизированного визуального контроля

Источником возникновения дефектов чаще всего является человек. В полностью автоматическом производственном процессе с точной настройкой технологических режимов и отсутствия загрязняющих частиц (производство в чистых помещениях) возникновение каких-либо дефектов невозможно. Таким образом, крупные промышленные компании мира по производству полупроводниковых приборов Intel, Samsung, TSMC и другие [46] используют автоматизированные конвейеры производства в чистых помещениях с минимальным доступом человека до полупроводниковых пластин. Организация такого производства, поддержание необходимого уровня чистоты часто являются затратными и оправдывается лишь при большом обороте полупроводниковых пластин. Такие компании могут позволить себе автоматизированные установки визуального контроля.

В визуальном контроле нет необходимости при высокой «культуре» производства для производства гражданской продукции и наличия гарантийного срока эксплуатации произведённых устройств, т.к. произведённые устройства (корпусированные или бескорпусные) проходят контроль параметров, заявленных в технической документации. Во всех других случаях наличие выходного визуального контроля позволит снизить затраты на замену или возмещение понесённого ущерба при выходе из работы произведённых устройств.

При небольшом объёме производства полупроводниковых устройств выгоднее нанять оператора визуального контроля, чем покупать установку

автоматизированного визуального контроля. При большом объёме производства существует компромисс между большим количеством операторов визуального контроля и автоматизированными установками. Решение принимается из соображений затрат на содержания большого штата сотрудников и качеством ручного визуального контроля, т.к. человеку свойственно уставать в процессе напряжённой работы, что снижает качество визуального контроля.

При существующей потребности в установках автоматизированного визуального контроля существуют готовые решения «под ключ» для встраивания в процесс производства полупроводниковых приборов.

Данные различных установок автоматизированного визуального контроля приведены в таблицах 1.1, 1.2.

Таблица 1.1 – Существующие установки автоматизированного визуального контроля на основе оптической микроскопии

Наименование станции визуального контроля	MT2010/3000 [47,48]	Candela CS-20 [49]	Falcon 500 [50]	MicroProf AP [51]
Производитель	MueTec GmbH, Германия	KLA-Tencor, США	Camtek, Китай	FormFactor, США
Методы микроскопии	Видимый диапазон, ИК, УФ	Оптическая, эллипсометрия	Оптическая микроскопия	Оптическая микроскопия, ИК, интерферометр
Размер полупроводниковых подложек	до 200 мм	до 200 мм	до 300 мм	до 300 мм
Контроль/измерение размеров элементов/дефектов	до 1 мкм	до 250 нм	до 2 мкм	до 200 нм
Поиск неравномерностей подложки			есть	есть
Поиск известных дефектов МИС	Классификация дефектов	Классификация дефектов		
Измерение толщин плёнок МИС	Прозрачные от 10 нм до 40 мкм	Измерение неоднородности		Прозрачные плёнки
Скорость обработки	более 70 пластин в час	до 20 пластин в час	до 50 пластин в час	

Таблица 1.2 – Существующие установки автоматизированного визуального контроля на основе сканирующей электронной микроскопии

Наименование станции визуального контроля	SEM CR6300 [52]	Surfscan SP7XP [53]
Производитель	Hitachi, Япония	KLA-Tencor, США
Год выпуска	2020	2020
Методы микроскопии	Сканирующий электронный микроскоп, оптическая система	Сканирующий электронный микроскоп, ионный микроскоп
Размер полупроводниковых подложек	до 300 мм	до 300 мм
Контроль/измерение размеров элементов/дефектов	для техпроцесса 5 нм	для техпроцесса 5 нм (до 12,5 нм)
Поиск неравномерностей подложки	Электронный луч	есть
Поиск известных дефектов МИС	Классификация дефектов	Классификация дефектов
Скорость обработки	Более 36 пластин в час	

Из таблиц видно, что существуют два основных типа установок автоматизированного визуального контроля полупроводниковых пластин: на основе оптических микроскопов и электронных микроскопов. Установки на основе оптического микроскопа ограничены возможностями оптической микроскопии: максимальное разрешение до 200 нм – четверть длины волны оптического излучения. За счёт возможности использования встроенного интерферометра или эллипсометра позволяют измерять толщину прозрачных плёнок. Характеризуются высокой скоростью работы при невысокой стоимости оборудования.

Установки на основе сканирующего электронного микроскопа позволяют осуществлять поиск дефектов размером до несколько нанометров, подходит для современных технологических процессов до 5 нм.

1.5 Зондовые станции

При отсутствии на производстве полупроводниковой продукции специально выделенной установки визуального контроля такую установку может заменять зондовая станция, при условии наличия качественной оптической системы, т.к. требования к микроскопу зондовой станции ниже. На ручной зондовой станции

можно осуществлять ручной визуальный контроль, на полуавтоматической и автоматической – автоматизированный визуальный контроль. Также в рамках ограниченного бюджета и необходимостью визуального контроля с некоторыми допущениями в качестве установки визуального контроля можно использовать оптический микроскоп, но качество такого визуального контроля СВЧ МИС будет чрезвычайно низким, из-за высокой степени возникновения ошибки при изменении положения полупроводниковой пластины под объективом микроскопа. Существуют микроскопы с механическим приводом предметного столика, но на таком столике проблематично зафиксировать полупроводниковую пластину.

Контроль электрофизических параметров СВЧ МИС является основным критерием годности СВЧ МИС. В процессе прохождения контроля электрофизических параметров выявляются рабочие СВЧ МИС, проверяются рабочие характеристики на соответствие технической документации. Контролирование электрофизических параметров осуществляется с использованием специального измерительного оборудования и оснастки. Набор измерительного оборудования для измерения определённой группы характеристик СВЧ МИС отличается: SMU (Source-Meter Unit) – источник-измеритель для измерения ВАХ постоянной и импульсной, ВАЦ – векторный анализатор цепей для измерения АЧХ, ФЧХ, КСВН и другие, генератор сигналов, измеритель мощности и т.д. Оснасткой для измерений электрофизических параметров чаще всего является зондовая станция, в основные задачи которой входят:

- фиксация полупроводниковой пластины или отдельных чипов на держателе полупроводниковых пластин (chuck);
- возможность крепление держателей DC, СВЧ и других зондов (в том числе многоконтактных) на пластине зондовой станции (plate);
- контролирование контакта зондов с контактными площадками СВЧ МИС и наблюдение происходящих процессов при измерениях с использованием встроенного микроскопа (цифрового, окулярного или электронного);
- поворот chuck-а для выравнивания полупроводниковой пластины ортогонально зафиксированным на зондовой станции СВЧ зондам;

- ортогональное перемещение по полупроводниковой пластине для быстрого измерения одной характеристики на нескольких СВЧ МИС без подстройки зондов;

- изменение высоты chuck–plate для удобного процесса контакта с полупроводниковой пластиной;

- виброизоляция для сохранения условий измерения характеристик.

Для расширения функционала зондовой станции и измерения полупроводниковых характеристик зондовые станции могут быть модифицированы:

- установка термо-chuck-а для измерения электрофизических параметров в расширенном температурном диапазоне (от -60°C до 300°C);

- установка радиопоглощающих экранов для устранения влияния внешних радиосигналов при измерении малосигнальных параметров;

- установка высоковольтного chuck-а для измерения электрофизических характеристик СВЧ МИС в условиях повышенного статического поля, измерение устойчивости СВЧ МИС к статическому электричеству;

- установка манипулятора микроскопа для измерения электрофизических характеристик больших СВЧ МИС, в случае если СВЧ МИС не помещается в поле зрения микроскопа;

- установка электроприводов для автоматизированного перемещения по всем доступным осям и ускорения группового измерения СВЧ МИС на одной полупроводниковой пластине;

- установка загрузчика полупроводниковых пластин для полного исключения человеческого фактора из измерительного процесса;

- установка цифровой камеры на микроскоп для удобного наблюдения изображения на мониторе компьютера и другое.

Зондовые станции можно разделить на ручные, полуавтоматические и автоматические. В измерительном процессе на ручных зондовых станциях человек производит все манипуляции с пластиной: загрузка полупроводниковой пластины, перемещение от чипа к чипу, установка манипуляторов и микроскопа. В

полуавтоматических зондовых станциях измерительных процесс автоматизирован системой с числовым программным управлением (ЧПУ): автоматическое перемещение по осям X (горизонтальная ось), Y (вертикальная ось), Z (подъём chuck-a) является обязательным условием полуавтоматической зондовой станции. Полуавтоматическая зондовая станция может быть дополнена автоматическим поворотом оси Theta (поворот chuck-a), перемещением микроскопа, фокусировкой микроскопа, подъёмом пластины фиксирования держателя зондов (plate), электромеханическим приводом держателей зондов. В автоматических зондовых станциях весь измерительных процесс от загрузки полупроводниковых пластин, перемещения от одного чипа СВЧ МИС к другому до выгрузки полупроводниковых пластин полностью автоматический. Такие зондовые станции могут быть встроены в автоматизированный производственный конвейер изготовления полупроводниковой продукции.

Существует большое многообразие зондовых станций для любых задач и на любой бюджет, от самых простых ручных с ценой до 100 т. руб. до высокотехнологичных автоматических с ценой свыше 50 млн. руб. В таблицах 1.3, 1.4 представлены некоторые модели существующих полуавтоматических и автоматических зондовых станций.

Таблица 1.3 – Сравнение полуавтоматических зондовых станций

Наименование зондовой станции	SUMMIT200 [54]	TS2000 [55]
Производитель	FormFactor (Cascade Microtech), США	MPI, Тайвань
Размер полупроводниковых подложек	до 200 мм	до 200 мм
Количество поддерживаемых СВЧ зондов	до 4 + 4 DC	до 4 + 4 DC
Точность позиционирования в плоскости XY	до 2 мкм	до 4 мкм
Скорость перемещения в плоскости XY	до 100 мм/с	до 100 мм/с
Повторяемость по оси Z	до 1 мкм	до ±3 мкм
Поворот	±7 градусов	±5 градусов
Виды держателей полупроводниковых пластин	Коаксиальный (триаксиальный опционально)	Коаксиальный (триаксиальный опционально)
Измерение в диапазоне температур	Опция от -60°C до 300°C	Опция от -60°C до 300°C

Таблица 1.4 – Сравнение автоматических зондовых станций

Наименование зондовой станции	CM300xi-ULN [56]	TS3500 [57]
Производитель	FormFactor (Cascade Microtech), США	MPI, Тайвань
Размер полупроводниковых подложек	до 300 мм	до 300 мм
Количество поддерживаемых СВЧ зондов	до 4 + 4 DC	до 4 + 4 DC
Точность позиционирования в плоскости XY	Стандартная до 2 мкм, точный режим до 0,3 мкм	до ±2 мкм
Скорость перемещения в плоскости XY	до 50 мм/с	до 50 мм/с
Повторяемость по оси Z	до 1 мкм	до ±1 мкм
Поворот	±3,75 градуса	±5 градусов
Виды держателей полупроводниковых пластин	Коаксиальный (триаксиальный опционально)	Коаксиальный (триаксиальный опционально)
Измерение в диапазоне температур	Опция от -60°C до 300°C	Опция от -60°C до 300°C

1.6 Программные решения автоматизированного визуального контроля

Кроме существующих готовых программно-аппаратных решений существуют только программные решения для определения дефектов на уже полученных фотографиях или микрофотографиях.

Automated optical inspection (AOI) – технология, объединяющая подходы и методы контроля изготовления печатных плат, в том числе контроль изготовления многослойной печатной платы, контроль качества компонентов, контроль расстановки компонентов, контроль качества пайки, контроль качества разварки чипов и другие [58]. Технология использует различные виды микроскопии (зависит от конкретной задачи) для получения необходимого изображения, компьютерное зрение для вычисления критических размеров и определения наличия дефектов. Методы AOI адаптированы для проведения визуального контроля процесса изготовления печатных плат и при необходимости могут быть адаптированы к визуальному контролю СВЧ МИС за исключением поиска некоторых дефектов микрофотографий СВЧ МИС (AOI стандартными средствами не сможет распознать дефект неравномерной электрохимически осаждённой металлизации).

NI Vision Builder – программное обеспечение для создания скриптов процесса автоматизированного визуального контроля, полностью совместимое с программным обеспечением LabVIEW [59]. NI Vision Builder (рисунок 1.6) позволяет настроить конвейер трансформаций входного изображения для получения определённого результата. Алгоритмы, используемые в NI Vision Builder, предназначены для проведения визуального контроля любой выпускаемой продукции и при необходимости могут быть адаптированы к визуальному контролю СВЧ МИС за исключением поиска некоторых дефектов микрофотографий СВЧ МИС. Для реализации специальных алгоритмов служба поддержки NI Vision Builder рекомендует использовать LabVIEW.

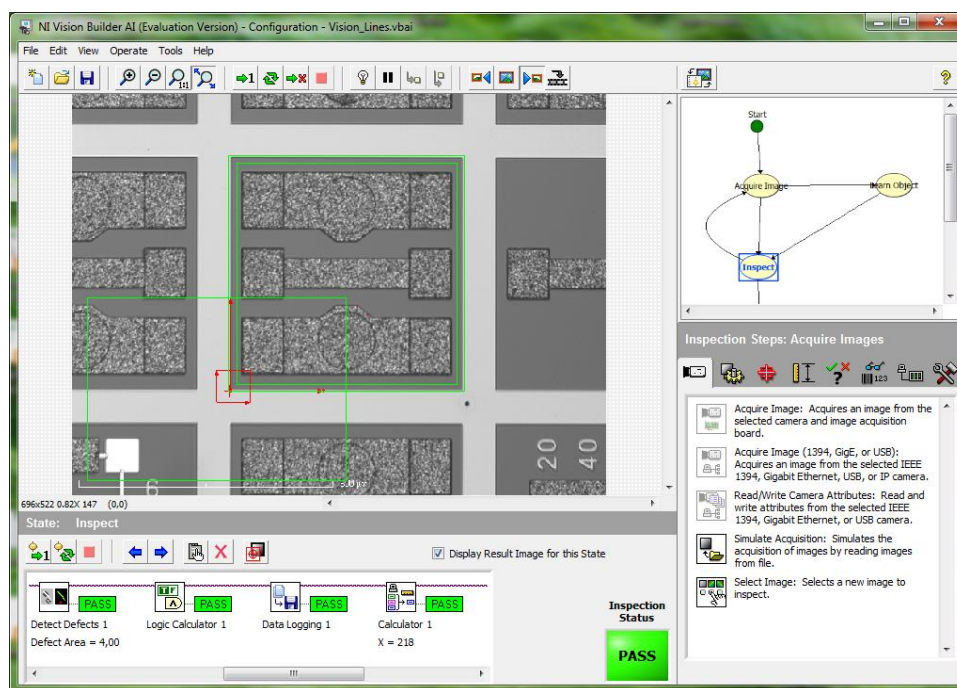


Рисунок 1.6 – Пример реализации алгоритма автоматизированного визуального контроля СВЧ МИС с использованием ПО NI Vision Builder

1.7 Подходы к автоматизации визуального контроля

Статьи последних лет, посвящённые автоматизации визуального контроля полупроводниковых приборов и МИС можно поделить на группы подзадач, которые они решают: поиск и распознавание известных и неизвестных дефектов топологии [60,61]; дефектоскопия многоуровневой металлизации [33,34,45,62]; дефектоскопия областей стритов – пространство между МИС, предназначенное для

разделения полупроводниковой пластины на отдельные чипы [30,63]; дефектоскопия поверхности исходной полупроводниковой пластины без топологии (входной контроль) [64-67]; классификация типов дефектов по месторасположению дефектных МИС на полупроводниковой пластине [68,69]; общие приёмы и методы дефектоскопии полупроводниковых приборов и МИС [70]; дефектоскопия готовых изделий полупроводниковых приборов и МИС [71]. В основу данных методов легли различные архитектуры искусственных свёрточных нейронных сетей. Применение свёрточных нейронных сетей для решения проблемы автоматизации визуального контроля позволяет получить высокую точность визуального контроля до 98%. Однако для задач дефектоскопии используются глубокие свёрточные нейронные сети, они требуют значительного времени для переобучения для каждой топологии МИС, для которых производится дефектоскопия.

1.8 Инструменты автоматизированного визуального контроля

Программные решения автоматизированного визуального контроля основаны на использовании технологий компьютерного зрения и искусственных нейронных сетях.

Компьютерное зрение – теория и технология создания машин, которые могут производить обнаружение, слежение и классификацию объектов [72]. Методы компьютерного зрения основываются на четком представлении физического процесса формирования изображения на матрице фото-видеозаписывающего устройства, позволяют обрабатывать полученную информацию различными образами [73,74]. Компьютерное зрение позволяет решать множество задач, которые можно разделить на четыре группы: определение положения, измерение, инспекция, идентификация.

Определение положения, ориентации и скорости движения (применимо к какому-либо объекту на изображении) производится относительно системы координат с началом отсчёта в какой-либо выбранной точке обзора. Применительно к задаче автоматизированного визуального контроля – это определение положения и

поворота изображения СВЧ МИС относительно левого верхнего угла микрофотографии или относительно центра полупроводниковой пластины. Также данная группа задач позволяет организовать обратную связь выравнивания полупроводниковой пластины на установке автоматизированного визуального контроля, автоматических и полуавтоматических зондовых станций.

Измерение в компьютерном зрении решает задачу определения линейных размеров наблюдаемого объекта, площади поверхности элементов и объёма структурных элементов (для устройств 3D сканирования).

Инспекция в компьютерном зрении решает задачи определения соответствия внешних визуальных параметров объекта заложенным на этапе проектирования, вычисления отклонения от эталона объекта и осуществления обратной связи.

Идентификация в компьютерном зрении решает задачи классификации наблюдаемого объекта, в частности считывание различных кодов (штрих-код, QR-код и другие) с последующим распознаванием их средствами камеры или компьютером [75].

Самые распространённые методы обработки изображения, используемые компьютерным зрением: счетчик пикселей, выделение связанных областей, бинаризация, построение гистограммы и гистограммная обработка, сегментация, декодирование 1D и 2D кодов, распознавание символов, измерение размеров, методы идентификации личности, методы восстановления формы объекта. Сочетание данных методов в необходимой последовательности позволяет выполнить полный анализ изображения для получения необходимого результата [76].

Система компьютерного зрения состоит из аппаратной и программной части. Аппаратное обеспечение состоит из одной или нескольких фото- или видеокамер, подсветки и оборудования ввода/вывода информации. Программное обеспечение производит последовательную обработку информации, полученную из фото- или видеокамер. Самой распространённой реализацией методов компьютерного зрения является библиотека OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [77]. Она содержит в себе реализованные на языке программирования C++

распространённые алгоритмы компьютерного зрения, оптимизированные по времени выполнения.

Искусственные нейронные сети

Искусственные нейронные сети (ИНС) – современный подход к решению большого числа задач. Принцип работы ИНС схож с принципом работы нервной системы живых существ и основан на выявлении зависимостей из данных на входе и принятии решения на выходе. ИНС, как упрощённой математической модели нервной системы живых организмов, присуще основное преимущество интеллектуальных систем: решение сложных вычислительных задач в результате обучения [78,79]. Спектр задач, которые решаются с использованием нейронных сетей: распознавание образов и классификация, принятие решений и управление, прогнозирование, аппроксимация, анализ данных и сжатие информации. Самой распространённой API искусственных нейронных сетей является библиотека TensorFlow [80]. API позволяет настроить и обучить искусственные нейронные сети, поддерживает ускорение на тензорных процессорах (TPU).

Выводы

Визуальный контроль является важным видом выходного контроля, при котором отбраковываются потенциально нерабочие изделия для экономии времени и средств при выполнении других видов выходных контролей. Качество визуального контроля гарантируется нормативными документами предприятий, разработанными на основе существующих стандартов ГОСТ 18725-83 [20] и ГОСТ 20.57.406-81 [21], за рубежом – MIL-STD-883E [29]. Стандарты регламентируют методы и средства визуального контроля, содержат рекомендации по составлению технических карт проведения визуального контроля.

Многообразие станций визуального контроля обеспечивает потребности передового и массового производства полупроводниковых приборов за счёт наличия станций на основе оптической (детектирование дефектов до 2 мкм) и электронной (детектирование дефектов для техпроцесса 5 нм) микроскопии.

Проблема использования данных станций в условиях мелкосерийного производства заключается в их высокой стоимости.

В качестве станций визуального контроля с использованием оптической микроскопией могут быть использованы полуавтоматические и автоматические зондовые станции при условии наличия качественной оптической схемы.

Существующие программные обеспечения частично покрывают требования проведения автоматизированного визуального контроля СВЧ МИС из-за узкой специализации и трудностей при адаптации для проведения визуального контроля полупроводниковой продукции. Особенности микрофотографий СВЧ МИС требуют сложных интеграционных манипуляций с данными программными обеспечениями. Программное обеспечение станций визуального контроля глубоко интегрировано с аппаратной частью и не может функционировать без него.

Современные статьи автоматизации визуального контроля посвящены интеграции в данную область глубоких свёрточных нейронных сетей, они позволяют с высокой эффективностью и точностью детектирования дефекты, но одновременно с этим требуют значительного времени для переобучения под каждую топологию МИС.

ГЛАВА 2. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

2.1 Классификация дефектов на микрофотографии МИС СВЧ

Для качественной оценки степени дефектности МИС СВЧ предварительно следует провести анализ существующих дефектов и провести их классификацию.

По размеру дефекты можно разделить в следующие группы:

– дефект полупроводниковой пластины. Дефект распространяется на всю полупроводниковую пластину или большую её часть. Возникает из-за небрежного обращения с материалом, некачественного входного контроля или неправильных технологических режимов. Данный тип брака редкий и часто приводит к снятию пластины с производства на этапах межоперационного контроля;

– дефект участка полупроводниковой пластины. Дефект распространяется только на небольшой участок полупроводниковой пластины, затрагивает группу рядом расположенных СВЧ МИС. Возникает из-за небрежного обращения с материалом, неправильных технологических режимов. Данный тип брака редкий, пластина остаётся в производстве, характеризуется большим количеством бракованных изделий. Выявляется на этапах межоперационного контроля, оцениваются риски продолжения работы с данной пластиной: если затраты оправданы пластина остаётся в работе, иначе пластина снимается с производства;

– дефект СВЧ МИС. Дефект распространяется только на одну СВЧ МИС (рядом расположенные СВЧ МИС не подвержены влиянию данного дефекта), СВЧ МИС полностью дефектна и не может выполнять даже частично свой функционал. Возникает из-за небрежного обращения с материалом, плохого контроля технологических операций (нанесение фоторезиста, незавершённое травление и др.). Данный тип брака редкий. Межоперационный контроль позволяет исправить данный вид брака повторным проведением группы технологических операций, если это возможно и экономически оправдано;

– дефект участка СВЧ МИС. Дефект распространяется на отдельный элемент или группу элементов топологии СВЧ МИС. Возникает из-за небрежного

обращения с материалом, плохого контроля технологических операций. Данный тип брака распространён в неавтоматизированном производстве СВЧ МИС. Межоперационный контроль позволяет исправить данный вид брака повторным проведением группы технологических операций, если это возможно, но для предотвращения данного типа брака требуется более тщательный межоперационный контроль, чаще не доступен по экономическим причинам в неавтоматизированном производстве. Если СВЧ МИС гражданского назначения и топология позволяет исправление, можно частично восстановить функционал СВЧ МИС для снижения экономических потерь.

Все типы брака по данному признаку характерны для неавтоматизированного производства, где человеческий фактор является основной причиной возникновения дефектов. В данной работе будет сделан акцент на дефектах участка СВЧ МИС, которые можно наблюдать на поверхности СВЧ МИС, используя микроскопию в отражённом свете. Дефекты участка СВЧ МИС можно объединить в следующие группы:

– поверхностные дефекты загрязнения на участках СВЧ МИС, удалённых топологически от элементов СВЧ МИС (рисунок 2.1), не влияют на работоспособность и надёжность СВЧ МИС. В очень редких случаях могут быть отбракованы при необходимости сохранения эстетического вида выпускаемой продукции при заказе отдельных некорпусированных СВЧ МИС (ОЕМ заказ);

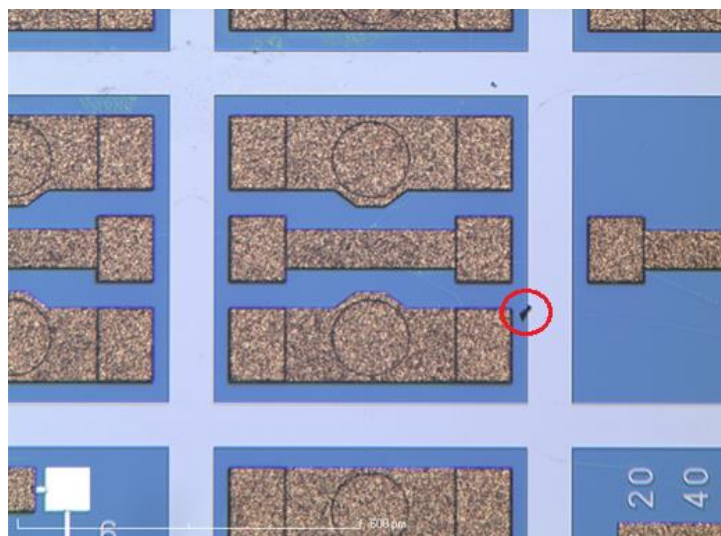


Рисунок 2.1 – Незначительное загрязнение поверхности SiO₂

– поверхностные дефекты загрязнения на элементах СВЧ МИС, не влияют на функциональность СВЧ МИС, но могут ухудшать электрофизические параметры и ухудшать надёжность изделия (рисунок 2.2). Могут быть отбракованы при необходимости сохранения эстетического вида выпускаемой продукции при OEM заказе при условии удовлетворения электрофизическим параметрам техническому заданию (далее ТЗ). В других случаях при удовлетворении электрофизическим параметрам ТЗ решение о годности СВЧ МИС принимают в зависимости от области нахождения дефекта. Если загрязнение находится в области активного элемента (диод или транзистор) СВЧ МИС признают негодной, так как есть вероятность существования критического дефекта в области активного элемента под загрязнением, который при выходном электрофизическом контроле не выявляется, а при длительной эксплуатации может вывести из строя СВЧ МИС. Если загрязнение находится в области пассивного элемента (аттенуатор, конденсатор, катушка и другие) и контроль электрофизических параметров не выявил отклонения от ТЗ, то СВЧ МИС признаётся годной;

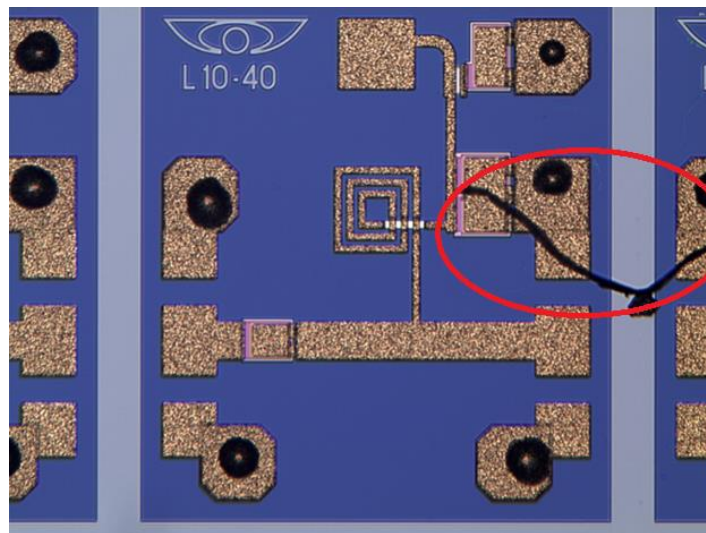


Рисунок 2.2 – Значительное загрязнение СВЧ МИС, препятствующее проведению тщательного визуального контроля конденсатора

– следы от зондов не являются дефектом СВЧ МИС (рисунок 2.3). Технология создания металлизированных слоёв заключается в формировании тонкого слоя металла термическим напылением с последующим электрохимическим осаждением толстого слоя металлизации. Поверхность

электрохимически осаждённого слоя имеет шероховатость, которая проявляется при микроскопии в отражённом свете при осевом освещении в виде поверхности с неоднородным окрасом и отсутствием постоянной текстуры. После контакта зондов остаются гладкие участки на поверхности металлизации, которые наблюдаются как белые области (свет осевого освещения полностью отражается и без преломлений попадает в объектив микроскопа). Для определённых групп СВЧ МИС нормируется максимальное количество касаний зондов (порядка единиц касаний), после которых годная по всем параметрам СВЧ МИС считается браком;

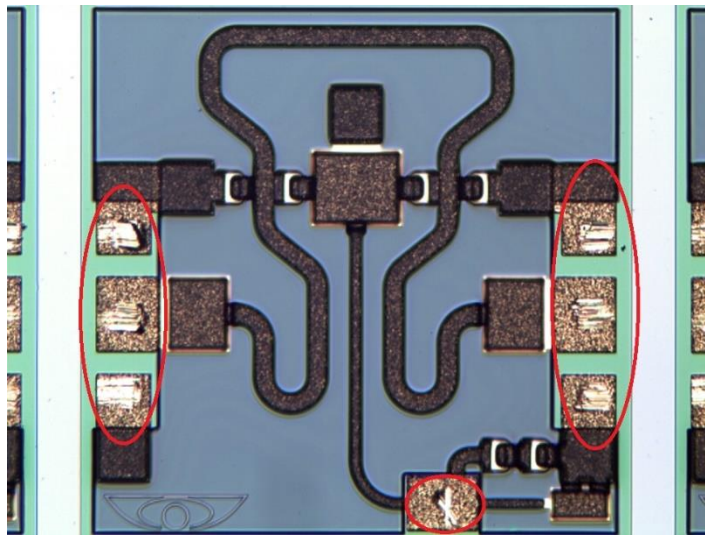


Рисунок 2.3 – Дефект металлизации от касания зондов при проведении контроля электрических параметров СВЧ МИС

– дефекты структуры подложки и металлизации – критические изменения структуры элементов СВЧ МИС (рисунок 2.4). СВЧ МИС с такими дефектами могут быть признаны годными только в случае расположения дефектов вдали от элементов топологии и не влияющие на электрофизические параметры при условии поставки СВЧ МИС в корпусе. В других случаях СВЧ МИС с такими дефектами обладают плохой стабильностью работы (низкая надёжность), небольшим временем работы на отказ (низкая безотказность);

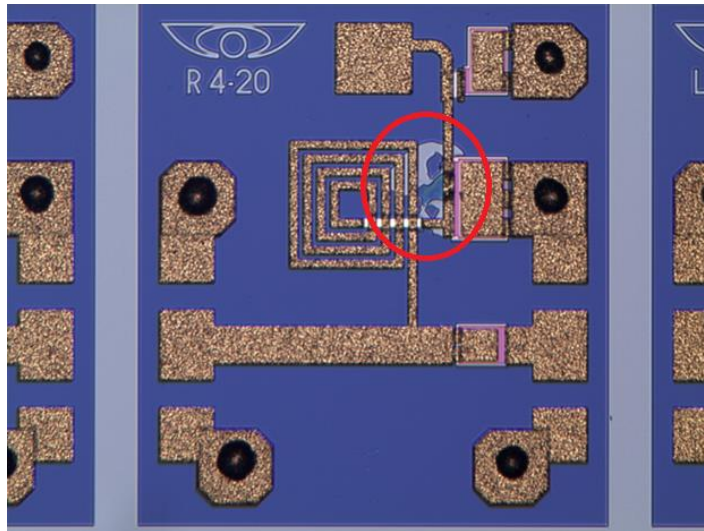


Рисунок 2.4 – Нарушение поверхности SiO_2 под металлизацией

– дефекты металлизации вследствие неполного осаждения металла в процессе электрохимического осаждения (рисунок 2.5). Такие дефекты проявляются при микроскопии в отражённом свете с осевым источником света. Участки металлизации с непостоянной текстурой (характерные при правильном электрохимическом осаждении) постепенно переходят в участки с постоянной текстурой и окрасом, отличаются от участков контакта зондов своим расположением и размером области равномерного окраса. СВЧ МИС с таким типом дефекта признаётся браком при условии полного прерывания линии прохождения сигнала, такие устройства при эксплуатации будут обладать низкой надёжностью;

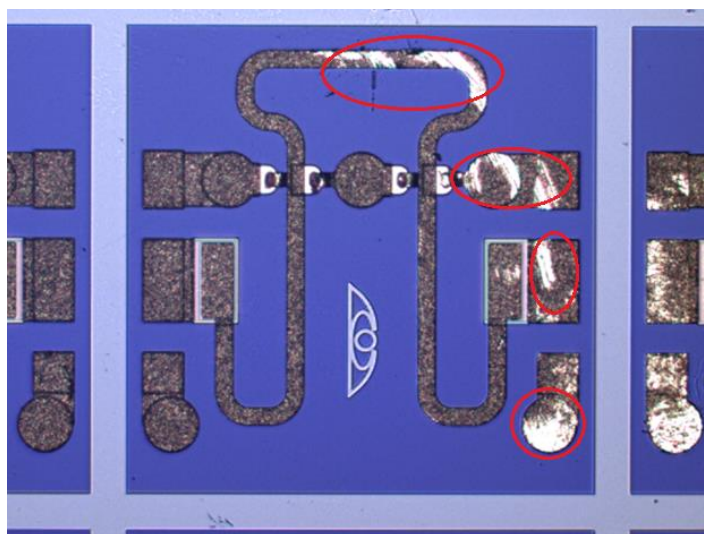


Рисунок 2.5 – Дефект металлизации: неравномерность электрохимического осаждения

– особенности изображения при микроскопии, не являющиеся дефектами. К данному типу относятся участки «потемневшей» металлизации на изображении при микроскопии в отражённом свете при осевом освещении, обусловленные особенностью освещения и «провисанием» металлизации над областью сквозного травления подложки для электрического соединения с обратной стороной СВЧ МИС (рисунок 2.6);

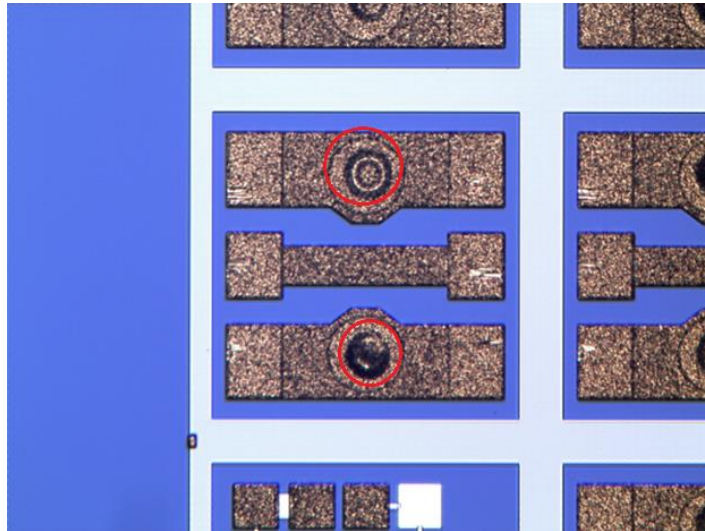


Рисунок 2.6 – Особенность микрофотографии при осевом освещении микроскопии

– дефекты неравномерности толщины диэлектрических плёнок проявляются при оптической микроскопии в видимом диапазоне в виде неодинакового оттенка на всей полупроводниковой пластине (рисунок 2.7). Так плёнка оксида кремния на разных участках полупроводниковой пластины может меняться от светло-зелёного до тёмно-синего в зависимости от толщины из-за проявления эффекта интерференции света в прозрачной плёнке. Тот же самый эффект наблюдается в плёнках из нитрида кремния, оксида титана и других. Не является критическим дефектом при условии удовлетворения характеристик СВЧ МИС ТЗ;

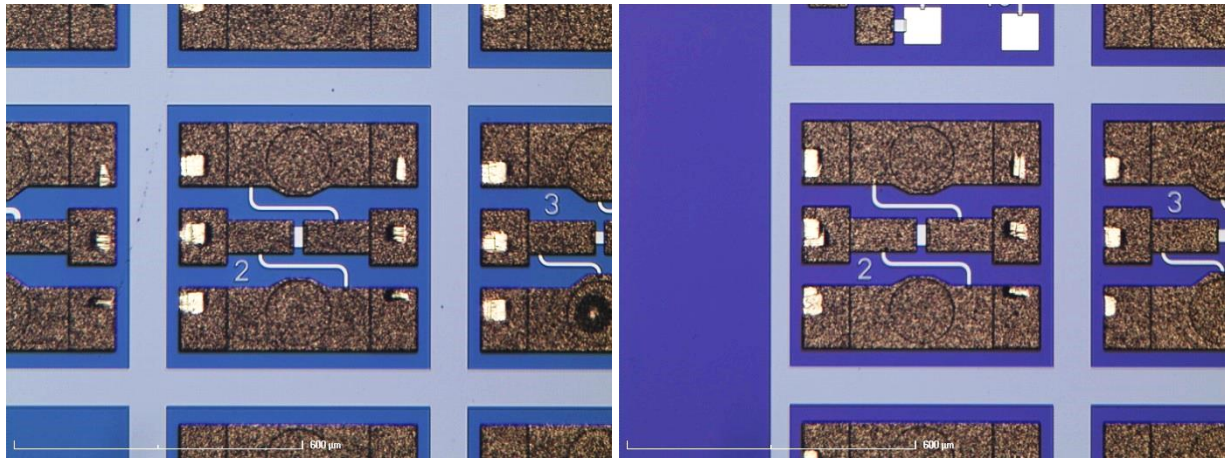


Рисунок 2.7 – Неравномерность оттенка SiO_2 одной подложки в разных участках полупроводниковой пластины

– наличие цветов «побежалости» диэлектрических плёнок возникают вследствие неравномерности течения процессов формирования этих плёнок (рисунок 2.8). Дефект проявляет дефекты сформированной фоторезистивной плёнки, которая истончилась раньше завершения процесса формирования диэлектрической плёнки. Дефект считается не критичным если расположен на удалении от активных элементов СВЧ МИС и не влияет на электрофизические характеристики;

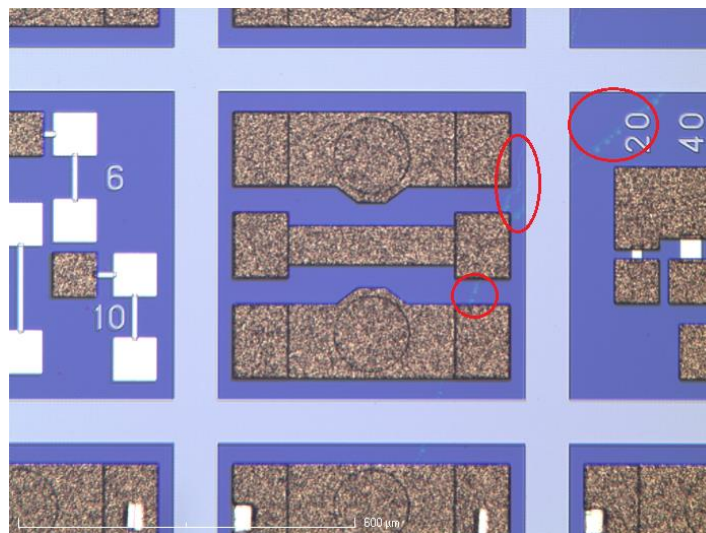


Рисунок 2.8 – Дефект «побежалости» SiO_2

– вздутие диэлектрических плёнок возникает вследствие установки неправильных параметров режима формирования данных плёнок или вследствие недостаточной очистки поверхности полупроводниковой пластины перед

формированием диэлектрического слоя (рисунок 2.9). Данный дефект является критическим если расположен вблизи элементов или под элементами топологии, т.к. непосредственно влияет на надёжность СВЧ МИС: на момент прохождения контроля электрофизических параметров данный тип дефекта не проявляется. Со временем при эксплуатации, вздутый диэлектрик разрушается, что напрямую повлияет на рабочие характеристики СВЧ МИС.

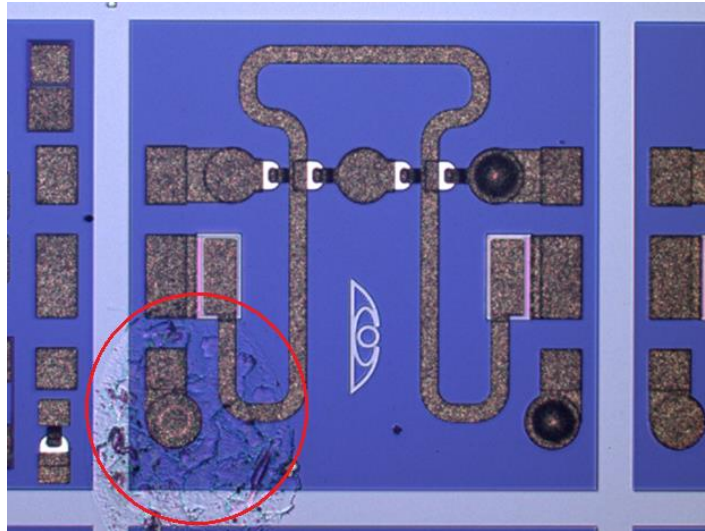


Рисунок 2.9 – Дефект вздутия SiO₂

Предложенная классификация дефектов позволяет сформулировать следующие требования к алгоритму автоматизированного визуального контроля:

- должен отличать разнородные покрытия: определять принадлежность цвета и текстуры области микрофотографии МИС к области фотошаблона;
- должен оценивать удалённость расположения определённых дефектов относительно элементов топологии МИС;
- должен определять размеры определённых дефектов и оценивать их относительно максимального допустимого размера;
- должен учитывать особенности микрофотографии МИС, не реагировать на них как на дефекты, но определять дефекты в их области;
- должен позволять менять весовой коэффициент областей микрофотографии для повышения чувствительности алгоритма на мелких элементах топологии МИС.

2.2 Предварительная обработка изображений

Микрофотографии СВЧ МИС, полученные в автоматическом режиме, в изначальном состоянии не пригодны для осуществления автоматизированного визуального контроля. Для получения качественного результата автоматизированного визуального контроля требуется предварительная обработка микрофотографий:

- снижение уровня шума с использованием алгоритма компьютерного зрения фильтр Гаусса [81]. Данный фильтр позволяет снизить уровень ложных срабатываний нейронной сети, которая используется в качестве классификатора цвета пикселей микрофотографии;

- повышение резкости изображения с использованием метода нерезкого маскирования (unsharp masking) [82]. Данный фильтр позволяет повысить детализацию микрофотографии, таким образом переходные места между областями микрофотографии СВЧ МИС будут корректно обработаны классификатором, что позволит уменьшить размер минимального детектируемого дефекта;

- нормализация микрофотографии по яркости и оттенку методом эквализации гистограммы изображения (histogram equalization) [83]. Данный шаг предварительной обработки позволяет скорректировать цветовое пространство микрофотографии СВЧ МИС и облегчить задачу классификации пикселей (устраняется проблема неравномерности толщины прозрачных плёнок) [15,60].

2.3 Алгоритм автоматизированного визуального контроля

Алгоритм основан на сравнении микрофотографии СВЧ МИС, полученной с использованием оптической микроскопии в видимом диапазоне при осевом освещении. Таким образом, алгоритм позволяет осуществлять не только поиск дефектов на равномерной поверхности диэлектрических плёнок, но и на поверхности металлизации. Блок-схема алгоритма показана на рисунке 2.10.

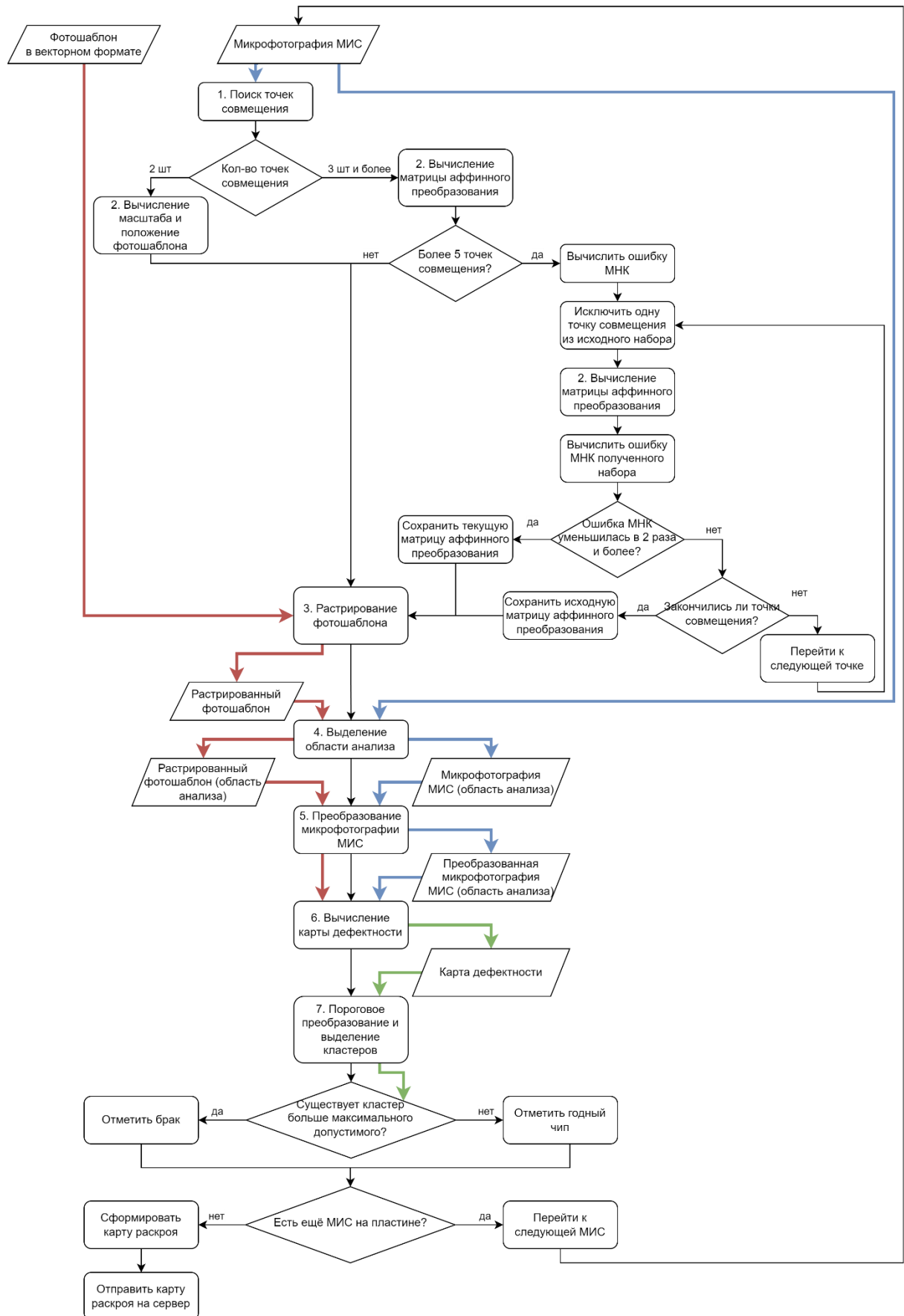


Рисунок 2.10 – Блок схема алгоритма автоматизированного визуального контроля: синими стрелками показано движение по алгоритму микрофотографии МИС, красными – фотошаблона, зелёными – карты дефектности

Алгоритм сравнивает чертёж фотошаблона в векторном формате (далее фотошаблон) с микрофотографией, находит отличия, которые принимает за дефекты, оценивает их размер и принимает решение о годности СВЧ МИС на микрофотографии. Общая последовательность алгоритма сводится к последовательному выполнению следующих этапов:

- 1) поиск двух или более точек совмещения;
- 2) вычисление матрицы аффинного преобразования фотошаблона в растровый масштаб микрофотографии;
- 3) растеризация фотошаблона с заливкой областей;
- 4) выделение области анализа из микрофотографии и растрированного фотошаблона;
- 5) преобразование выделенной области анализа микрофотографии СВЧ МИС с использованием классификатора в цветовую палитру растрированного фотошаблона;
- 6) вычисление карты дефектности;
- 7) определения наличия дефекта по карте дефектности.

Результатом работы алгоритма является карта дефектности СВЧ МИС в масштабе микрофотографии, отображающая дефектные участки СВЧ МИС.

2.3.1 Поиск точек совмещения

Для поиска различий между растровой микрофотографией и векторным фотошаблоном следует их совместить, используя точки совмещения. Данные точки совмещения не являются точками совмещения, которые используются в технологическом процессе для совмещения разных слоёв топологии СВЧ МИС, изображенных в виде специальных символов, не являющиеся функциональными элементами СВЧ МИС. Так как при производстве используется групповой метод изготовления, поэтому не в каждой СВЧ МИС могут находиться такие точки совмещения.

Структура точки совмещения для совмещения микрофотографии и фотошаблона хранит в себе следующую информацию: изображение ключевого

элемента поиска (углы СВЧ МИС, углы или другие ключевые точки элементов топологии СВЧ МИС) в растровом виде в масштабе микрофотографии (рисунок 2.11), размер и положение области поиска изображения точки совмещения на микрофотографии в масштабе микрофотографии, векторные координаты точного положения изображения точки совмещения на фотошаблоне в масштабе фотошаблона.

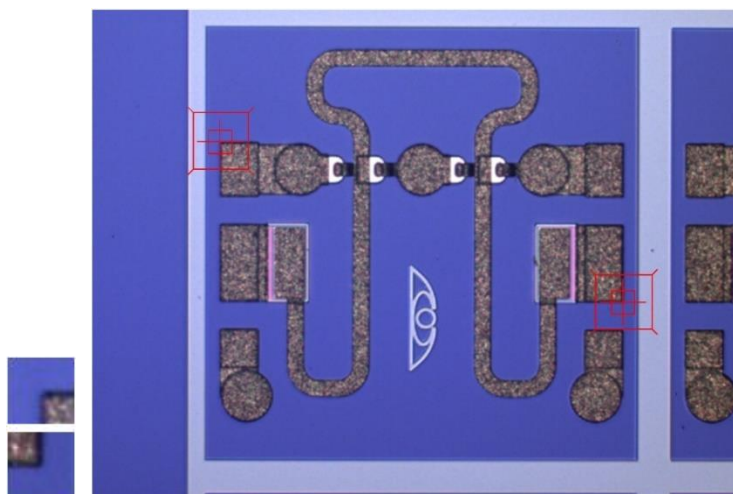


Рисунок 2.11 – Пример поиска точек совмещения на микрофотографии: изображение ключевого элемента поиска (слева) и найденные точки совмещения (справа)

Определение положения точек совмещения на микрофотографии осуществляется путём поиска координаты точки $P(x, y)$ положения изображения точки совмещения с минимальным значением коэффициента расходимости, который вычисляется по следующей формуле:

$$K_{x,y} = \sum (R_{x+i,y+j} - R_{i,j}^{TC})^2 + \sum (G_{x+i,y+j} - G_{i,j}^{TC})^2 + \sum (B_{x+i,y+j} - B_{i,j}^{TC})^2, \quad (2.1)$$

где $R_{x+i,y+j}$, $G_{x+i,y+j}$, $B_{x+i,y+j}$ – компоненты цвета RGB формата области поиска точки совмещения на микрофотографии;

$R_{i,j}^{TC}$, $G_{i,j}^{TC}$, $B_{i,j}^{TC}$ – компоненты цвета RGB формата изображения точки совмещения.

Для ускорения работы данного шага алгоритма используются методы частичного поиска шаблона на изображении с использованием ключевых точек шаблона [84,85]. Также метод поиска шаблона поддаётся ускорению с использованием двумерного преобразования Фурье [84,85].

Количество точек совмещения должно быть две и более. Так, при двух точках совмещения можно вычислить только положение и масштаб фотошаблона в растровых координатах, при наличии трёх точек совмещения дополнительно можно вычислить угол поворота. При большем количестве точек совмещения увеличивается точность вычисления матрицы аффинного преобразования, также появляется возможность оценки ошибки аппроксимации и коррекции набора выбранных точек совмещения.

Количество, положение точек совмещения на фотошаблоне и область поиска формируются пользователем на стадии настройки алгоритма.

2.3.2 Вычисление матрицы аффинного преобразования фотошаблона

При известных координатах точек совмещения в масштабе фотошаблона и микрофотографии можно вычислить коэффициенты преобразования векторных координат фотошаблона в растровые координаты микрофотографии, которые удобнее выражать в виде матрицы аффинного преобразования:

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

где $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}, m_{31}, m_{32}$ – элементы матрицы аффинного преобразования.

Само преобразование из векторных координат фотошаблона в растровые координаты микрофотографии можно записать в виде следующего выражения:

$$V' * M = P', \quad (2.3)$$

где V' – дополненная матрица координат точек совмещения в масштабе фотошаблона:

$$V' = \begin{pmatrix} v_{1x} & v_{1y} & 1 \\ v_{2x} & v_{2y} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{nx} & v_{ny} & 1 \end{pmatrix}; \quad (2.4)$$

где $v_{1x}, v_{2x}, \dots, v_{nx}$ – абсциссы точек совмещения в масштабе фотошаблона;

$v_{1y}, v_{2y}, \dots, v_{ny}$ – ординаты точек совмещения в масштабе фотошаблона;

n – общее количество точек;

P' – дополненная матрица координат точек совмещения в масштабе микрофотографии, соответствующие точкам матрицы V' :

$$P' = \begin{pmatrix} p_{1x} & p_{1y} & 1 \\ p_{2x} & p_{2y} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{nx} & p_{ny} & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

где $p_{1x}, p_{2x}, \dots, p_{nx}$ – абсциссы точек совмещения в масштабе микрофотографии;

$p_{1y}, p_{2y}, \dots, p_{ny}$ – ординаты точек совмещения в масштабе микрофотографии.

Подставляя содержимое соответствующих матриц в выражение (2.3), получается следующее выражение:

$$\begin{pmatrix} v_{1x} & v_{1y} & 1 \\ v_{2x} & v_{2y} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{nx} & v_{ny} & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{1x} & p_{1y} & 1 \\ p_{2x} & p_{2y} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{nx} & p_{ny} & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Полученное выражение можно представить в виде выражений для отдельных элементов дополненной матрицы координат точек совмещения в масштабе микрофотографии:

$$\begin{aligned} p_{1x} &= v_{1x} * m_{11} + v_{1y} * m_{21} + m_{31}; \\ p_{1y} &= v_{1x} * m_{12} + v_{1y} * m_{22} + m_{32}; \\ p_{2x} &= v_{2x} * m_{11} + v_{2y} * m_{21} + m_{31}; \\ p_{2y} &= v_{2x} * m_{12} + v_{2y} * m_{22} + m_{32}; \\ &\dots; \\ p_{nx} &= v_{nx} * m_{11} + v_{ny} * m_{21} + m_{31}; \\ p_{ny} &= v_{nx} * m_{12} + v_{ny} * m_{22} + m_{32}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Полученные выражения будут использоваться в качестве функции для аппроксимирования методом наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} p_{ix} &= v_{ix} * m_{11} + v_{iy} * m_{21} + m_{31} \\ p_{iy} &= v_{ix} * m_{12} + v_{iy} * m_{22} + m_{32}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Общая формула записи функции ошибки для МНК [86] имеет следующий вид:

$$F(a) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, a))^2, \quad (2.9)$$

где y_i – ордината точки линейной регрессии;

x_i – абсцисса точки линейной регрессии;

a – неизвестный параметр линейной регрессии;

$f(x, a)$ – функция аппроксимации.

Для выражений (2.8) функция ошибки для МНК примет следующий вид

$$\begin{aligned} F_x(M) &= \sum_{i=1}^n \left(p_{ix} - (v_{ix} * m_{11} + v_{iy} * m_{21} + m_{31}) \right)^2 \\ F_y(M) &= \sum_{i=1}^n \left(p_{iy} - (v_{ix} * m_{12} + v_{iy} * m_{22} + m_{32}) \right)^2, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где $F_x(M)$ и $F_y(M)$ – ошибка функции аппроксимации абсциссы и ординаты точек совмещения в масштабе микрофотографии.

Условие минимизации ошибки функции аппроксимации:

$$\begin{cases} \frac{\partial F_x(M)}{\partial m_{11}} = 0 \\ \frac{\partial F_x(M)}{\partial m_{21}} = 0 \\ \frac{\partial F_x(M)}{\partial m_{31}} = 0 \end{cases}, \begin{cases} \frac{\partial F_y(M)}{\partial m_{12}} = 0 \\ \frac{\partial F_y(M)}{\partial m_{22}} = 0 \\ \frac{\partial F_y(M)}{\partial m_{32}} = 0 \end{cases}. \quad (2.11)$$

Подставляем выражения (2.10), находим дифференциалы. Получаются следующие системы линейных алгебраических выражений, где неизвестными коэффициентами являются элементы матрицы аффинного преобразования:

$$\begin{cases} m_{11} \sum_{i=1}^n v_{ix}^2 + m_{21} \sum_{i=1}^n v_{ix} v_{iy} + m_{31} \sum_{i=1}^n v_{ix} = \sum_{i=1}^n p_{ix} v_{ix} \\ m_{11} \sum_{i=1}^n v_{ix} v_{iy} + m_{21} \sum_{i=1}^n v_{iy}^2 + m_{31} \sum_{i=1}^n v_{iy} = \sum_{i=1}^n p_{ix} v_{iy}; \\ m_{11} \sum_{i=1}^n v_{ix} + m_{21} \sum_{i=1}^n v_{iy} + m_{31} n = \sum_{i=1}^n p_{ix} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} m_{12} \sum_{i=1}^n v_{ix}^2 + m_{22} \sum_{i=1}^n v_{ix} v_{iy} + m_{32} \sum_{i=1}^n v_{ix} = \sum_{i=1}^n p_{iy} v_{ix} \\ m_{12} \sum_{i=1}^n v_{ix} v_{iy} + m_{22} \sum_{i=1}^n v_{iy}^2 + m_{32} \sum_{i=1}^n v_{iy} = \sum_{i=1}^n p_{iy} v_{iy}. \\ m_{12} \sum_{i=1}^n v_{ix} + m_{22} \sum_{i=1}^n v_{iy} + m_{32} n = \sum_{i=1}^n p_{iy} \end{cases} \quad (2.13)$$

Решение двух полученных систем линейных алгебраических уравнений любым подходящим методом, например, методом Крамера, позволяет найти значения элементов матрицы аффинного преобразования для растривания

фотошаблона в масштаб микрофотографии СВЧ МИС (2.2). Подставляя полученные элементы матрицы в выражение ошибки МНК (2.10) можно оценить корректность местоположения найденных точек совмещения. При условии дефектности области месторасположения точки совмещения, найденная координата будет смещённая, что снизит качество совмещения, и ошибка МНК будет высокой.

Для повышения стабильности работы алгоритма визуального контроля при условии допустимой дефектности области поиска точек совмещения разработана модификация шага вычисления матрицы аффинного преобразования фотошаблона с использованием коррекции набора точек совмещения. Использование пяти и более точек совмещения позволяет провести коррекцию этого набора методом наблюдения за изменением ошибки МНК: если ошибка МНК с исключенной точкой совмещения уменьшилась более чем в 2 раза и это уменьшение максимальное из всех вариантов, то выносится вердикт о дефектности области поиска точки совмещения. Объясняется это тем, что положение точки совмещения на микрофотографии определено не верно и геометрически неверно произошло совмещение:

$$\delta(F_{\Sigma i}) = \frac{F_{\Sigma i} - F_{\Sigma}}{F_{\Sigma}} \cdot 100\%, \quad (2.14)$$

где F_{Σ} – суммарная ошибка МНК без исключения точки совмещения;

$F_{\Sigma i}$ – суммарная ошибка МНК с исключенной точкой совмещения;

$\delta(F_{\Sigma i})$ – относительное изменение суммарной ошибки МНК.

Условия для исключения точки совмещения из дальнейшего расчёта примет вид:

$$\begin{cases} \delta(F_{\Sigma i}) < 0 \\ |\delta(F_{\Sigma i})| > 50\%. \\ |\delta(F_{\Sigma i})| \rightarrow \max \end{cases} \quad (2.15)$$

На рисунке 2.12 показан пример работы коррекции: цифрами показано относительное изменение ошибки МНК при исключении каждой точки совмещения из набора, используемого при вычислении коэффициентов матрицы аффинного преобразования.

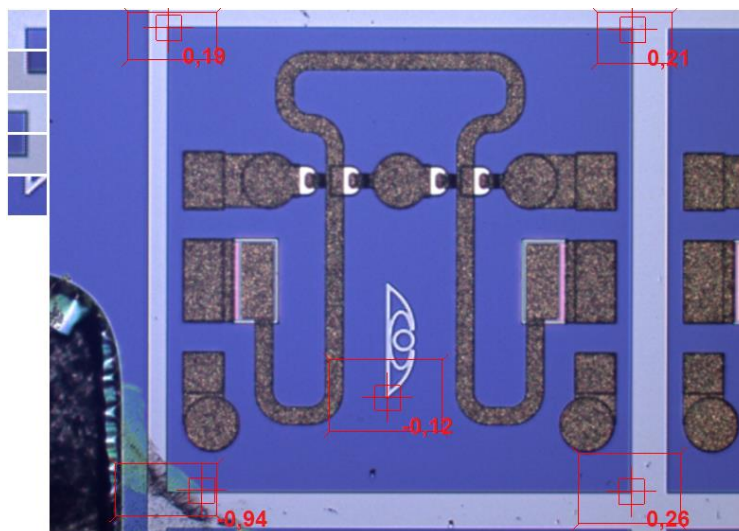


Рисунок 2.12 – Пример относительного изменения ошибки МНК при исключении каждой из точек совмещения

Введение данного алгоритма позволило проще и быстрее настраивать положение точек совмещения алгоритма автоматизированного визуального контроля при незначительном снижении производительности.

Таким образом, использование системного подхода к выбору точек совмещения, отличающегося использованием изменяемой группы точек совмещения и метода наименьших квадратов, позволяет улучшить устойчивость работы алгоритма на монолитных интегральных схемах допустимой дефектности.

2.3.3 Растеризация векторного чертежа фотошаблона

Чертеж фотошаблона представлен в виде цифрового файла векторного изображения в формате «.dxf» [87,88], который используется при изготовлении физических фотошаблонов для проведения фотолитографии или для создания подпрограммы для электронной литографии, содержит информацию обо всём фотошаблоне и всех его слоях. Для проведения автоматизированного визуального контроля на основе чертежа фотошаблона требуются определённые слои и участки, которые формируют внешний вид конкретной СВЧ МИС. Например, слой фотошаблона для вскрытия окон под легирование полупроводниковой пластины для создания активных элементов (диодов, транзисторов) не нужен, а слой для формирования внешней металлизации необходим.

Необходимые слои и участки фотошаблона, формирующие внешний вид СВЧ МИС, выбираются пользователем на этапе настройки алгоритма, так как последовательность слоёв в файле «.dxf» может не соответствовать реальной последовательности фотошаблонов при изготовлении (такая последовательность указана в технологическом маршруте изготовления СВЧ МИС).

При растеризации над векторным фотошаблоном производятся следующие операции:

- выбор необходимых слоёв из файла «.dxf», заданных пользователем на этапе настройки алгоритма;
- формирование необходимой последовательности растеризации слоёв для формирования «правильного» изображения эталонной СВЧ МИС;
- каждая точка векторных полигонов каждого выбранного слоя фотошаблона преобразуется с использованием матрицы аффинного преобразования, полученной на предыдущем шаге алгоритма;
- формируется новое поле для растривания фотошаблона;
- на созданном поле с заданной последовательностью отрисовываются полигоны каждого слоя фотошаблона используя преобразованные точки, каждый полигон закрашивается цветом слоя векторного чертежа фотошаблона, к которому он принадлежит, формируется палитра эталонной СВЧ МИС (рисунок 2.13).

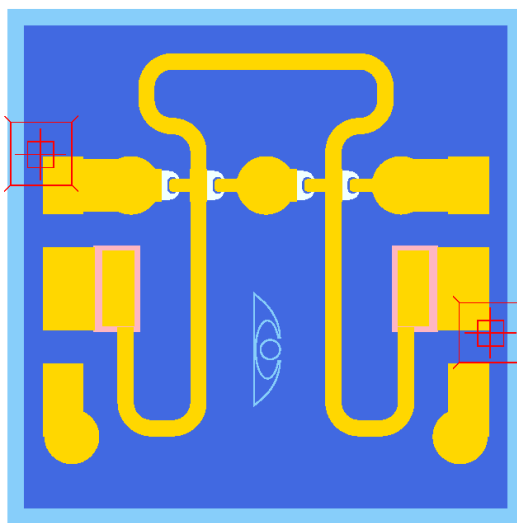


Рисунок 2.13 – Растриванный фотошаблон в масштабе микрофотографии с отмеченными точками совмещения

Растреризация фотошаблона необходима для дальнейшего попиксельного сравнения его с микрофотографией СВЧ МИС.

2.3.4 Выделение области анализа

Микрофотография СВЧ МИС получается в процессе автоматизированной съёмки полупроводниковой пластины на полуавтоматической, автоматической зондовой станции или станции визуального контроля. При наведении микроскопа на интересующую СВЧ МИС в объектив микроскопа также попадают участки соседних СВЧ МИС. Избавиться от этих участков уменьшением области интереса (ROI) нельзя из-за существования незначительного смещения и поворота СВЧ МИС в объективе микроскопа (так же захват соседних СВЧ МИС может помочь сформировать фотографию высокого разрешения всей полупроводниковой пластины при необходимости).

Введение шага алгоритма выделения области анализа позволяет исключить попадание участков соседних СВЧ МИС в процесс анализа степени дефектности интересующей СВЧ МИС (рисунок 2.14). При необходимости область анализа может содержать отдельный элемент СВЧ МИС, для которого настроены особенные требования к минимально допустимому размеру дефекта.

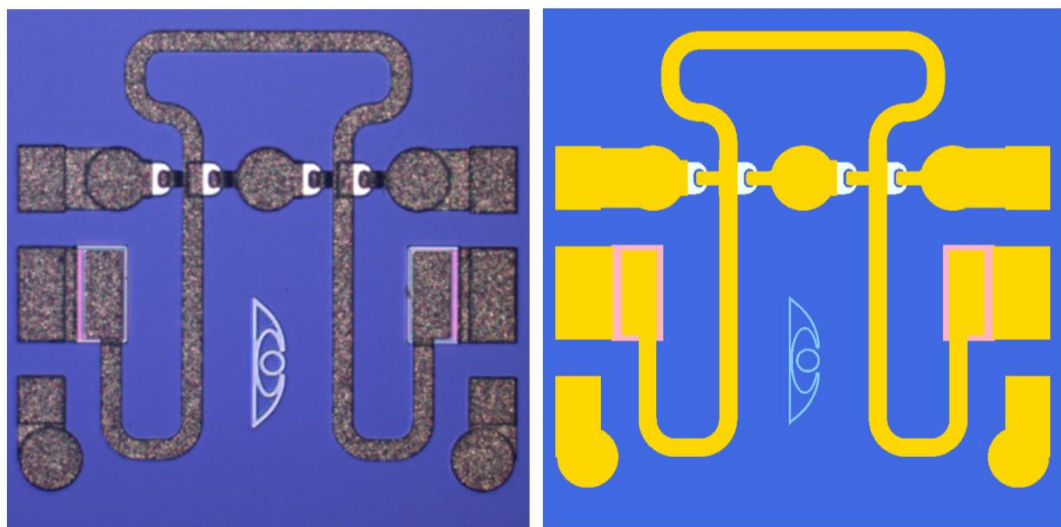


Рисунок 2.14 – Пример выделения области анализа из микрофотографии и растрированного фотошаблона

Область анализа привязана к векторным координатам фотошаблона и одинакова для всех анализируемых СВЧ МИС. С использованием вычисленной матрицы аффинного преобразования область анализа из векторных координат преобразуется в растровые координаты микрофотографии. Используя полученные координаты из микрофотографии и растриванного фотошаблона извлекаются интересующие области для анализа на наличие дефектов.

2.3.5 Преобразование микрофотографии

Микрофотография, полученная с использованием оптической микроскопии в видимом диапазоне, содержит множество цветов (при использовании формата RGB 24bit количество цветов 16,8 млн). Чтобы корректно сравнивать цвета пикселей на микрофотографии и растриванном фотошаблоне, цвета пикселей микрофотографии СВЧ МИС следует перекрасить в цветовую палитру растриванного фотошаблона (так как цветовая палитра растриванного фотошаблона меньше цветовой палитры микрофотографии). Для этой задачи используется классификатор. В данном алгоритме используется классификатор на основе обученной искусственной нейронной сети [78], который может «непрерывное» множество цветов формата RGB 24bit преобразовать в цветовую палитру цветов растриванного фотошаблона. Такой классификатор можно в любой момент времени достаточно быстро адаптировать к изменяющимся оттенкам подложки (из-за неравномерности диэлектрических слоёв), также возможен переход на более сложную архитектуру ИНС без существенных изменений в программном коде программного обеспечения автоматизированного визуального контроля.

Классификатор является многослойной искусственной нейронной сетью, состоит из входного слоя с тремя нейронами (соответствует количеству каналов цветового пространства RGB), одного скрытого слоя с 10 нейронами и выходного слоя с количеством нейронов равному количеству классифицируемых областей фотошаблона (рисунок 2.15).

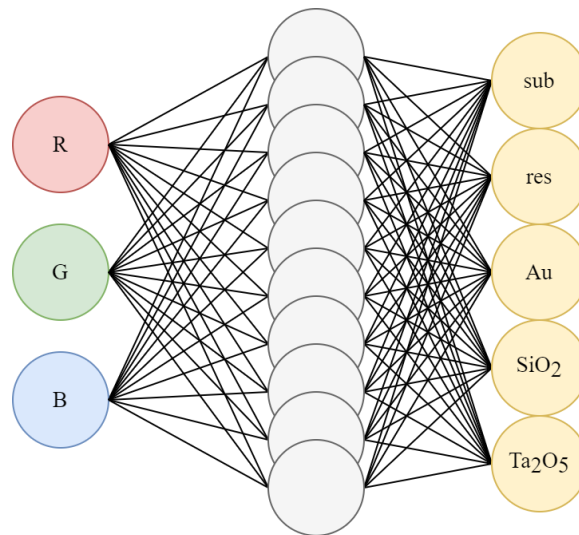


Рисунок 2.15 – Пример архитектуры нейронной сети, используемой в качестве классификатора пикселей

Перед подачей цвета пикселя на вход нейронной сети необходимо его преобразовать (нормировать), так как область чувствительности искусственной нейронной сети находится в области значений от 0 до 1. Осуществляется это делением каждой компоненты цвета пикселя на максимальное значение компоненты цвета (для формата RGB 24bit деление осуществляется на 255).

В результате преобразования цвета пикселя искусственной нейронной сетью получается вектор значений принадлежности данного цвета к той или иной области фотошаблона. Далее выбирается наибольшее значение из данного вектора и пиксель перекрашивается в цвет слоя фотошаблона, к которому относится данное значение.

Искусственная нейронная сеть предварительно обучена методом обратного распространения ошибки классифицировать пиксели к определённой области фотошаблона [89].

В результате преобразования получается микрофотография, раскрашенная в палитре растриванного фотошаблона (рисунок 2.16). Цвета могут не соответствовать реальным цветам микрофотографии СВЧ МИС, они используются исключительно для разделения разных участков СВЧ МИС.

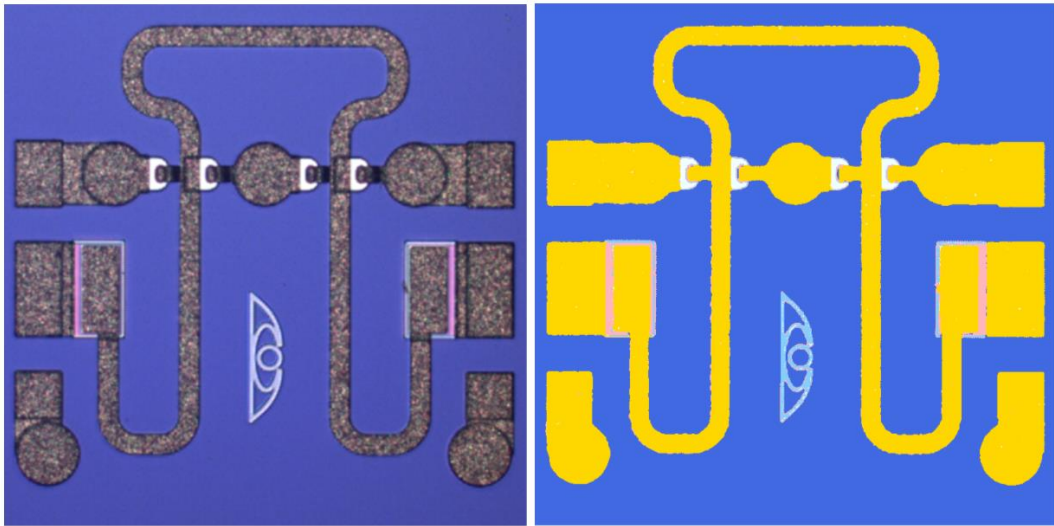


Рисунок 2.16 – Пример преобразования микрофотографии с использованием классификатора

2.3.6 Вычисление карты дефектности

Сравнение преобразованной микрофотографии СВЧ МИС с растровым фотошаблоном осуществляется попиксельно: для каждого пикселя микрофотографии производится поиск ближайшего по положению пикселя растрового фотошаблона того же цвета. Если пиксель такого цвета существует, то в качестве результата принимается пиксельное расстояние (значение может быть дробным для диагонально расположенных пикселей). Если пиксель такого цвета не существует, то в качестве результата принимается значение равное максимальному размеру микрофотографии по вертикали или горизонтали (рисунок 2.17).

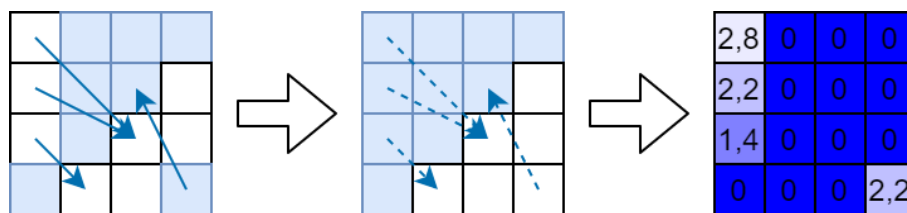


Рисунок 2.17 – Пример вычисления пиксельного расстояния от положения пикселя преобразованной микрофотографии до ближайшего пикселя области принадлежности растрового фотошаблона

В результате работы алгоритма по всей преобразованной микрофотографии получается карта дефектности СВЧ МИС. Если её нормировать по максимальному

значению и раскрасить в чёрно-белые цвета, то можно визуально оценить положение дефекта на микрофотографии СВЧ МИС (рисунок 2.18).

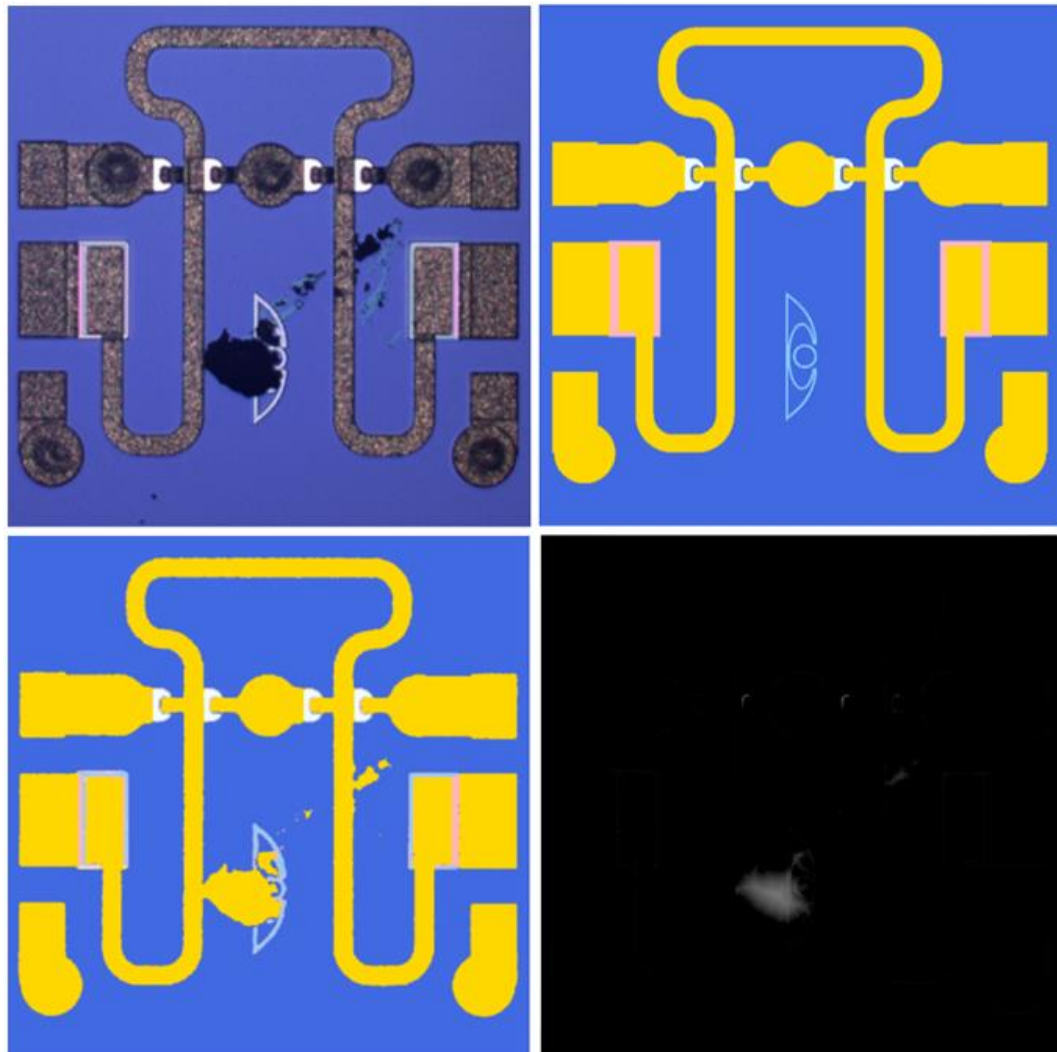


Рисунок 2.18 – Пример вычисленной карты дефектности на основе преобразованной микрофотографии СВЧ МИС с дефектом и растриванного фотошаблона

2.3.7 Поиск и определение наличия дефекта на карте дефектности

Ключевыми критериями наличия дефекта на карте дефектности являются порог детектирования дефекта и максимальный допустимый размер дефекта.

Порог детектирования дефекта определяет пиксельное расстояние, при котором текущий пиксель микрофотографии удалён от своей области фотошаблона на расстояние больше заданного и является дефектом. С использованием данного порога над картой дефектности производится бинарное преобразование [74]. После такого преобразования растриванная карта дефектности показывает наличие

дефектов. Ввод такого параметра как порог детектирования дефектов позволяет снизить чувствительность алгоритма и исключить несущественные отклонения топологии СВЧ МИС от фотошаблона, небольшую ошибку совмещения микрофотографии и фотошаблона алгоритмом и аберрации оптической системы съёмки микрофотографий СВЧ МИС при оптической микроскопии.

После бинарного преобразования карты дефектности производится кластеризация выделенных дефектов в группы. Критерий объединения в группы – наличие соседних дефектных пикселей (4 соседних пикселей по вертикали и горизонтали).

Максимальный допустимый размер дефекта определяет максимально возможный линейный размер кластера дефектных пикселей, который не считается дефектом (существует возможность использовать в качестве критерия максимальную допустимую площадь дефекта или комбинацию данных признаков). Если существует хотя бы один кластер дефектных пикселей, который не удовлетворяет условию максимального допустимого дефекта, СВЧ МИС на микрофотографии считается бракованной. Введение такого параметра в алгоритм объясняется наличием незначительного цифрового шума на микрофотографиях и небольших загрязнений, которые не являются существенными дефектами СВЧ МИС и не влияют на её работоспособность.

2.4 Подходы и методы реализации этапов алгоритма

автоматизированного визуального контроля

2.4.1 Реализация поиска точек совмещения

Поиск точек совмещения реализован шаблонным методом с использованием ключевых точек [84,85]. В качестве шаблона поиска используется изображение точки совмещения, полученное на этапе подготовки алгоритма из типичной микрофотографии СВЧ МИС. В качестве ключевых точек поиска используются четверть пикселей изображения точки совмещения: каждый второй пиксель по вертикали и горизонтали. Первая стадия поиска точки совмещения происходит с использованием выбранной доли пикселей по всей области поиска. Для каждой

координаты ключевых точек вычисляется коэффициент различия: среднеквадратическое отклонение синего компонента цвета пикселей изображения точки совмещения от области поиска микрофотографии СВЧ МИС:

$$K_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum (B_{x+2i,y+2j} - B_{2i,2j}^{TC})^2}{n}}, \quad (2.16)$$

где $B_{x+2i,y+2j}$ – один из компонентов цвета RGB формата (красный, зелёный или синий) каждого второго пикселя по вертикали и горизонтали области поиска точки совмещения на микрофотографии;

$B_{2i,2j}^{TC}$ – один из компонентов цвета RGB формата (тот же компонент, который используется из пикселя микрофотографии: красный, зелёный или синий) каждого второго пикселя по вертикали и горизонтали изображения точки совмещения;

x, y – координаты проверяемого положения точки совмещения на микрофотографии;

n – общее количество пикселей, используемое для предварительного поиска.

Полученный набор коэффициентов различия $K_{x,y}$ сортируется по возрастанию значения коэффициента и выбирается четверть множества координат положения, при которых достигаются минимальные значения различия.

Для точного определения положения точки совмещения в области поиска СВЧ МИС для выбранных координат по формуле (2.1) вычисляется суммарное отклонение всех компонентов цвета пикселей изображения точки совмещения от области поиска микрофотографии СВЧ МИС. Выбирается координата с наименьшим отклонением: данная координата показывает расположение точки совмещения на микрофотографии СВЧ МИС.

В качестве ускорения работы данного шага алгоритма можно использовать механизм свёртки изображения преобразованием Фурье [85], данный подход используется в библиотеке компьютерного зрения OpenCV [84] и в настоящее время является самым оптимизированным по времени выполнения.

2.4.2 Реализация преобразования векторного чертежа фотошаблона

На этапе проектирования СВЧ МИС чертежи фотошаблонов выполняются в векторном формате «.dxf» в программе AutoCAD. Векторный формат позволяет использовать фотошаблон на любом увеличении без потери качества изображения. Для использования данного формата файла в программе автоматизированного визуального контроля был разработан модуль чтения данных из файлов с использованием описания элементов формата [87]. Сторонние библиотеки чтения файлов формата «.dxf» не позволяют просто и гибко использовать структуру файла, бесплатные из которых предоставляют функционал исключительно для открытия файла и вывода векторного изображения в свои клиентские формы WinAPI [90,91], что усложняет интеграцию с разрабатываемым программным обеспечением.

Разработанный модуль позволяет читать файлы формата «.dxf», содержащего примитивы: линии, прямоугольники, окружности, полилинии, многоугольники с дугами, реализована поддержка примитивов с различными ширинами линий. Данный комплект примитивов достаточный для использования на конечном производстве. Также модуль считывает информацию о слоях фотошаблона и иерархию принадлежности примитивов к слоям. При чтении файла каждый примитив приводится в соответствие с примитивом WinAPI программного обеспечения.

2.4.3 Реализация классификатора на основе искусственной нейронной сети

Используемый классификатор на основе искусственной нейронной сети имеет простую архитектуру. Для того, чтобы не перегружать разрабатываемое программное обеспечение сторонними библиотеками, был реализован программный модуль нейронной сети, реализующий весь необходимый функционал [78]. Разработанный модуль нейронной сети не поддерживает ускорение на GPU (Graphic Process Unit) или TPU (Tensor Process Unit).

Необходимость разработки собственного модуля искусственной нейронной сети обусловлена требованием повышенной гибкости решения за счёт возможности самостоятельной тонкой калибровки структуры библиотеки искусственной нейронной сети с требуемыми доработками и возможностью встраивания системы искусственной нейронной сети в любые другие проекты без затрат времени на дополнительную разработку, исследования существующих библиотек и соблюдения лицензионных соглашений.

Модуль ИНС реализует следующий функционал:

- определение формата данных в виде вектора матриц;
- определение классов слоев искусственной нейронной сети, имеющие идентичный абстрактный интерфейс: входные, полносвязные, свёрточные, слои объединения, выходные слои;
- определение класса архитектуры искусственной нейронной сети, который хранит информацию о всех слоях, их последовательность, зависимости и весовые коэффициенты;
- реализация метода обучения обратным распространением ошибки;
- реализация синхронного и асинхронного метода расчёта данных;
- реализация компоновщика искусственной нейронной сети «Builder 2.0», позволяющего собирать архитектуру нейронной сети из её текстового описания, производить обратное преобразование архитектуры в текстовое описание для компоновщика «Builder 2.0», сохранять и загружать нейронную сеть с её состоянием в файл (приложение А);
- реализация графического редактора искусственной нейронной сети для визуального представления и редактирования архитектуры (приложение А).

2.4.4 Реализация расчёта карты дефектности

Алгоритм этапа расчёта карты дефектности выполняется в 3 шага: один подготовительный при запуске программы автоматизированного визуального контроля и два основных.

Подготовительный шаг: формируется список групп целочисленных координат, равноудалённых от точки с координатами (0; 0). Группируются по целым значениям пиксельных расстояний от точки (0; 0). Данный шаг выполняется только однажды при запуске программы и формирует группы смещений от текущего пикселя. Список сортируется по возрастанию пиксельного расстояния от точки (0; 0) (рисунок 2.19).

9	8	8	7	7	7	6	7	7	7	8	8	9
8	8	7	6	6	6	5	6	6	6	7	8	8
8	7	6	5	5	5	4	5	5	5	6	7	8
7	6	5	5	4	4	3	4	4	5	5	6	7
7	6	5	4	3	3	2	3	3	4	5	6	7
7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7
6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6
7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7
7	6	5	4	3	3	2	3	3	4	5	6	7
7	6	5	5	4	4	3	4	4	5	5	6	7
8	7	6	5	5	5	4	5	5	5	6	7	8
8	8	7	6	6	6	5	6	6	6	7	8	8
9	8	8	7	7	7	6	7	7	7	8	8	9

Рисунок 2.19 – Формирование списка групп целочисленных координат, равноудалённых от центральной точки

На первом основном шаге алгоритма из первой точки области анализа преобразованной микрофотографии СВЧ МИС производится поиск минимального расстояния до каждой области растриванного фотошаблона. Поиск расстояния осуществляется с использованием списка групп целочисленных координат, сформированного на подготовительном шаге. Значение минимального расстояния до каждой области фотошаблона фиксируется (рисунок 2.20).

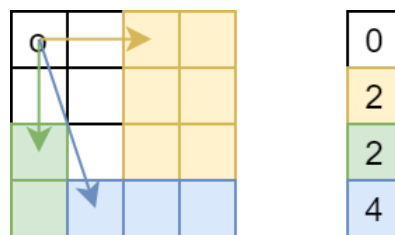


Рисунок 2.20 – Вычисление пиксельного расстояния до каждой области фотошаблона из начала координат изображения: для белой области 0 пикселей, для жёлтой 2 пикселя, для зелёной 2 пикселя, для синей 4 пикселя

На втором основном шаге алгоритма производится поиск минимального пиксельного расстояния для соседних пикселей с учётом известной информации. Извлекается минимальное расстояние r из соседнего уже найденного пикселя, формируется диапазон поиска расстояния из $r-1, r, r+1$, для текущей координаты. Гарантируется, что минимальное пиксельное расстояние для текущей точки находится в данных пределах минимального пиксельного расстояния (рисунок 2.21).

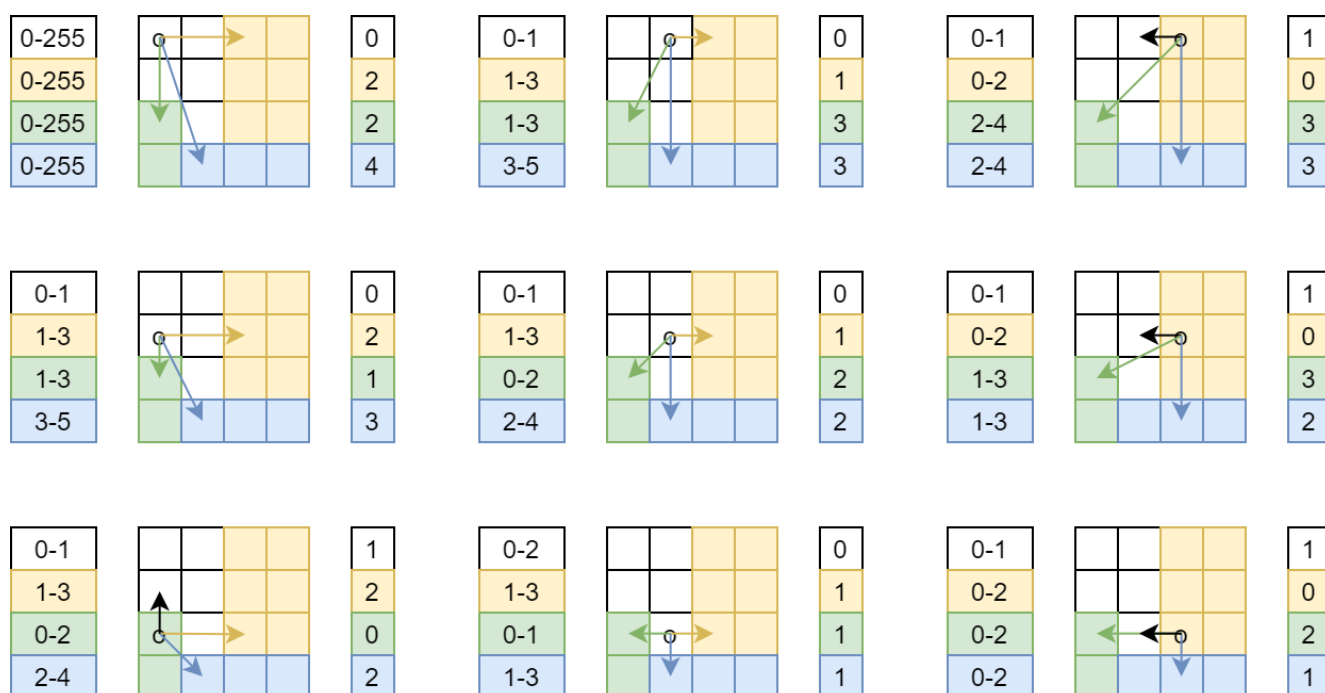


Рисунок 2.21 – Пример расчёта пиксельного расстояния на основе информации о пиксельных расстояниях соседних пикселей: левый столбец – диапазон поиска пикселя; таблица – схема поиска; правый столбец – результат поиска

Такой подход ускоряет вычисления на единицу размера области анализа относительно простого прохода по каждому пикселю области анализа. Существует более быстрый подход к решению данной задачи с использованием прохода в ширину графа, сформированного на основе соседних пикселей [92]. При необходимости ускорения работы алгоритма визуального контроля этот шаг алгоритма целесообразно оптимизировать.

2.5 Асимптотика алгоритма автоматизированного визуального контроля

Асимптотика (сложность) алгоритма определяет количество операций над данными, с её помощью можно сравнивать время выполнения разных алгоритмов и приблизительно оценить абсолютное время работы алгоритма [93].

Асимптотика алгоритма автоматизированного визуального контроля будет суммироваться из следующих слагаемых:

$$O_{\Sigma} = O_{TC} + O_{RF} + O_{OA} + O_{ИНС} + O_{КД} + O_{Д}, \quad (2.17)$$

где O_{TC} – асимптотика алгоритма поиска всех точек совмещения;

O_{RF} – асимптотика растривания фотошаблона;

O_{OA} – асимптотика выделения области анализа;

$O_{ИНС}$ – асимптотика преобразования выделенной области анализа микрофотографии с использованием классификатора на основе искусственной нейронной сети;

$O_{КД}$ – асимптотика составления карты дефектности;

$O_{Д}$ – асимптотика определения наличия дефекта.

Асимптотика алгоритма поиска всех точек совмещения оценивается следующим образом:

$$O_{TC} = n \times w_{TC} \times h_{TC} \times w_{оп} \times h_{оп} \approx 5 \times 30 \times 30 \times 80 \times 70 \approx 10^7, \quad (2.18)$$

где n – количество точек совмещения;

w_{TC}, h_{TC} – ширина и высота микроизображения точки совмещения;

$w_{оп}, h_{оп}$ – ширина и высота размера области поиска точки совмещения на микрофотографии.

Асимптотика растривания фотошаблона определяется либо суммарным количеством линий всех используемых слоёв всех используемых элементов (не превышает тысячи элементов), либо произведением ширины и высоты микрофотографии (в качестве изначального пространства растривания фотошаблона используется пространство микрофотографии). Таким образом:

$$O_{RF} = \max(count_{фш}, w_{мф} \times h_{мф}) \approx \max(10^3, 1000 \times 800) \approx 10^6, \quad (2.19)$$

где $count_{фш}$ – количество элементов фотошаблона;

$w_{\text{мф}}, h_{\text{мф}}$ – ширина и высота микрофотографии.

Асимптотика выделения области анализа из микрофотографии и растриванного фотошаблона определяется размерами области анализа:

$$O_{\text{OA}} = 2 \times w_{\text{oa}} \times h_{\text{oa}} \approx 2 \times 700 \times 700 \approx 10^6, \quad (2.20)$$

где $w_{\text{oa}}, h_{\text{oa}}$ – ширина и высота области анализа.

Асимптотика преобразования выделенной области анализа микрофотографии с использованием классификатора на основе искусственной нейронной сети оценивается по следующей формуле:

$$O_{\text{ИНС}} = w_{\text{oa}} \times h_{\text{oa}} \times O_{\text{КЛ}} \approx 700 \times 700 \times 50 \approx 10^7, \quad (2.21)$$

где $w_{\text{oa}}, h_{\text{oa}}$ – ширина и высота области анализа;

$O_{\text{КЛ}}$ – асимптотика классификатора на основе искусственной нейронной сети, можно оценить по количеству весовых коэффициентов всей нейронной сети.

Асимптотика составления карты дефектности оценивается по следующей формуле:

$$O_{\text{КД}} = w_{\text{oa}} \times h_{\text{oa}} \times \max(w_{\text{oa}} + h_{\text{oa}}) \approx 700 \times 700 \times 700 \approx 3 \times 10^8, \quad (2.22)$$

где $w_{\text{oa}}, h_{\text{oa}}$ – ширина и высота области анализа.

Асимптотика определения наличия дефекта оценивается по следующей формуле:

$$O_{\text{Д}} = w_{\text{oa}} \times h_{\text{oa}} \approx 700 \times 700 \approx 10^5, \quad (2.23)$$

где $w_{\text{oa}}, h_{\text{oa}}$ – ширина и высота области анализа.

Суммарная асимптотика предложенного алгоритма составляет:

$$O_{\Sigma} \approx 10^7 + 10^6 + 10^6 + 10^7 + 3 \times 10^8 + 10^5 \approx 3,2 \times 10^8,$$

что соответствует приблизительно 3,2 секундам работы центрального процессора с частотой 1 ГГц.

2.6 Программное обеспечение автоматизированного визуального контроля

На основе вышеизложенного алгоритма автоматизированного визуального контроля было разработано программное обеспечение «ReChip 1.0». Программное обеспечение реализует следующий функционал:

- настройка алгоритма автоматизированного контроля (рисунок 2.22);

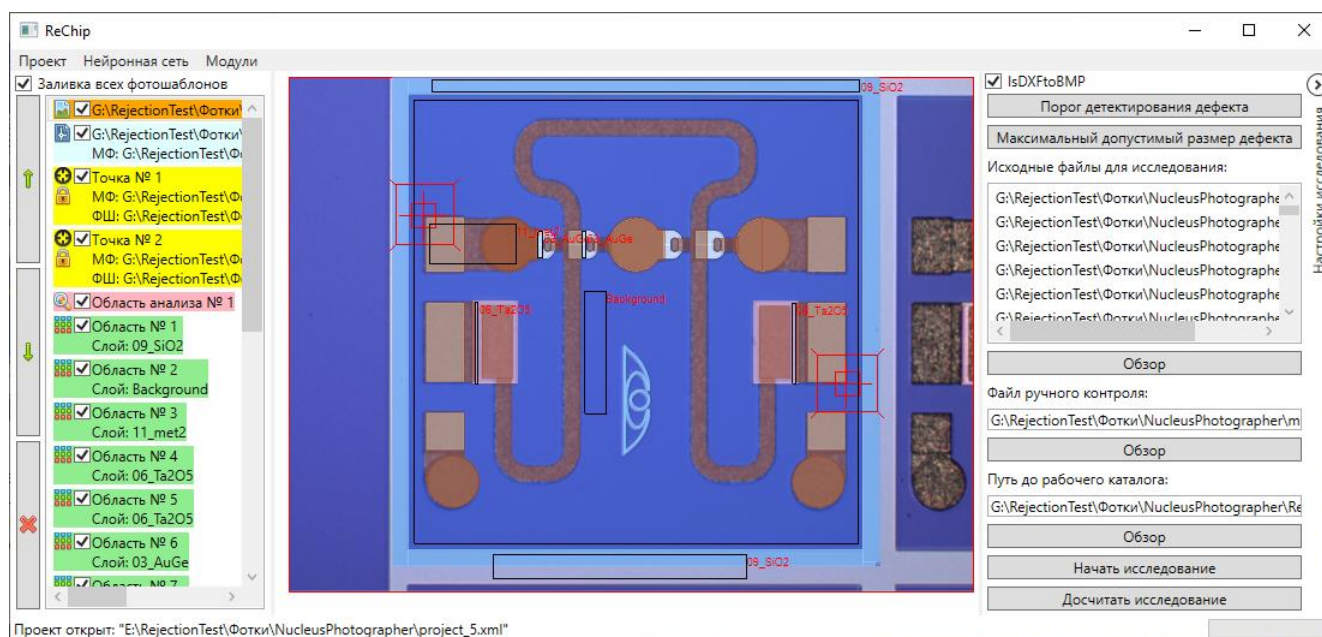


Рисунок 2.22 – Главное окно программы «ReChip 1.0» с настроенным проектом поиска дефектов

- сохранение в файл и загрузка из файла настроенного алгоритма;
- проведение автоматизированного визуального контроля на наборе микрофотографий СВЧ МИС;
- проведение автоматизированного визуального контроля над микрофотографией из потока цифровой камеры программы управления измерительным процессом полуавтоматической зондовой станции;
- проведение автоматизированных экспериментов по подбору значений порога детектирования дефекта и максимального допустимого размера дефекта для получения необходимого качества визуального контроля;

- проведение автоматизированных экспериментов для сравнения результатов ручного и автоматизированного визуальный контролей;
- проведение исследования результатов автоматизированных экспериментов для анализа выполнения автоматизированного визуального контроля (рисунок 2.23);

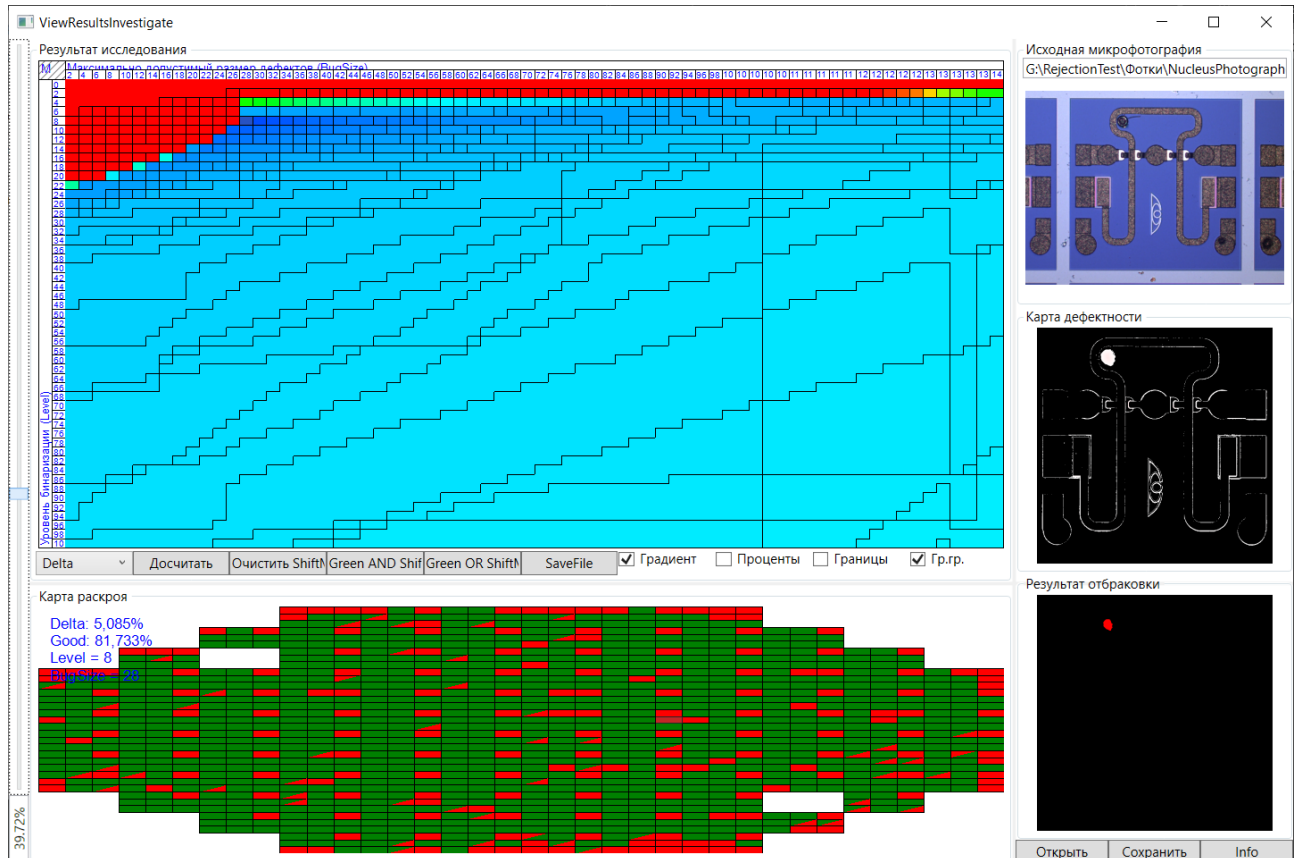


Рисунок 2.23 – Окно программы автоматизированного визуального контроля для проведения анализа результатов исследования

- сохранение результатов автоматизированных экспериментов в файл;
- использование внешних модулей расширения для модификации алгоритма автоматизированного визуального контроля, без изменения основной последовательности этапов алгоритма автоматизированного визуального контроля;
- проведение ручного визуального контроля (рисунок 2.24).

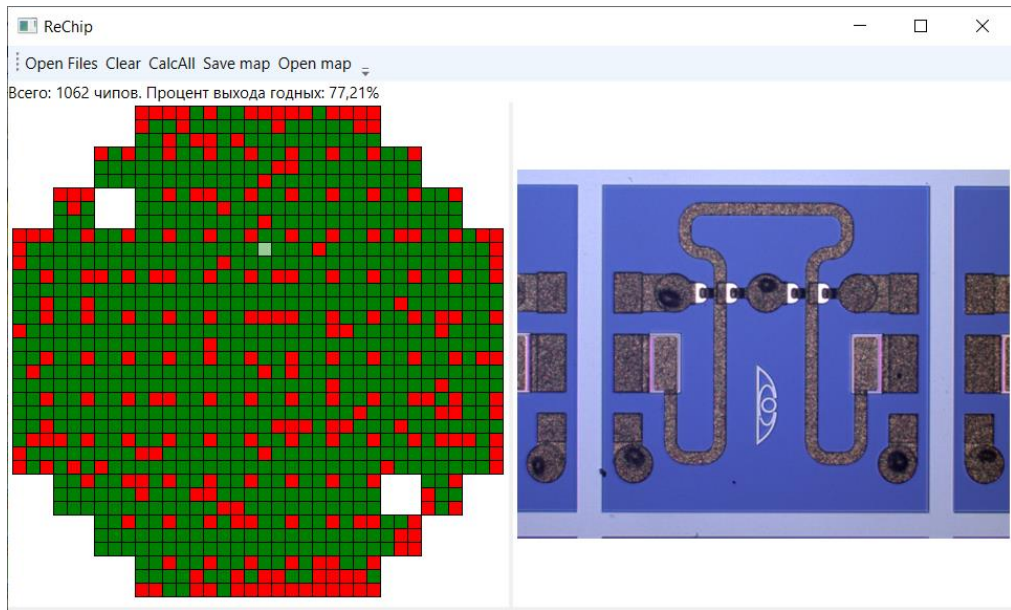


Рисунок 2.24 – Окно подпрограммы проведения ручного визуального контроля

В программное обеспечение входят следующие модули:

- основной модуль программы с главным окном и интерфейсом встраивания в программу управления измерительным процессом полуавтоматической зондовой станции;
- модуль чтения векторных файлов формата «.dxf»;
- модуль работы с искусственными нейронными сетями;
- модуль создания группы параллельно выполняемых задач в пуле потоков;
- модуль определения внешних интерфейсов взаимодействия;
- модуль проведения автоматизированных экспериментов и анализ их результатов.

Для использования сторонних модулей предоставлены следующие интерфейсы программы:

- интерфейс проекта алгоритма автоматизированного визуального контроля для создания собственной последовательности этапов проведения визуального контроля;
- интерфейс этапа поиска точки совмещения;
- интерфейс этапа преобразования области анализа микрофотографии СВЧ МИС;
- интерфейс этапа вычисления карты дефектности;

– интерфейс этапа оценки степени дефектности из карты дефектности.

Программное обеспечение написано на языке программирования C# 7.3 с использованием фреймворка NET.Framework 4.6.1. Графический интерфейс создан с использованием графической подсистемы WPF. Среда разработки Visual Studio 2019.

Выводы

Проведена классификация дефектов, выявлены особенности каждой группы дефектов, определена степень влияния дефектов на рабочие характеристики приборов, сформулированы критерии, по которым СВЧ МИС при наличии того или иного типа дефекта будет считаться годной или бракованной.

Сформулирован алгоритм автоматизированного визуального контроля, отличающийся от существующих методом сравнения с фотошаблоном. Алгоритм использует технологии компьютерного зрения и искусственные нейронные сети для обеспечения высокой степени сходимости результата автоматизированного визуального контроля и ручного.

Разработан системный подход выбора группы точек совмещения, который использует критерий повторяемости геометрического расположения на микрофотографии МИС и фотошаблоне. Данный метод позволяет исключить точки совмещения, на участках которых расположен дефект и их координаты вычислены неверно.

Впервые применён классификатор на основе искусственной нейронной сети и метод вычисления пиксельного расстояния при дефектоскопии МИС, позволяющие эффективно определять дефекты топологии разнородных покрытий.

Описаны особенности реализации алгоритма в программном обеспечении автоматизированного визуального контроля, выделены «бутылочные горла» данной реализации по быстродействию и предложены пути алгоритмической оптимизации. Оценена сложность реализованного алгоритма через оценку его асимптотики. Описан основной функционал и состав разработанного программного обеспечения.

ГЛАВА 3. УСТАНОВКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

3.1 Требования к проектированию установки автоматизированного визуального контроля

В качестве аппаратной части системы автоматизированного визуального контроля выступает установка автоматизированного визуального контроля. К основным задачам такой установки можно отнести:

- фиксирование полупроводниковой пластины держателем полупроводниковых пластин (chuck);
- перемещение пластины под цифровым микроскопом с точностью, достаточной для определения положения СВЧ МИС на микрофотографии;
- скорость перемещения полупроводниковой пластины под микроскопом должна быть сопоставима или меньше среднего времени обработки одной микрофотографии программой для создания задела на ускорение процесса автоматизированного визуального контроля;
- разрешение цифровой камеры и увеличение цифрового микроскопа должно быть достаточным для съёмки СВЧ МИС с необходимым разрешением, достаточным для фиксирования минимального возможного дефекта для оптического диапазона;
- время съёмки одной микрофотографии цифровой камерой должно быть существенно меньше скорости перемещения от чипа к чипу.

К опциям установки автоматизированного визуального контроля можно отнести:

- поворот chuck-а: нет необходимости ввиду возможности цифрового поворота изображения при незначительной потере качества;
- обратная связь системы позиционирования полупроводниковой пластины под микроскопом: нет необходимости ввиду возможности цифровой коррекции положения изображения СВЧ МИС на микрофотографии;

- установка пластины крепления DC и СВЧ зондов: при установке системы обратной связи, поворота и подъёма chuck-а и данной опции можно из установки автоматизированного визуального контроля получить полуавтоматическую зондовую станцию без существенных экономических затрат;

- установка микроскопа с темнопольной оптической системой: открывает новые возможности дефектоскопии, но требует доработку алгоритма автоматизированного визуального контроля под данный тип микрофотографий.

После формирования основных и опциональных особенностей установки автоматизированного визуального контроля требуется конкретизировать необходимые параметры:

- диаметр полупроводниковой пластины до 150 мм (до 200 мм);
- размер минимального детектируемого дефекта до 2 мкм (при использовании объектива цифрового микроскопа x5 максимальный размер пикселя камеры должен быть не более 10 мкм, при использовании объектива x10 – не более 20 мкм);

- время перемещения от чипа к чипу не более 0,2 с (при максимальном размере чипа до 5 мм скорость перемещения должна быть не меньше 0,05 м/с);

- минимальное разрешение камеры 3600x3600 пикселей: камера должна захватывать полностью СВЧ МИС с размерами 2x2 мм с 10% запасом по краям чипа и с запасом детектирования минимального дефекта 3 пикселя на 2 мкм (для съёмки СВЧ МИС большого размера можно использовать метод «сшивания» нескольких микрофотографий частично снятой СВЧ МИС);

- время съёмки одной микрофотографии менее 0,1 с на разрешении матрицы, при котором фиксируется минимальный детектируемый дефект.

Для преобразования установки автоматизированного визуального контроля в полуавтоматическую зондовую станцию требуется выполнение следующих необходимых критериев:

- погрешность абсолютного позиционирования по горизонтальным осям ХУ не более 4 мкм;

- повторяемость относительного позиционирования по вертикальной оси Z не более 4 мкм;
- разрешение поворотной оси Theta не менее 1 угловой минуты;
- допустимо увеличение времени перемещения от чипа к чипу до 1 с, при этом должно гарантироваться перемещение chuck-а вниз до высоты отсутствия контакта зондов с контактными площадками СВЧ МИС («подныривание» под зондами).

3.2 Выбор основных функциональных компонентов

В рамках реализации аппаратной части комплекса автоматизированного визуального контроля было разработано две установки: полуавтоматическая зондовая станция и станция автоматизированного визуального контроля.

Механическая часть (перемещение)

Для точного перемещения любой станции требуется высококачественные компоненты. С другой стороны, для удешевления стоимости конечного продукта следует искать наиболее выгодные предложения по соотношению цена/качество. В результате поиска поставщиков были выбраны следующие производители компонентов.

Для полуавтоматической зондовой станции:

- направляющие рельсы и каретки перемещения по осям X, Y и Z тайваньской фирмы HIWIN [94] (возможна замена на производителя ТНК [95], из-за совместимости используемых компонентов у выбранных производителей);
- радиальноупорный подшипник поворота chuck-а японской фирмы ТНК;
- направляющие линейные подшипники перемещения микроскопа японской фирмы ТНК;
- оптические линейки обратной связи перемещения российской фирмы СКБ ИС [96];
- шарико-винтовая передача (ШВП) моторизованного привода осей X, Y, Z тайваньской фирмы HIWIN (возможно использование ШВП любой фирмы, так как используется обратная связь);

– шаговые двигатели приводов всех используемых осей тайваньской фирмы HIWIN (возможно использование шаговых двигателей любой фирмы, так как используется обратная связь). Шаговые двигатели выбраны из-за низкой стоимости системы с ЧПУ по сравнению с прямым приводом и сервоприводом, при удовлетворении скоростных и точностных характеристик;

– драйвер шаговых двигателей китайского производителя Leadshine Technology Co. [97] (возможно использование драйверов любой фирмы, так как используется обратная связь, требуется совместимость и удовлетворение скоростных и точностных характеристик);

– контроллер управления американской фирмы OMS Motion Inc. [98], по примеру существующего решения (возможна замена на контроллер любой фирмы с поддержкой шаговых двигателей, потребуются создание только управляющей библиотеки для интеграции нового решения, требуется совместимость и удовлетворение скоростных и точностных характеристик).

Для станции автоматизированного визуального контроля:

– двухкоординатный планарный двигатель прямого привода тайваньской фирмы HIWIN Microsystem [99] (возможна замена на белорусского производителя ООО «РУХСЕРВОМОТОР» [100] или американского производителя H2W Technologies, Inc. [101]);

– радиальноупорный подшипник поворота chuck-а японской фирмы ТНК;

– направляющие линейные подшипники перемещения микроскопа японской фирмы ТНК;

– шарико-винтовая передача (ШВП) моторизованного привода микроскопа тайваньской фирмы HIWIN;

– серво-двигатель привода микроскопа тайваньской фирмы HIWIN;

– драйвер и контроллер серво-двигателя привода микроскопа и двухкоординатного планарного двигателя прямого привода тайваньской фирмы HIWIN Microsystem (поставляется комплектом с планарным двигателем).

Оптическая часть (микроскоп и цифровая камера)

Качественная оптическая часть гарантирует надёжность визуального контроля и высокий уровень работы с полупроводниковыми пластинами. Для полуавтоматической зондовой станции был выбран светлопольный микроскоп японского производителя Mitutoyo 378-505 [102], подсветка осевая, окуляры того же производителя. Цифровая камера Альтами UCМOS14000КРА в будущем может быть заменена на более дорогой и качественный аналог.

Основным критерием для выбора микроскопа для полуавтоматической зондовой станции являлось качество получаемого изображения. У японской фирмы Mitutoyo есть множество патентов на оптические системы микроскопов. Микроскопы и объективы этого производителя компенсируют хроматические aberrации, что является чрезвычайно важным параметром получения изображения высокого качества на большом увеличении.

Для станции автоматизированного визуального контроля был выбран микроскоп со светлым и тёмным полем Mitutoyo 378-518, подсветка осевая, окуляры того же производителя. Цифровая камера Альтами UCМOS14000КРА в будущем может быть заменена на более дорогой и качественный аналог.

Основным критерием для выбора микроскопа для станции автоматизированного визуального контроля, как и для полуавтоматической зондовой станции, являлось качество получаемого изображения. Использование микроскопа с возможностью просмотра изображения в тёмном поле расширяет спектр применения станции.

Пневматические элементы всех установок используются фирмы Festo [103] и Mindman [104].

3.3 Разработанные образцы зондовых станций и станции визуального контроля

Полуавтоматическая зондовая станция разработана, изготовлен опытный образец. Габаритный чертёж, фотография и изображение модели представлены на рисунках 3.1-3.5.

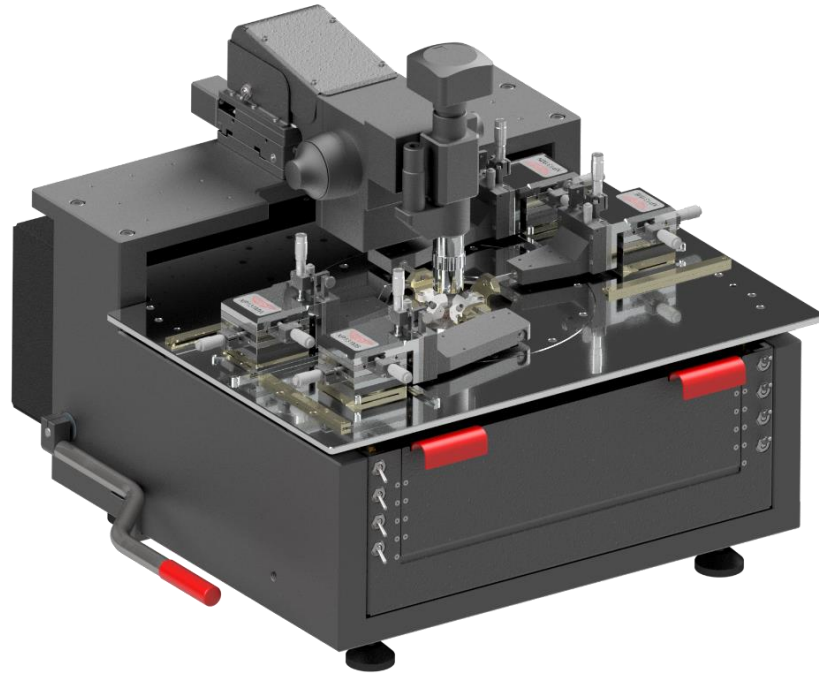


Рисунок 3.1 – 3D модель полуавтоматической зондовой станции Terra-200COAX вид спереди

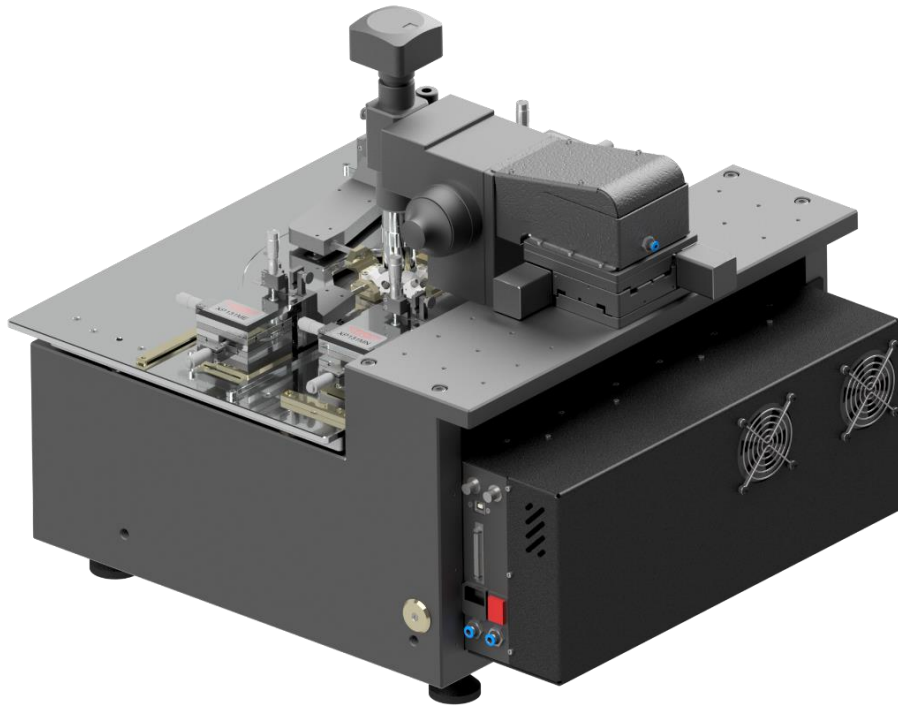


Рисунок 3.2 – 3D модель полуавтоматической зондовой станции Terra-200COAX вид сзади

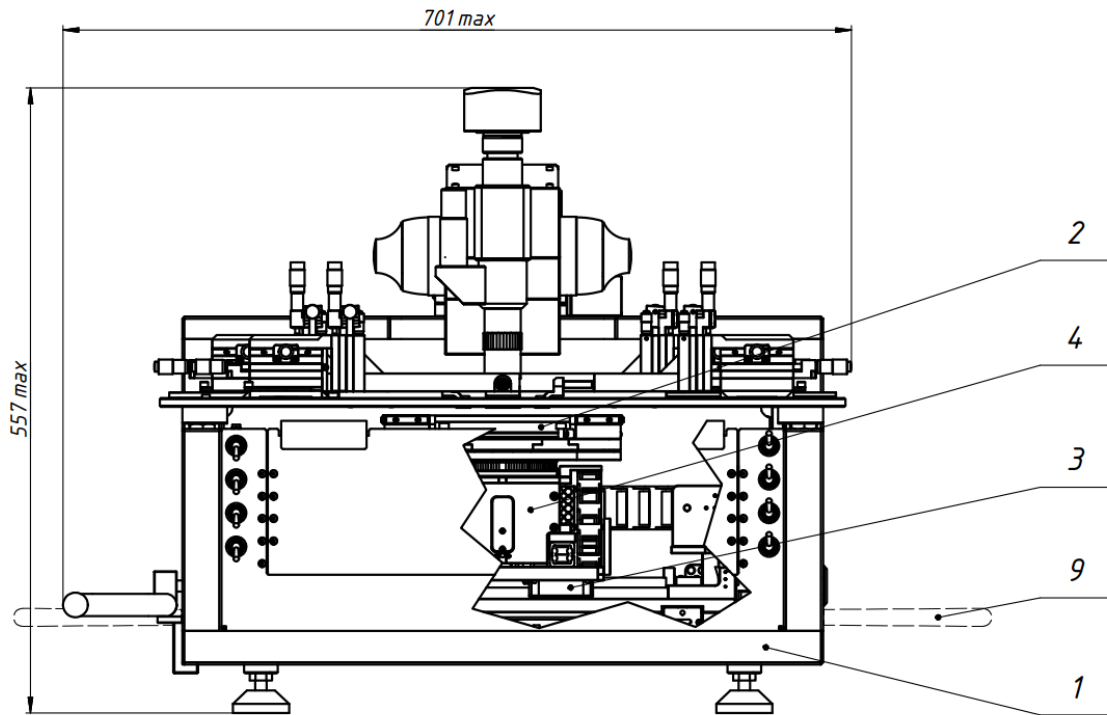


Рисунок 3.3 – Габаритный чертёж полуавтоматической зондовой станции Terra-200COAX вид
спереди

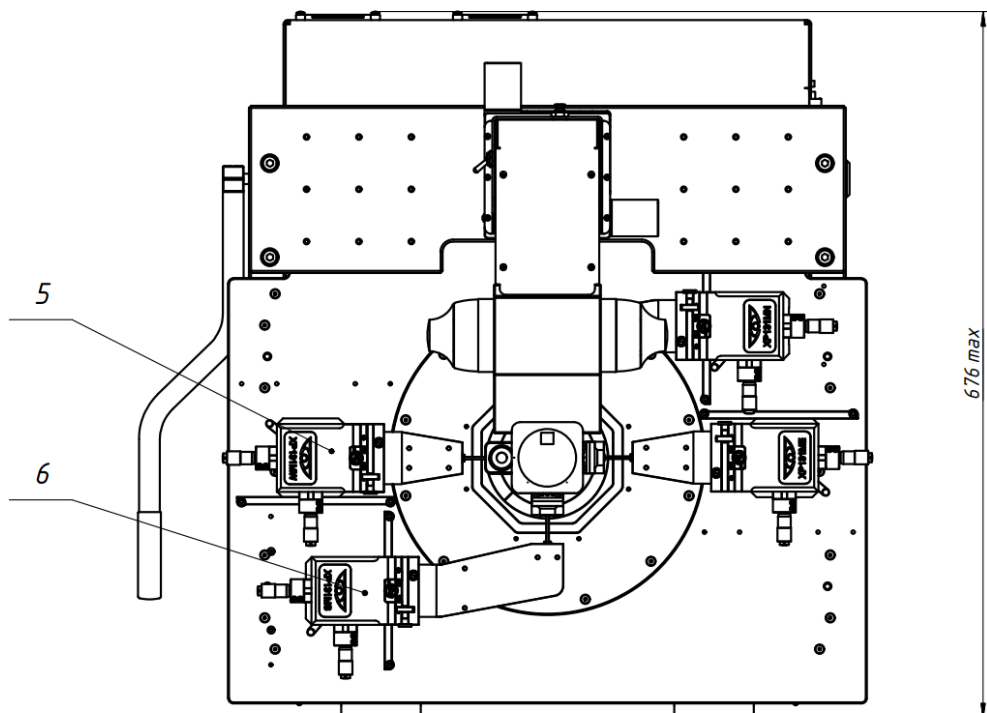


Рисунок 3.4 – Габаритный чертёж полуавтоматической зондовой станции Terra-200COAX вид
сверху



Рисунок 3.5 – Фотография собранного опытного образца полуавтоматической зондовой станции Terra-200COAX

В результате разработки полуавтоматическая зондовая станция обладает следующими характеристиками:

- диаметр полупроводниковых пластин до 200 мм;
- диапазон перемещения в плоскости XY до 220 мм;
- точность позиционирования в плоскости XY ± 2 мкм;
- диапазон перемещения по оси Z до 11 мм;
- повторяемость перемещения по оси Z ± 1 мкм;
- диапазон поворота chuck-а ± 15 градусов;
- диапазон перемещения микроскопа в плоскости XY до 50 мм, моторизированное;
- фиксированная высота подъёма стола plate: контакт (0 мм), подъём (3 мм);
- размер минимального различимого дефекта до 2 мкм.

Станция автоматизированного визуального контроля разработана, изготовлен опытный образец. Фотография и изображение модели представлены на рисунках 3.6-3.7.

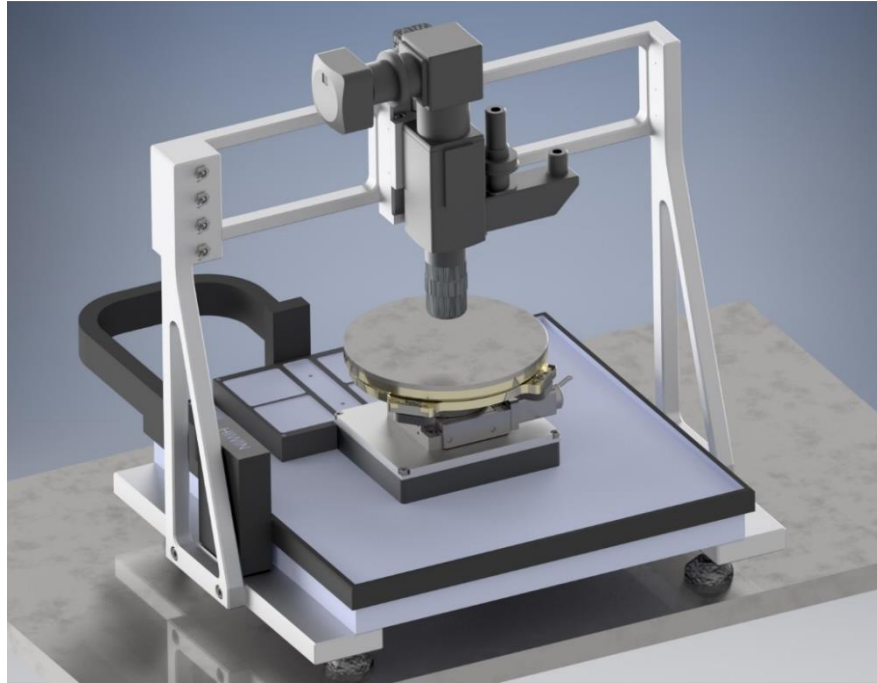


Рисунок 3.6 – 3D модель станции автоматизированного визуального контроля



Рисунок 3.7 – Фотография собранного опытного образца станции автоматизированного визуального контроля

В результате разработки станция автоматизированного визуального контроля обладает следующими характеристиками:

- диаметр полупроводниковых пластин до 200 мм;
- диапазон перемещения в плоскости XY более 220 мм;
- точность позиционирования в плоскости XY ± 20 мкм;
- диапазон поворота chuck-а ± 15 градусов;
- диапазон перемещения микроскопа по оси Z до 50 мм, моторизованное;
- размер минимального различимого дефекта до 2 мкм.

3.4 Программное обеспечение управления измерениями

Для осуществления измерительного процесса на полуавтоматической зондовой станции группой программистов АО «НИИПП» было создано специализированное программное обеспечение ProMeas 4.0. Данное ПО разделено на функциональные модули: основной модуль, модуль связи с измерительными приборами, модуль измерительных задач, модуль связи с базой данных, модуль работы с зондовой станцией. Основным модулем является каркасом программного обеспечения, обеспечивает взаимодействие других модулей и регулирует уровень доступа к измерительному процессу пользователей. Модуль связи с измерительными приборами реализует интерфейсы управления различными измерительными приборами, источниками питания и сигнала, управляющими и переключающими приборами; обеспечивает надёжность получаемых данных: метрологически значимая часть прошла испытания метрологической экспертизы. Модуль измерительных задач задаёт последовательность управляющих команд измерительными приборами для проведения того или иного контроля электрофизических параметров; последовательность команд хранится на удалённом сервере. Модуль связи с базой данных обеспечивает взаимодействие с облачным сервером хранения и обработкой результатов измерений; каждое измерение любых электрофизических параметров заносится в базу данных для последующей обработки. Модуль работы с зондовой станцией обеспечивает управление зондовой станцией и видеопотоком цифровой камеры микроскопа.

Процесс измерения электрофизических параметров можно упрощённо выразить в следующей последовательности:

1) используя модуль управления зондовой станцией переехать на новую СВЧ МИС;

2) используя модуль измерительных задач и модуль связи с измерительными приборами провести конфигурацию измерительного оборудования, получить измеренные данные;

3) используя модуль связи с базой данных отправить измеренные данные на удалённый сервер;

4) повторять шаги 1-3 для всех СВЧ МИС в измерительной задаче.

Программное обеспечение автоматизированного визуального контроля встраивается в качестве модуля измерительных задач, подключается к видеопотоку цифровой камеры микроскопа станции. Таким образом не нарушается целостность программного обеспечения ProMeas 4.0 и обеспечивается реализация автоматизированного визуального контроля на уже существующих и разработанных полуавтоматических зондовых станциях и станции автоматизированного визуального контроля.

3.5 Аппаратно-программная система температурной компенсации

В процессе отладки полуавтоматической зондовой станции Terra-200COAX при измерении плоскостности chuck-а для её коррекции было зафиксировано смещение уровня «контакта» (положение chuck-а по оси Z, при котором происходит измерение электрофизических параметров зондами – контакт зондов) с течением времени. При измерении зависимости изменения положения уровня «контакта» chuck-а был получен график (рисунок 3.8).

По графику видно, что уровень смещения плоскости «контакта» составляет до 50 мкм. Данный уровень недопустим как для измерения электрофизических параметров МИС – допустимый диапазон высот для СВЧ зондов от 10 мкм до 40 мкм (overtravel), так и для автоматизированного визуального контроля – глубина резкости до ± 10 мкм.

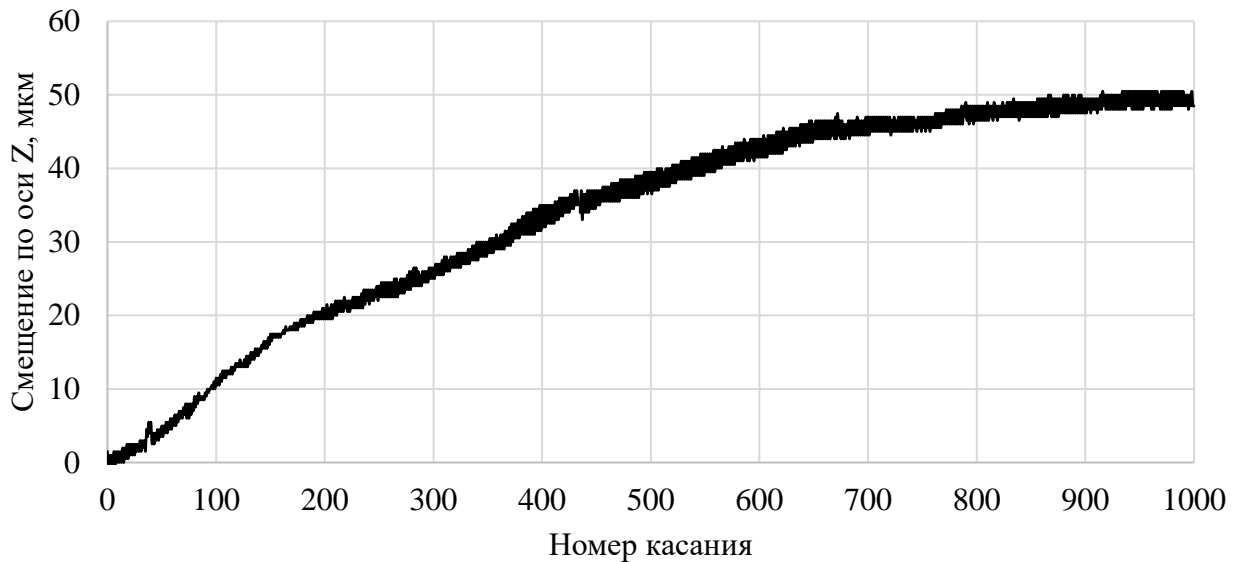


Рисунок 3.8 – График зависимости смещения плоскости «контакта» chuck-а по оси Z от количества касаний

Было выдвинуто предположение о температурной природе данного явления, связанное с разогревом узлов из-за работы двигателей оси Z (подъёма) и Theta (поворота) chuck-а. Для проверки данной гипотезы был установлен датчик температуры в область модуля подъёма и поворота (рисунок 3.9).

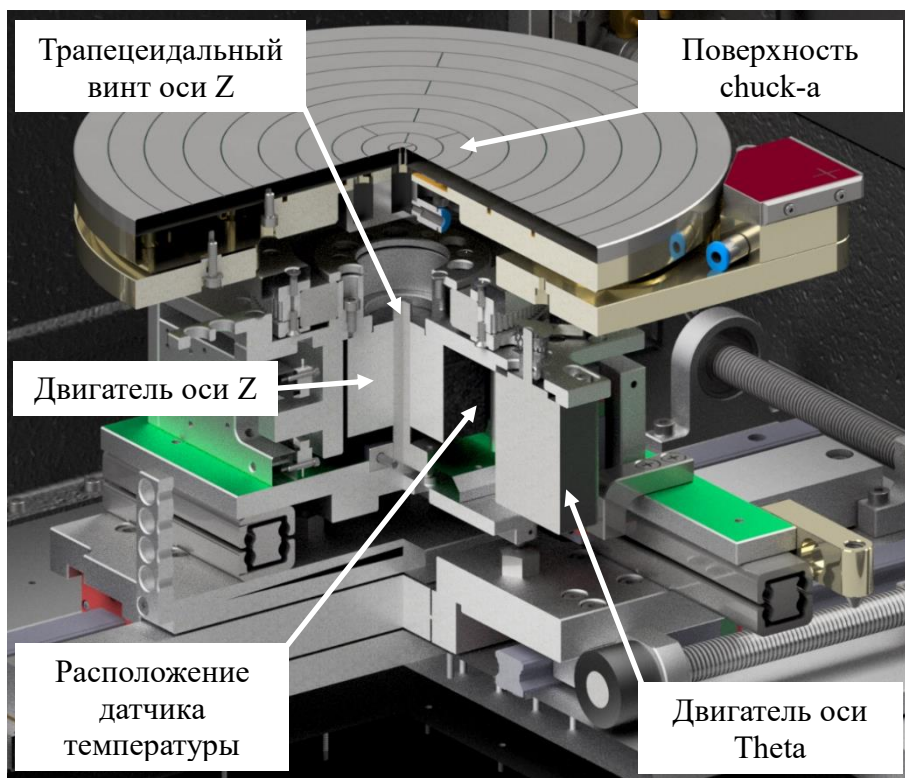


Рисунок 3.9 – Рендер устройства подъемного механизма chuck-а полуавтоматической зондовой станции Terra-200COAX с указанием расположения датчика температуры

После установки датчика температуры была измерена зависимость смещения плоскости «контакта» chuck-а от температуры (рисунок 3.10).

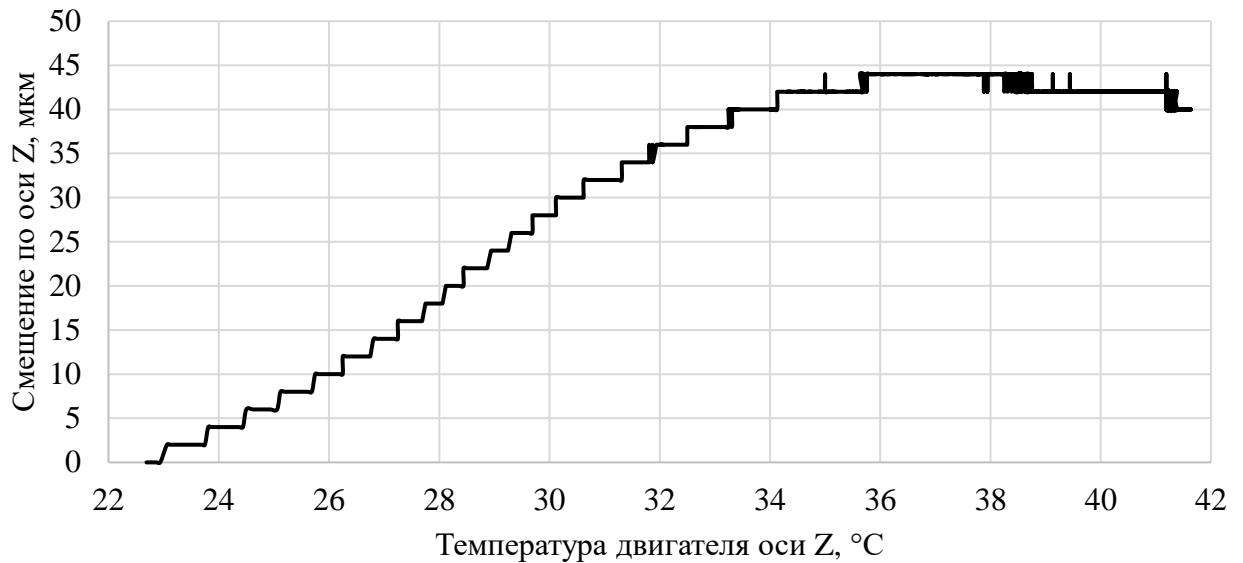


Рисунок 3.10 – График зависимости смещения плоскости «контакта» chuck-а по оси Z от температуры двигателя оси Z полуавтоматической зондовой станции Terra-200COAX

Из графика видно, что смещение зависит от температуры линейно в диапазонах температуры и может быть описано следующим образом:

$$\Delta z = \begin{cases} 0, & \text{если } T < 23^{\circ}\text{C} \\ 3,6812 \cdot T - 83,76, & \text{если } 23^{\circ}\text{C} \leq T < 35^{\circ}\text{C}, \\ 45, & \text{если } T \leq 35^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3.1)$$

где T – температура двигателя оси Z, полученная датчиком, °C;

Δz – смещение оси Z, мкм.

Для коррекции смещения плоскости «контакта» из-за разогрева был разработан и добавлен программный модуль температурной коррекции в модуль коррекции плоскостности chuck-а. Модуль обладает следующим функционалом:

- загрузка «закона» температурной зависимости из файла конфигурации полуавтоматической зондовой станции;
- подключение датчика температуры и связь с ним заданным протоколом;
- считывание температуры с датчика раз в секунду;
- по запросу модуля коррекции плоскостности chuck-а вычисление компенсации уровня «контакта» по загруженному «закону».

После введения системы температурной компенсации уровня «контакта» смещение данного уровня уменьшилась и составила меньше параметра повторяемости измерительного прибора: менее 1 мкм. Общая плоскостность всей поверхности chuck-а после введённых температурной компенсации и коррекции плоскостности показана в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Плоскостность chuck-а на разных стандартных диаметрах полупроводниковых пластин при разных углах поворота, мкм

Угол поворота	Диаметр 50 мм	Диаметр 100 мм	Диаметр 150 мм	Диаметр 200 мм
-20°	13	19	37	37
-15°	10	15	26	35
-10°	6	11	17	19
-5°	8	10	11	16
0°	6	10	13	25
5°	9	12	19	20
10°	6	11	15	17
15°	9	12	12	16
20°	6	9	11	17

Как видно из таблицы 3.1, после введения системы температурной компенсации общий уход плоскостности chuck-а не превышает высоту работы зондов СВЧ и находится в пределах глубины резкости микроскопа. Таким образом, использование аппаратно-программной системы температурной компенсации держателя полупроводниковых пластин, отличающейся гибкостью программной настройки температурной зависимости, позволяет исключить уход фокусного расстояния и увеличить устойчивость алгоритма.

3.6 Программно-аппаратный комплекс измерения электрофизических параметров МИС

На основе разработанной полуавтоматической зондовой станции Terra-200COAX был собран программно-аппаратный комплекс измерения электрофизических параметров МИС на неразделённых полупроводниковых

пластинах. На рисунке 3.11 приведена фотография программно-аппаратного комплекса, на рисунке 3.12 показана упрощённая структура комплекса.



Рисунок 3.11 – Фотография программно-аппаратного комплекса измерения электрофизических параметров МИС на неразделённых полупроводниковых пластинах на основе полуавтоматической зондовой станции Terra-200COAX

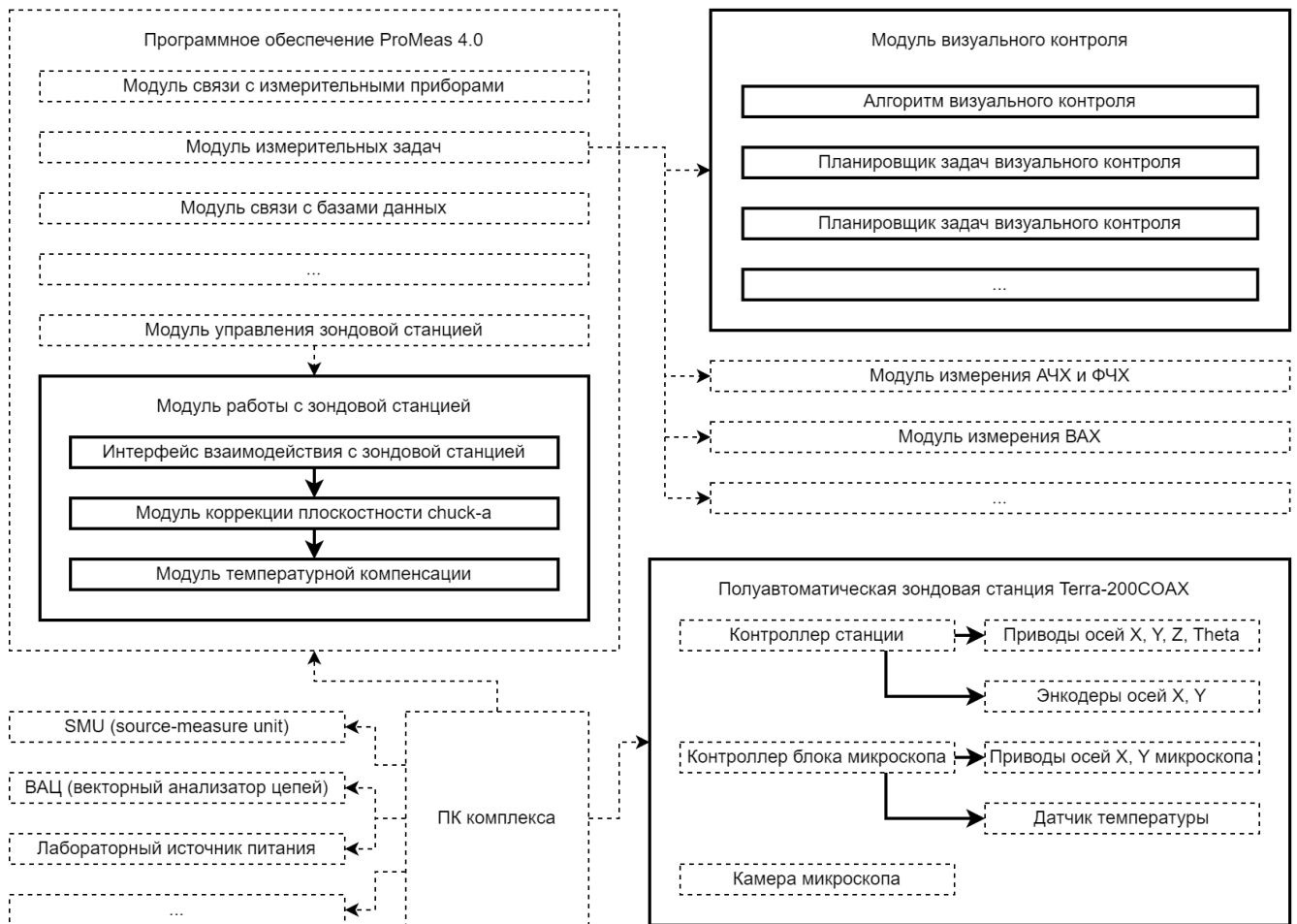


Рисунок 3.12 – Упрощённая структура программно-аппаратного комплекса: жирными линиями показан личный вклад автора (разработанные узлы и связи в рамках данной работы); пунктирами показаны приобретённые или разработанные командой узлы и связи

Разработанный программно-аппаратный комплекс измерения электрофизических параметров МИС на неразделённых полупроводниковых пластинах позволяет осуществлять следующие технологические операции:

- измерение электрофизических параметров МИС;
- проведение ручного и автоматизированного визуального контроля;
- маркировка бракованных МИС.

Выводы

Разработаны станция автоматизированного визуального контроля и полуавтоматическая зондовая станция, которая может выполнять функцию станции визуального контроля за счёт использования качественной оптической системы. Разработанные станции в совокупности с программным обеспечением не

уступают по характеристикам зарубежным аналогам, а по некоторым даже превосходят их.

Разработана специализированная аппаратно-программная система температурной компенсации, отличающаяся гибкостью программной настройки и позволяющая исключить влияние эффекта температурного расширения механических узлов под воздействием внешних факторов. Система температурной компенсации в совокупности с модулем коррекции плоскостности держателя полупроводниковых пластин (chuck) позволяют получить общую плоскостность до 20 мкм, что достаточно как для измерения электрофизических параметров зондами СВЧ, так и для проведения качественного автоматизированного визуального контроля.

На основе разработанной полуавтоматической зондовой станции разработан программно-аппаратный комплекс измерения электрофизических параметров МИС на неразделённых полупроводниковых пластинах.

Выбор качественных компонентов от проверенных производителей гарантирует надёжность изделия и его заявленные характеристики.

ГЛАВА 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

4.1 Методика проведения экспериментов

Автоматизация технологического процесса визуального контроля подразумевает замещение ручного контроля автоматическим или полуавтоматическим, а степень успешности данного замещения оценивается сходимостью результатов ручного и автоматизированного визуальных контролей. Таким образом, для проведения экспериментов по проверки работоспособности алгоритма и программного обеспечения необходимо провести ручной визуальный контроль исходных данных.

Ручной визуальный контроль был проведён специалистом по визуальному контролю. Обработаны несколько полупроводниковых пластин с различными СВЧ МИС. Все отсортированные СВЧ МИС поделены по сложности топологии для алгоритма автоматизированного визуального контроля:

– самые простые, планарные линии (рисунок 4.1). Включают 3 области фотошаблона: подложка, SiO_2 , металлизация. Размер СВЧ МИС 500x500 мкм, размер минимального элемента около 50 мкм;

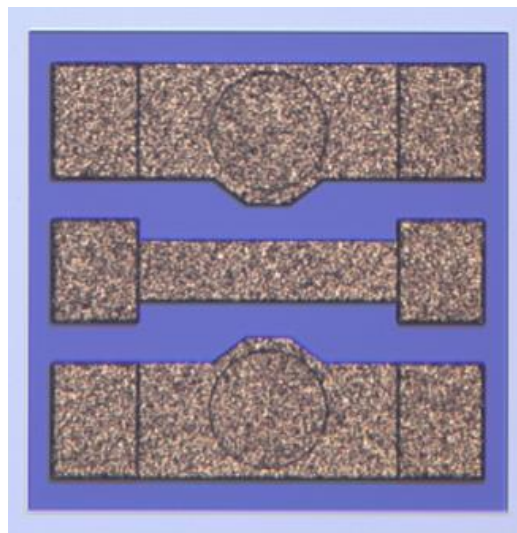


Рисунок 4.1 – Пример микрофотографии самой простой СВЧ МИС – планарная линия

– простые СВЧ МИС, аттенюаторы (рисунок 4.2). Включают 4 области фотошаблона: подложка, SiO_2 , металлизация, резистивный слой. Размер СВЧ МИС

500x500 мкм, размер минимального элемента около 10 мкм, располагаются на полупроводниковых пластинах с планарными линиями;

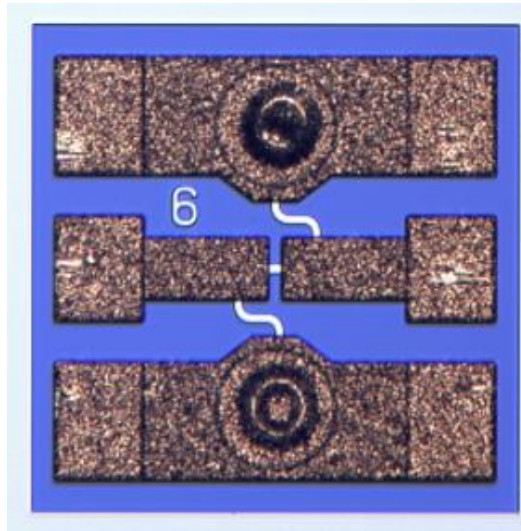


Рисунок 4.2 – Пример микрофотографии простой СВЧ МИС – аттенюатор 6 дБ

– СВЧ МИС средней сложности (рисунок 4.3). Включает 4 или 5 областей фотошаблона: подложка, SiO_2 , металлизация, резистивный слой, диэлектрик конденсаторов. Размер СВЧ МИС от 600x300 мкм, размер минимального элемента около 10 мкм, отличается от простых СВЧ МИС сложной топологией, мелкими элементами и наличием катушек индуктивности и конденсаторов;

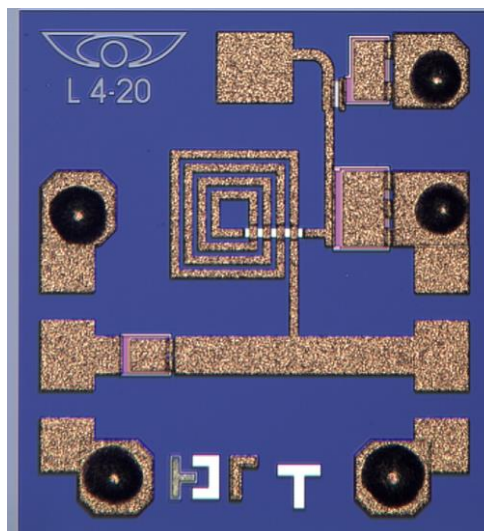


Рисунок 4.3 – Пример микрофотографии СВЧ МИС средней сложности – МИС смещения по постоянному току

– сложные СВЧ МИС (рисунок 4.4). Включают от 4 областей фотошаблона: подложка, SiO_2 , металлизация, резистивный слой и др. Размер СВЧ МИС от 1000x1000 мкм и меньше. В топологии СВЧ МИС присутствуют активные элементы (диоды и транзисторы). Размер минимального элемента менее 3 мкм;

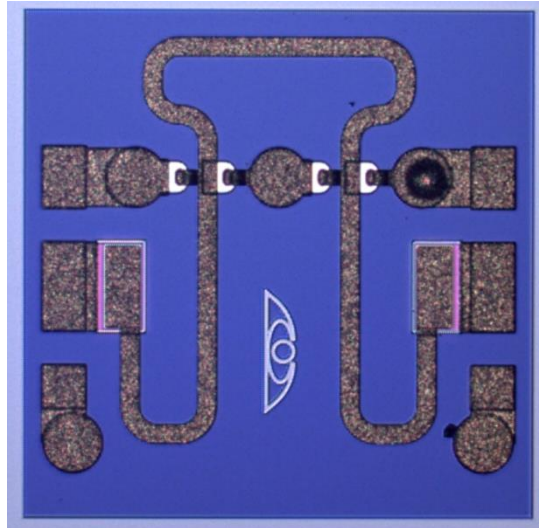


Рисунок 4.4 – Пример микрофотографии сложной СВЧ МИС – МИС ограничителя СВЧ мощности

– СВЧ МИС повышенной сложности (рисунок 4.5). Включает от 5 областей фотошаблона: подложка, SiO_2 , металлизация, резистивный слой, диэлектрик конденсаторов и др. Размер СВЧ МИС от 500x500 мкм и более. В топологии СВЧ МИС присутствуют активные элементы (диоды и транзисторы), мелкие пассивные элементы (катушки индуктивности и конденсаторы), копланарные линии. Размер минимального элемента менее 3 мкм;

– фотонная МИС электрооптического модулятора (рисунок 4.6). Включает от 5 областей фотошаблона: подложка, Si_3N_4 , область оптического канала, область металлизация и др. Размер МИС от 8500x600 мкм и более. В топологии МИС присутствует оптический канал, мелкие элементы металлизации. Размер минимального элемента менее 3 мкм.

Для каждой группы СВЧ МИС производится настройка алгоритма автоматизированного визуального контроля: загружается вспомогательная микрофотография, загружается фотошаблон СВЧ МИС, настраиваются точки совмещения, устанавливается область анализа, обучается классификатор на основе

искусственной нейронной сети и устанавливаются требуемые параметры: порог детектирования дефектов и максимальный допустимый размер дефекта. Далее запускается процесс визуального контроля при выбранных параметрах для указанного набора микрофотографий СВЧ МИС, результатом проведения автоматизированного визуального контроля является карта раскроя пластины с указанием годных и дефектных СВЧ МИС.

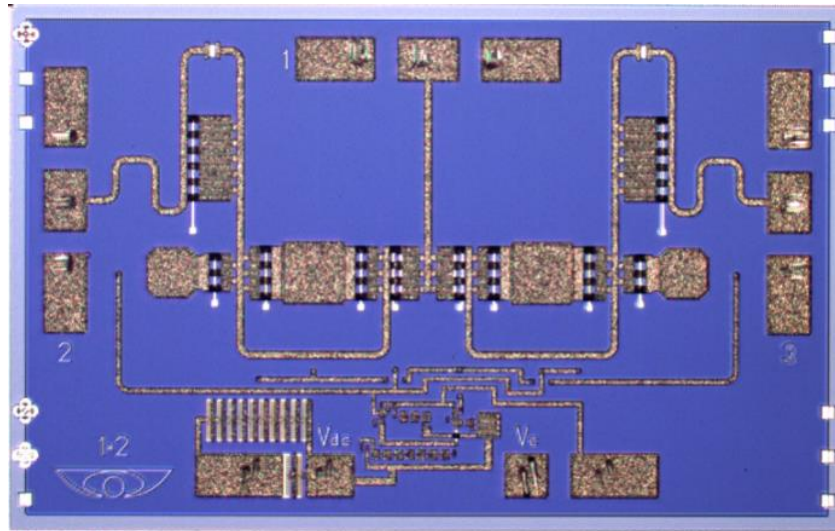


Рисунок 4.5 – Пример микрофотографии СВЧ МИС повышенной сложности – переключатель изготовленный по транзисторной технологии

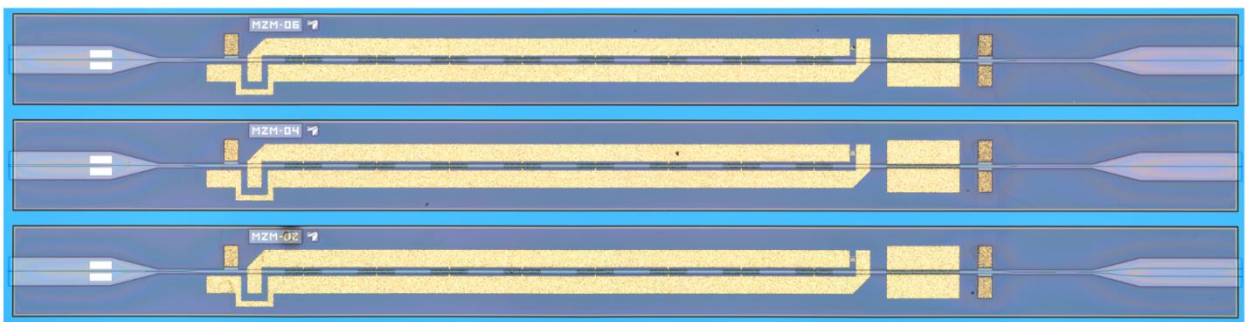


Рисунок 4.6 – Пример микрофотографии МИС повышенной сложности – фотонная МИС электрооптического модулятора

Для определения степени успешности выполнения автоматизированного визуального контроля следует сравнить полученную карту раскроя с картой раскроя ручной отбраковки СВЧ МИС. Фиксируя отличия этих двух карт раскроя, рассчитывается процент общей ошибки алгоритма, ошибка первого и второго рода. За нулевую гипотезу принято утверждение, что данная СВЧ МИС годная, первая

гипотеза – данная СВЧ МИС бракованная. Таким образом ошибка первого рода будет определяться долей годных СВЧ МИС, которые определены алгоритмом автоматизированного контроля как бракованные («ложнобракованные» СВЧ МИС), ошибка второго рода – доля бракованных СВЧ МИС определены годными («ложногодные» СВЧ МИС).

Разделение ошибки первого и второго рода позволит оценить применимость разработанного алгоритма в реальных условиях эксплуатации. Так при наличии нулевой ошибки первого рода (отсутствуют «ложнобракованные» СВЧ МИС), все СВЧ МИС помеченные как бракованные можно не рассматривать в последующих технологических этапах контроля, но следует обратить внимание на годные СВЧ МИС, среди них могут быть бракованные, их может выявить контроль электрофизических параметров. При наличии нулевой ошибки второго рода (отсутствуют «ложногодные» СВЧ МИС) все СВЧ МИС, определённые как годные, отправляются на другие виды контролей, а бракованные СВЧ МИС могут быть подвергнуты ручному визуальному контролю для поиска «ложнобракованных» СВЧ МИС и повышения процента выхода годных. В первом и во втором случаях автоматизированный контроль имеет место быть, т.к. в первом случае увеличивается срок эксплуатации СВЧ зондов, при исключении касания к бракованным СВЧ МИС. Во втором случае существенно упрощается и ускоряется процесс ручного визуального контроля при высоком проценте выхода годных СВЧ МИС, за счёт использования автоматизированного визуального контроля.

Общая ошибка расхождения ручного и автоматизированного визуальных контролей не представляет практической ценности и служит исключительно для оценки степени повторения ручного визуального контроля. Данный тип ошибки включает ошибку первого и второго родов, поэтому нельзя признать группу годных СВЧ МИС полностью годными без ручной отбраковки и нельзя признать группу бракованных СВЧ МИС полностью бракованными, т.к. существенно снизится процент выхода годных СВЧ МИС.

4.2 Программное обеспечение автоматизированного проведения экспериментов

Для ускорения проведения экспериментов была разработана подпрограмма проведения серии автоматизированных экспериментов для программного обеспечения автоматизированного визуального контроля. Подпрограмма встроена в программное обеспечение и позволяет запустить серию описанных выше экспериментов используя текущий настроенный алгоритм для группы микрофотографий СВЧ МИС с переменными параметрами порога детектирования дефекта и максимального допустимого размера дефекта (рисунок 4.7).

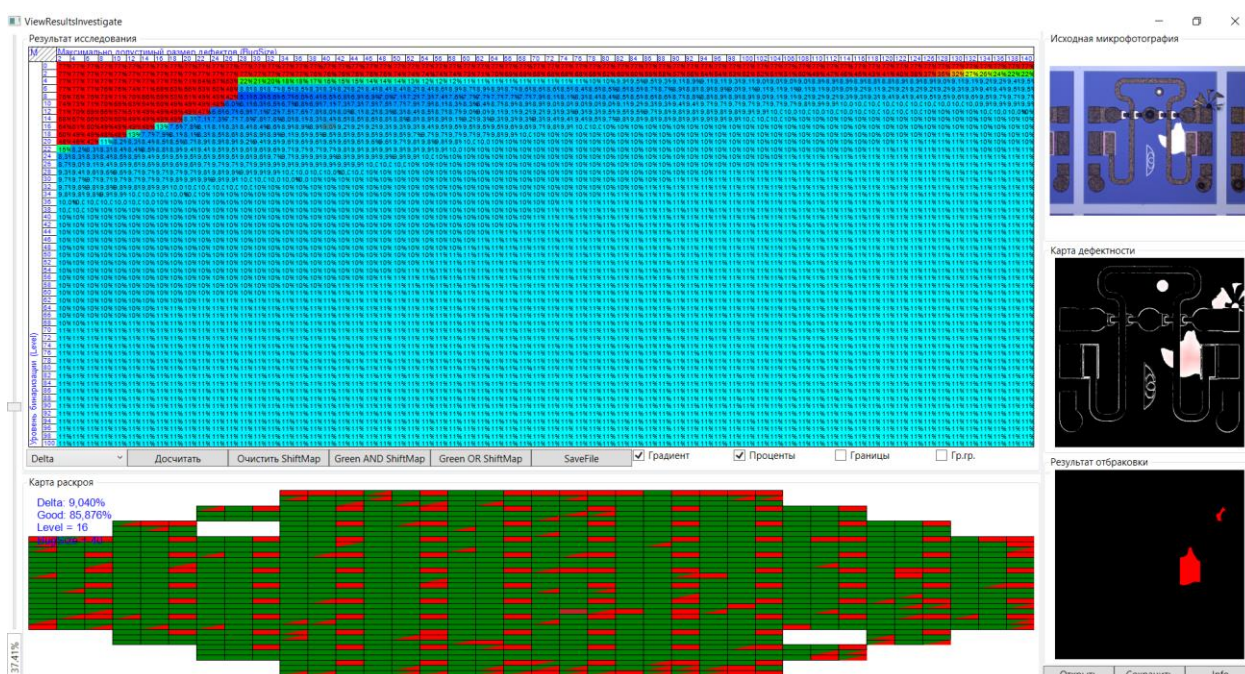


Рисунок 4.7 – Главное окно подпрограммы проведения автоматизированных экспериментов

Подпрограмма разделяет последовательность алгоритма автоматизированного контроля на две части: расчёт всех карт дефектности для всех выбранных микрофотографий СВЧ МИС полупроводниковой пластины и поиск дефектов на всех картах дефектности с учётом значений переменных параметров. Подпрограмма использует модуль создания группы параллельно выполняемых задач в пуле потоков для выполнения первой и второй частей алгоритма автоматизированного визуального контроля. Ресурсы компьютера таким образом

используются максимально, и скорость процесса автоматизированных исследований возрастает.

Результатом работы подпрограммы служит таблица со значениями ошибок: в зависимости от необходимости можно выбрать общую ошибку, ошибку первого или второго рода. Также подпрограмма позволяет обработать результаты экспериментов: определить границы рабочих значений порога детектирования дефектов и максимального допустимого размера дефекта для текущего набора микрофотографий СВЧ МИС. Для каждой ячейки данной таблицы можно просмотреть полученную карту раскрыя пластины и сравнить её с картой раскрыя, полученную в результате ручного визуального контроля. Используя карту раскрыя пластины можно посмотреть каждую микрофотографию СВЧ МИС, её карту дефектности, полученную с использованием настроенного алгоритма автоматизированного визуального контроля, и результат автоматизированной отбраковки: выделенный дефект (при наличии), на основании которого выдвинулось предположение о дефектности СВЧ МИС.

Также подпрограмма собирает информацию о времени работы алгоритма автоматизированного визуального контроля, времени работы подпрограммы автоматизированного проведения экспериментов и конфигурации компьютера, на котором выполнялась подпрограмма (рисунок 4.8). Таким образом можно оценить производительность алгоритма на один исполнительный поток центрального процессора (CPU) и спрогнозировать время выполнения алгоритма на других компьютерах.

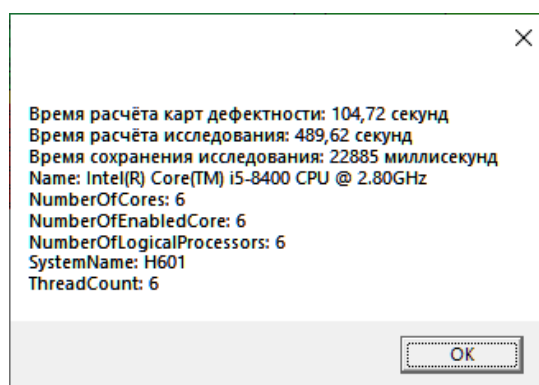


Рисунок 4.8 – Сводная информация о времени выполнения автоматизированных экспериментов и о конфигурации компьютера

4.3 Проведение экспериментов и обсуждение результатов

4.3.1 Самые простые планарные линии СВЧ МИС

Самая простая СВЧ МИС – планарная линия (рисунок 4.9).

Параметры программы исследования:

- разрешение камеры 700x500 пикселей;
- размер СВЧ МИС в пикселях 300x300 пикселей;
- размер СВЧ МИС 500x500 мкм;
- две точки совмещения;
- размер области анализа 350x350 пикселей;
- три распознаваемых областей фотошаблона: подложка, SiO₂, металлизация;
- архитектура нейронной сети: три нейрона входного слоя, 6 нейронов скрытого слоя, 3 нейрона выходного слоя;
- количество микрофотографий в наборе: 428 шт;
- время выполнения ручного визуального контроля около 0,5 часа.

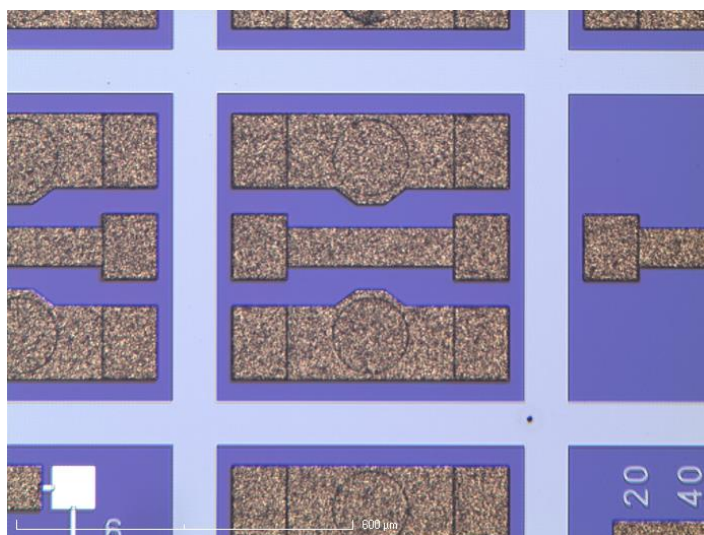


Рисунок 4.9 – Исходная микрофотография планарной линии

Результаты экспериментов приведены на рисунках 4.10-4.12 (подробные результаты исследования приведены в приложении Б.1). Время расчёта карт

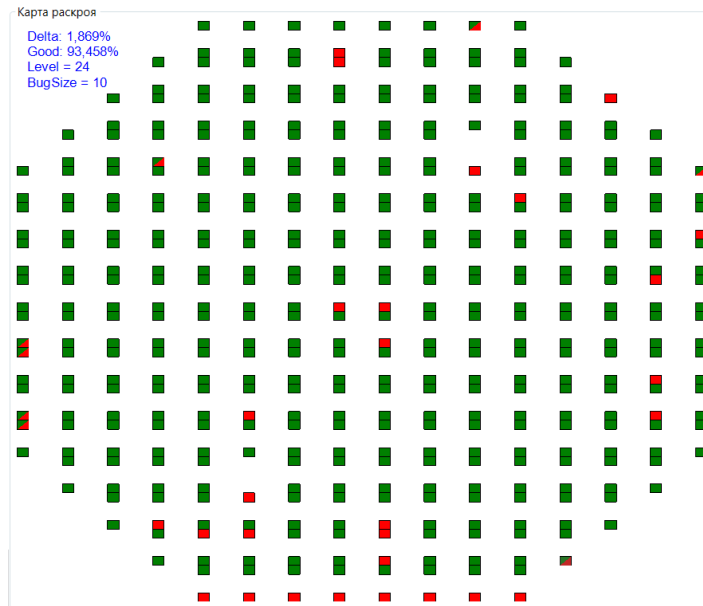


Рисунок 4.13 – Карта раскря, полученная автоматизированным визуальным контролем

Анализируя карту раскря для параметров отбраковки с одной ошибкой второго рода можно прийти к выводу: неправильно отбракованные изделия находятся на краях полупроводниковой пластины, чаще всего в этих областях пластины СВЧ МИС бракуются по электрофизическим параметрам из-за неравномерности формирования структуры (не относится к данному типу СВЧ МИС). Неотбракованы следующие дефекты:

- дефект металлизации (рисунок 4.14 а): недостаточное электрохимическое осаждение – дефект распространяется не на большую часть СВЧ МИС, данная СВЧ МИС может быть признана годной на усмотрение специалиста визуального контроля;
- дефект SiO_2 (рисунок 4.14 б): скол диэлектрика в некритичной области – дефект не критичный, данная СВЧ МИС может быть определена как годной на усмотрение специалиста визуального контроля.

Вывод: алгоритм успешно справился с визуальным контролем самой простой топологией СВЧ МИС. Неправильно отбракованные СВЧ МИС не содержат критические дефекты, нет необходимости наличия дополнительного ручного визуального контроля. Ускорение автоматизированного визуального контроля по сравнению с ручным составило в 14 раз.

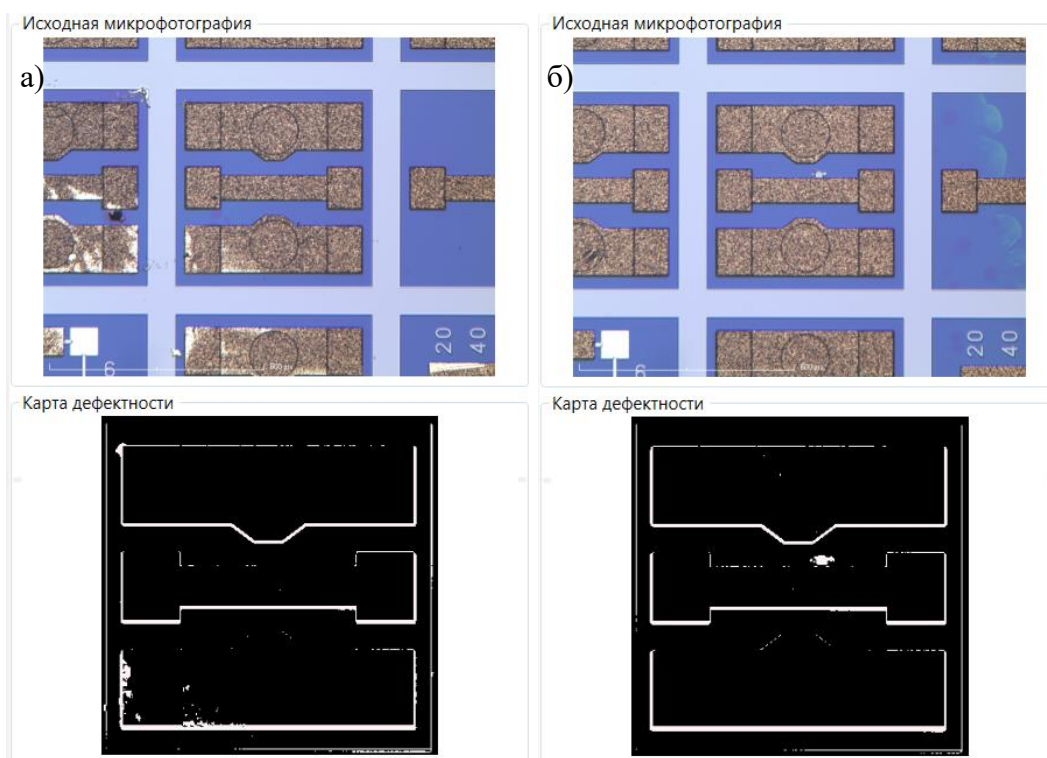


Рисунок 4.14 – Типовые найденные дефекты: а) дефект металлизации, б) дефект SiO₂

4.3.2 Простые СВЧ МИС

Простая СВЧ МИС, аттенюатор (рисунок 4.15).

Параметры программы исследования:

- разрешение камеры 700x500 пикселей;
- размер СВЧ МИС в пикселях 300x300 пикселей;
- размер СВЧ МИС 500x500 мкм;
- две точки совмещения;
- размер области анализа 350x350 пикселей;
- четыре распознаваемых областей фотошаблона: подложка, SiO₂, металлизация, резистивный слой;
- архитектура нейронной сети: три нейрона входного слоя, 10 нейронов скрытого слоя, 4 нейрона выходного слоя;
- количество микрофотографий в наборе: 424 шт;
- время выполнения ручного визуального контроля около 0,5 часа.

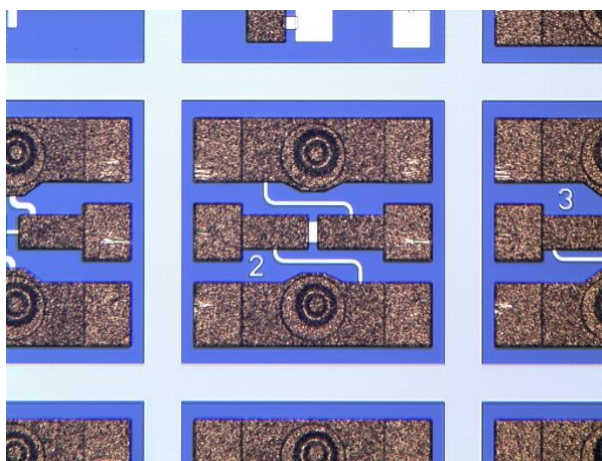


Рисунок 4.15 – Исходная микрофотография аттенюатора 2 дБ

Результаты экспериментов приведены на рисунках 4.16-4.18 (подробные результаты исследования приведены в приложении Б.2). Время расчёта карт дефектности 105 секунд на 6 потоках = 1,5 (сек*поток)/микрофотографию. Время расчёта исследования 490 секунд на 6 потоках.

Наилучший показатель общей ошибки 7,1% = 30 неправильно отбракованных СВЧ МИС из набора. Минимальная ошибка второго рода, при которой не встречается ошибка первого рода 7,1% = 30 бракованных СВЧ МИС определены как годные. Надёжный диапазон параметров, при которых сохраняется минимальная ошибка второго рода не более 8%: порог детектирования от 16 до 30 пикселей, максимальный допустимый размер дефекта от 82 до 138 пикселей. На рисунке 4.19 показана типичная карта раскроя пластины.

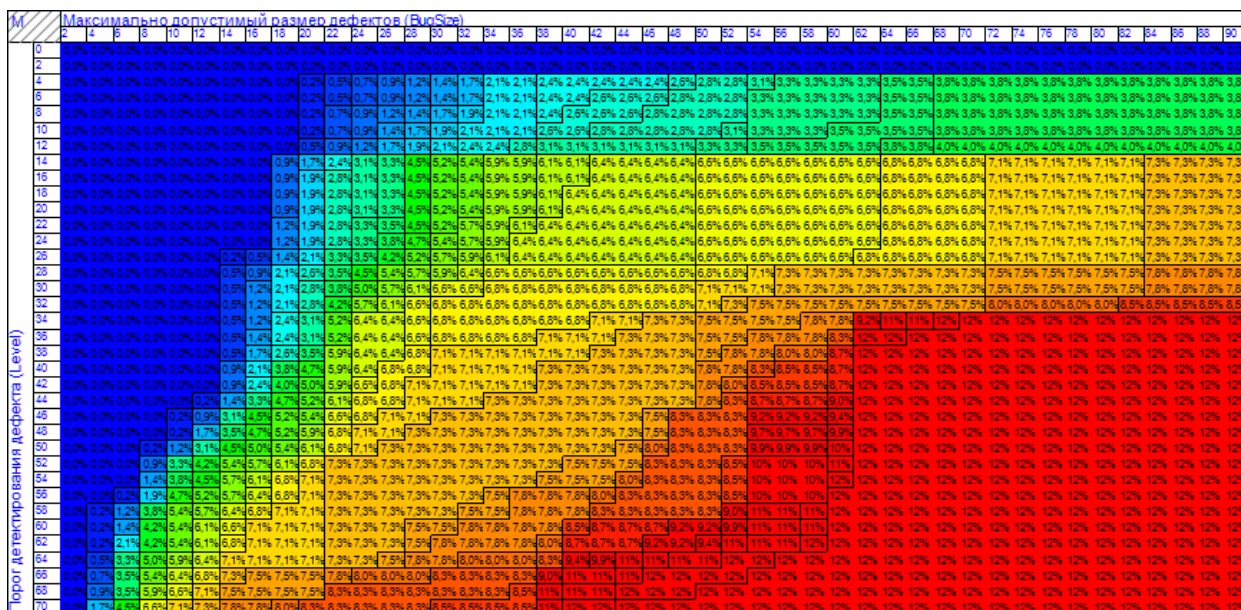


Рисунок 4.18 – Результаты автоматизированного тестирования: ошибка второго рода автоматизированного визуального контроля от ручного для набора микрофотографий аттенюатора 2 дБ

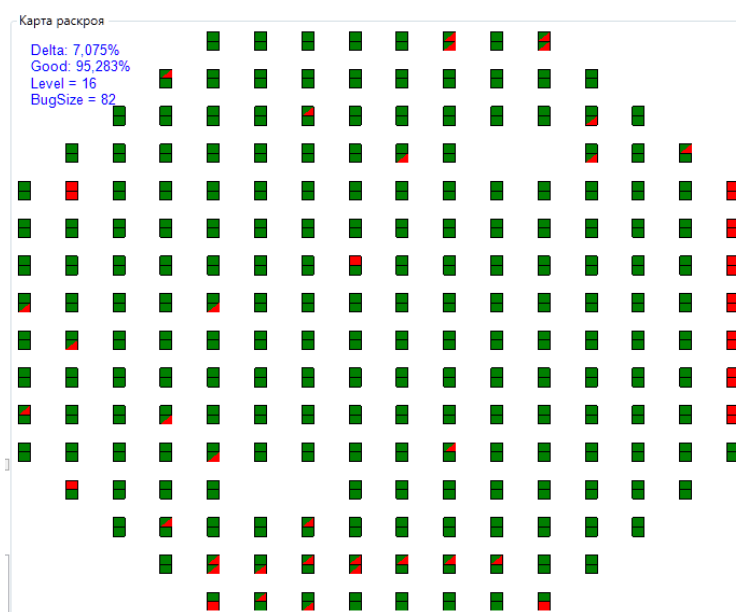


Рисунок 4.19 – Карта раскря, полученная автоматизированным визуальным контролем

Анализируя карту раскря для параметров отбраковки с одной ошибкой второго рода можно прийти к выводу: неправильно отбракованные изделия находятся на краях полупроводниковой пластины, чаще всего в этих областях пластины СВЧ МИС бракуются по электрофизическим параметрам из-за неравномерности формирования структуры. Неправильно отбракованы следующие дефекты:

– дефект SiO_2 (рисунок 4.20 а): скол диэлектрика в критической области – цветовая палитра области резистора близка к цветовой палитре области подложки, ввиду этого классификатор не может корректно разделить данные области и территориально область подложки относит к области резистора. Такой критический дефект выявляется при контроле электрофизических параметрах и не влияет на качество общего контроля;

– загрязнение на углах СВЧ МИС, приводящее к неверному совмещению микрофотографии СВЧ МИС и фотошаблона (рисунок 4.20 б). Данный вид дефекта встречается редко, проблема решается добавлением нескольких вспомогательных точек совмещения.

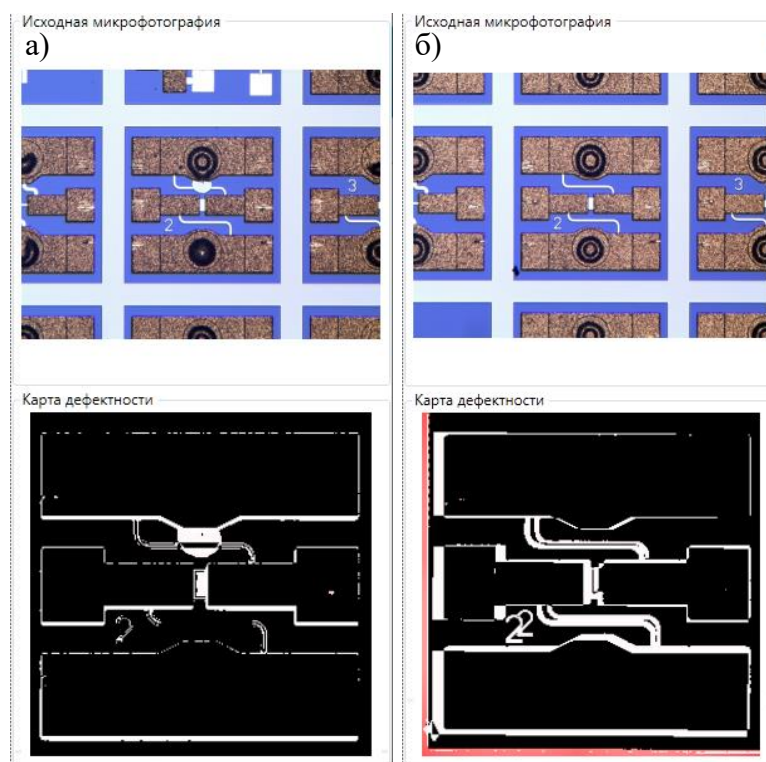


Рисунок 4.20 – Типовые ошибки детектирования дефектов: а) дефект SiO_2 ,
б) загрязнение угла СВЧ МИС

Вывод: алгоритм достаточно успешно справляется с визуальным контролем простой топологией СВЧ МИС. Все пропущенные дефекты критических областей будут выявлены в процессе контроля электрофизических параметров, количество «ложнобракованных» СВЧ МИС мало, чтобы существенно ухудшить процент

выхода годных СВЧ МИС. Ускорение автоматизированного визуального контроля по сравнению с ручным составило в 17 раз.

4.3.3 СВЧ МИС средней сложности

СВЧ МИС средней сложности, МИС смещения по постоянному току (рисунок 4.21).

Параметры программы исследования:

- разрешение камеры 700x550 пикселей;
- размер СВЧ МИС в пикселях 500x550 пикселей;
- размер СВЧ МИС 950x1050 мкм;
- две точки совмещения;
- размер области анализа 500x400 пикселей;
- пять распознаваемых областей фотошаблона: подложка, SiO_2 , металлизация, резистивный слой, Ta_2O_5 ;
- архитектура нейронной сети: три нейрона входного слоя, 10 нейронов скрытого слоя, 5 нейронов выходного слоя;
- количество микрофотографий в наборе: 342 шт;
- время выполнения ручного визуального контроля около 1 часа.

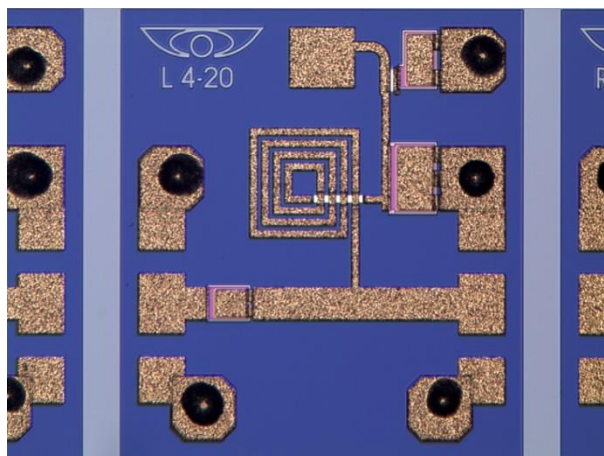


Рисунок 4.21 – Исходная микрофотография МИС смещения по постоянному току

Результаты экспериментов приведены на рисунках 4.22-4.24 (подробные результаты исследования приведены в приложении Б.3). Время расчёта карт

Анализируя карту раскроя для параметров отбраковки с одной ошибкой второго рода можно прийти к выводу: низкая эффективность алгоритма для обработки микрофотографий из текущего набора (23% найденных из всех бракованных СВЧ МИС). Рассматривая неправильно отбракованные СВЧ МИС можно прийти к следующему заключению: в процессе технологического маршрута произошло незначительное «уширение» областей электрохимически осаждённой металлизации при сохранении положения и размеров других областей СВЧ МИС (рисунок 4.26).

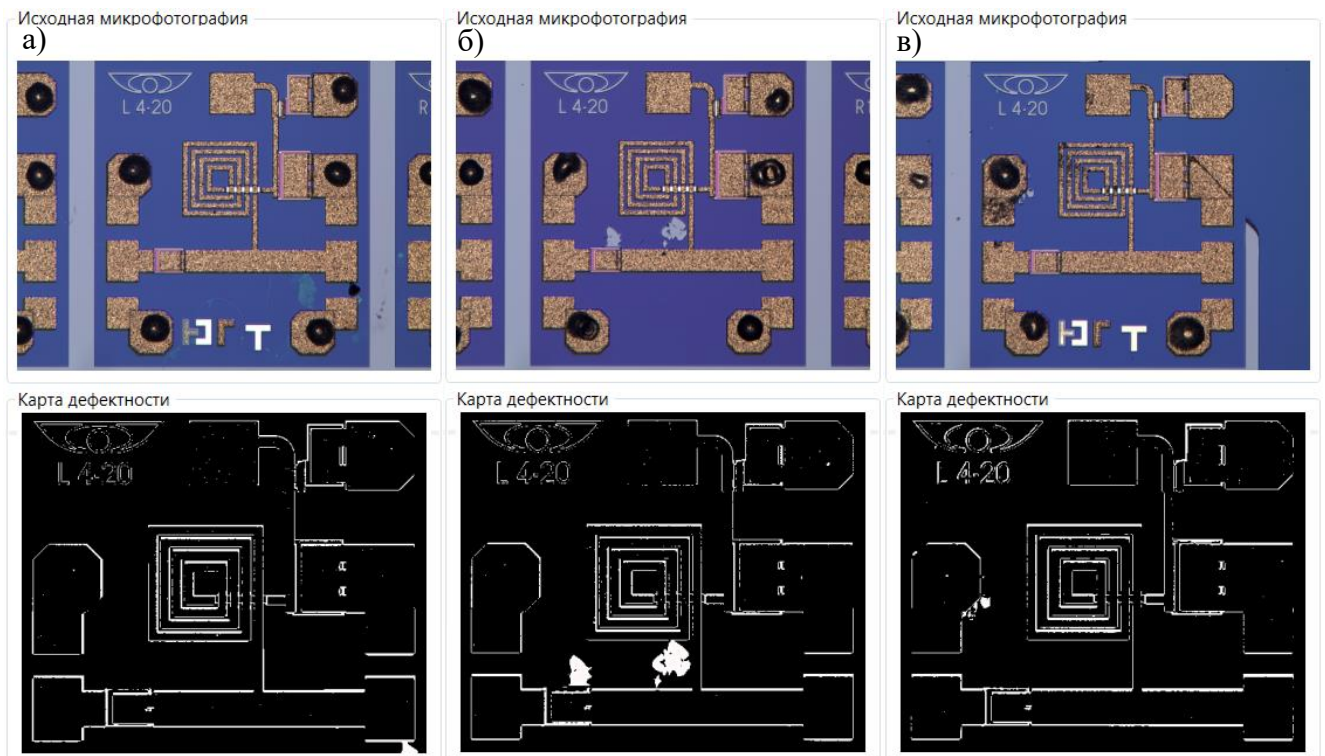


Рисунок 4.26 – Типовые ошибки детектирования дефектов: а) неопределённый дефект SiO_2 («побежалость»), б) неопределённый дефект SiO_2 (скол диэлектрика), в) дефекты металлизации

Оптимальные значения параметров порога детектирования дефекта и максимального допустимого размера дефекта сместились в область подавления «уширения» областей электрохимически осаждённой металлизации. Это в свою очередь понизило чувствительность алгоритма к более мелким дефектам.

Контроль электрофизических параметров отклонений от технического задания данного набора СВЧ МИС не выявил.

Вывод: несмотря на низкую ошибку второго рода 6,7% алгоритм не справляется с визуальным контролем СВЧ МИС, для которых при прохождении технологического маршрута наблюдается допустимое уширение металлизации. Ускорение автоматизированного визуального контроля по сравнению с ручным составило в 28 раз.

4.3.4 Сложные СВЧ МИС

Сложная СВЧ МИС (ограничитель мощности) выполнена по pin-технологии, включает активные элементы в виде диодов и пассивные элементы в виде конденсаторы (рисунок 4.27).

Параметры программы исследования:

- разрешение камеры 1200x800 пикселей;
- размер СВЧ МИС в пикселях 770x770 пикселей;
- размер СВЧ МИС 1,2x1,2 мм;
- две точки совмещения;
- размер области анализа 770x770 пикселей;
- пять распознаваемых областей фотошаблона: подложка, SiO₂, металлизация, область диодов, выполненная в виде металлизации без электрохимического осаждения, область диэлектрика конденсаторов из Ta₂O₅;
- архитектура нейронной сети: три нейрона входного слоя, 10 нейронов скрытого слоя, 5 нейронов выходного слоя;
- количество микрофотографий в наборе: 1062 шт;
- время выполнения ручного визуального контроля около 2 часов.

Результаты экспериментов приведены на рисунках 4.28-4.30. Время расчёта карт дефектности 1740 секунд на 6 потоках = 9,8 (сек*поток)/микрофотографию. Время расчёта исследования 2880 секунд на 6 потоках.

Максимально допустимый размер дефектов, В/См		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00		
0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00		

Рисунок 4.30 – Результаты автоматизированного тестирования: ошибка второго рода автоматизированного визуального контроля от ручного для набора микрофотографий ограничителя мощности

Наилучший показатель общей ошибки $5,1\% = 54$ неправильно отбракованных СВЧ МИС из набора. Проблема данного исследования состоит в том, что в установленном диапазоне переменных параметров порога детектирования дефекта и максимального допустимого размера дефекта отсутствует эксперимент с нулевой ошибкой первого рода из-за плохого совмещения фотошаблона по двум точкам совмещения (рисунок 4.29). Данная проблема возникает из-за наличия загрязнения или дефекта в области точки совмещения (рисунок 4.31).



Рисунок 4.31 – Неудовлетворительное совмещение микрофотографии и фотошаблона из-за значительного загрязнения места поиска точки совмещения (места расположения точек совмещения выделены на микрофотографии красными квадратами)

Если принять допустимость ошибки первого рода $0,2\% = 2$ годных чипа признать бракованными (осознано снизить выход СВЧ МИС на $0,2\%$), можно получить ошибку детектирования $6,1\% = 65$ неправильно отбракованных СВЧ МИС. Если исключить 2 чипа ошибки первого рода, следует, что 63 бракованных СВЧ МИС признаны годными.

При использовании пяти точек совмещения и метода коррекции набора точек совмещения возникшая проблема плохого совмещения микрофотографии и фотошаблона устраняется. Результаты экспериментов приведены на рисунках 4.32-4.34 (подробные результаты исследования приведены в приложении Б.4). Время расчёта карт дефектности 1920 секунд на 6 потоках = 11 (сек*поток)/микрофотографию. Время расчёта исследования 3200 секунд на 6 потоках.

M	Максимально допустимый размер дефектов (BugSize)																																				
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70		
0	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%
2	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%
4	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%
6	78%	78%	78%	77%	76%	75%	73%	69%	64%	59%	54%	52%	47%	41%	35%	21%	19%	19%	18%	18%	17%	16%	16%	15%	15%	15%	14%	14%	14%	13%	12%	11%	9,9%	10%	10%	10%	
8	77%	77%	76%	75%	73%	71%	66%	61%	55%	53%	51%	51%	49%	46%	43%	33%	31%	31%	30%	29%	28%	27%	26%	25%	24%	23%	22%	21%	20%	19%	18%	17%	16%	15%	14%	13%	
10	75%	74%	72%	71%	69%	64%	57%	52%	51%	51%	50%	49%	47%	45%	43%	33%	31%	31%	30%	29%	28%	27%	26%	25%	24%	23%	22%	21%	20%	19%	18%	17%	16%	15%	14%	13%	
12	72%	71%	70%	67%	64%	60%	51%	51%	50%	50%	48%	46%	44%	42%	40%	30%	28%	28%	27%	26%	25%	24%	23%	22%	21%	20%	19%	18%	17%	16%	15%	14%	13%	12%	11%	9,9%	
14	70%	68%	68%	62%	61%	51%	50%	50%	50%	48%	46%	44%	42%	40%	38%	28%	26%	26%	25%	24%	23%	22%	21%	20%	19%	18%	17%	16%	15%	14%	13%	12%	11%	9,9%	10%	10%	
16	66%	63%	61%	61%	61%	60%	60%	60%	58%	56%	54%	52%	50%	48%	46%	36%	34%	34%	33%	32%	31%	30%	29%	28%	27%	26%	25%	24%	23%	22%	21%	20%	19%	18%	17%	16%	
18	61%	61%	61%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
20	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
22	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
24	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
26	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
28	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
30	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
32	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
34	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
36	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
38	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
40	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
42	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
44	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
46	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
48	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
50	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
52	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
54	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
56	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
58	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	
60	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	48%	48%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	30%	

Рисунок 4.32 – Результаты автоматизированного тестирования: Общая ошибка расхождения с ручным визуальным контролем для набора микрофотографий ограничителя мощности

M	Максимально допустимый размер дефектов (BugSize)																																					
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70			
0	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%
2	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%
4	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	77%	74%	67%	59%	42%	19%	17%	16%	15%	15%	14%	14%	13%	13%	12%	12%	11%	11%	10%	10%	9,4%	8,2%	6,8%	5,4%	5,3%	5,2%	5,1%		
6	78%	78%	78%	77%	76%	75%	73%	69%	64%	59%	54%	51%	34%	7,3%	7,2%	7,1%	7,0%	6,8%	6,6%	6,2%	5,9%	5,9%	5,7%	5,5%	5,4%	5,1%	4,3%	3,1%	2,9%	2,9%	2,8%	2,6%	2,4%	2,3%				
8	77%	77%	76%	75%	72%	70%	66%	60%	54%	51%	49%	49%	29%	2,9%	2,8%	2,8%	2,7%	2,6%	2,6%	2,6%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,4%	2,3%	2,1%	1,9%	1,9%	1,9%	1,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
10	75%	73%	72%	70%	69%	63%	55%	50%	49%	49%	48%	47%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	1,8%	0,7%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,5%	
12	71%	71%	69%	66%	66%	51%	49%	49%	48%	48%	48%	2,4%	2,4%	2,4%	2,4%	2,3%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	1,5%	0,4%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	
14	69%	67%	66%	60%	49%	48%	47%	46%	3,8%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	1,9%	1,9%	1,9%	1,9%	1,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
16	64%	60%	48%	48%	47%	47%	46%	7,6%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	1,9%	1,9%	1,9%	1,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
18	48%	47%	47%	46%	46%	8,3%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	1,9%	1,9%	1,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
20	46%	46%	41%	6,4%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	1,9%	1,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
22	15%	2,4%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	1,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
24	2,3%	2,1%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	1,3%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
26	2,2%	2,1%	2,0%	2,0%	2,0%	1,3%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
28	2,2%	2,1%	2,0%	2,0%	1,3%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
30	2,1%	2,1%	1,3%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
32	1,4%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
34	0,2%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
36	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
38	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
40	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
42	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
44	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
46	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
48	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
50	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
52	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
54	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
56	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
58	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
60	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	

Рисунок 4.33 – Результаты автоматизированного тестирования: ошибка первого рода автоматизированного визуального контроля от ручного для набора микрофотографий ограничителя мощности

M	Максимально допустимый размер дефектов (BugSize)																																				
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70		
0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	0,5%	1,3%	2,1%	2,3%	2,6%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,6%	2,6%	3,0%	3,3%	3,4%	3,6%	3,7%	4,0%	4,1%	4,2%	4,6%	4,6%	4,8%	5,1%	5,3%			
6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,3%	0,6%	0,7%	1,0%	1,1%	2,2%	3,5%	3,7%	3,9%	3,9%	4,1%	4,1%	4,2%	4,4%	4,4%	4,6%	4,9%	5,0%	5,0%	5,4%	5,4%	5,7%	6,0%	6,3%	6,4%	6,4%	6,4%			
8	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	0,5%	0,6%	0,8%	1,4%	1,5%	1,7%	1,8%	1,9%	3,3%	4,5%	4,6%	4,9%	5,0%	5,2%	5,4%	5,5%	5,8%	5,9%	6,0%	6,1%	6,2%	6,4%	6,5%	6,8%	7,0%	7,0%	7,0%	7,1%	7,1%	7,1%	7,2%		
10	0,0%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	1,0%	1,5%	1,9%	2,1%	2,1%	2,1%	2,2%	5,1%	5,4%	5,5%	5,8%	5,8%	5,9%	6,0%	6,2%	6,3%	6,4%	6,6%	6,8%	7,2%	7,2%	7,2%	7,4%	7,6%	7,6%	7,6%	7,8%	8,1%	8,1%	8,1%		
12	0,6%	0,7%	1,0%	1,7%	2,1%	2,3%	2,3%	2,3%	3,5%	5,8%	6,0%	6,3%	6,3%	6,4%	6,8%	7,0%	7,1%	7,3%	7,6%	7,6%	7,8%	7,8%	8,0%	8,1%	8,3%	8,3%	8,6%	8,8%	8,9%	9,0%	9,0%	9,1%	9,1%	9,2			

которой не встречается ошибка первого рода $8,4\% = 84$ бракованных СВЧ МИС определены как годные. Надёжный диапазон параметров, при которых сохраняется минимальная ошибка второго рода более 10% : порог детектирования от 16 до 24 пикселей, максимальный допустимый размер дефекта от 38 до 52 пикселей. При увеличении ошибки второго рода до $10,5\%$ надёжный диапазон параметров расширяется значительно: порог детектирования от 16 до 42 пикселей, максимальный допустимый размер дефекта от 38 до 96 пикселей. На рисунке 4.35 показана типичная карта раскроя пластины.

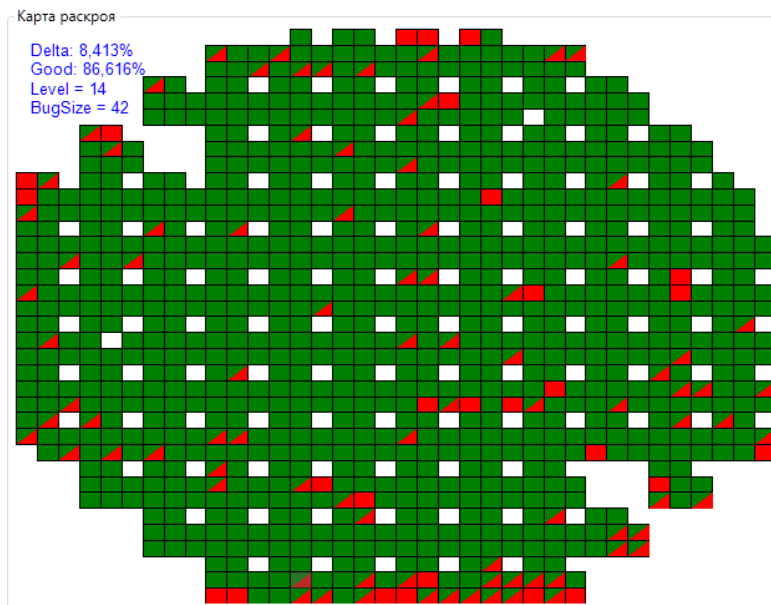


Рисунок 4.35 – Карта раскроя, полученная автоматизированным визуальным контролем

Анализируя карту раскроя для параметров отбраковки с одной ошибкой второго рода можно прийти к выводу: неправильно отбракованные изделия находятся на краю полупроводниковой пластины, чаще всего в этих областях пластины СВЧ МИС бракуются по электрофизическим параметрам из-за неравномерности формирования структуры. Неправильно отбракованы следующие дефекты:

- загрязнение на углах СВЧ МИС, приводящее к неверному совмещению микрофотографии СВЧ МИС и фотошаблона (рисунок 4.31). Данный вид дефект встречается редко, проблема решается добавлением нескольких вспомогательных точек совмещения;

- загрязнение вблизи элементов топологии СВЧ МИС (рисунок 4.36 а), не является критическим дефектом, но может повлиять на надёжность СВЧ МИС, считается браком на усмотрение оператора визуального контроля;
- дефект металлизации вдали от элементов топологии (рисунок 4.36 б) не является критическим дефектом, считается браком на усмотрение оператора визуального контроля;
- дефект SiO_2 (рисунок 4.36 в): вздутие диэлектрика в критической области
- по цвету данный дефект не отличается от цвета области SiO_2 , трудно детектировать, требуется тщательный визуальный контроль.

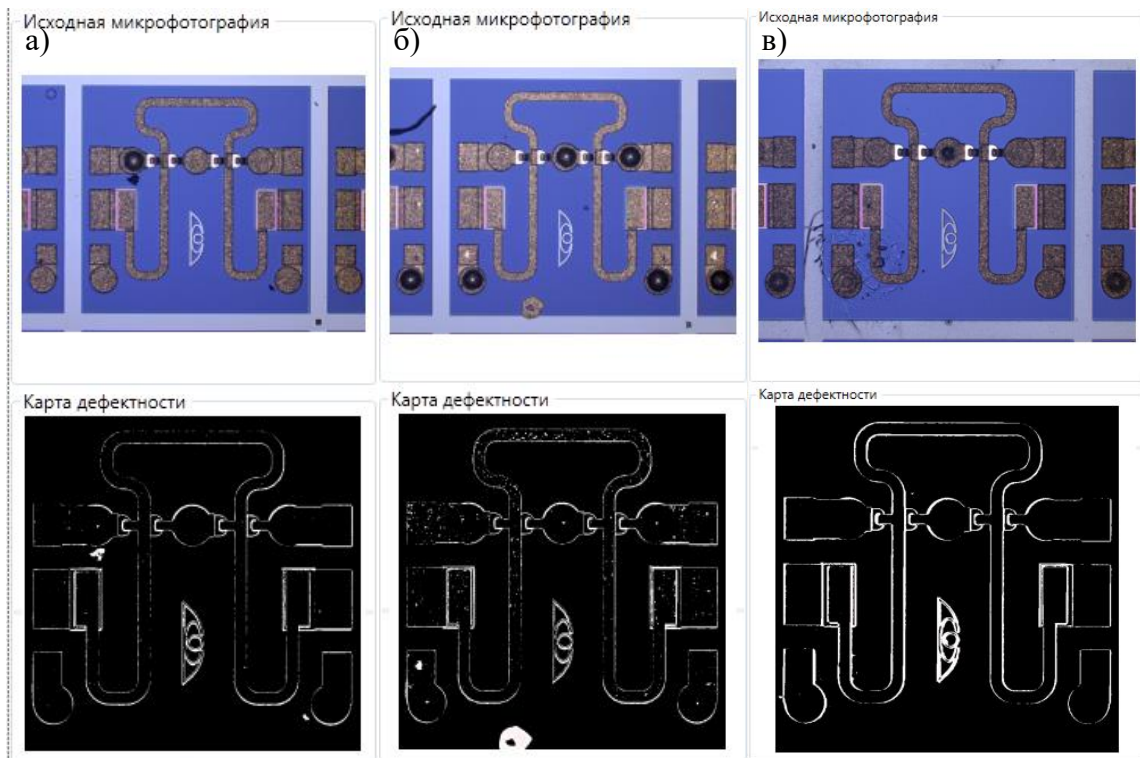


Рисунок 4.36 – Типовые ошибки детектирования дефектов: а) незначительное загрязнение вблизи области активного элемента, б) дефект металлизации вдали от активных элементов, в) дефект SiO_2

Вывод: алгоритм достаточно успешно справляется с визуальным контролем с топологией СВЧ МИС повышенной сложности. Повторяемость ручного визуального контроля автоматизированным достигает 94%. Ускорение автоматизированного визуального контроля по сравнению с ручным составило в 3 раза.

4.3.5 СВЧ МИС высокой сложности

Выбранные СВЧ МИС высокой сложности (переключатель на транзисторной технологии) (рисунок 4.37) содержат множество мелких элементов области МИС, отвечающие за управление и питание – драйвер, множество активных элементов в виде транзисторов. Для упрощения задачи для алгоритма автоматизированного визуального контроля задача браковки по внешнему виду может быть поделена на две части: браковка общего вида СВЧ МИС без драйвера и браковка СВЧ МИС по микрофотографии драйвера на большом увеличении. Браковка по общему виду без учёта драйвера сводится к задаче контроля СВЧ МИС средней сложности. Рассмотрим задачу браковки МИС по микрофотографии драйвера.

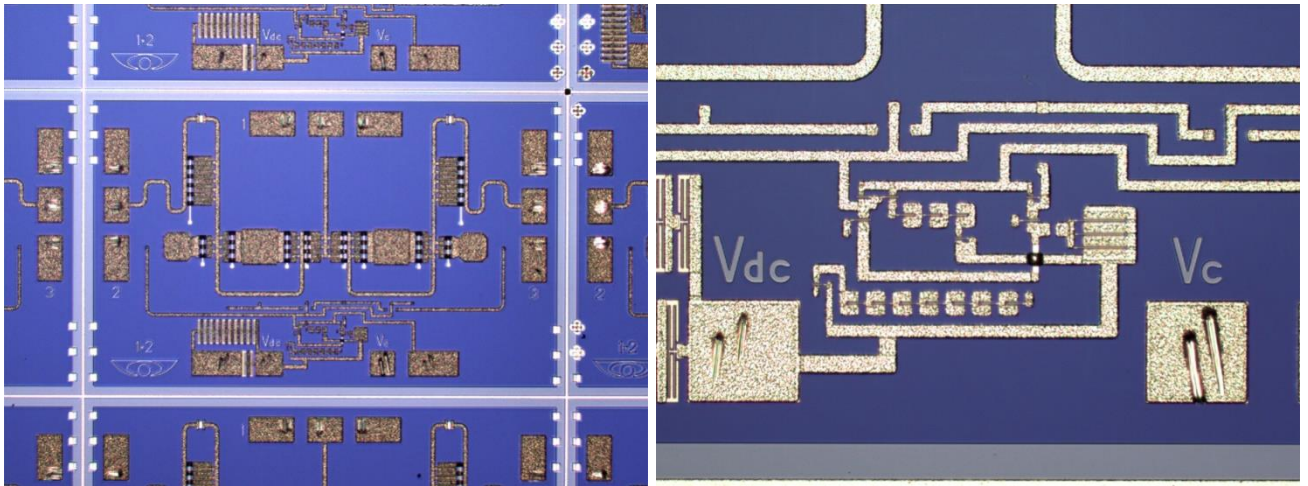


Рисунок 4.37 – Исходная микрофотография переключателя на транзисторной технологии (слева) и исходная микрофотография драйвера переключателя (справа)

Параметры программы исследования:

- разрешение камеры 950x700 пикселей;
- размер области драйвера СВЧ МИС 314x180 мкм;
- две точки совмещения;
- размер области анализа 780x420 пикселей;
- три распознаваемых областей фотошаблона: подложка, SiO_2 , металлизация;
- архитектура нейронной сети: три нейрона входного слоя, 10 нейронов скрытого слоя, 3 нейрона выходного слоя;

M	Максимально допустимый размер дефектов (PugSize)																																											
	2	4	5	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70									
0	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%							
2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%						
4	0.0%	0.2%	0.6%	1.0%	1.2%	1.7%	2.3%	2.9%	3.5%	4.1%	4.5%	5.2%	5.8%	6.2%	6.2%	6.4%	6.8%	7.0%	7.0%	7.2%	7.6%	7.9%	8.1%	8.1%	8.1%	8.1%	8.3%	8.5%	8.7%	9.1%	9.1%	9.1%	9.1%	9.1%	9.1%	9.1%	9.1%	9.1%	9.1%					
6	0.0%	2.1%	2.9%	3.7%	3.9%	4.3%	5.0%	5.6%	6.2%	6.2%	6.6%	6.8%	7.0%	7.0%	7.4%	7.6%	7.6%	7.9%	7.9%	7.9%	8.1%	8.3%	8.3%	8.5%	8.5%	8.5%	8.7%	8.7%	8.9%	9.1%	9.1%	9.3%	9.3%	9.3%	9.3%	9.3%	9.3%	9.3%	9.3%					
8	1.0%	4.5%	4.8%	4.8%	5.0%	5.8%	6.8%	6.8%	7.2%	7.2%	7.4%	7.6%	8.1%	8.3%	8.3%	8.5%	8.5%	8.5%	8.5%	8.9%	8.9%	8.9%	9.3%	9.3%	9.3%	9.5%	9.5%	9.5%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%				
10	1.4%	5.4%	5.4%	5.0%	7.0%	7.2%	7.2%	7.6%	7.6%	8.1%	8.3%	8.5%	8.7%	8.7%	8.7%	8.7%	8.7%	8.7%	9.1%	9.3%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.9%				
12	1.9%	6.8%	6.4%	7.4%	7.6%	7.9%	8.1%	8.1%	8.5%	8.5%	8.7%	8.7%	9.1%	9.1%	9.1%	9.1%	9.1%	9.3%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%				
14	2.9%	8.1%	8.1%	8.3%	8.5%	8.5%	8.7%	8.7%	8.9%	9.1%	9.3%	9.3%	9.3%	9.5%	9.5%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%					
16	3.1%	8.7%	8.9%	8.9%	9.1%	9.3%	9.3%	9.3%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%	11%			
18	3.7%	8.9%	9.3%	9.5%	9.5%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%			
20	9.5%	9.5%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%			
22	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.9%	9.9%	9.9%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%		
24	9.7%	9.7%	9.7%	9.7%	9.9%	9.9%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%		
26	9.7%	9.7%	9.7%	9.9%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%		
28	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%		
30	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	
32	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	
34	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	
36	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	
38	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	
40	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	
42	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	
44	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%
46	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%
48	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%
50	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%

Рисунок 4.40 – Результаты автоматизированного тестирования: ошибка второго рода автоматизированного визуального контроля от ручного для набора микрофотографий драйвера переключателя

Наилучший показатель общей ошибки $7,2\% = 35$ неправильно отбракованных СВЧ МИС из набора. Минимальная ошибка второго рода, при которой не встречается ошибка первого рода $7,2\% = 35$ бракованных СВЧ МИС определены как годные. Надёжный диапазон параметров, при которых сохраняется минимальная ошибка второго рода более 10%: порог детектирования от 10 до 24 пикселей, максимальный допустимый размер дефекта от 12 до 50 пикселей. На рисунке 4.41 показана типичная карта раскрыя пластины.

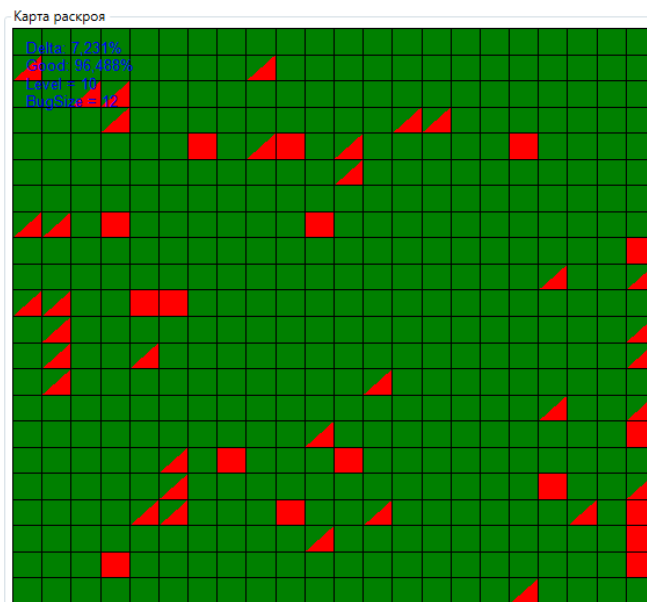


Рисунок 4.41 – Карта раскрыя, полученная автоматизированным визуальным контролем

Анализируя полученные результаты, а именно карты дефектности микрофотографий драйвера СВЧ МИС, можно сделать заключение о нечётком соответствии топологических размеров элементов СВЧ МИС с фотошаблоном (рисунок 4.42).

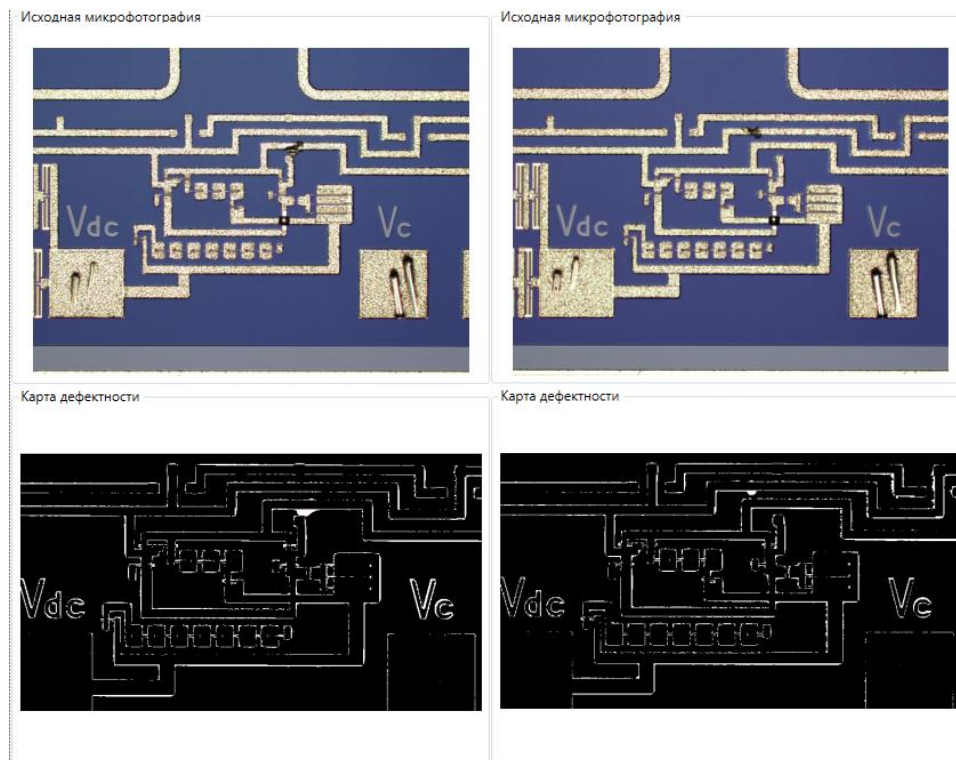


Рисунок 4.42 – Типовые ошибки детектирования дефектов

Нечёткое соответствии топологических размеров элементов СВЧ МИС с фотошаблоном является особенностью технологии изготовления СВЧ МИС и учитывается конструктором МИС на этапе разработки фотошаблона для получения требуемой топологии. Из-за такого подхода точно настроить предложенный алгоритм автоматизированного визуального контроля не представляется возможным, максимально достигнутый результат: 7,2% ошибка автоматизированного визуального контроля от ручного. Однако при таком достигнутом результате отсутствует ошибка первого рода, а, следовательно, все отбракованные СВЧ МИС являются браком по внешнему виду.

Вывод: алгоритм удовлетворительно справляется с визуальным контролем драйвера СВЧ МИС высокой сложности. Все пропущенные дефекты будут выявлены в процессе контроля электрофизических параметров. Ускорение

автоматизированного визуального контроля по сравнению с ручным составило в 8 раз.

4.3.6 Фотонные МИС электрооптического модулятора

В отдельную группу были вынесены фотонные МИС электрооптического модулятора (рисунок 4.43). МИС разработаны в ЛИОР каф. ФЭ, ТУСУР [105]. К особенностям данных МИС можно отнести высокое соотношение сторон до 14:1 и сверхвысокое разрешение микрофотографии.

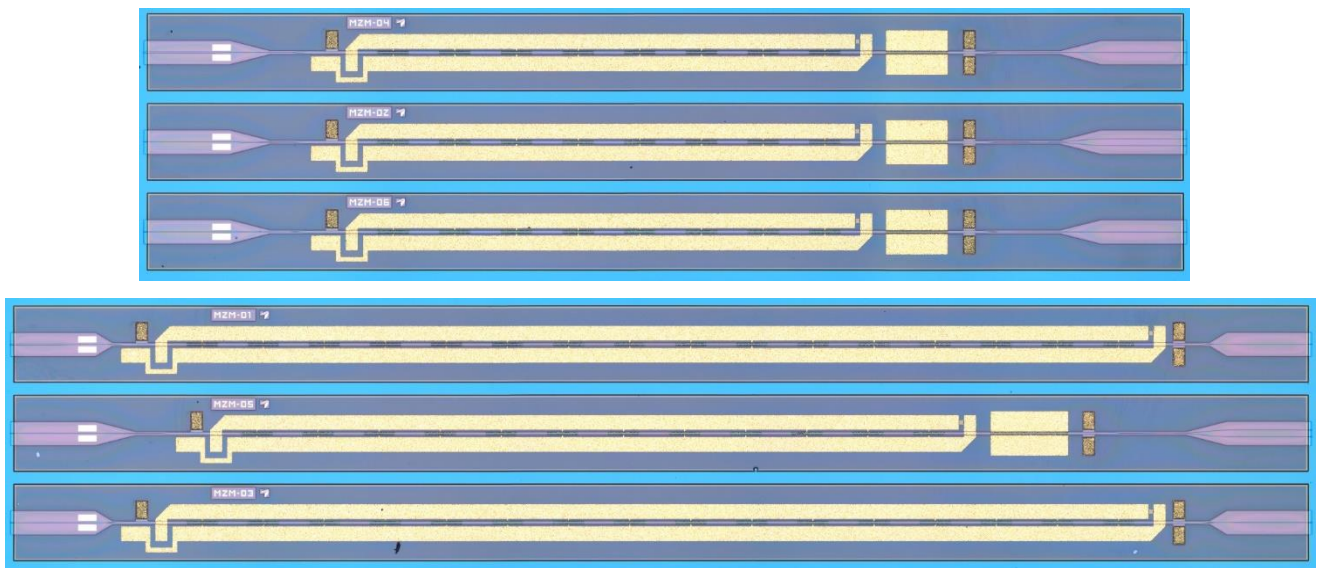


Рисунок 4.43 – Исходные микрофотографии фотонных МИС электрооптического модулятора различных топологий

Параметры программы исследования:

- разрешение камеры до 9700x700 пикселей;
- размер МИС в пикселях до 9500x550 пикселей;
- размер СВЧ МИС до 10,0x0,6 мм;
- три точки совмещения;
- размер области анализа 7000x500 пикселей;
- шесть распознаваемых областей фотошаблона: подложка, Si_3N_4 , металлизация, металлизация без электрохимического осаждения, область оптического канала, область ВСВ (защитный диэлектрический слой);

вычислительных потоков, при наличии производительного оборудования можно превзойти скорость визуального контроля без снижения его качества.

Выводы

Разработанный алгоритм автоматизированного визуального контроля обладает высокой повторяемостью результатов ручного визуального контроля от 88% (ошибка второго рода 12%) до 98% (ошибка второго рода от 1,9%).

Программное обеспечение позволяет на существенно ускорить ручной визуальный контроль от 4 до 28 раз.

Исследование разработанного алгоритма автоматизированного визуального контроля показало его хорошую стабильность в диапазоне значений переменных параметров порога детектирования дефекта и максимального допустимого размера дефекта. Таким образом не требуется высокая точность подбора данных параметров для повторения ручного контроля с точностью до 90%.

Усложнение задачи автоматизированного визуального контроля в виде увеличения разрешения микрофотографии влечёт к увеличению затрачиваемого времени, однако реализация алгоритма, как было показано в разделе 2.4, имеет «бутылочные горла» на нескольких шагах, оптимизация которых и использование более производительного оборудования позволит превзойти скорость визуального контроля на любых топологиях и разрешениях микрофотографий МИС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был разработан программно-аппаратный комплекс автоматизированного визуального контроля МИС.

Программная часть комплекса основана на оригинальном алгоритме обработки микрофотографии МИС с использованием технологий компьютерного зрения и искусственных нейронных сетей. Алгоритм сравнивает микрофотографию МИС и фотошаблон, который используется для создания данной МИС, методом вычисления пиксельного расстояния каждого пикселя микрофотографии до области его принадлежности в фотошаблоне. Разработанный алгоритм, отличающийся от существующих методом сравнения с фотошаблоном, позволяет с высокой эффективностью проводить визуальный контроль. Повторяемость автоматизированного визуального контроля относительно ручного достигает 98%.

Разработан системный подход выбора группы точек совмещения алгоритма автоматизированного визуального контроля, который использует критерий повторяемости геометрического расположения на микрофотографии МИС и фотошаблоне. Данный метод позволяет исключить точки совмещения, на участках которых расположен дефект и их координаты вычислены неверно.

Скорость работы алгоритма автоматизированного контроля прямо пропорциональна количеству вычислительных потоков персонального компьютера, на котором выполняется данный алгоритм и достигает ускорения визуального контроля от 4 до 28 раз на 6 вычислительных потоках по сравнению с ручным в зависимости от сложности топологии контролируемой МИС.

Разработанное программное обеспечение на основе алгоритма автоматизированного визуального контроля обладает модульной структурой для удобного расширения данного программного обеспечения. Так же программное обеспечение может быть подключено в измерительную программу, разработанную в АО «НИИПП» для осуществления «потокового» визуального контроля на существующих станциях. Также в дополнение к основному функционалу

программное обеспечение позволяет проводить исследования визуального контроля, которые помогают определить оптимальные критерии вычисления дефектности: порог детектирования дефекта и максимальный допустимый размер дефекта. В качестве вспомогательных величин используются общая ошибка расхождения ручного и автоматизированного визуальных контролей, ошибка первого (доля годных МИС определены как бракованные – «ложнобракованные» МИС) и второго (доля бракованных МИС определены как годные – «ложногодные» МИС) рода.

Разработана станция автоматизированного визуального контроля и полуавтоматическая зондовая станция, которая может выполнять функцию станции визуального контроля за счёт использование качественной оптической системы. Разработанные станции в совокупности с программным обеспечением не уступают по характеристикам зарубежным аналогам, а по некоторым даже превосходят их.

Разработана специализированная аппаратно-программная система температурной компенсации, отличающаяся гибкостью программной настройки и позволяющая исключить влияние эффекта температурного расширения механических узлов под воздействием внешних факторов.

На основе разработанной полуавтоматической зондовой станции разработан программно-аппаратный комплекс измерения электрофизических параметров МИС на неразделённых полупроводниковых пластинах.

Разработанные полуавтоматическая зондовая станция и программное обеспечение автоматизированного визуального контроля используются на предприятии АО «НИИПП».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширяев Б.В. Алгоритм автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем с использованием искусственных нейронных сетей / Б.В. Ширяев, А.Ю. Ющенко, А.В. Безрук // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 72-76.
2. Шурыгин Ю.А. Изготовление электрооптических модуляторов на основе InP для ВОЛС и проведение автоматизированного визуального контроля их поверхности на предмет наличия дефектов / Ю.А. Шурыгин, С.В. Ишуткин, Б.В. Ширяев, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 3.
3. Ширяев Б.В. Повышение эффективности алгоритма автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем / Б.В. Ширяев, Д.П. Аргунов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2022. – № 4. – С. 56-62.
4. Shiryaev B.V. Algorithm for automated visual inspection of MMIC using a classifier based on neural networks [Электронный ресурс] / B.V. Shiryaev, A.V. Bezruk, D.P. Argunov, A.Yu. Yushenko // ITM Web of Conferences 30, 04012 (2019). – Режим доступа: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_04012.pdf (дата обращения: 22.09.2021).
5. Argunov D.P. Design ICCreatech semiconductor wafer accounting and probe measurement automatization software [Электронный ресурс] / D.P. Argunov, B.V. Shiryaev, A.V. Bezruk, A.Yu. Yushenko // ITM Web of Conferences 30, 04012 (2019). – Режим доступа: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_04009.pdf (дата обращения: 22.09.2021).
6. Ширяев Б.В. Алгоритм Брезенхэма для систем ЧПУ с N-мерным пространством // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – Ч. 3. – С. 70-72.
7. Ширяев Б.В. Алгоритм автоматизированного визуального контроля при производстве МИС СВЧ с использованием искусственных нейронных сетей //

Новые информационные технологии в исследовании сложных структур. – 2018. – С. 102-103.

8. Ширяев Б.В. Алгоритм определения дефектов СВЧ МИС с использованием гистограмм участков микрофотографии / Б.В. Ширяев, А.Ю. Ющенко, А.В. Безрук // Наука. Технологии. Инновации. – 2018. – Ч. 2. – С. 118-120.

9. Ширяев Б.В. Алгоритм автоматизированного визуального контроля СВЧ МИС с использованием классификатора на основе многослойного персептрона / Б.В. Ширяев, А.В. Безрук // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов в 7 томах. – 2019. – Том 7. – С. 122-124.

10. Ширяев Б.В. Алгоритм определения годности СВЧ МИС с использованием классификатора на основе искусственных нейронных сетей // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУРа (Томск, 22–24 мая 2019 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 2. – С. 81-83.

11. Ширяев Б.В. Алгоритм автоматизированного визуального контроля СВЧ МИС по микрофотографиям с использованием классификатора на основе искусственных нейронных сетей / Б.В. Ширяев, А.В. Безрук, Д.П. Аргунов, А.Ю. Ющенко // 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2019). Севастополь, 8–14 сентября 2019 г. : тезисы д-дов. – Москва ; Минск ; Севастополь, 2019. – С. 72-73.

12. Аргунов Д.П. Программный комплекс ICCreatech для автоматизации учета полупроводниковых пластин, проведения измерений и анализа полученных данных / Д.П. Аргунов, А.В. Безрук, Б.В. Ширяев, А.Ю. Ющенко // 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2019). Севастополь, 8–14 сентября 2019 г. : тезисы д-дов. – Москва ; Минск ; Севастополь, 2019. – С. 69-70.

13. Ширяев Б.В. Алгоритм автоматизированного визуального контроля СВЧ МИС на основе искусственной нейронной сети с вычислением средневзвешенного пиксельного расстояния / Б.В. Ширяев, Д.П. Аргунов, А.В. Безрук // Электронные средства и системы управления: материалы докладов

XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2019. – 254 с.

14. Ширяев Б.В. Алгоритм совмещения векторного чертежа фотошаблона и микрофотографии СВЧ МИС с помощью метода наименьших квадратов / Б.В. Ширяев, Д.П. Аргунов, А.В. Безрук //Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 13–30 мая 2020 г.: в 2 частях. – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 2. – С. 41-43.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2022662082. Программа вычисления гистограмм области анализа автоматизированного визуального контроля «HisAVI» / Б. В. Ширяев – Заявка № 2022660326. Дата поступления 08.06.2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.06.2022 г.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2022663754. Программное обеспечение «ProChar3» («ПроХар3») / Б.В. Ширяев – Заявка № 2022663218. Дата поступления 13.07.2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.07.2022 г.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2022667536. Программное обеспечение «ProMeas4» / Д.П. Аргунов, Б.В. Ширяев – Заявка № 2022666802. Дата поступления 14.09.2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21.09.2022 г.

18. Микроволновая монолитная интегральная схема [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Микроволновая_монолитная_интегральная_схема (дата обращения: 22.09.2021).

19. Каталог. АО «НИИПП» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mmic.niipp.ru/catalog> (дата обращения: 22.09.2021).

20. ГОСТ 18725-83 Микросхемы интегральные. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 36 с.

21. ГОСТ 20.57.406-81 Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 133 с.

22. ГОСТ 20271.1-91 Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 93 с.
23. ГОСТ Р 52536-2006 Оборудование станций радиоконтроля автоматизированное. Технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2020. – 27 с.
24. ГОСТ 27.410-87 Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 79 с.
25. ГОСТ Р 27.403-2009 Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы. – М.: Стандартиформ, 2010. – 16 с.
26. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Стандартиформ, 2020. – 59 с.
27. ГОСТ Р 57394-2017 Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность. – М.: Стандартиформ, 2017. – 46 с.
28. ГОСТ 21493-76 Изделия электронной техники. Требования по сохраняемости и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1995. – 15 с.
29. Test method standard microcircuits [Электронный ресурс]. – Режим доступа: scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf (дата обращения 22.09.2021).
30. Schlosser T. Improving automated visual fault inspection for semiconductor manufacturing using a hybrid multistage system of deep neural networks / T. Schlosser, M. Friedrich, F. Beuth // Journal of Intelligent Manufacturing. - 2022. - С. 1099–1123.
31. Wafer defect inspection system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hitachi-hightech.com/global/products/device/semiconductor/inspection.html> (дата обращения 22.09.2021).
32. Semiconductor Inspection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.newport.com/n/semiconductor-inspection> (дата обращения 22.09.2021).

33. Kaur B. Detection and classification of printed circuit board defects using image subtraction method / B. Kaur, G. Kaur, A. Kaur // Proceedings of the Conference on Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS'14). – 2014. – С. 1–5.

34. Doudkin A. Objects identification on the color layout images of the integrated circuit layers / A. Doudkin, A. Inyutin, M. Vatin // Proceedings of the IEEE Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. – 2005. – С. 610-614.

35. Semiconductor - Metrology and Inspection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hitachi-hightech.com/global/products/device/semiconductor/metrology-inspection.html> (дата обращения 22.09.2021).

36. Jong-Chih Chien, Inspection and Classification of Semiconductor Wafer Surface Defects Using CNN Deep Learning Networks [Электронный ресурс] / Jong-Chih Chien, Ming-Tao Wu and Jiann-Der Lee // 2020. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/15/5340> (дата обращения: 22.09.2021).

37. Груздов, В.В. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике [Текст] / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. – М.:ТЕХНОСФЕРА. – 2016. – 328с.

38. Интерференционная микроскопия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: m-protect.ru/wiki/index.php?title=интерференционная_микроскопия (дата обращения 22.09.2021).

39. Смирнов, С.В. Методы и оборудование контроля параметров технологических процессов производства наногетероструктур и наногетероструктурных монокристаллических интегральных схем : учеб. Пособие [Текст] / С.В. Смирнов. – Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – Томск, 2010. – 115 с.

40. Yi-sha Ku. Infrared differential interference contrast microscopy for 3D interconnect overlay metrology [Электронный ресурс] / Yi-sha Ku, Deh-Ming Shyu, Yeou-Sung Lin, Chia-Hung Cho. Режим доступа: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-21-16-18884&id=259873> (дата обращения 22.09.2021).

41. Paul C. Montgomery. Deep submicron 3D surface metrology for 300 mm wafer characterization using UV coherence microscopy / Paul C. Montgomery, D. Montaner // *Microelectronic Engineering*. – 1999. – С. 291-297.

42. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Рентгеновская_фотоэлектронная_спектроскопия (дата обращения 22.09.2021).

43. JCM-6000 Versatile Benchtop SEM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JCM-6000.html> (дата обращения 22.09.2021).

44. Электронный микроскоп [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Электронный_микроскоп (дата обращения 22.09.2021).

45. Machado B.T. Segmentation of Integrated Circuit Layouts from Scan Electron Microscopy Images / B.T. Machado, E. Ukwatta, M. Spence, C. Pawlowicz // *IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE)*. – 2018. – С. 1-4.

46. Top-15 Semi Companies Log Year-Over-Year Growth of 21% in 1Q21 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.icinsights.com/news/bulletins/Top15-Semi-Companies-Log-YearOverYear-Growth-Of-21-In-1Q21/> (дата обращения 22.09.2021).

47. CRITICAL DIMENSION (CD) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.muete.com/critical-dimension-cd_cd_0_kkdetail_KK_OHNE.html (дата обращения 22.09.2021).

48. Измерительно-инспекционные системы контроля качества полупроводниковых пластин MT2010/3000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://liontech.ru/upload/iblock/2f4/sistema_kontrolya_mt2010_3000.pdf (дата обращения 22.09.2021).

49. KLA-Tencor Candela CS-20. Установка для автоматизированной инспекции поверхности на производстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rusnanonet.ru/equipment/candela_cs20/ (дата обращения 22.09.2021).

50. Surfscan® SP7XP Unpatterned Wafer Defect Inspection System [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kla-tencor.com/documents/products/brochures/KLA-Surfscan-SP7XP-Product-Brochure.pdf> (дата обращения 22.09.2021).

51. MicroProf® AP Flexible Multi-sensor Metrology Tool for Advanced Packaging [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://frtmetrology.com/produkte/microprof/microprof-ap/> (дата обращения 22.09.2021).

52. High-Speed Defect Review SEM CR6300 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hitachi-hightech.com/global/product_detail/?pn=semi-rs (дата обращения 22.09.2021).

53. KLA-Tencor Candela CS-20. Установка для автоматизированной инспекции поверхности на производстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rusnanonet.ru/equipment/candela_cs20/ (дата обращения 22.09.2021).

54. Cascade SUMMIT200 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.formfactor.com/product/probe-systems/200-mm-systems/summit200/> (дата обращения 22.09.2021).

55. MPI TS2000 Series – The Evolution [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mpi-corporation.com/ast/engineering-probe-systems/mpi-automated-systems/ts2000-probe-system/> (дата обращения 22.09.2021).

56. Cascade CM300xi-ULN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.formfactor.com/product/probe-systems/300-mm-systems/cm300xi-uln/> (дата обращения 22.09.2021).

57. TS3500 Series with WaferWallet® = Accuracy + Flexibility + Automation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mpi-corporation.com/ast/engineering-probe-systems/mpi-automated-systems/ts3500-series-with-waferwallet/> (дата обращения 22.09.2021).

58. Automated optical inspection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Automated_optical_inspection (дата обращения 22.09.2021).

59. Vision Builder for Automated Inspection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/software/products/vision-builder-for-automated-inspection.html> (дата обращения 22.09.2021).

60. LeCun Y. Learning methods for generic object recognition with invariance to pose and lighting / Y. LeCun, F.J. Huang, L. Bottou // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'04). – 2004. – С. 97-104.

61. Cheon S. Convolutional Neural Network for Wafer Surface Defect Classification and the Detection of Unknown Defect Class / S. Cheon, H. Lee, C.O. Kim, S.H. Lee // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. – 2019. – Vol. 32, no. 2. – С. 163–170.

62. Hong X. Deep learning for automatic IC image analysis / X. Hong, D. Cheng, Y. Shi, T. Lin, B.H. Gwee // Proceedings of the IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing (DSP'18). – 2018. – С. 1–5.

63. Schlosser T. A Novel Visual Fault Detection and Classification System for Semiconductor Manufacturing Using Stacked Hybrid Convolutional Neural Networks / T. Schlosser, F. Beuth, M. Friedrich, D. Kowerko // 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). – 2019. – С. 1511-1514.

64. Sanz L.C. Machine Vision Algorithms for Automated Inspection Thin-Film Disk Heads // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1988. – № 10 (6). – С. 830-848.

65. Chenn-Jung H. Image processing techniques for wafer defect cluster identification / H. Chenn-Jung, W. Chi-Feng, W. Chua-Chin // IEEE Design & Test of Computers. – 2002. – Vol. 19, iss. 2. – С. 44-48.

66. Lee K. A Convolutional Neural Network for Fault Classification and Diagnosis in Semiconductor Manufacturing Processes / K. Lee, S. Cheon, C. Kim // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. – 2017. – Vol. 30, iss. 2. – С. 135-142.

67. Xie L. A novel defect detection and identification method in optical inspection / L. Xie, R. Huang, N. Gu, Z. Cao // Neural Computing and Applications. – 2014. – Vol. 24., no. 7–8. – С. 1953–1962.

68. Chenn-Jung H. Clustered defect detection of high quality chips using self-supervised multilayer perceptron // *Expert Systems with Applications*. – 2007. – Vol. 33, iss. 4. – С. 996-1003.
69. Nakazawa T. Wafer map defect pattern classification and image retrieval using convolutional neural network / T. Nakazawa, D.V. Kulkarni // *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. – 2018. – Vol. 31, no. 2. – С. 309–314.
70. Suzuki S. Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following / S. Suzuki, K. Abe // *Computer Vision Graphics and Image Processing*. – 1985. – Vol. 30. – С. 32–46.
71. Huang S. Automated visual inspection in the semiconductor industry: A survey / S. Huang, Y. Pan // *Computers in Industry*. – 2015. – Vol. 66. – С. 1-10.
72. Компьютерное зрение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Компьютерное_зрение (дата обращения 22.09.2021).
73. Форсайт, Д. Компьютерное зрение. Современный подход [Текст] / Д. Форсайт, Ж. Понс; пер. с англ. А.В. Назаренко, И.Ю. Дорошенко. – М.: Издательский дом «Вильямс». – 2004. – 928 с.
74. Шапиро, Л. Компьютерное зрение [Текст] / Л. Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ. А.А. Богуславский. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2006. – 752 с.
75. Лысенко, О. Машинное зрение от SICK/IVP [Текст] / О. Лысенко // *Компоненты и технологии*. – 2007. – №1. – С. 54-59.
76. Лукьяница, А.А. Цифровая обработка видеоизображений [Текст] / А.А. Лукьяница, А. Г. Шишкин. – М.: «Ай-Эс-Эс Пресс». – 2009. – 518 с.
77. OpenCV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://opencv.org/> (дата обращения 22.09.2021).
78. Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines*. – 3rd Ed. – Pearson, 2008. – 936 p.
79. Schmidhuder J. Deep learning in neural networks: An overview // *Neural Netw.* – 2015. – Vol. 61. – С. 85–117.

80. TensorFlow. Комплексная платформа машинного обучения с открытым исходным кодом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tensorflow.org/> (дата обращения 22.09.2021).

81. Gaussian blur [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_blur (дата обращения 22.09.2021).

82. Unsharp masking [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Unsharp_masking (дата обращения 22.09.2021).

83. Histogram equalization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Histogram_equalization (дата обращения 22.09.2021).

84. Template Matching OpenCV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: docs.opencv.org/4.5.1/de/da9/tutorial_template_matching.html (дата обращения 22.09.2021).

85. Нахождение объектов на картинках [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/joom/blog/445354/> (дата обращения 22.09.2021).

86. Least Squares Fitting [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html> (дата обращения 22.09.2021).

87. DXF Reference [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_2012_pdf_dxf-reference_enu.pdf (дата обращения 22.09.2021).

88. Ahmad N. Manufacturing Feature Recognition of Parts using DXF Files / N. Ahmad, A.F.M. Anwarul Haque // 4 International Conference on Mechanical Engineering. – 2001. – Vol. 6. – С. 111–115.

89. Нейронная сеть – обучение ИНС с помощью алгоритма обратного распространения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://robocraft.ru/blog/algorithm/560.html> (дата обращения 22.09.2021).

90. netDxf [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/haplokuon/netDxf> (дата обращения 22.09.2021).

91. CAD .NET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cadsofttools.ru/products/cad-net/> (дата обращения 22.09.2021).

92. Поиск в ширину [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e-maxx.ru/algo/bfs> (дата обращения 22.09.2021).

93. «О» большое и «о» малое [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/«О»_большое_и_«о»_малое (дата обращения 22.09.2021).

94. HIWIN. Manufacturer of Motion Control Components and Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hiwin.us/> (дата обращения 22.09.2021).

95. THK [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thk.com/> (дата обращения 22.09.2021).

96. Специальное Конструкторское Бюро Измерительных Систем (СКБ ИС) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://skbis.ru/> (дата обращения 22.09.2021).

97. Leadshine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.leadshine.com/> (дата обращения 22.09.2021).

98. OMS Motion, Inc. Motion Control Solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.omsinmotion.com/> (дата обращения 22.09.2021).

99. HIWIN MIKROSYSTEM. Linear Planar Servo Motor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hiwinmikro.tw/en/product/linear-motor-system/linear-planar-servo-motor> (дата обращения 22.09.2021).

100. RUCHSERVOMOTOR. Планарный сервопривод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ruchservomotor.com/product_types/shagovye-dvigateli/ (дата обращения 22.09.2021).

101. H2W. Dual Axis Linear Stepper Motors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.h2wtech.com/category/dual-axis-linear-stepper#productInfo1> (дата обращения 22.09.2021).

102. Mitutoyo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mitutoyo.ru/ru_ru (дата обращения 22.09.2021).

103. FESTO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.festo.com/cms/ru_ru/index.htm (дата обращения 22.09.2021).

104. Mindman [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mindman.com.ru/> (дата обращения 22.09.2021).

105. Ishutkin S.V. Technological Development of an InP-Based Mach–Zehnder Modulator / S.V. Ishutkin, V.S. Arykov, I.V. Yunusov, M.V. Stepanenko, P.E. Troyan, Y.S. Zhidik // *Symmetry*. – 2020. – V. 12. – С. 1–10.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

А.1 Компоновщик нейронной сети «Builder 2.0»

Общее описание

Описание нейронной сети может быть сформировано как в одну строку, так и в несколько, разделённых символом начала новой строки «\n» и/или символом возврата каретки «\r».

Построитель нейронной сети не чувствителен к регистру символов.

Набор служебных символов для описания структуры нейронной сети: «#», «(», «)», «;», «,», «*», пробел. Каждая запись, описывающая нейронную сеть, отделяется служебным символом «#» или «;». Точка применяется для отделения дробной части от целой при записи дробных чисел, запятая для отделения аргументов записи.

Первая запись во главе строки информирует о версии построителя. Для 2 версии построителя начинается с «2#...» и может содержать любые другие неслужебные и нецифровые символы. Последующие записи несут в себе сведения о самой нейронной сети, начинающиеся с символов:

- «s(...))» – описание скорости обучения всей нейронной сети: «s(0.5)»;
- «a(...))» – описание инерционности обучения всей нейронной сети: «a(0.4)»;
- «i...(...))» – описание входа нейронной сети;
- «l...(...))» – описание слоя нейронной сети;
- «c...(...))» – описание слоя объединения нейронных слоёв;
- «out(...))» – выходной слой нейронной сети.

Скорость и инерционность нейронной сети

Скорость должна быть задана в любой части описания нейронной сети только один раз в пределах от 0 до 1.

Запись об инерционности нейронной сети может отсутствовать или быть одна. При отсутствии записи инерционность принимается за 0.

Слой нейронной сети

Каждая запись описания слоя нейронной сети начинается со специального символа, обозначающего глобальную конфигурацию слоя. За символом следует уникальное имя слоя. В скобках указываются параметры слоя.

Входной слой нейронной сети

Описание входного слоя начинается со специального символа «i» (input). Параметры в описании: первая цифра обозначает размерность входных данных от одномерного вектора (1) до трёхмерной матрицы или вектора двумерных матриц (3). Далее по порядку идут размеры матрицы в направлениях X, Y, Z. Пример: «in1(2, 29, 29)» – входные данные вида двумерной матрицы размером 29×29.

Скрытый слой нейронной сети

Название слоя начинается с ключевого символа «l» (layer). Параметры: первый параметр – строка с именем предшествующего слоя, второй параметр описывает тип связи нейронного слоя:

– свёрточный слой «conv(...)» (convolution) с 5 параметрами: количество ядер свёртки, ширина, высота, шаг свёртки по ширине, по высоте (разделение параметров возможно запятой или символом «*»). Пример: «l2(in1, Conv(30, 5*5, 2*2))» – свёрточный слой, подключённый к слою in1 с 30 ядрами свёртки, размером 5×5 и шагом 2×2;

– полносвязный слой «full(...)» (full connection) с одним параметром: количество нейронов в слое. Пример: «l2(l1, Full(20))» – полносвязный слой с 20 нейронами.

Слой объединения

Название слоя начинается с ключевого символа «c» (combination). Параметры: первый параметр – символ, обозначающий тип объединения: «V» – векторное объединение, «M» – матричное объединение. Все остальные параметры содержат имена слоёв, результаты которых объединяются. Пример: «c4(V, l3, c5)» – слой векторного объединения слоёв l3 и c5.

Выходной слой

Название слоя начинается с ключевого слова «out» (output) и не имеет уникального имени. Служит для обозначения того, что слой, указанный в единственном параметре, предоставляет данные на выход всей нейронной сети. Пример: «out(l21)» – слой l21 является выходным.

Также компоновщик реализует функционал по сохранению и загрузке искусственной нейронной сети на жёсткий диск компьютера с сохранением состояния всех настраиваемых весовых коэффициентов.

А.2 Графический редактор искусственной нейронной сети

Графический редактор предназначен для конфигурации и визуализации архитектуры искусственной нейронной сети. Редактор имеет графический интерфейс для взаимодействия с пользователем (рисунок А.1).

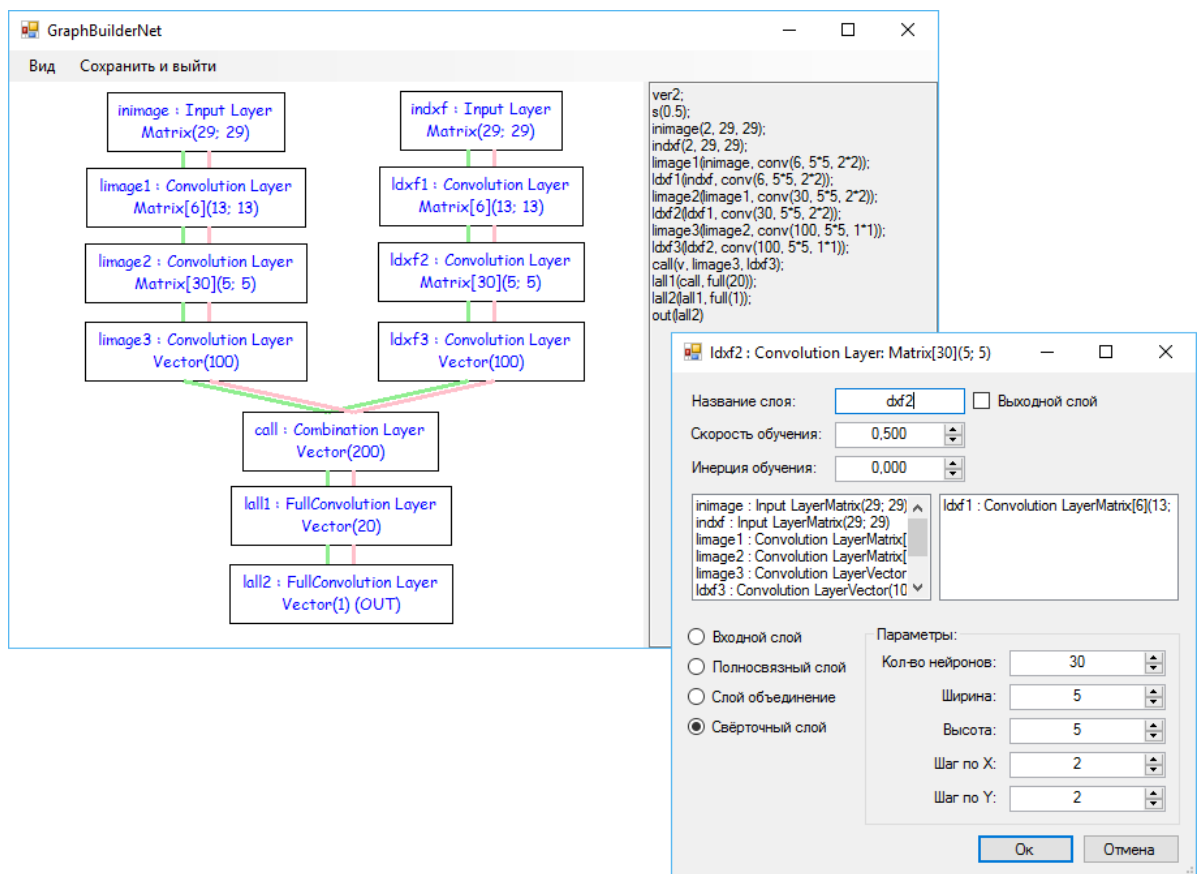


Рисунок А.1 – Интерфейс графического редактора искусственной нейронной сети и диалоговое окно настройки слоя

Графический редактор состоит из областей графического и текстового представления архитектуры нейронной сети. В графической части слои представлены в виде прямоугольных элементов; слои, имеющие связь, соединены зелёной (прямой проход) и красной (обратное распространение ошибки) линиями. В графической области существует возможность перемещать прямоугольники слоёв с использованием компьютерного манипулятора (компьютерная мышь), добавлять и удалять слои. Создание/изменение слоя производится в специальном диалоговом окне настройки параметров слоя, в котором существует возможность указания названия слоя, скорости и инерции обучения, родительского слоя, выбрать тип слоя и параметры, характеризующие тип (например, для полносвязного выбрать количество нейронов в слое).

Б.3 Подробные результаты тестирования МИС смещения по постоянному току

Уровень яркости (Level)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
Максимально допустимый размер дефекта (PixelSize)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120																				
Уровень яркости (Level)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120																				

Рисунок Б.7 – Результаты автоматизированного тестирования: Общая ошибка расхождения с ручным визуальным контролем для набора микрофотографий МИС смещения по постоянному току

№	Максимально возможный уровень детализации (Level)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
12	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
13	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
18	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
19	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
20	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
21	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
22	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
23	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
24	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
25	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
26	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
27	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
28	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
29	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
30	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
31	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
32	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
33	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
34	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
35	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
36	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
37	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
38	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
39	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
40	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
41	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
42	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
43	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
44	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
45	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
46	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
47	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
48	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
49	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
50	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
51	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
52	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
53	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
54	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
55	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
56	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
57	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
58	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
59	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
60	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
61	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
62	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
63	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
64	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
65	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
66	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
67	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
68	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
69	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
70	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
71	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
72	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
73	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
74	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
75	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
76	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
77	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
78	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
79	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
80	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
81	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
82	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
83	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
84	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
85	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
86	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
87	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
88	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
89	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
90	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
91	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
92	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
93	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
94	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
95	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
96	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
97	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
98	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
99	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
100	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Рисунок Б.14 – Результаты автоматизированного тестирования: ошибка первого рода автоматизированного визуального контроля от ручного для набора микрофотографий драйвера переключателя

Б.6 Подробные результаты тестирования фотонных МИС электрооптического модулятора

Рисунок Б.16 – Результаты автоматизированного тестирования: Общая ошибка расхождения с ручным визуальным контролем для набора микрофотографий фотонных МИС электрооптического модулятора топологии №1

Масштабирование

Порт Аэтропавана Леванта (Level)

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

Рисунок Б.19 – Результаты автоматизированного тестирования: Общая ошибка расхождения с ручным визуальным контролем для набора микрофотографий фотонных МИС электрооптического модулятора топологии №4