

На правах рукописи



Ширяев Борис Владимирович

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

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) и акционерном обществе «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (АО «НИИПП»)

- Научный руководитель –** доктор технических наук профессор
Шурыгин Юрий Алексеевич
- Официальные оппоненты:** **Горюнов Алексей Германович,**
доктор технических наук, доцент, руководитель отделения
ядерно-топливного цикла инженерной школы ядерных
технологий Национального исследовательского Томского
политехнического университета
- Титов Виталий Семёнович,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
вычислительной техники Юго-западного государственного
университета, г. Курск
- Ведущая организация –** Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Новосибирский
государственный технический университет»

Защита состоится 22 декабря 2022 г. в 14-00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.415.02, созданного на базе ТУСУРа, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа (г. Томск, ул. Красноармейская, 146) и на сайте ТУСУРа: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/x2927fk5>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Зайченко Татьяна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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 монолитные интегральные схемы СВЧ диапазона (далее – СВЧ МИС), снизить степень износа СВЧ зондов посредством уменьшения числа касаний и оценить общий внешний вид выпускаемой продукции. Изготовленная МИС по визуальному признаку оценивается в нескольких категориях: качественный анализ поверхностей элементов МИС, отсутствие повреждений и загрязнений, точность повторения фотошаблона и другие.

Современные масштабы выпуска монолитных интегральных схем и полупроводниковых приборов настолько огромны, что ручной 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 нейронной 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 фотоматрицы 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 объема 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, 2 – индексируемые в Web of Science, 9 тезисов докладов, получено 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость и структура диссертационной работы.

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 посвящена разработке алгоритма автоматизированного визуального контроля и программному обеспечению на его основе.

Исходными данными для алгоритма являются микрофотографии исследуемых МИС и чертёж фотошаблона в векторном формате, который используется при изготовлении этих МИС.

На первом этапе происходит *поиск точек совмещения*. Поиск осуществляется методом шаблонного поиска с предварительным поиском разрежённого изображения точки совмещения. Информация о местоположении точки совмещения на фотошаблоне в векторных координатах позволяет сопоставить фотошаблон с микрофотографией на следующем шаге.

При известных координатах точек совмещения в масштабе фотошаблона и микрофотографии можно *вычислить коэффициенты матрицы аффинного преобразования* из векторных координат фотошаблона в растровые координаты микрофотографии:

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

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:

$$V' * M = P', \quad (2)$$

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

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

Подстановка значений матриц в выражение (2) с последующим обобщением приводит к следующему выражению:

$$\begin{aligned} p_{ix} &= v_{ix} * m_{11} + v_{iy} * m_{21} + m_{31} \\ p_{iy} &= v_{ix} * m_{12} + v_{iy} * m_{22} + m_{32} \end{aligned} \quad (3)$$

где v_{ix} – абсцисса точки совмещения в масштабе фотошаблона;

v_{iy} – ордината точки совмещения в масштабе фотошаблона;

p_{ix} – абсцисса точки совмещения в масштабе микрофотографии;

p_{iy} – ордината точки совмещения в масштабе микрофотографии.

Выражение ошибки метода наименьших квадратов (далее – МНК) для данных выражений примет вид:

$$\begin{aligned} F_x(M) &= \sum_{i=1}^n \left(p_{ix} - (v_{ix} * m_{11} + v_{iy} * m_{21} + m_{31}) \right)^2 \\ F_y(M) &= \sum_{i=1}^n \left(p_{iy} - (v_{ix} * m_{12} + v_{iy} * m_{22} + m_{32}) \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

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

Интегрирую по неизвестным коэффициентам матрицы аффинного преобразования приводит к получению следующих систем линейных уравнений:

$$\begin{cases} m_{11} \sum v_{ix}^2 + m_{21} \sum v_{ix}v_{iy} + m_{31} \sum v_{ix} = \sum p_{ix}v_{ix} \\ m_{11} \sum v_{ix}v_{iy} + m_{21} \sum v_{iy}^2 + m_{31} \sum v_{iy} = \sum p_{ix}v_{iy}; \\ m_{11} \sum v_{ix} + m_{21} \sum v_{iy} + m_{31}n = \sum p_{ix} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} m_{12} \sum v_{ix}^2 + m_{22} \sum v_{ix}v_{iy} + m_{32} \sum v_{ix} = \sum p_{iy}v_{ix} \\ m_{12} \sum v_{ix}v_{iy} + m_{22} \sum v_{iy}^2 + m_{32} \sum v_{iy} = \sum p_{iy}v_{iy}. \\ m_{12} \sum v_{ix} + m_{22} \sum v_{iy} + m_{32}n = \sum p_{iy} \end{cases} \quad (6)$$

Решение данных уравнений любым методом (в диссертационной работе используется метод Крамера) позволяет получить искомые коэффициенты аффинного преобразования. Подставляя полученные коэффициенты в выражение ошибки МНК (4) 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. При высокой ошибке МНК из набора исходных точек совмещения последовательно исключаются по одной каждая точка совмещения до получения удовлетворительной ошибки.

Положение 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.

После вычисления матрицы аффинного преобразования производится *растеризация чертежа фотошаблона* из векторного пространство в растровое пространство микрофотографии.

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

Для корректного сравнения микрофотографии МИС и растриванного фотошаблона, цвета пикселей *микрофотографии МИС преобразуются* в цветовую палитру растриванного фотошаблона с использованием классификатора на основе предварительно обученной искусственной нейронной сети.

Сравнение преобразованной микрофотографии МИС с растриванном фотошаблоном осуществляется попиксельно: для каждого пикселя микрофотографии производится поиск ближайшего по положению пикселя растриванного фотошаблона того же цвета, в качестве результата выбирается расстояние в пикселях (рисунок 1).

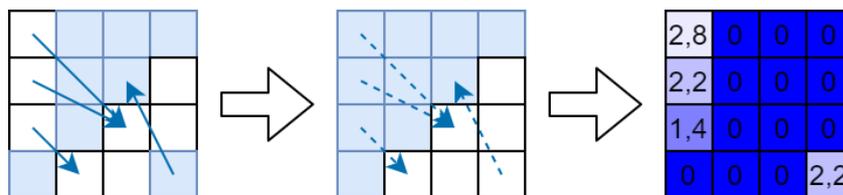


Рисунок 1 – Пример вычисления пиксельного расстояния

Результатом данного шага алгоритма является *карта дефектности*, каждое значение карты дефектности отличное от «0» обозначает дефект.

Классификатор и метод расчёта пиксельного расстояния работают в совокупности: классификатор определяет принадлежность участка микрофотографии к той или иной области фотошаблона, определяет тип поверхности каждого участка микрофотографии МИС, а метод расчёта карты дефектности определяет правильность его расположения опираясь на информацию о расположении этих участков из растриванного фотошаблона.

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

Заключительным этапом работы алгоритма автоматизированного визуального контроля является бинарное преобразование полученной карты дефектности с установленным *порогом детектирования дефектов* и поиска кластера связанных пикселей, размер которого больше, чем *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. Ввод данного параметра позволяет снизить чувствительность алгоритма и исключить несущественные отклонения топологии МИС от фотошаблона, небольшую ошибку совмещения микрофотографии и фотошаблона алгоритмом и aberrации оптической системы съёмки микрофотографий МИС при оптической микроскопии. Максимальный допустимый размер дефекта определяет максимально возможный линейный размер кластера дефектных пикселей, который не считается дефектом. Введение такого параметра позволяет подавить незначительный цифровой шум на микрофотографиях и небольшие загрязнения, которые не являются существенными дефектами МИС и не влияют на её работоспособность.

Заключительная часть второй главы посвящена особенностям реализации разработанного алгоритма в программном обеспечении: особенности реализации поиска точек совмещения, реализация классификатора на основе искусственной нейронной сети и его обучение, реализация расчёта карты дефектности; произведена оценка асимптотики разработанного алгоритма в текущей реализации и предложены методы оптимизации при необходимости ускорения работы программного обеспечения.

Третья глава посвящена разработке установки автоматизированного визуального контроля. В качестве аппаратного обеспечения разработаны полуавтоматическая зондовая станция (рисунок 2) и станция автоматизированного визуального контроля (рисунок 3). Полуавтоматическая зондовая станция кроме визуального контроля может проводить контроль электрических параметров МИС.

В качестве особенности разработанной станции выделена система температурной компенсации расширения механических узлов. При работе установки визуального контроля в условиях отличных от нормальных происходит изменение фокусного расстояния из глубины фокуса из-за нагрева узлов станции, что сопровождается размытием изображения из видеопотока цифровой камеры микроскопа. Данная система измеряет температуру ключевых узлов перемещения полупроводниковой пластины, производит вычисления необходимой компенсации по оси Z и подаёт команду на перемещение держателя полупроводниковой пластины на необходимую величину. Система температурной компенсации возвращает фокус микроскопа в плоскость полупроводниковой пластины, без необходимости установки дорогостоящих систем автоматического фокуса. Температурная зависимость предварительно измерена в пределах рабочей температуры от 25°C до 50°C с использованием измерительной головки с разрешением 1 мкм и интерполирована с точностью до 5 мкм.

Положение 3. Использование аппаратно-программной системы температурной компенсации держателя полупроводниковых пластин, отличающейся гибкостью программной настройки температурной зависимости, позволяет исключить уход фокусного расстояния и увеличить устойчивость алгоритма.



Рисунок 2 – Фотография собранного
опытного образца полуавтоматической
зондовой станции Terra-200COAX



Рисунок 3 – Фотография собранного
опытного образца станции
автоматизированного визуального контроля

В четвёртой главе приведены результаты автоматизированного визуального контроля МИС различного уровня сложности топологии: простые СВЧ МИС с аттенюаторами (рисунок 4а), СВЧ МИС средней сложности с индуктивностями и конденсаторами (рисунок 4б), сложные СВЧ МИС с диодами (рисунок 4в), СВЧ МИС высокой сложности с транзисторами (рисунок 4г), сложные фотонные МИС электрооптических модуляторов с оптическим полупроводниковым каналом (рисунок 4д). На всех наборах микрофотографий алгоритм автоматизированного визуального контроля показал удовлетворительные результаты (таблица 1).

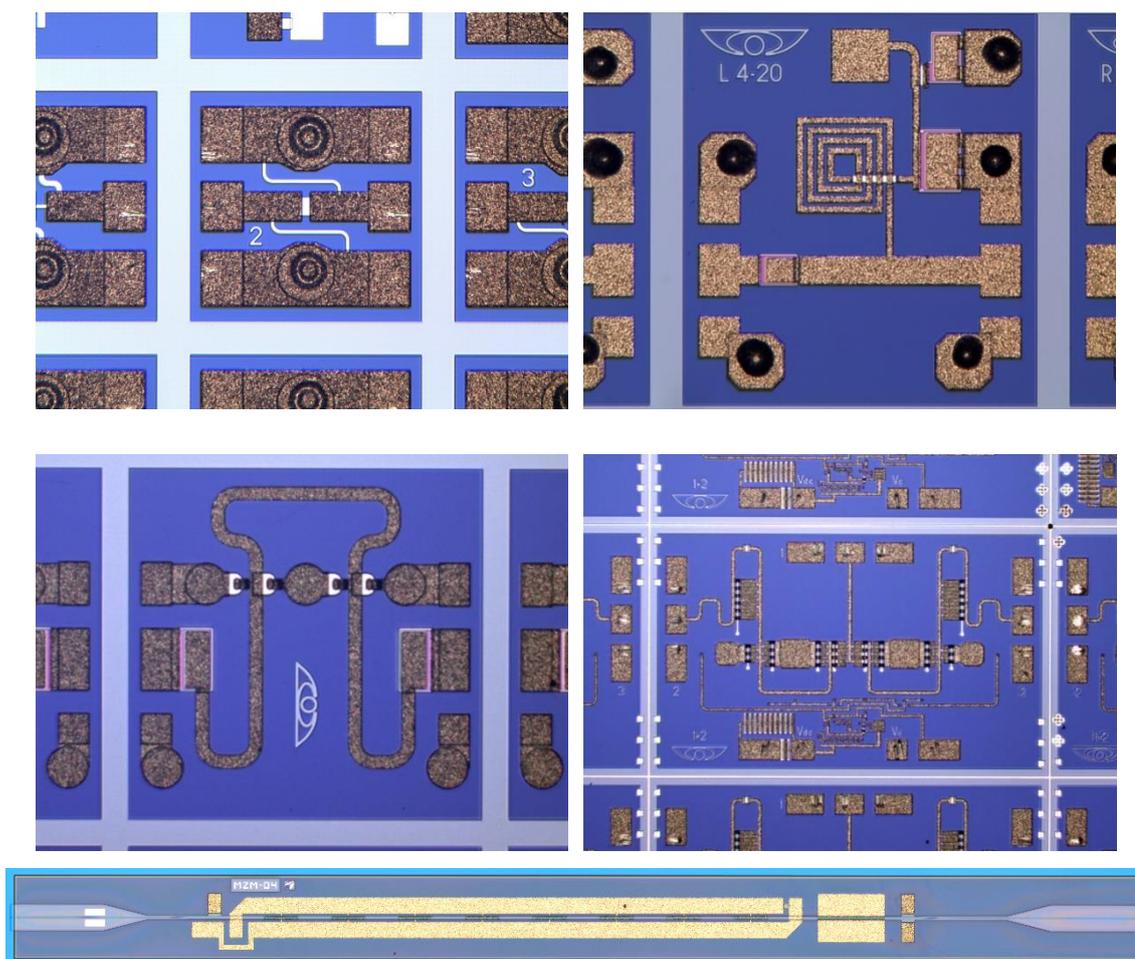


Рисунок 4 – Исходные микрофотографии исследуемых МИС: а) СВЧ МИС с аттенюаторами; б) МИС смещения по постоянному току; в) СВЧ МИС ограничителя мощности; г) СВЧ МИС переключатель на транзисторной технологии; д) фотонные МИС электрооптических модуляторов

Разработанный алгоритм автоматизированного визуального контроля эффективно проводит визуальный контроль с использованием цифрового фотошаблона в векторном масштабе без необходимости формирования базы изображений для автоматизированного визуального контроля современных установок.

Положение 4. Использование метода сравнения с фотошаблоном, отличающегося от метода сравнения с микрофотографией эталонной МИС исходным объектом сравнения, повышает производительность визуального контроля в условиях мелкосерийного производства.

Таблица 1 – Результаты работы алгоритма автоматизированного визуального контроля на разных группах микрофотографиях МИС по сравнению с ручным визуальным контролем

	Повторяемость ручного визуального контроля	Минимальная ошибка второго рода*
Простая МИС – планарная линия	98,1%	1,9%
Простая МИС – аттенюатор	92,9%	7,1%
МИС средней сложности – СВЧ МИС смещения по постоянному току	93,3%	6,7%
Сложная МИС – СВЧ МИС ограничителя мощности	94,9%	8,4%
МИС высокой сложности – СВЧ МИС переключателя на транзисторной технологии	92,8%	7,2%
Фотонная МИС высокой сложности – электрооптический модулятор	75,9%	–

Примечание: *Минимальная ошибка второго рода, при которой не встречается ошибка первого рода; ошибка второго рода – доля бракованных МИС определены годными («ложногодные» МИС).

В приложении А кратко изложено описание компоновщика искусственной нейронной сети, который используется при подготовке классификатора алгоритма автоматизированного визуального контроля на этапе настройки проекта.

В приложении Б приведены подробные результаты тестирования алгоритма на различных группах микрофотографий МИС из четвертой главы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационном исследовании разработан алгоритм автоматизированного визуального контроля полупроводниковых приборов и монолитных интегральных схем, создан аппаратно-программный комплекс на его основе.

1. Разработан алгоритм автоматизированного визуального контроля, отличающийся от существующих методом сравнения с фотошаблоном, позволяющий с высокой эффективностью проводить визуальный контроль. Повторяемость автоматизированного визуального контроля относительно ручного достигает 98%.

2. 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.

3. Разработано программное обеспечение автоматизированного визуального контроля на основе разработанного алгоритма с использованием технологий компьютерного зрения и искусственных нейронных сетей.

4. Скорость работы алгоритма автоматизированного контроля прямо пропорциональна количеству вычислительных потоков персонального компьютера, на котором выполняется данный алгоритм и достигает ускорения визуального контроля от 3 до 28 раз на 6 вычислительных потоках по сравнению с ручным в зависимости от сложности топологии контролируемой МИС.

5. Разработана 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.

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

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

Основные публикации по теме диссертации

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 докладов. – 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 докладов. – 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.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. 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.

2. 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.

3. 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.