

На правах рукописи



Аргунов Дмитрий Пантелеевич

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЗОНДОВОГО КОНТРОЛЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном 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, профессор отделения
ядерно-топливного цикла на правах кафедры Национального
исследовательского Томского политехнического университета

Казанцев Михаил Александрович,
кандидат технических наук, начальник отдела АСУП
АО «НПП «Радиосвязь», г. Красноярск

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Новосибирский
государственный технический университет»

Защита состоится 26 декабря 2024 г. в 10 часов 00 минут 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/ldito7b9>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Зайченко Татьяна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В эпоху цифровых технологий разработка и производство интегральных схем (ИС) является одним из ключевых факторов, влияющих на технологическую и экономическую независимость стран. Недостаточное развитие собственного инструментального и алгоритмического обеспечения автоматизации процессов производства интегральных схем может привести к риску возникновения отраслевого кризиса. Разработка и производство собственного технологического оборудования и программно-аппаратных средств для обеспечения автоматизации технологических процессов производства полупроводниковых интегральных схем является одной из важных задач успешного развития отрасли.

Одной из составляющих технологического процесса производства интегральных схем является процесс зондового контроля, отвечающий за определение электрических характеристик изготавливаемых интегральных схем и полупроводниковых приборов как на финальных этапах производства до резки и корпусирования изделий, так и для контроля стабильности технологического процесса на промежуточных этапах.

На данный момент на многих отечественных предприятиях микроэлектронной промышленности для целей автоматизации контроля характеристик интегральных схем при исследовательском и мелкосерийном производстве наибольшее распространение получили ручные и полуавтоматические зондовые станции различных иностранных производителей таких как Form Factor (США), MPI Corporation (Тайвань) и некоторых других. При этом совместно с оборудованием применяется программное обеспечение, поставляемое производителем оборудования, не всегда удовлетворяющее требованиям к спектру выполняемых задач, а его модернизация и расширение функционала в большинстве случаев сильно осложнена или невозможна вовсе из-за наличия юридических и/или коммуникационных затруднений. Так же обработка, анализ и систематизация результатов технологических процессов производства требует интеграции и применения специального программного обеспечения, создания собственных решений для хранения данных.

Таким образом, разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) зондового контроля электрических параметров ИС на неразделённых полупроводниковых пластинах и создание на её основе программно-аппаратного комплекса позволит обеспечить исследовательские лаборатории и производства необходимым оборудованием и технологиями, снижающими трудозатраты при проведении тестирования и анализа изготавливаемых изделий. При этом исполнение программного обеспечения в виде расширяемого модульного программного комплекса позволит решать большинство исследовательских и производственных задач, связанных с автоматизацией процесса измерения характеристик ИС, используя единый инструмент, расширение функционала которого не потребует высоких трудозатрат.

Объектом исследования является технологический процесс зондового контроля электрических параметров интегральных схем и полупроводниковых приборов на неразделённых полупроводниковых пластинах.

Предметом исследования являются алгоритмы автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров ИС на неразделённых полупроводниковых пластинах и методы передачи, хранения и обработки полученных результатов зондового контроля электрических параметров ИС для обеспечения совместимости с автоматизированной информационной системой.

Целью диссертационной работы является разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) зондового контроля электрических параметров ИС на неразделённых полупроводниковых пластинах и создание программно-аппаратного комплекса на её основе.

Задачи исследования, поставленные в диссертационной работе для достижения указанной цели:

1) провести обзор и анализ существующих программных систем автоматизации процесса зондового контроля электрических параметров ИС, определить перечень проблем, требующих решения при проектировании;

2) выбрать базовую методологию, средства и технологии построения АСУТП с учетом требования к модульности проектируемого программно-аппаратного комплекса автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров ИС;

3) разработать обеспечивающие подсистемы АСУТП: подсистему управления аппаратным обеспечением зондовой станции, подсистему сбора данных с измерительного оборудования и подсистему хранения и передачи результатов и параметров проведения технологического процесса;

4) разработать алгоритм работы АСУТП зондового контроля электрических параметров ИС, на основе которого в последующем реализовать программно-аппаратный комплекс зондового контроля электрических параметров ИС.

Научная новизна заключается в следующем:

1) *предложена* методика программной юстировки исполнительных механизмов системы перемещения полупроводниковой пластины в плоскости XY, *отличающаяся* от существующих тем, что корректировочные коэффициенты извлекаются из изображения эталонного фотошаблона при помощи алгоритмов цифровой обработки изображений;

2) *предложен* оригинальный язык математического преобразования результатов измерения электрических параметров, *отличающийся* применением принципов визуального программирования для задания алгоритма преобразования данных оператором зондовой станции;

3) *разработана* комплексная программная система, *отличающаяся* применённым комплексом оригинальных алгоритмов работы АСУТП зондового контроля электрических параметров интегральных схем, *позволяющая* обеспечить выполнение полного цикла автоматизированного технологического процесса зондового контроля электрических параметров ИС.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в совершенствовании метода оптимизации модульных структур систем сбора, обработки и передачи данных в АСУТП зондового контроля электрических параметров ИС и в разработке алгоритма работы АСУТП зондового контроля электрических параметров ИС.

Практическая значимость работы:

1) разработан и реализован программно-аппаратный комплекс зондового контроля электрических параметров ИС на неразделённых пластинах. В основе комплекса лежит модульная архитектура построения АСУТП, позволяющая адаптировать функционал под специфические задачи широкого круга предприятий микроэлектронной промышленности;

2) разработанный программно-аппаратный комплекс АСУТП зондового контроля электрических параметров интегральных схем испытан на полуавтоматической зондовой станции «Terra-200» в совокупности с программной частью, представляющей собой единый программно-аппаратный комплекс для решения задач зондового контроля электрических параметров в производственном цикле изготовления СВЧ монолитных интегральных схем в АО «НИИПП», г. Томск;

3) проведенные в рамках диссертационной работы исследования использованы при выполнении комплексного проекта «Разработка базовой технологии производства комплексов программно-аппаратных для измерения параметров монолитных интегральных схем на пластине с использованием зондовых стронций в диапазоне до 67 ГГц с возможностью расширения диапазона частот до 650 ГГц» (Министерство промышленности и торговли Российской Федерации, соглашение о предоставлении из федерального бюджета субсидии на финансовое обеспечение части затрат на создание научно-технического задела по разработке

базовых технологий производства приоритетных электронных компонентов и радиоэлектронной аппаратуры № 020-11-2019-980 от «24» декабря 2019 г.);

4) разработанный программно-аппаратный комплекс зондового контроля электрических параметров интегральных схем, реализованный на базе полуавтоматической зондовой станции «Тетра-200», использован при измерении СВЧ характеристик монолитных интегральных схем и радиофотонных микросборок в рамках выполнения научного проекта «Теоретические исследования и экспериментальная разработка оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов» (Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № FEWM-2020-0040 от «17» января 2024 г.).

Методология и методы исследования. Полученные результаты, положения и сделанные выводы основаны на методах вычислительной математики, теории математической статистики, теории автоматического управления. В ходе реализации программно-аппаратного комплекса был применен ряд методов объектно-ориентированного проектирования и программирования.

Положения, выносимые на защиту:

1) предложенная методика программной юстировки исполнительных механизмов системы перемещения полупроводниковой пластины в плоскости XY позволяет повысить точность позиционирования зонда на контактных площадках не менее чем в 5 раз;

2) применение оригинального языка математических вычислений, основанного на принципах визуального программирования, при реализации модуля анализа данных АСУТП зондового контроля электрических параметров ИС позволяет осуществлять обработку данных в том числе для вычисления косвенных характеристик ИС при проведении отбраковки, а также способствует снижению порога вхождения относительно ручной обработки данных;

3) применение предложенных алгоритмов автоматизации технологического процесса зондового контроля позволило разработать комплексную программную систему обеспечивающую выполнение полного цикла мероприятий контроля ИС на полупроводниковых пластинах, за счет реализации автоматического съёма данных измерений с каждого кристалла, тем самым снижающую трудозатраты на проведение выходного контроля готовых приборов более чем в 8 раз.

Достоверность и апробация полученных в ходе исследований результатов и выводов работы обеспечивается строгостью используемых математических методов при обработке экспериментальных данных, апробацией полученных теоретических и экспериментальных результатов на конференциях и семинарах различного уровня; публикацией статей, содержащих полученные результаты, в рецензируемых журналах; наличием результатов интеллектуальной деятельности; внедрением результатов исследований в промышленное производство. Реализуемость предложенных алгоритмов и методов подтверждена экспериментально в ходе разработки программного обеспечения.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. 29-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, СевГУ, 2019 г.;

2. международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», г. Томск, ТУСУР, 2019 г.;

3. международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, ТУСУР, 2019, 2020 гг.

4. 11-й всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем», г. Москва, Зеленоград, ИППМ РАН, 2022 г.

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объёма теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку и отладку алгоритма и программного обеспечения автоматизированной системы

управления технологическим процессом зондового контроля электрических параметров интегральных схем на неразделённых полупроводниковых пластинах. Автором проведен анализ, интерпретация и обобщение полученных экспериментальных результатов, сформулированы расширенные научные выводы по каждой главе диссертации, а также обобщенный вывод по диссертационной работе. Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту положения, получены автором лично. Цели и задачи научного исследования поставлены совместно с научным руководителем.

В создании аппаратной части программно-аппаратного комплекса автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров интегральных схем принимал участие канд. техн. наук Ширяев Б.В.

Совместно с автором в обсуждении экспериментальных результатов принимали участие канд. техн. наук Ющенко А.Ю., канд. техн. наук Ширяев Б.В., канд. техн. наук Жидик Ю.С.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, 3 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 опубликованы в изданиях, индексируемых в Web of Science, 4 тезиса докладов конференций, 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Объём и структура работы: диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и четырех приложений. Полный объём диссертации составляет 120 страниц, включая 65 рисунков. Список литературы содержит 47 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования; определены проблема и цель исследования, объект и предмет исследования; сформулированы гипотеза, задачи и методы исследования; раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования; изложены основные положения, выносимые на защиту; описана апробация и внедрение результатов исследования.

В первой главе содержится обзор научно-технической литературы по теме диссертационного исследования.

В первом пункте рассматриваются общие принципы организации процесса производства интегральных схем. Показано, что производство монолитных интегральных схем СВЧ диапазона (МИС СВЧ) представляет собой сложный многоступенчатый технологический процесс, включающий в себя более сотни отдельных технологических операций, на которые влияет значительное число параметров. Поэтому для контроля технологического процесса требуется проведение большого количества измерений электрических параметров.

Во втором пункте описаны основные способы контроля электрических характеристик интегральных схем и используемое для этого технологическое оборудование. Показано, что основным методом контроля электрических характеристик интегральных схем в процессе производства является зондовый контроль. Применение зондового контроля в процессе разработки позволяет оценить соответствие реальных и ожидаемых характеристик схемы, а при серийном изготовлении позволяет провести отбраковку не соответствующих требуемым характеристикам изделий до распайки в корпус, что снижает себестоимость производства.

На сегодняшний день существует несколько разновидностей зондовых станций для измерений электрических характеристик МИС на полупроводниковых пластинах: ручные, полуавтоматические и полностью автоматические зондовые станции.

Полуавтоматические зондовые станции хорошо зарекомендовали себя мелкосерийном и исследовательско-лабораторном применении, поскольку позволяют значительно сократить время проведения контроля за счет автоматизации перемещения зондов по пластине, относительно недорого по сравнению с полностью автоматическими и не требуют чрезмерно сложных систем для интеграции в производственный процесс.

В третьем пункте описываются различные методы анализа массивов данных, полученных при контроле характеристик изделий.

В четвертом пункте приводится обзор существующего на сегодняшний день программного обеспечения для проведения зондового контроля электрических параметров интегральных схем и анализа измерений. Измерения современных СВЧ устройств и их элементов нередко требуют одновременной работы большого числа измерительных приборов в составе единого стенда и могут быть весьма трудоёмкими. Однако значительная часть современных измерительных приборов имеет возможность управления с помощью внешних управляющих команд от ЭВМ, что открывает широкие возможности для автоматизации процесса измерений. При этом требуется применение узкоспециализированного программного обеспечения для выполнения тех или иных видов измерений. В разделе приведен обзор специализированных программ производства National Instruments, Keysight, Focus Microwave, NI AWR и др. Рассмотренное программное обеспечение обладает рядом недостатков. Отсутствует возможность управления измерительным оборудованием отечественного производства. Применение универсального программного обеспечения требует его существенной доработки для автоматизации системы управления технологическим процессом зондового контроля электрических параметров МИС СВЧ и обработки их результатов. Специализированные программы для СВЧ измерений, как правило, не реализуют всех необходимых функций. Кроме того, специализированное программное обеспечение трудно расширяемо при добавлении принципиально нового измерительного оборудования.

На основании проведенного обзора научно-технической литературы по теме диссертационного исследования была сформулирована цель работы и определены необходимые для ее достижения задачи.

Во второй главе рассмотрены вопросы моделирования процессов и функционального поведения программного модуля АСУТП зондовых измерений электрических параметров интегральных схем. Его основной задачей является организация возможности выполнения зондовых измерений характеристик интегральных схем в автоматическом режиме без участия оператора. Для решения поставленных задач был предложен ряд моделей и алгоритмов.

Во-первых, была предложена модель хранения данных результатов измерений и настроек оборудования в едином файле проекта.

Существует два подхода при моделировании данных. Моделирование на основе документа с набором атрибутов и моделирование на основе контейнера элементов, описывающих более простые сущности. Второй подход позволяет проектировать более гибкие системы с возможности расширения типов хранимого контента.

При разработке последней версии ПАК ICCreatech ProMeas 4 была предложена новая модель файла измерительного проекта полупроводниковой пластины, названная CWMP (compact wafer measurement project). Эта модель сохранила концепцию возможности ручного доступа к файлам данных в случае возникновения проблем с системой, при этом увеличив скорость доступа и снизив эффективный занимаемый объем данных.

Модель представляет собой иерархически-структурированный расширяемый файловый архив, хранящий параметры проекта, настройки оборудования и модулей для проведения измерений, карту пластины и файлы с результатами измерений в виде изолированных объектов. Структура базовой модели проекта представлена на рисунке 1.

Верхний уровень структуры представляют файлы настроек модулей проекта, каждый из которых описывает состояние определенной подсистемы проекта на языке JSON:

- common.json хранит общие атрибуты проекта пластины, идентификатор сопроводительного листа, название проекта комплекта фотошаблонов;
- wafermap.json описывает карту раскрытия пластины, размеры и расположение отдельных чипов, меток совмещения;

- paths.json описывает идентификаторы и связи сформированных маршрутов обработки чипов на пластине;

- procJournal.json хранит журнал запуска автоматизированных задач на пластине.

На втором уровне подсистемы могут сохранять дополнительные данные, базовая модель содержит следующие элементы:

- parts/ содержит файлы описания частей карты пластины, используемые для настройки выборочного тестирования чипов или в случае разделения пластины на отдельные части;

- aprocs/ содержит файлы настроек автоматизированных процессов;

- data/ содержит файлы результатов измерений и дополнительные данные, которые могут быть сохранены внутри проекта.

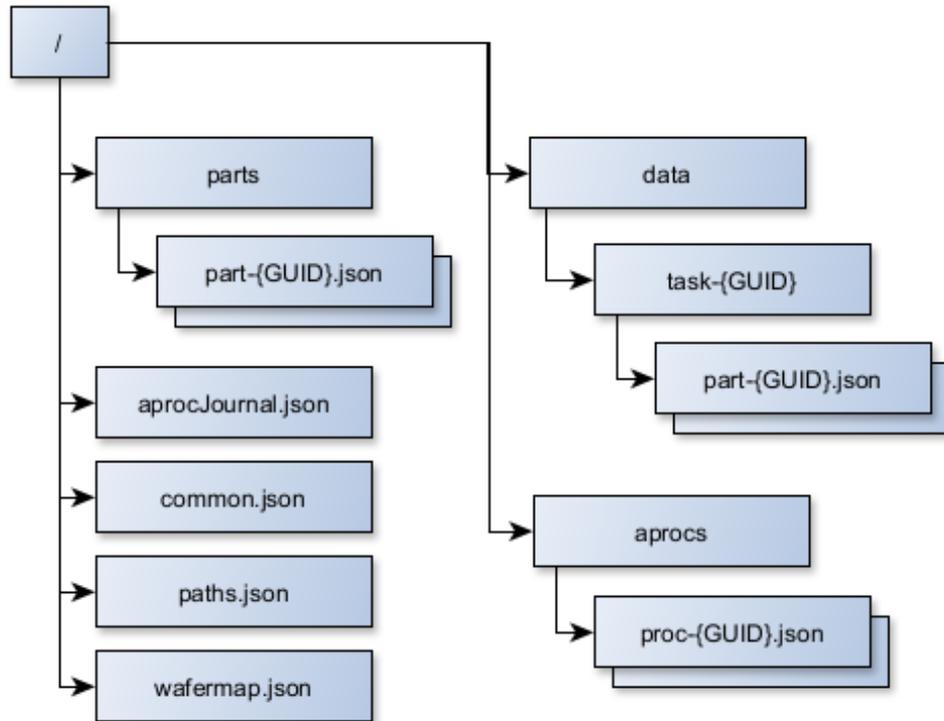


Рисунок 1 – Структура файла CWMP

Упаковка сформированных в соответствии с описанной моделью данных в один файл может осуществляться разными методами сжатия информации, например, алгоритм Deflate.

Для оценки эффективности снижения расхода дискового пространства при использовании предложенной модели был проведен сравнительный анализ с предыдущим способом хранения данных. Для этого была взята та же выборка проектов, что использовалась при исследовании перерасхода дискового пространства. Каждый проект был преобразован в формат, соответствующий новой модели, и упакован в файл, сжатый алгоритмом Deflate. После чего преобразованная выборка проектов была загружена на то же сетевое хранилище, где для каждого проекта было определено фактически занимаемое им пространство. После реализации предложенной модели в виде программного модуля было проведено сравнение времени загрузки данных в программу анализа результатов измерения в новом и старом формате.

Оцененное сокращение расхода дискового пространства, проведенное по линиям тренда, составило 78,1 раз. При этом время загрузки данных в новой модели сократилось в среднем в 11 раз.

Во-вторых, был предложен оригинальный метод автоматического выравнивания полупроводниковых пластин на столике станции с применением компьютерного зрения.

Выравнивание полупроводниковой пластины перед проведением зондового контроля электрических параметров интегральных схем является важной процедурой. Процедура выравнивания включает в себя определение угла корректировки, на который необходимо повернуть рабочий стол, чтобы направления осей X , Y установки совпали с осями X' , Y' раскроя пластины. Для автоматизации процесса выравнивания пластины был предложен оригинальный алгоритм определения угла корректировки на базе анализа линейной регрессии группы точек, расположенных на осевой линии пластины с поиском точек на изображении методом свертки двумерного Фурье преобразования.

Реализация данного метода требует решения двух задач:

- поиск группы точек, расположенных на одной линии на полупроводниковой пластине;
- определение угла коррекции по координатам найденных точек.

На первом этапе необходимо найти координаты набора точек, лежащих на одной линии, параллельной оси пластины. В качестве таких точек предложено использовать области пересечения стритов между отдельными чипами на пластине (рисунок 2), поскольку данные области являются ярко выраженными периодическими элементами пластины вне зависимости от различия топологий соседних чипов.

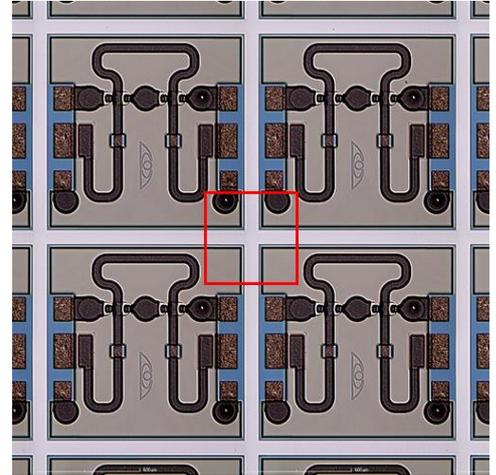


Рисунок 2 – Элемент совмещения

Для поиска таких элементов на изображении с микроскопа можно применить алгоритмы цифровой обработки изображений. В частности, было предложено использование способа поиска шаблона методом двумерного преобразования Фурье, который является одним из основных методов по нахождению необходимого объекта на изображении. Он представляет собой пошаговое сканирование шаблоном исходного изображения, причем на каждом шаге рассчитывается либо просто измеряется степень соответствия участка изображения существующему шаблону. По завершению сканирования на изображении выделяется область, которая соответствует шаблону в большей степени.

Общая блок-схема алгоритма выравнивания полупроводниковой пластины приведена на рисунке 3.

Для выравнивания полупроводниковой пластины оператору зондовой станции необходимо задать параметры выполнения процесса выравнивания и указать метку, по которой будет выполняться выравнивание путем перемещения полупроводниковой пластины в области обзора цифрового микроскопа, таким образом, чтобы метка совмещения попала в выделенную на экране область интереса. После чего алгоритм выполнит процедуру поиска меток и корректировки угла поворота держателя полупроводниковых пластин в полностью автоматическом режиме без участия человека.

Отличительной особенностью реализации данного алгоритма от аналогичных систем является наличие системы предварительного выравнивания. Предварительное выравнивание выполняет грубую корректировку угла поворота пластины по первым двум найденным меткам совмещения, что позволяет успешно решать задачу точного выравнивания без вмешательства оператора даже при значительных начальных углах поворота, когда при периодическом шаговом смещении вдоль оси выравнивания метка совмещения уходит из поля видимости микроскопа раньше завершения процесса выравнивания.

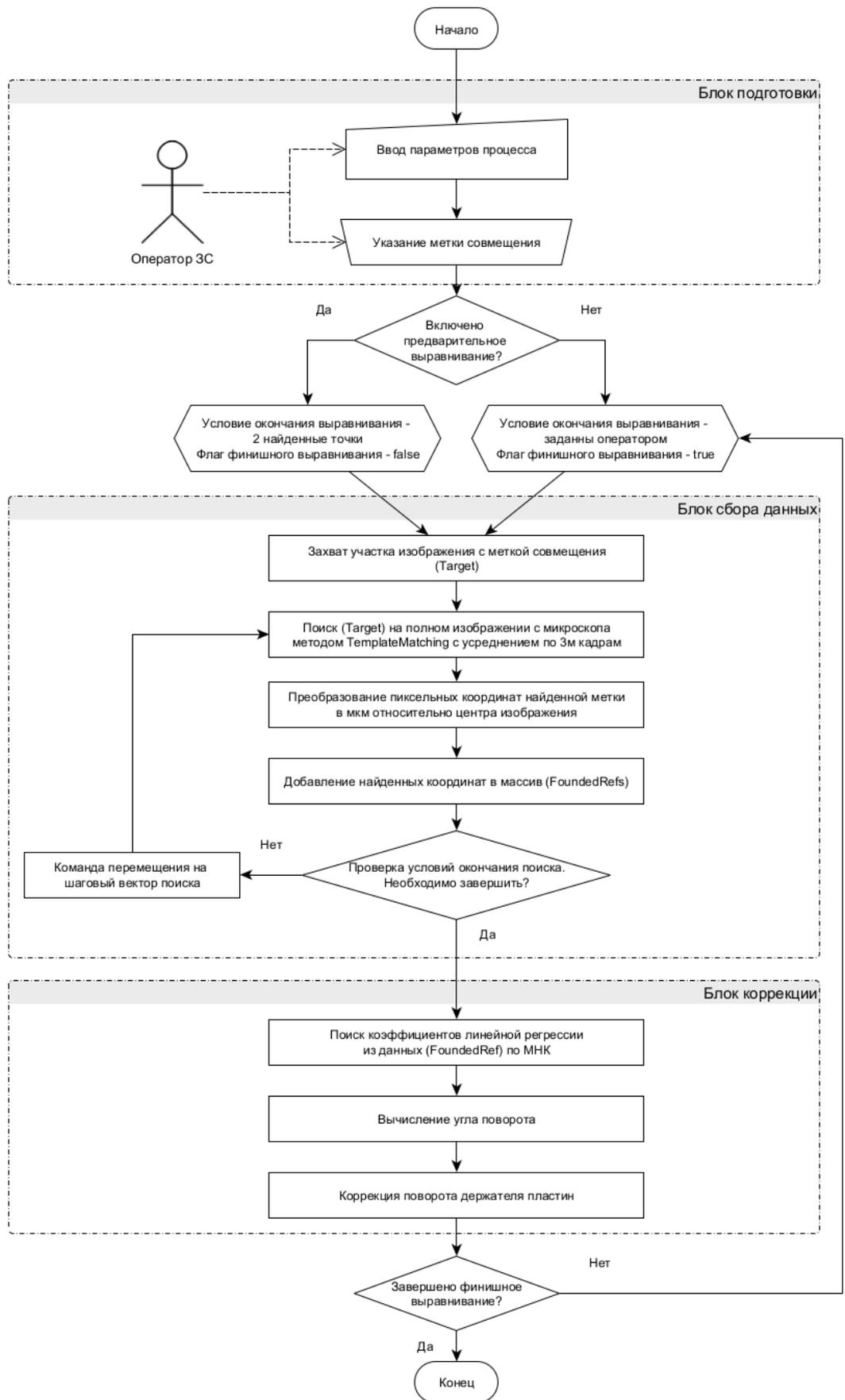


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма выравнивания полупроводниковой пластины с функцией предварительного выравнивания

В-третьих, предложен метод программной коррекции искривления линейных направляющих системы перемещения держателя полупроводниковых пластин, с применением для составления корректировочной таблицы машинного зрения и эталонного оптического шаблона.

Для количественной оценки ошибки позиционирования было предложено использовать специально изготовленный эталонный фотошаблон (рисунок 4) и алгоритм машинного распознавания меток (рисунок 3).

Методика оценки поперечной ошибки позиционирования заключается в выравнивании эталонного фотошаблона по поперечной оси и проходе вдоль исследуемой оси по непрерывной стороне линии фотошаблона с шагом равным ширине поля зрения цифрового микроскопа и определении положения границы линии на изображении при помощи алгоритма машинного зрения. На рисунках ниже представлены результаты оценки изменения поперечной ошибки позиционирования для оси X до исправления (рисунок 5) и после исправления (рисунок 6).

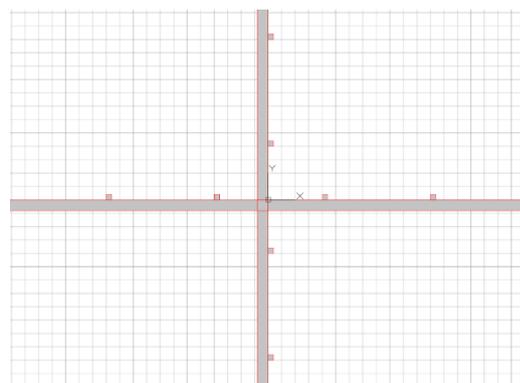


Рисунок 4 – Топология эталонного фотошаблона

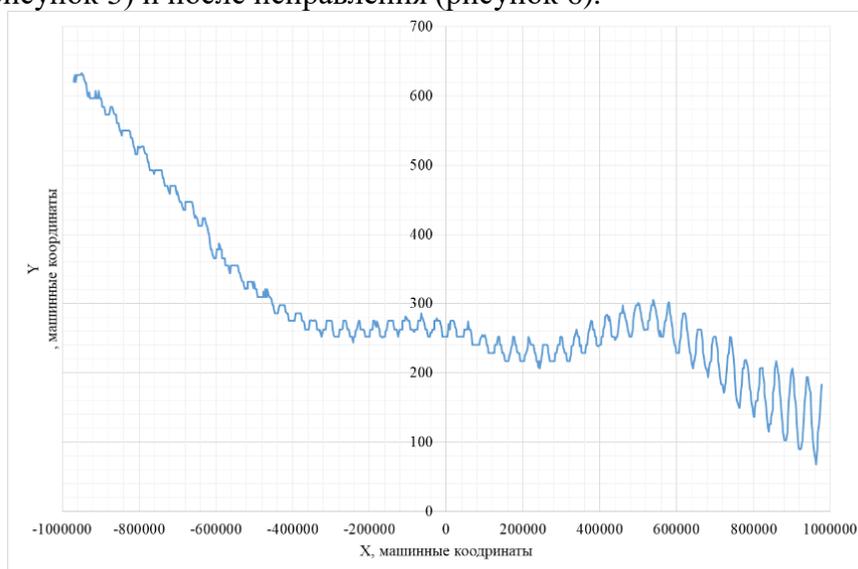


Рисунок 5 – Поперечное отклонение позиционирования до введения коррекции

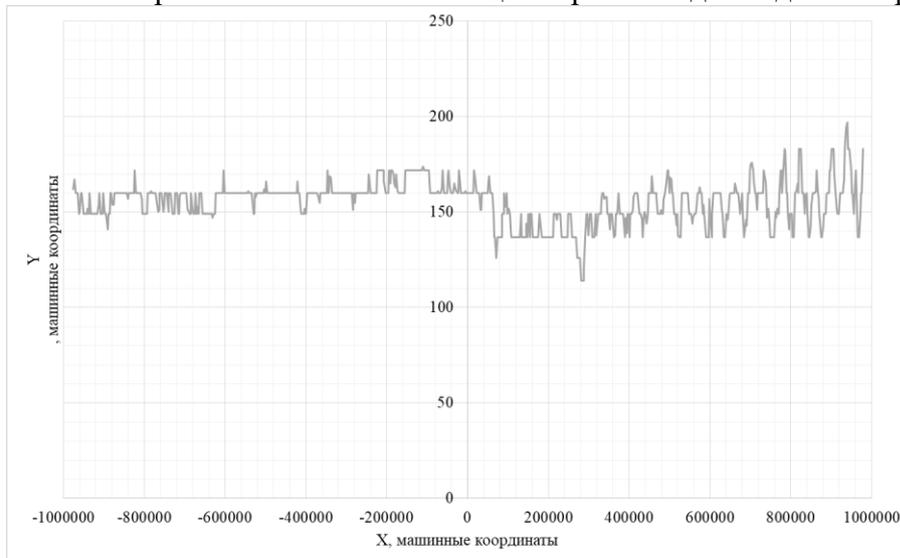


Рисунок 6 – Поперечное отклонение позиционирования после введения коррекции

Для верификации исправления поперечной ошибки по обоим осям было проведено измерение вектора отклонения изображения контактной площадки на изображениях цифрового микроскопа на выборке чипов по полупроводниковой пластине диаметром 76 мм. Гистограмма распределения амплитуды векторов отклонения представлена на рисунке 7.

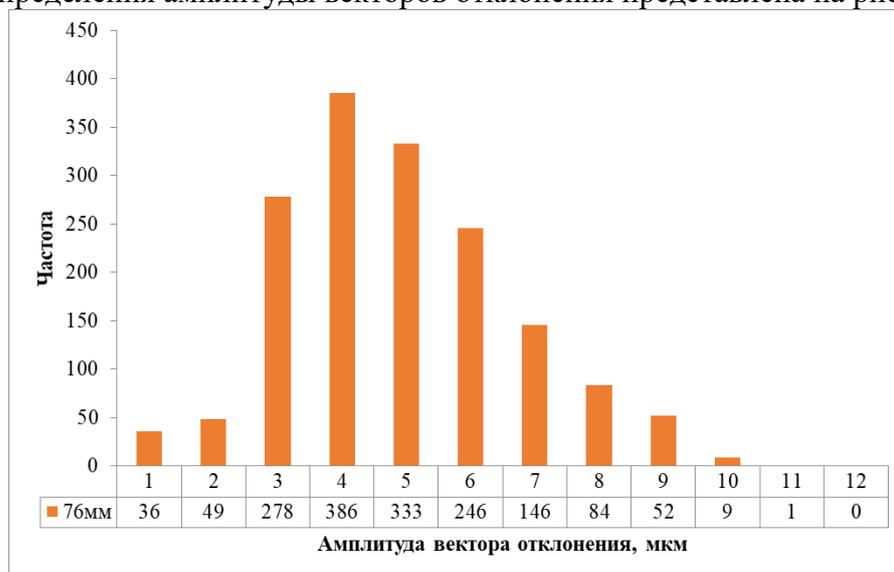


Рисунок 7 – Результат измерения вектора отклонения позиционирования на выборке чипов по полупроводниковой пластине диаметром 76 мм

Из данных экспериментальных измерений выведено среднее значение отклонения 3,4 мкм, стандартное отклонение составило 1,78 мкм. Таким образом, применение предложенного способа коррекции позволило повысить точность позиционирования зондов до $\pm 5,3$ мкм, что лучше изначального показателя более чем в 5 раз.

В-четвертых, предложен подход и алгоритм автоматизации процесса обработки пластин на зондовой станции: измерение электрических характеристик, фотографирование топологии, визуальный контроль, маркировка и т.д. Процессы обработки пластин делятся на два основных типа: операция над пластиной и операция над группой чипов. Исходя из этого была предложена уточненная формализация технологического процесса зондового контроля изделий на полупроводниковых пластинах (рисунок 8). А также предложена архитектура системы автоматизации процесса обработки пластины базовыми элементами которой являются процессы над пластиной и процессы над группами чипов. При этом поведение программы на самом верхнем уровне задается в виде конечного автомата (рисунок 9).

Желтым цветом в расширенной последовательности операций технологического процесса зондового контроля (рисунок 8) отмечены операции требующие участия оператора, зеленым цветом отмечены процессы, которые можно реализовать в автоматическом режиме. Отдельно отмечен процесс «Открытие проекта измерений», данный процесс выполняется оператором вручную, однако может быть сведен к считыванию специальной метки с технологической тары пластины или маршрутного листа и загрузки необходимых данных из информационной системы при наличии таковой.

В состоянии ожидания (рисунок 9) программа должна предоставлять пользователю доступ к пользовательским интерфейсам для взаимодействия с проектом пластины и взаимодействия с зондовой станцией. Доступна возможность ручного управления аппаратными компонентами системы. При этом перед оператором стоит задача открыть или создать файл проекта пластины, соответствующий размещенной на предметном столике пластине, выполнить разметку чипов и запустить необходимые задачи на выполнение.

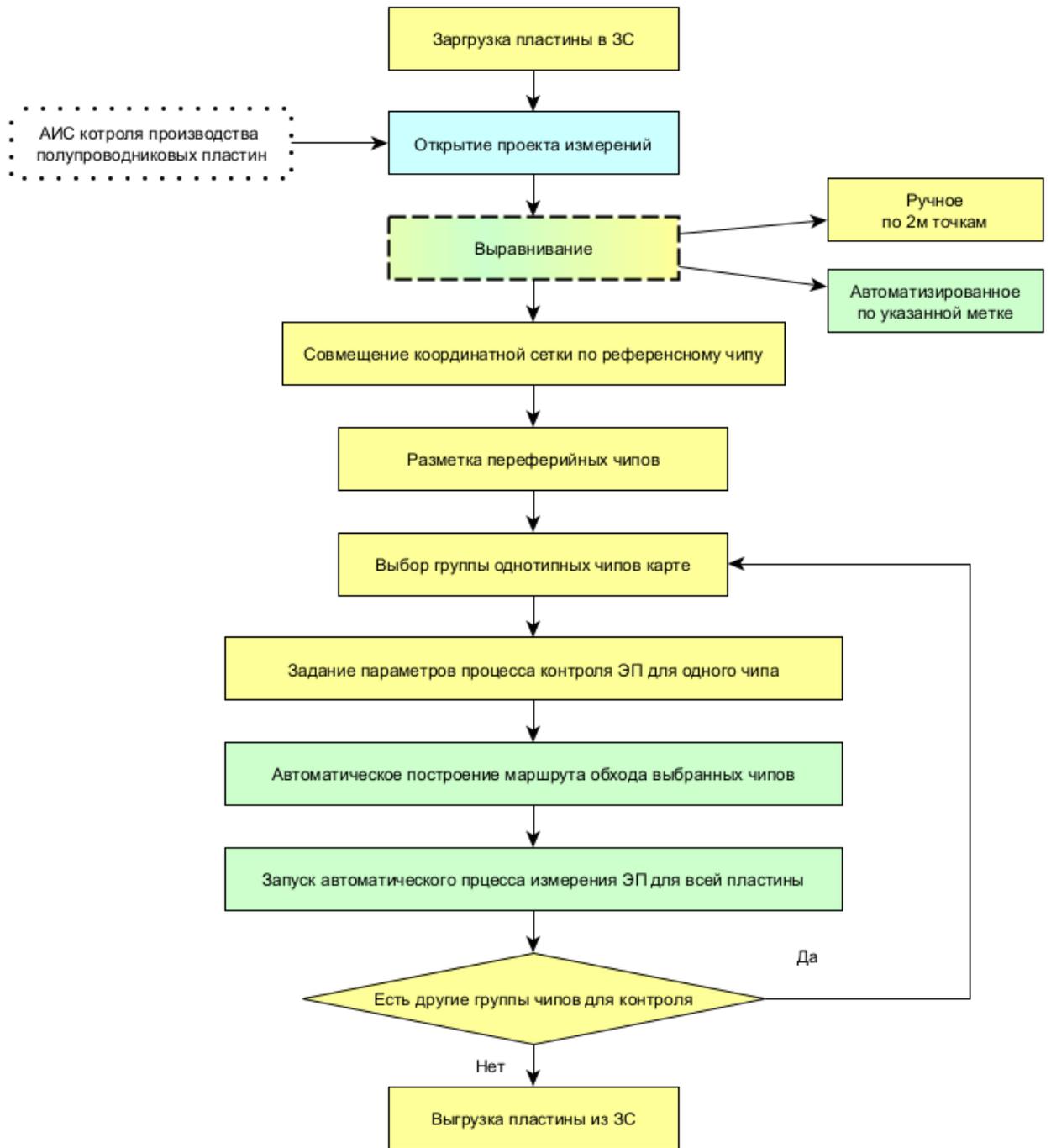


Рисунок 8 – Расширенная последовательность операций технологического процесса зондового контроля



Рисунок 9 – Конечный автомат верхнего уровня управления

- наличие средств автоматизации процесса измерения параметров изделий на полупроводниковых пластинах;
- поддержка расширяемой интеграции с различным измерительным оборудованием;
- поддержка клиентскими модулями вызова удаленных функций на сервере (RPC);
- реализация программно-конфигурируемых средств управления аппаратными системами измерительных комплексов;

К основным архитектурным принципам при проектировании программного решения, описанного в главе, относятся:

- проектирование комплекса в виде многомодульной системы, обеспечивающего гибкость и расширяемость;
- применение современных стандартов (WPF, gRPC, JSON, JWT, .NET6);
- применение многослойной архитектуры при проектировании сетевой архитектуры;
- использование единого механизма аутентификации пользователя в прикладных модулях системы;
- организация работы с информационными источниками посредством единой точки входа в виде центрального сервера, обеспечивающего виртуализацию схемы данных и независимость от фактической реализации хранилища.

Далее в главе для приведенных требований предложены варианты их реализации:

- организация работы с базой данных и информационными источниками через промежуточный сервер управления данными;
- применение механизма Component Model на базе динамически подключаемых библиотек для расширения и динамического формирования структуры прикладных модулей.
- применение собственной системы инструментальных интерфейсов для реализации библиотек управления любыми измерительными приборами.

Перечисленные предложения реализованы в архитектуре системы, показанной на рисунке 12.

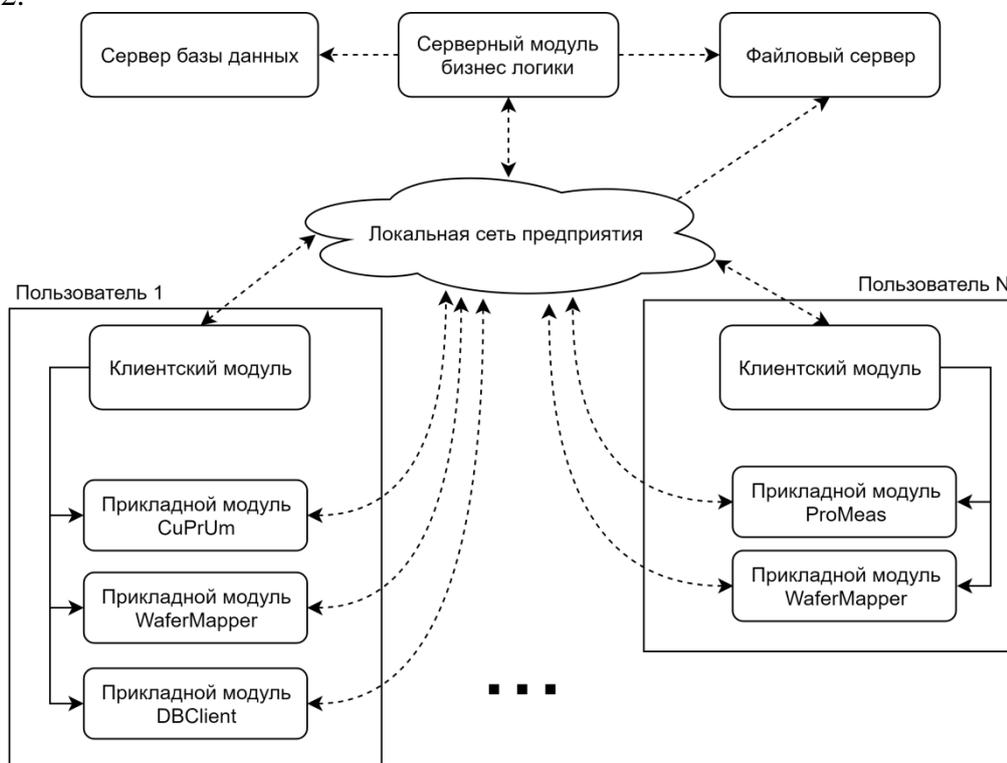


Рисунок 12 – Архитектура клиент-серверной системы комплекса

Отдельно стоит выделить модуль анализа данных измерений ICC CuPrUm. Программный модуль CuPrUm визуализирует измеренные электрические характеристики и позволяет выполнять их статистическую обработку и анализ посредством перемещаемых маркеров. На основе визуализации и статистической обработки оператор может выполнить отбраковку кристаллов путем удаления характеристик, не удовлетворяющих заданным условиям, на экране компьютера. Также программный модуль содержит систему визуального программирования VIScript, разработанную для выполнения математической обработки исходных данных.

VIScript – оригинальный язык математического преобразования данных, отличающийся применением принципов визуального программирования для определения алгоритма преобразования разработанный с целью внедрения в программный модуль возможности создания пользовательских алгоритмов обработки данных измерений без написания программного кода и перекомпиляции программного модуля. VIScript реализован в виде библиотеки классов, содержащей набор базовых интерфейсов и классов от которых наследуются все функциональные блоки используемые в алгоритмах VIScript. В отличие от текстовых скриптовых языков программирования данный язык позволяет изменять, создавать алгоритмы даже пользователям слабо знакомым с классическим программированием. Программист лишь в нестандартных случаях корректирует программный код, либо создает дополнительные функциональные блоки для последующего их использования в визуальном программировании.

При выполнении структура графа передается специальной программе исполнителю, которая последовательно обходит вершины графа и выполняет запрограммированные в них действия. Пример программы на языке VIScript представлен на рисунке 13.

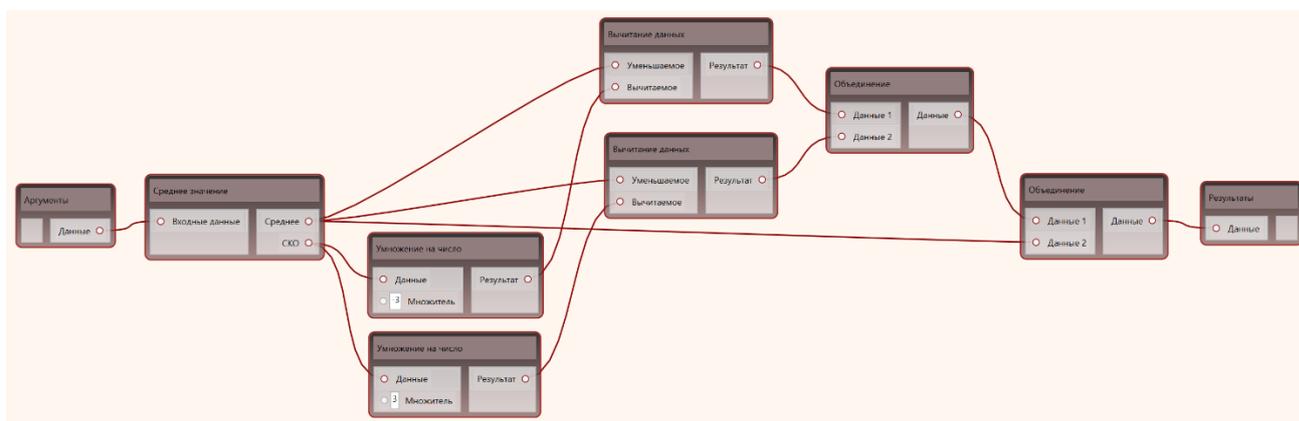


Рисунок 13 – Алгоритм статистической обработки массива данных на VIScript

Применение разработанного языка в интеграции с программным обеспечением автоматизации зондового контроля интегральных схем при анализе получаемых данных имеет преимущество перед классическими подходами к способам задания преобразований с помощью написания текстовых скриптов или использования сложных специализированных математических пактов программного обеспечения за счет наглядного представления потока преобразования данных и возможности быстрого комбинирования различных блоков преобразования между собой. На рисунке 14 представлен результат обработки массива данных 1250 графиков с результатами измерения S-параметров интегральных схем с пластины диаметром 50 мм с помощью скрипта показанного на рисунке 13.



Рисунок 14 – Результат статистической обработки массива данных с помощью VIScript

По входному массиву данных алгоритм выполнил для каждой частотной точки расчет среднего значения, среднеквадратичного отклонения, затем к среднему значению была прибавлена и отнята величина 3 СКО в двух независимых потоках данных, после чего все результаты вычислений были объединены в результирующий набор данных и отправлены для вывода на экран.

Таким образом, в работе показано что применение оригинального языка математических вычислений, основанного на принципах визуального программирования, при реализации модуля анализа данных АСУТП зондового контроля электрических параметров ИС позволяет осуществлять обработку данных в том числе для вычисления косвенных характеристик ИС при проведении отбраковки, а также способствует снижению порога вхождения относительно ручной обработки данных.

Четвертая глава посвящена описанию практического применения разработанного комплекса программ и инструментов при производстве монолитных интегральных схем.

Разработанный в рамках выполнения диссертационной работы модуль автоматизации зондовых измерений интегральных схем был использован в полуавтоматической зондовой станции Terra-200 (АО «НИИПП», Россия), предназначенной для контроля характеристик интегральных схем на пластинах до 200 мм, которая в последующем была внедрена в производственный цикл отдела разработки СВЧ интегральных схем и технологический комплекс интегральных схем АО «НИИПП» (рисунок 15).

Для реализации возможности управления аппаратной частью станции Terra-200 был разработан отдельный программный модуль, реализующий общие интерфейс блоков станции. Разработанный модуль позволил обеспечить управление исполнительными механизмами зондовой станции и провести испытания станции на полупроводниковых пластинах в лабораторных условиях. После чего опытный образец станции был установлен на производственной линии, где успешно прошел рабочие испытания и показал прирост производительности контроля электрических характеристик изделий.

Сравнительные замеры времени затрачиваемого, на ручной контроль и автоматизированные измерения показали, что при ручном выполнении контрольных измерений токов утечки на 50мм пластине, содержащей 1714 чипов, оператор затрачивает порядка 388 минут, при этом контроль параметров в полуавтоматическом режиме занимает 47

минут, что в 8,2 раза быстрее ручного контроля, а также исключает риски, связанные с человеческим фактором.

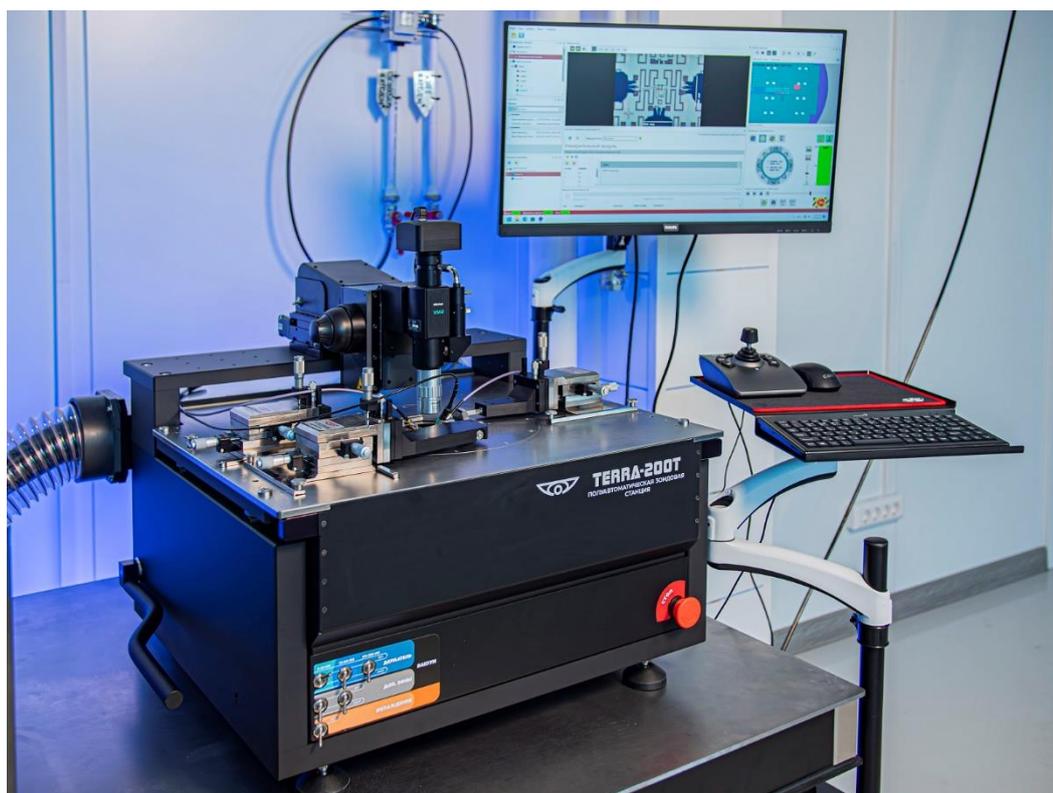


Рисунок 15 – Программно-аппаратный комплекс автоматизированных зондовых измерений на базе зондовой станции Terra-200 и ПО ProMeas 4

Помимо проведения измерений электрических параметров интегральных схем и полупроводниковых приборов разработанный программно-аппаратный комплекс, реализованный на базе полуавтоматической зондовой станции «Терра-200», был успешно протестирован при измерении СВЧ характеристик радиотонных микросборок, собранных на переходных керамических платах на базе сверхширокополосного электрооптического модулятора с интегрированным источником излучения (рисунок 16) и показал свою эффективность при проведении нестандартных измерений.

Разработанный комплекс программного обеспечения был успешно применен в производственном цикле изготовления монолитных интегральных схем СВЧ диапазона в АО «НИИПП». Серверный модуль и инфраструктура базы данных была развернута на внутреннем сервере АО «НИИПП» под управлением операционной системы на базе Linux ядра. В ходе развертывания системы клиентские модули были установлены на персональные компьютеры инженеров, занимающихся разработкой топологий интегральных схем, маршрутных технологов, отвечающих за разработку базовых технологий и ведение пластин по технологической цепочке, и на промышленные компьютеры, управляющие зондовыми

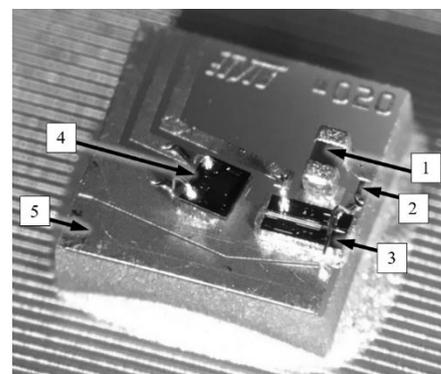


Рисунок 16 – Внешний вид радиотонной микросборки: 1 – блокировочный конденсатор; 2 – интегрированный согласующий резистор; 3 – кристалл ЭАМ с интегрированным лазером; 4 – кристалл мониторингового фотодиода; 5 – плата на AlN

станциями на измерительном участке. На рисунке 17 приведен пример пользовательского интерфейса программных модулей комплекса.

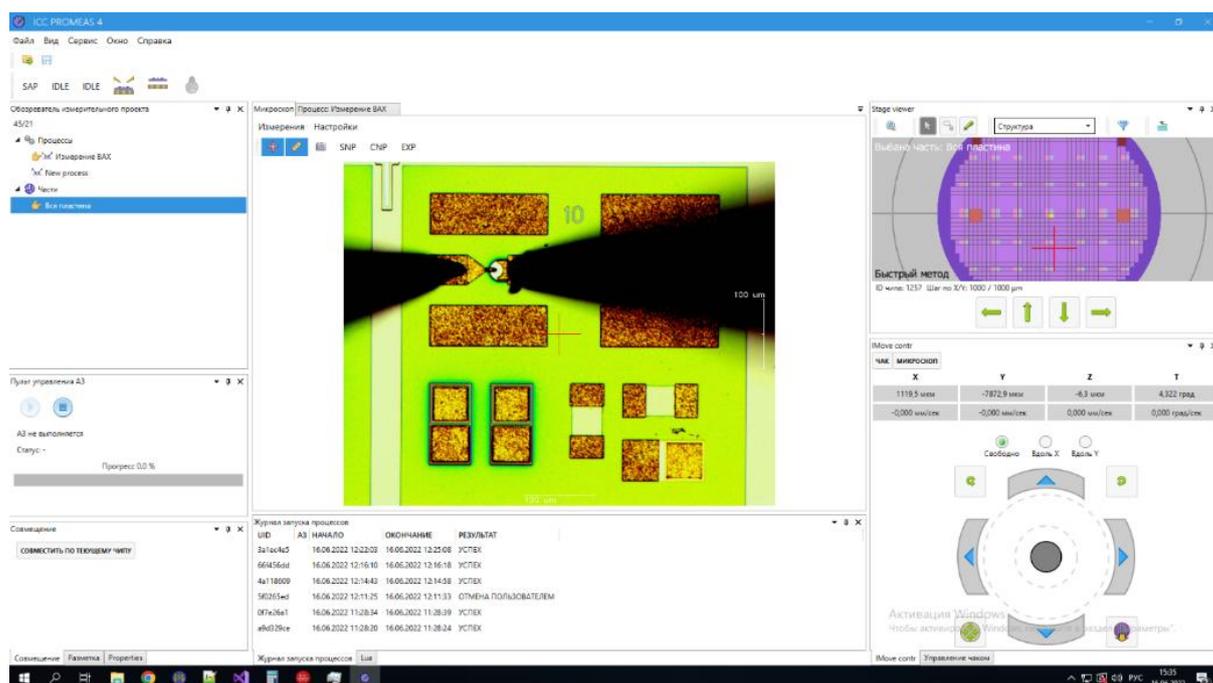


Рисунок 17 – Пользовательский интерфейс модуля зондовых измерений (процесс измерения рpn диодов)

Пользовательский интерфейс программного модуля автоматизации зондовых измерений полностью соответствует современным стандартам, имеет модульную оконную структуру и позволяет настроить пользовательское пространство под решаемые задачи.

В рамках комплекса задач по информационному обеспечению сопровождения процесса производства в системе при содействии маршрутных технологов была заполнена база данных базовых технологий. Сформированы цепочки стандартных операций, объединённых в технологические блоки, отвечающие за формирование определенных элементов топологии изготавливаемых интегральных схем. Из блоков составлены типовые маршруты базовых технологий, которыми обладает АО «НИИПП».

Сформированная база технологии позволила успешно интегрировать программный комплекс в этап подготовки производства пластины. В результате чего ускорился процесс проектирования комплекта фотошаблонов для производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе представлены результаты разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом зондового контроля электрических параметров ИС на неразделённых полупроводниковых пластинах.

В результате разработки АСУТП зондового контроля электрических параметров ИС были получены следующие результаты.

1. Был проведен обзор и анализ существующих программных систем автоматизации процесса зондового контроля электрических параметров ИС, определен перечень проблем, требующих решения при проектировании.

2. Выбрана базовая методология, средства и технологии построения АСУТП с учетом требования к модульности проектируемого программно-аппаратного комплекса автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров ИС.

3. Разработаны обеспечивающие подсистемы АСУТП: подсистема управления аппаратным обеспечением зондовой станции и подсистема сбора данных с измерительного оборудования. Показано, что разработанный и предложенный способ коррекции искривления линейных направляющих системы перемещения с применением для составления корректировочной таблицы машинного зрения и эталонного оптического шаблона позволяет повысить точность позиционирования на полупроводниковой пластине до $\pm 5,3$ мкм. Кроме этого показано, что применение при автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров интегральных схем метода организации хранения данных на основе структурированного zip архива, позволяет снизить потребление дискового пространства для хранения результатов зондовых измерений электрических параметров ИС на АРМ среднем в 2,1 раза, на сетевом хранилище предприятия в среднем более чем в 78 раз, а также обеспечивает повышение скорости обмена данными между модулями АСУТП более чем в 11 раз.

4. На основе разработанной АСУТП зондового контроля электрических параметров ИС был создан и внедрен в производственный цикл программно-аппаратного комплекс зондового контроля электрических параметров ИС, что повысило эффективность работы за счет автоматизации сбора данных в технологическом процессе, цифровизации учета данных и повышения их доступности на рабочих станциях операторов и инженеров. Внедренный программно-аппаратного комплекс зондового контроля электрических параметров ИС позволил снизить трудозатраты на проведение выходного контроля готовых приборов более чем в 8 раз.

5. Результаты работы использованы в процессах проектирования и технологического контроля изготовления МИС СВЧ, а также в производстве полуавтоматических зондовых станций «Терга-200» на предприятии «АО «НИИПП» и при измерении СВЧ цепей радиофотонных микросборок в лаборатории интегральной оптики и радиофотоники ТУСУР, что подтверждается полученными актами использования результатов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК:

1. Ширяев Б. В., **Аргунов Д. П.**, Жидик Ю. С., Ющенко А. Ю., Лаптев И. В. Алгоритм автоматического контроля внешнего вида ИС на основе вычисления пиксельного расстояния // Изв. вузов. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 432-446.
2. Юнусов И.В., Арыков В.С., Степаненко М.В., Жук Г.Г., **Аргунов Д.П.**, Шейнбергер А.А. Сверхширокополосный электрооптический модулятор с интегрированным источником излучения // Доклады ТУСУРа. – 2024. – Т 27, № 3.
3. Ширяев Б. В., **Аргунов Д. П.** Повышение эффективности алгоритма автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2022. – № 4. – С. 56-62.

Публикации в журналах, индексируемых в Web Of Science:

4. Shiryayev B.V. Algorithm for automated visual inspection of MMIC using a classifier based on neural networks [Электронный ресурс] / B.V. Shiryayev, 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. Shiryayev, 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).

Свидетельства на регистрацию ПО для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667603 Российская Федерация. "Программное обеспечение "CuPrUm" : № 2022666830: заявл. 13.09.2022 : опублик. 22.09.2022 / **Д. П. Аргунов** ; заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов».
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667536 Российская Федерация. "Программное обеспечение "ProMeas4" : № 2022666802: заявл. 14.09.2022 : опублик. 21.09.2022 / **Д. П. Аргунов** ; заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов».

Публикации в других журналах, сборниках научных трудов и материалах научных и научно-практических конференций:

1. **Аргунов Д. П.** Разработка программного обеспечения для выполнения автоматизированных зондовых измерений СВЧ-МИС / **Д. П. Аргунов** // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – № 1-3. – С. 171-174.
2. 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 // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-1. – С. 136-137.
3. 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 // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-1. – С. 148-149.
4. **Аргунов Д. П.** Программа построения карт полупроводниковых пластин для проведения автоматизированных зондовых измерений СВЧ МИС / **Д. П. Аргунов**, А. В. Безрук, А. Ю. Ющенко // Российская наука в современном мире : Сборник статей XIV международной научно-практической конференции, Москва, 20 февраля 2018 года. – Москва: Актуальность.РФ, 2018. – С. 34-35.