

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

На правах рукописи



Аргунов Дмитрий Пантелеевич

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗАЦИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЗОНДОВОГО КОНТРОЛЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ 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 – 2024

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Оглавление .....	2
Введение .....	5
1. Обзор устройств, методов и программных комплексов зондовых измерений	14
1.1. Производство интегральных схем.....	14
1.2. Устройства зондового контроля .....	16
1.3. Методы анализа данных .....	21
1.4. Программное обеспечение .....	25
1.4.1. Специализированное программное обеспечение для автоматизации измерений.....	26
1.4.2. Программное обеспечение для автоматизации зондовых измерений.	30
1.4.3. Программное обеспечение для анализа и обработки данных измерений.....	32
1.5. Формализация технологического процесса зондового контроля .....	33
1.6. Выводы по главе.....	35
2. Предложенные алгоритмы .....	37
2.1. Метод хранения данных измерений.....	37
2.1.1. Анализ файлового подхода к хранению данных .....	37
2.1.2. Структура проектов пластины в формате XML .....	39
2.1.3. Новая модель файла измерительного проекта пластины CWMP .....	40
2.2. Алгоритм выравнивания пластины.....	43
2.2.1. Ручное выравнивание по 2м точкам. ....	44
2.2.2. Автоматический поиск натренированных меток совмещения .....	45
2.2.3. Поиск базового среза по всему изображению пластины.....	45
2.2.4. Выравнивание на основе Фурье преобразований изображения пластины.....	48

2.2.5. Алгоритм выравнивания на основе линейной регрессии группы точек	49
2.3. Метод коррекции искривления линейных направляющих.....	54
2.4. Алгоритмы автоматизации зондовых измерений.....	59
2.5. Выводы по главе.....	65
3. Реализация программы и инфраструктура системы .....	66
3.1. Методология проектирования .....	66
3.2. Требования и постановка задачи.....	67
3.3. Выбор архитектурных решений .....	68
3.3.1. Выбор программной платформы.....	69
3.3.2. Архитектура сетевого взаимодействия .....	69
3.3.3. Обеспечение безопасности транспортной системы .....	73
3.4. Клиентский модуль.....	74
3.5. Модуль базы данных ICC Environment.....	76
3.6. Модуль создания карт раскроя ICC WaferMapper.....	78
3.7. Модуль зондовых измерений ICC ProMeas4.....	85
3.7.1. Назначение.....	85
3.7.2. Подсистема автоматизации измерений .....	86
3.8. Модуль Анализа данных измерений ICC CuPrUm.....	91
3.9. Выводы по главе.....	101
4. Описание практического применения .....	102
4.1. Применение программного модуля зондовых измерений в связке с полуавтоматической зондовой станцией Terra-200.....	102
4.2. Внедрение программного комплекса в процесс АО «НИИПП».....	105
4.3. Выводы по главе.....	109
5. Заключение .....	110
Список литературы .....	112
Приложение А .....	117

Приложение Б .....	118
Приложение В .....	119
Приложение Г .....	120

## ВВЕДЕНИЕ

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 интегральных схем (ИС), используя единый инструмент, расширение функционала которого не потребует высоких трудозатрат.

**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.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- 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 ХУ, *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 «Terra-200», был 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.).

**Объектом исследования** является технологический процесс зондового контроля электрических параметров интегральных схем (ИС) 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.

**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  $XU$  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 обоснованность** 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.

#### **Апробация результатов работы.**

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.

*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* произведён литературный обзор по теме диссертационного исследования. В первом пункте рассматриваются общие принципы организации процесса производства интегральных схем. Показано, что для контроля технологических процессов при изготовлении ИС требуется проведение большого количества измерений электрических параметров. Во втором пункте описаны основные способы контроля электрических характеристик интегральных схем и используемое для этого технологическое оборудование. 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. 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. Была предложена модель хранения данных результатов измерений и настроек оборудования в едином файле проекта. Предложен оригинальный метод автоматического выравнивания полупроводниковых пластин на столике станции с применением компьютерного зрения. Предложен метод программной коррекции искривления линейных направляющих системы перемещения держателя полупроводниковых пластин с применением алгоритмов цифровой обработки изображения эталонного фотошаблона для составления корректировочной таблицы. Предложен подход и алгоритм автоматизации процесса обработки пластин на зондовой станции, базовыми элементами которого являются процессы над пластиной и процессы над группами чипов.

*В третьей главе* рассмотрены технические требования к программной системе, архитектурные и структурные решения, а также практическая реализация программных модулей. Приведены основные технические требования, которым должна удовлетворять разрабатываемая программная система сопровождения производства и зондового контроля полупроводниковых приборов и интегральных схем должна отвечать ряду функциональных и

нефункциональных требований, а также приведены принципы ее проектирования и реализации.

*Четвертая глава* посвящена описанию практического применения разработанного программно-технического комплекса автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров интегральных схем. Разработанный комплекс программного обеспечения был успешно применен в производственном цикле изготовления монолитных интегральных схем СВЧ диапазона в АО «НИИПП». Показано, что разработанная комплексная программная система, обеспечивающая выполнение полного цикла мероприятий зондового контроля электрических параметров интегральных схем на полупроводниковых пластинах, снижает трудозатраты на проведение выходного контроля готовых приборов.

*В выводах* диссертационной работы подведены основные итоги проведенной работы и сформулированы результаты, представляемые к защите.

# 1. ОБЗОР УСТРОЙСТВ, МЕТОДОВ И ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

## 1.1. Производство интегральных схем

В последнее время монолитные интегральные схемы СВЧ диапазона (далее – МИС СВЧ) получили довольно широкое распространение, как в военной, так и в гражданской промышленности, особенно в сотовой телефонии. Наиболее типичными МИС являются маломощные усилители, смесители, усилители мощности, модуляторы и т.д. и на основе таких МИС легко построить устройство более высокого уровня, например, приемник. Существуют также и устройства, целиком реализованные в виде одной МИС, например, МИС-приемник, выполненный на едином кристалле. Постоянно растущий спрос на МИС СВЧ приводит к увеличению объемов их продаж и, как следствие, непрерывному развитию и росту объемов их производства. Любой производитель всегда заинтересован в обеспечении высокого процента выхода годных изделий его производства. Не является исключением и производство МИС СВЧ. Для этих целей на фабриках полупроводниковой промышленности, как правило, реализовываются целые комплексы специальных мер, обеспечивающих контроль качества на всех этапах техпроцесса производства полупроводниковых изделий, включая методологию его реализации и методики проведения частных технологических операций, а также настройку и применение автоматизированных систем управления.

Отдельное и довольно пристальное внимание всегда уделяется контролю технологии, в рамках которого проводится мониторинг состояния оборудования, контроль качества используемых материалов (в т.ч. подложек и технологических сред), контроль чистоты производственных помещений (чистых комнат), контроль параметров отдельных техпроцессов и промежуточный контроль параметров изготавливаемых изделий. Исходя из вышесказанного становится очевидным, что производство СВЧ МИС является довольно сложным многоступенчатым процессом, который состоит из десятков, а порой и сотен

отдельных технологических операций. Каждая из этих операций может быть подвержена влиянию различных параметров, поэтому при промежуточном и итоговом контроле, осуществляется большое количество измерений специально размещаемых на полупроводниковой подложке тестовых модулей, позволяющих определять параметры и характеристики используемых материалов и элементов МИС без разрушения основных изготавливаемых элементов. Значительное количество контролирующих технологический процесс мероприятий и операций не только способствует оперативному выявлению и устранению ошибок в технологическом процессе, повышая тем самым процент выхода годных изделий, но и несколько усложняет общий процесс производства МИС СВЧ. При таких обстоятельствах разработка и внедрение автоматизированных систем управления технологическим процессом является весьма актуальной задачей.

Технологический процесс производства СВЧ МИС условно можно разделить на несколько ключевых этапов (рисунок 1.1).

Первый этап – подготовительный, данный этап включает в себя получение исходных монокристаллических полупроводниковых подложек уже с выращенной на них эпитаксиальной структурой, а также создание и регистрацию необходимых сопроводительных документов.

Второй этап – изготовление, на данном этапе на полупроводниковых пластинах формируется топология будущих микросхем путем проведения различных технологических операций – напыление, окисление, фотолитография, имплантация и термическая обработка. Последовательность, тип и параметры данных операций определяются технологией, изготавливаемой МИС.

Второй этап так же включает в себя межоперационный контроль. Межоперационный контроль выполняется для контроля технологических процессов с целью корректировки режимов при возникновении отклонений.

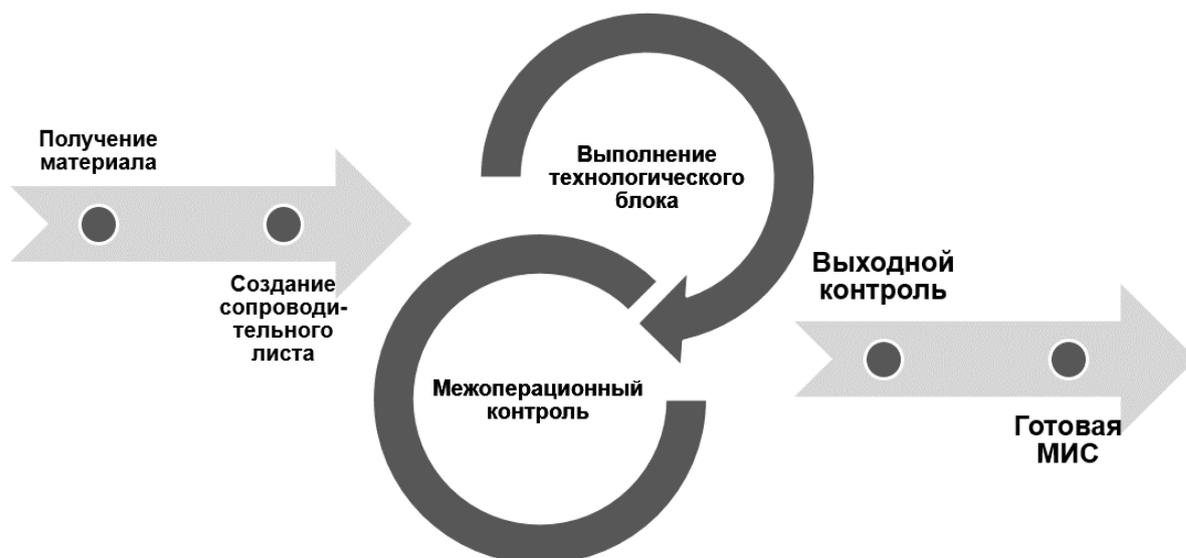


Рисунок 1.1 – Схема производства СВЧ МИС

Третий этап – заключительный, на данном этапе производится выходной контроль электрических характеристик СВЧ МИС методом зондового контроля, с последующим разделением полупроводниковых пластин на отдельные кристаллы. Полностью годные кристаллы корпусируются, либо поставляются заказчику в исходном виде.

## 1.2. Устройства зондового контроля

Контроль электрических параметров является обязательным этапом производства устройств электронной техники, в том числе СВЧ МИС. А при изготовлении полупроводниковых приборов контроль их характеристик требуется на всех этапах производства. Один из видов такого контроля – зондовые измерения. Для метрологов и работников ОТК важно иметь простой и удобный инструмент, не требующий больших временных затрат на измерения. Процесс технического контроля в сфере производства СВЧ МИС сегодня невозможен без зондовой станции, обеспечивающей высокую точность измерений электрических параметров производимых МИС. Зондовые станции предназначены практически для всех видов исследований и испытаний тестовых элементов, обязательных на каждом этапе изготовления полупроводниковых приборов в соответствии с технологическим маршрутом, а также для входного контроля качества

изготовленной продукции. Зондовые станции обеспечивают DC и RF измерения, а также измерения сигналов большой мощности.

Тестирование СВЧ МИС осуществляют в несколько этапов. На первом этапе проводят параметрические DC или RF измерения полупроводниковых пластин (измерение ВАХ, ВФХ, импульсные измерения). При проведении измерений производится отбраковка дефектных изделий с расстановкой отметок на карте полупроводниковой пластины. Это позволяет оценить процент выхода годных кристаллов и определить уровень эффективности реализации техпроцесса. Однако, даже при условии хорошей воспроизводимости техпроцесса изготовления СВЧ МИС изготовленные изделия на подложке обладают разбросом параметров. При этом зондовые измерения позволяют выполнить сортировку изделий по категориям отклонения от заданных значений параметров.

Зондовые станции, с помощью которых проводятся зондовые измерения, как правило, имеют в своем составе подложкодержатель, микроскоп, сам зонд и позиционеры для управления его перемещением. Зонды могут иметь разную конструкцию в зависимости от параметров, которые необходимо определить с его помощью. Для получения максимально корректных данных при осуществлении зондовых СВЧ измерений параметров интегральных схем используется СВЧ-зонд не вносящий искажения в измеряемый сигнал. Устройство такого зонда состоит из копланарной (контактной) части, подключаемой к измеряемой интегральной схеме, и разъемной части для соединения с измерительным оборудованием. При измерении параметров СВЧ МИС зонд и контактная площадка под него реализованы по схеме земля-сигнал-земля.

Существует несколько разновидностей зондовых станций для выполнения технологического процесса измерений электрических характеристик МИС на полупроводниковых пластинах.

Ручные зондовые станции – предназначены для выполнения зондовых измерений одиночных кристаллов, проведения межоперационного контроля характеристик различных элементов на полупроводниковых пластинах. Характеризуются простотой конструкции и эксплуатации, а также низкой

стоимостью. Позиционирование зондов и загрузка полупроводниковых пластин осуществляется оператором вручную, что делает практически невозможным полноценную автоматизацию процесса контроля параметров тестовых элементов и ИС. Ниже приведены примеры ручных зондовых станций TS150 производства компании MPI Corporation [1] (Рисунок 1.2) и OmegaAir-150mmW производства АО «НИИПП» (Рисунок 1.3).



Рисунок 1.2 – Ручная зондовая станция MPI TS150



Рисунок 1.3 – Ручная зондовая станция OmegaAir-150mmW для проведения load-pull измерений

Полуавтоматические зондовые станции – принципиально отличаются от ручных зондовых станций наличием моторизированных приводов перемещения держателя полупроводниковых пластин, как правило имеют в своем составе интегрированный промышленный компьютер, посредством которого осуществляется управление всеми компонентами зондовой станции. На рисунке 1.4 представлена полуавтоматическая зондовая станция Summit 12000 производства компании Cascade [2].

Загрузка полупроводниковых пластин в данном типе зондовых станций осуществляется так же вручную оператором. Но благодаря наличию моторизированных приводов, позволяющих перемещать держатель полупроводниковых пластин вдоль осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  с точностью до 5 мкм [3] и моторизированного поворотного механизма, с помощью данного вида зондовых станций возможно осуществление автоматизированных зондовых измерений электрических характеристик большого числа МИС на полупроводниковых пластинах без непосредственного участия оператора в процессе измерения.

Данный тип зондовых станций отличается от ручных зондовых станций существенного большей стоимостью, большими габаритами, а соответственно и массой установки, также для работы с полуавтоматическими зондовыми станциями требуется специальное программное обеспечение, что так же требует от оператора более высокой квалификации.



Рисунок 1.4 – Полуавтоматическая зондовая станция Cascade Summit 12000

Последний класс зондовых станций – автоматические зондовые станции, в их конструкцию входят специальные механизмы, предназначенные для автоматической подачи полупроводниковых пластин из кассеты на предметный столик станции. На рисунке 1.5 представлена полностью автоматическая зондовая станция CM300xi производства компании Cascade.



Рисунок 1.5 – Полностью автоматическая зондовая станция Cascade CM300xi

Данный тип зондовых станций хорошо подходит для крупных кремниевых фабрик с большим потоком полупроводниковых пластин большого диаметра (приведенная зондовая станция поддерживает автоматическую загрузку пластин из кассеты с диаметром 200 и 300 мм [4]). Автоматические зондовые станции так же оснащены моторизированными приводами перемещения держателя полупроводниковых пластин и не требуют непосредственного участия оператора в процессе измерения.

### **1.3. Методы анализа данных**

Проверка качества продукции, как и анализ и обработка экспериментальных данных зачастую осуществляются с применением методов математической статистики, которые, в свою очередь, являются основой теории планирования эксперимента и статистического контроля процесса. В контексте контроля технологического процесса планирование эксперимента [5] представляет собой методику, которая помогает определить наиболее важные или особо ответственные параметры процесса с использованием минимального числа экспериментов. Такая методика может применяться как для повышения надежности и/или устранения имеющихся сложностей уже действующего технологического процесса, так и при разработке нового. Другой наиболее часто

применяемой методологией является статистический контроль техпроцесса [5], который представляет собой определенный комплекс методик, основанных на математической статистике и предназначенных для контроля производственного процесса с целью повышения качества продукции и выявления имеющихся ошибок на ранних этапах. Постепенный уход параметров технологического процесса, изменение параметров оборудования, а также некачественные исходные материалы и т.п. могут стать причиной возникновения ошибок. В статистическом контроле техпроцесса существует такое понятие как контролируемый параметр, под которым понимается некая измеряемая величина, определяющая качество выпускаемого изделия. Для МИС обычно контролируемые параметрами являются электрофизические параметры используемых материалов (удельное сопротивление, удельная емкость) или приборные характеристики (например, ток насыщения транзистора). Но кроме них могут контролируемым параметром могут быть и СВЧ характеристики схемы, такие как коэффициент усиления, коэффициент шума и т.д. в статистическом контроле процессов, параметры, подвергающиеся контролю, являются случайными, распределенными по нормальному закону, величинами.

Рассмотрим подробнее некоторые средства статистического анализа, которые применяются при производстве СВЧ МИС.

Одним из таких средств является гистограмма, которая визуально представляет собой распределение частот появления выбранных переменных в установленных интервалах [6]. Пример гистограммы приведен на рисунке 1.6.

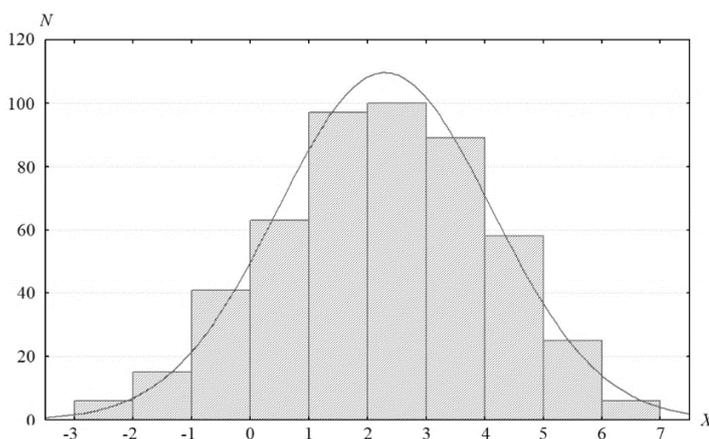


Рисунок 1.6 – Пример гистограммы

По оси  $x$  откладываются числовые значения контролируемой величины, которые разбиты на диапазоны или интервалы. Каждому диапазону соответствует столбец гистограммы; ширина столбца соответствует величине интервала, а высота представляет собой количество элементов в наборе данных, значения которых попадают в этот интервал. Понимание распределения данных является важным моментом в процессе их изучения [7].

Другим широко применяемым средством статистического контроля является контрольная карта (карта Шухарта). Это инструмент, позволяющий отслеживать ход протекания технологического процесса во времени и при выявлении отклонений от предъявляемых к процессу требований, воздействовать на него. Она представляет собой линейчатый график, построенный на основании значений контролируемого параметра технологии изготовления в зависимости от порядкового номера изделия. От обычных линейчатых графиков контрольные карты отличаются только дополнительно нанесенными горизонтальными линиями. Также на контрольную карту наносят ряд зон по степени удалённости от центральной линии. Область значений контрольного параметра, отличающихся от среднего значения не более чем на  $\sigma$ , называется зоной С, отличающихся от среднего не более чем на  $2\sigma$  – зоной В, отличающихся не более чем на  $3\sigma$  – зоной А. Для определения того, что технологический процесс перестал быть управляемым, используется набор критериев, зафиксированных в стандартах,

например, в ГОСТ Р 50779.42-99 [8]. Примеры подобных критериев приведены на рисунке 1.7.

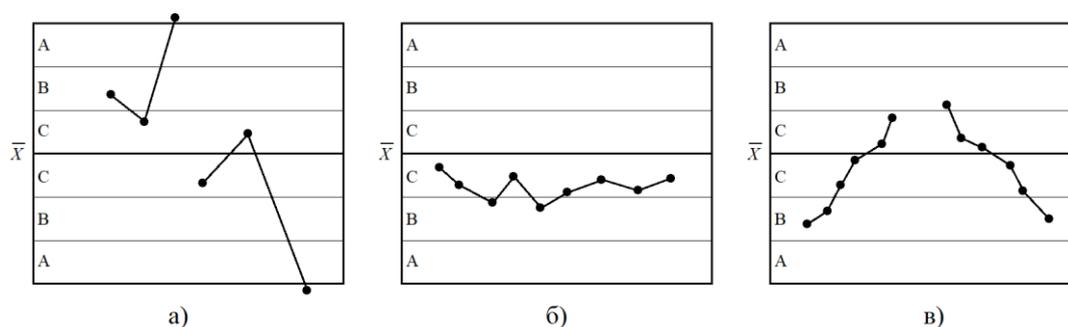


Рисунок 1.7 – Примеры критериев неуправляемого процесса для контрольных карт: а) точка вне зоны А; б) 9 точек подряд по одну сторону от центральной линии; в) 6 возрастающих или убывающих точек подряд

Следующим инструментом статистического контроля является распределение параметров ИС по подложке. Этот инструмент является специфическим и используется в полупроводниковой промышленности. В одном технологическом цикле на полупроводниковой пластине может одновременно изготавливаться от сотен до нескольких тысяч одинаковых микросхем. Из-за возможной нестабильности некоторых технологических операций физические свойства обрабатываемой поверхности или наносимого материала по пластине могут оказаться неоднородными (например, может возникнуть градиент температуры, неодинаковая толщина наносимого резиста, различная скорость травления и т.п.). Такая ситуация является нежелательной, но вполне возможной при отладке технологической линии и при поломке оборудования. Поэтому целесообразно оценивать пространственное распределение контролируемого параметра по подложке. Для этого обычно проводят визуализацию распределения параметра на специальном графике. График представляет собой круговое поле пластины, на которой размещены квадраты, соответствующие измеренным элементам (кристаллам МИС). Для каждого элемента определенным образом (например, цифрами, цветом и т.д.) отмечается значение контролируемого параметра. В результате график наглядно показывает распределение значений

параметра ИС в пределах пластины, по нему можно сделать вывод об однородности технологического процесса [7].

#### **1.4. Программное обеспечение**

Для контроля качества выполнения технологических операций в процессе производства СВЧ интегральных схем как правило проводится большое количество различных зондовых измерений их электрических характеристик. При проведении измерений в DC режиме оцениваются электрофизические характеристики материалов и некоторые параметры реализованного технологического процесса. Кроме того, в DC режиме проводятся измерения ВАХ полупроводниковых диодов и транзисторов. При необходимости проведения измерений на высоких рассеиваемых мощностях для предотвращения пробоя измеряемого полупроводникового прибора вследствие его перегрева применяются импульсные измерения ВАХ. С применением векторного анализатора цепей осуществляется оценка малосигнальных параметров рассеяния СВЧ МИС и их элементов. Оценка уровня шумовых параметров транзисторов может проводиться как в стандартном тракте, так и в режиме варьирования коэффициента отражения генератора для определения его оптимального значения и соответствующего минимального коэффициента шума (load-pull измерения коэффициента шума). Также определяются мощностные характеристики усилителей мощности, обуславливающие выходную мощность, динамический диапазон и линейность СВЧ устройства. Для мощных транзисторов выполняются такие load-pull измерения в режиме варьирования коэффициента отражения нагрузки с целью определения его значения, соответствующего максимальной выходной мощности [7].

Измерения современных СВЧ устройств и их компонентов часто требуют одновременной работы множества измерительных приборов в рамках одного стенда, что может быть весьма трудоемким процессом. Например, для создания нелинейной модели СВЧ транзистора необходимо провести измерения малосигнальных параметров рассеяния в большом количестве рабочих точек (около 100 и более). Выполнение таких измерений вручную требует значительных

временных затрат. Однако многие современные измерительные приборы могут управляться с помощью персонального компьютера, что открывает возможности для автоматизации процесса измерений.

Автоматизация существенно увеличивает скорость выполнения однотипных операций, снижает их трудоемкость и уменьшает вероятность ошибок оператора при измерениях СВЧ МИС. В настоящее время доступно множество программных решений, позволяющих автоматизировать процесс измерения параметров СВЧ МИС и их компонентов. Эти программы можно классифицировать на две группы: универсальные, где измерения являются дополнительной функцией, и специализированные, ориентированные на конкретную область. Рассмотрим несколько универсальных программных продуктов [7].

#### **1.4.1. Специализированное программное обеспечение для автоматизации измерений**

Программа LabVIEW [9] (National Instruments, США) является средой графического программирования для системного проектирования в отраслях, где требуется проведение испытаний, измерений или осуществление управления, а также быстрый доступ к оборудованию и результатам анализа данных. В данной среде графического программирования в виде графических диаграмм можно описать различные алгоритмы, в том числе автоматизации измерений. В LabVIEW поддерживается управление приборами по интерфейсам RS-232, GPIB, VISA и др. Такое программное обеспечение снижает сложность программирования, позволяя сосредоточиться непосредственно на решении технической задачи.

Среда программирования VEE Pro [10] (Keysight, США) предназначена для автоматизации измерений и тестирования в области СВЧ и других технологий. Она позволяет инженерам и исследователям создавать, управлять и анализировать измерения с помощью графического интерфейса, что упрощает процесс разработки и сокращает время на написание кода. VEE Pro ориентирована на управление измерениями и поддерживает большое количество

разнообразных интерфейсов и протоколов. Данная среда автоматически управляет разными типами данных. Дополнение (Toolbox) Instrument Control для пакета MATLAB [11] (Mathworks, США) предоставляет пользователям мощные инструменты для взаимодействия с различными измерительными приборами и системами. Такое дополнение обеспечивает процедуры и графические элементы управления измерительными приборами непосредственно в математическом пакете. Полученные данные затем можно обрабатывать и отображать средствами MATLAB.

Рассмотрим также специализированные программы, ориентированные на СВЧ измерения МИС и их элементов.

Программа WinCal XE [2] (Cascade Microtech, США). Предназначена для работы с векторными анализаторами цепей, является универсальным и интуитивно понятным инструментом для проведения радиочастотных измерений на полупроводниковых пластинах, набор встроенных инструментов для калибровки позволяет достигнуть высокой точности и повторяемости измерения S-параметров, что имеет решающее значение для точного моделирования, характеристики и проектирования устройств СВЧ [12].

Помимо выполнения измерений параметров рассеяния программа WinCalXE (Рисунок 1.8) так же может быть использована в качестве инструмента для просмотра данных измерений S-параметров, осуществляет их отображение в разных форматах, обработку, а также имеет набор алгоритмов 2-,3- и 4-портовой калибровки.

Недостатком программы является необходимость задавать значения напряжения смещения транзистора вручную, это делает процесс измерения S-параметров транзисторов во многих рабочих точках (что необходимо для построения модели) трудоёмким и времязатратным. Также программа не предназначена для одновременного открытия большого числа файлов S-параметров и не имеет встроенных средств отбраковки измерительных данных с работы с картами раскрытия полупроводниковых пластин.

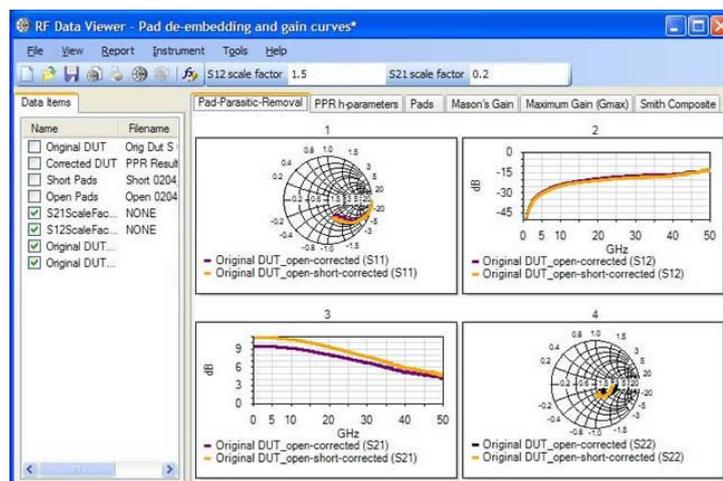


Рисунок 1.8 – Интерфейс WinCalXE

Программа Focus Explorer [13] (Focus Microwave, Канада) предназначена в первую очередь для автоматизации load-pull шумовых и мощностных измерений СВЧ транзисторов и МИС, а также импульсных измерений. Программа позволяет выполнять разные виды калибровки и просмотр результатов load-pull измерений. Недостатком является отсутствие связи с программами построения моделей транзисторов и статистического анализа результатов измерений.

Программный комплекс IC-CAP [10] (Keysight, США) осуществляет управление измерительными приборами, статистический анализ, построение моделей пассивных и активных компонентов СВЧ МИС. Комплекс реализует большое количество разнообразных алгоритмов измерений (импедансов, вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, СВЧ параметров) и построения моделей пассивных и активных компонентов (CMOS, HBT, BJT, FET и др.) для разных технологий. Недостатком комплекса является ориентация на измерительные приборы фирмы Keysight Technologies (прежнее название Agilent Technologies).

Модуль TestWave [14] (NI AWR, США) является расширением для САПР Microwave Office. В данном модуле поддерживается обмен данными с измерительными приборами большинства основных производителей непосредственно из средств системного моделирования в САПР. Однако данный модуль невозможно использовать без системы Microwave Office.

Таким образом, рассмотренное ПО обладает рядом недостатков. В упомянутых программах отсутствует возможность управления измерительным оборудованием отечественного производства. Применение универсального ПО требует его существенной доработки для автоматизации измерений СВЧ МИС 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. Из рассмотренных программ наибольшими возможностями обладает IC-CAP, однако она сложна в освоении, включает в себя большое количество функций, что является избыточным для конкретных приложений и поддерживает только приборы Keysight Technologies. В отечественных лабораториях обычно имеется разнородное оборудование, при этом решается целый комплекс задач. Использование зарубежного специализированного ПО в таких условиях неэффективно. Значительным недостатком также является высокая стоимость рассматриваемого ПО, что делает его недоступным для небольших компаний и исследовательских лабораторий.

С задачей автоматизации измерений непосредственно связана задача хранения и статистической обработки полученных при измерениях данных. Обзор программных средств решения этой задачи, приведённый в приложении Ж, показал, что существующее ПО также обладает рядом недостатков (необходимость существенной доработки с учётом предметной области, высокая сложность и стоимость). Поэтому разработка такого ПО также является актуальной. Таким образом, актуальной является задача разработки собственных средств автоматизации измерений, обладающих широкими возможностями по измерению, визуализации и обработки результатов СВЧ измерений. При этом модульная реализация должна сделать программу более доступной для небольших компаний и научных лабораторий

## 1.4.2. Программное обеспечение для автоматизации зондовых измерений

На данный момент рядом компаний производителей зондовых станций разработан набор определённого программного обеспечения, предназначенного для работы с аппаратным функционалом зондовых станций и навигации по полупроводниковым пластинам. Как правило, данное программное обеспечение предназначено для оборудования, поставляемого этими компаниями, и не обладает достаточным функционалом для решения всего спектра задач, возникающих в ходе разработки новых МИС. В качестве примеров таких программ можно рассмотреть несколько наиболее известных разработок.

Одним из наиболее проработанных решений является программный пакет компании Cascade Microtech под названием Velox™ WaferMap (Рисунок 1.9). Поскольку компания Cascade Microtech занимается непосредственной разработкой измерительных зондовых станций последнего поколения, линейка программного обеспечения под торговой маркой Velox™ оснащена встроенными средствами взаимодействия с большинством оборудования, применяемого на сегодняшний день в измерительных комплексах современных зондовых станций. Как следствие основным преимуществом программного пакета WaferMap является высокая степень интеграции программного и аппаратного обеспечения измерительных комплексов, построенных на основе связки зондовых станций компании Cascade Microtech и программ линейки Velox™.

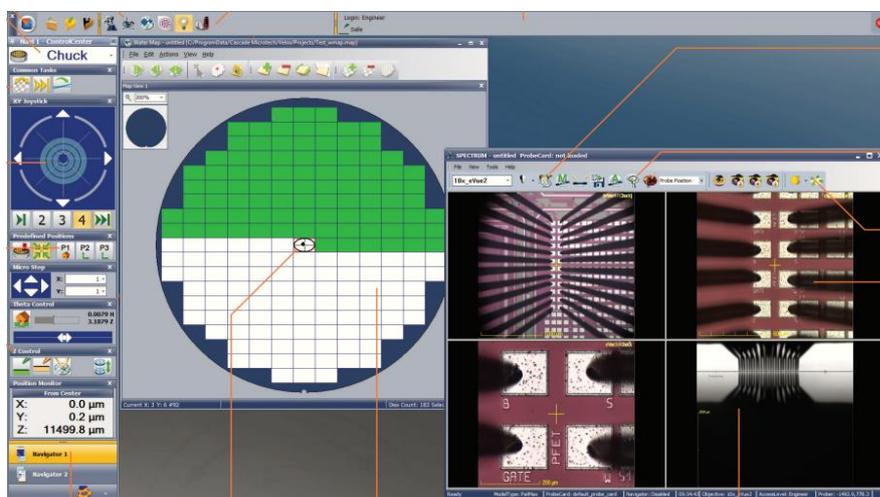


Рисунок 1.9 – Velox™ WaferMap [15]

Velox Wafer Map является приемником другой программы от компании Cascade Microtech, а именно программной среды Nucleus [16], которая предназначена для управления аппаратной частью автоматических зондовых станций Cascade. Зондовые станции, установленные на измерительном участке АО «НИИПП», работают под управлением именно программного обеспечения Nucleus. Данная программная оболочка предоставляет возможность управления системой позиционирования фиксатора пластин, системой позиционирования и фокусировки микроскопа, системой термостатирования пластины и другими аппаратными системами, которые могут входить в состав зондовой станции в зависимости от её комплектации. Также программная оболочка Nucleus имеет средства, позволяющие осуществлять удаленное управление аппаратным обеспечением зондовой станции посредством текстовых команд, передаваемых от удаленного компьютера или стороннего программного обеспечения через доступные в целевой системе интерфейсы обмена данными.

Одним из аналогов разрабатываемого программного комплекса является программа WaferPro Express Wafer Map (рисунок 1.10) предназначена для создания карт полупроводниковых пластин и предоставления информации об отдельных чипах в удобном для пользователя формате, недостатком программы является отсутствие встроенного функционала для работы с имеющимся измерительным оборудованием.

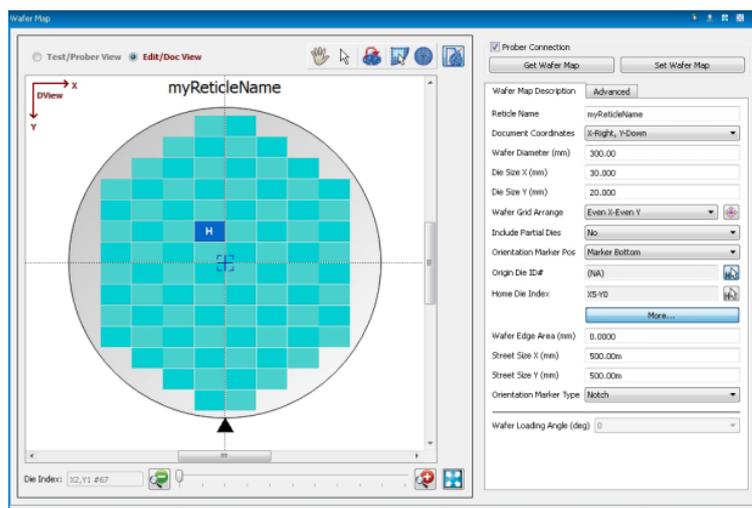


Рисунок 1.10 – WaferPro Express Wafer Map [17]

Так же стоит упомянуть о программном комплексе MPI Sntio (Рисунок 1.11), который так же предоставляет возможность управления аппаратной частью зондовых станций. К плюсам данной системы можно отнести хорошо проработанный пользовательский интерфейс программного комплекса, интуитивно понятное расположение элементов управления зондовой станцией, однако данный комплекс предназначен для работы с зондовыми станциями компании MPI Corp. и не подходит для использования с оборудованием АО «НИИПП».

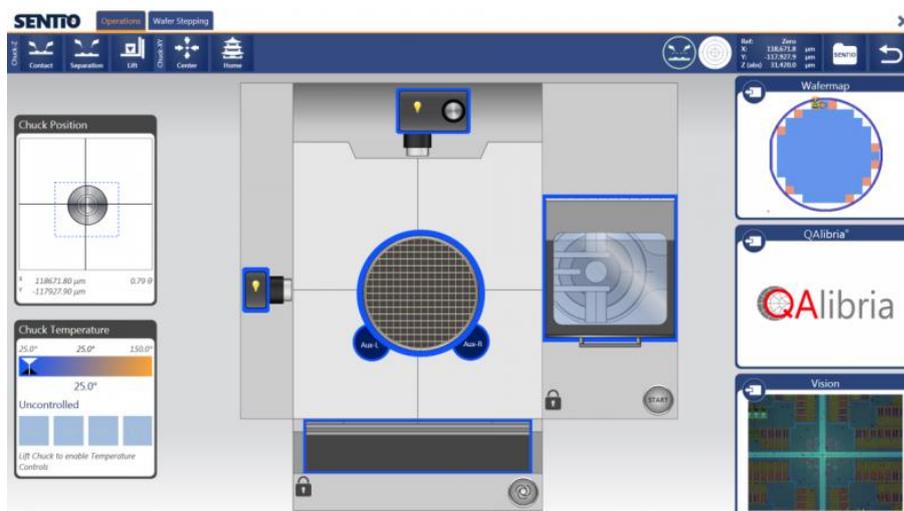


Рисунок 1.11 – MPI Sntio [18]

Представленные выше программы предназначены для управления аппаратным оснащением зондовых станций соответствующих производителей, а также работы с картами раскроя полупроводниковых пластин специфического типа для каждой из программ. Также данные программы не имеют нативного инструментария для работы с различными средствами измерения и задания алгоритмов проведения измерений и требуют использования сторонних программ для выполнения измерений.

### 1.4.3. Программное обеспечение для анализа и обработки данных измерений

SParamViewer – еще один программный пакет, основным предназначением которого является просмотр файлов, содержащих данные измерений S-

параметров в формате Touchstone, внешний вид программы показан на рисунке 1.12.

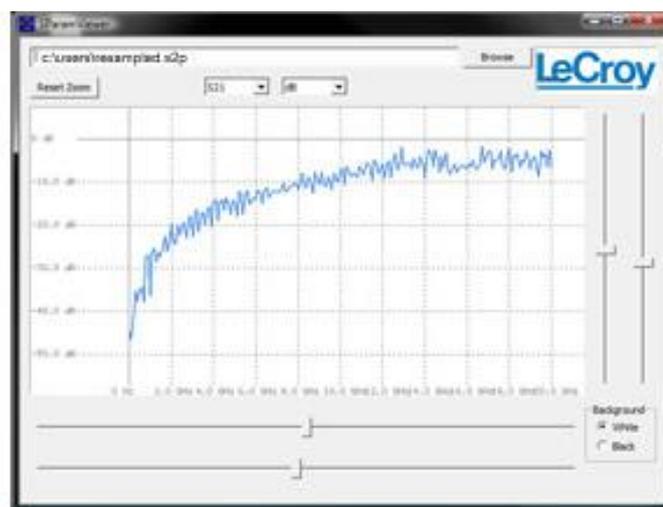


Рисунок 1.12 – Окно программы SParamViewer

Данная программа была разработана компанией Teledyne LeCroy [19] и распространяется бесплатно. Программа является простейшим визуализатором графиков S-параметров, к недостаткам следует отнести возможность одновременного открытия только одного файла и отсутствие каких-либо инструментов отбраковки и анализа характеристик, что делает данный программный пакет совершенно неприменимым для выполнения анализа данных измерений совокупности интегральных схема на полупроводниковой пластине.

В результате проведенного анализа существующего программного обеспечения для визуализации, обработки и анализа данных измерений электрических характеристик было выявлено, что на данный момент не существует комплексного программного пакета, позволяющего решить все поставленные перед ним задачи по анализу и отбраковки данных измерений.

### **1.5. Формализация технологического процесса зондового контроля**

На основе проведенного анализа области объекта исследования определены основные этапы выполнения технологического процесса зондового контроля полупроводниковых приборов и ИС на неразделенных пластинах с применением полуавтоматических зондовых станций. Формально процесс базируется на

последовательном выполнении оператором зондовой станции ряда операций (Рисунок 1.13).

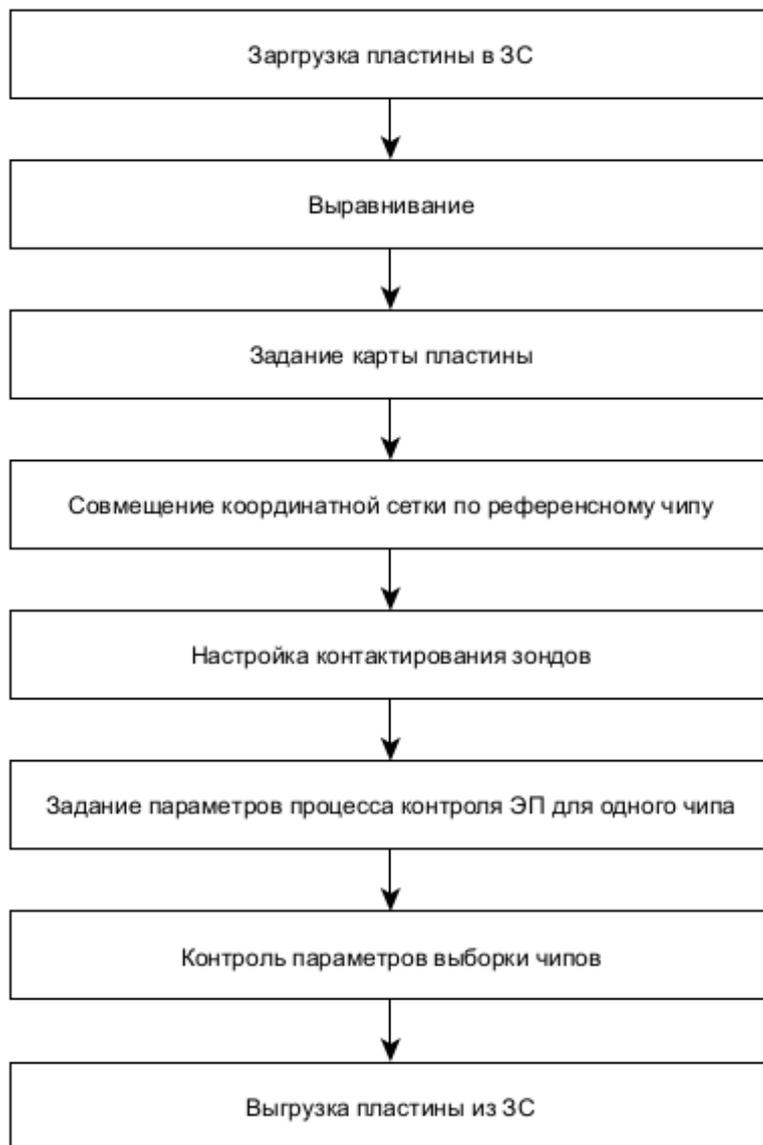


Рисунок 1.13 – Последовательность операций технологического процесса зондового контроля

Программное обеспечение современных зондовых станций позволяет автоматизировать значительную часть данных операций, таких как выравнивание, автоматический обход заданной группы чипов на пластине отслеживание параметров констатирования в ходе выполнения процесса, однако некоторые процессы связанные с заданием карты раскроя пластины, составлением

управляющей программы для проведения контрольных испытаний и заданием параметров процесса остаются на операторе зондовой станции.

На этапе задания карты пластины, оператор задает диаметр пластины и шаг мультипликации чипов по осям X и Y, после чего ему вручную необходимо выполнить верификацию соответствия краевых чипов на карте с краевыми чипами на полупроводниковой пластине и при необходимости скорректировать карту таким образом, чтобы привести ее в соответствие физической пластине.

На этапе задания алгоритма и выполнения процесса контроля параметров ИС, как правило применяется стороннее ПО реализующее необходимый алгоритм измерения электрических параметров и управляющее зондовой станцией посредством отправки ей команд на перемещение к следующему чипу по интерфейсу связи, либо путем ручного написания скриптов, на таких языках как Python, VisualBasic, Lua и др., реализующих требуемый алгоритм испытаний и управляющих как зондовой станцией, так и всем используемым измерительным оборудованием. Данный подход безусловно является гибким с точки зрения возможности реализации достаточно сложных алгоритмов и процедур тестирования ИС, однако также является достаточно сложным и трудоемким, поскольку требует от оператора зондовой станции специальных знаний из области программирования и основ межпроцессного взаимодействия для настройки связки из различного ПО.

### **1.6. Выводы по главе**

Разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) зондового контроля электрических параметров ИС на неразделённых полупроводниковых пластинах и создание программно-аппаратного комплекса на её основе является востребованным и актуальным вопросом.

Обзор литературы показал, что на данный момент существует ряд программ и программных систем, позволяющих автоматизировать как управление зондовыми станциями, так и процесс выполнения измерений электрических характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем. Однако

рассмотренные программы и программные системы имеют ряд значительных недостатков таких как:

- отсутствие поддержки СИ отечественного производства;
- узкая специализация программ, как следствие сложность объединения автоматизации измерений и автоматизации управления зондовой станцией;
- сложная интеграция инструментов анализа данных технологического процесса контроля и создания карт отбраковки для полупроводниковых пластин;
- отсутствие решений для организации единого хранилища данных и результатов измерений, объединяющего данные из различных источников.

Таким образом, на основе обзора существующих решений и формализованного описания последовательности технологического процесса зондового контроля ИС, сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. провести анализ используемых алгоритмов в существующих программных системах 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.

## 2. ПРЕДЛОЖЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ

В данной главе рассмотрены алгоритмы и методы, которые были предложены при разработке программно-аппаратного комплекса автоматизации зондовых измерений.

### 2.1. Метод хранения данных измерений

Классический подход к хранению результатов измерений заключается в создании для каждого проведенного измерения отдельного файла в стандартном общепринятом формате, соответствующему типу измеряемых данных, большинство из которых являются текстовыми форматами. К примеру для хранения результатов измерения s-параметров 2-х портового устройства в одном состоянии будет создан файл формата «.s2p» содержащий данные в простом текстовом виде. Для каждого чипа как правило выполняется ряд измерений при различных внешних условиях и управляющих сигналах, что генерирует соответствующее количеству состояний число файлов с данными.

#### 2.1.1. Анализ файлового подхода к хранению данных

Хранение файлов осуществляется на выделенном сервере с доступом к сетевому хранилищу через локальную вычислительную сеть, при этом в силу определённых требований к скорости чтения и надежности оборудования ИТ-службой предприятия установлен размер кластера файловой системы в хранилище равный 1МБ. Поскольку типичный полезный объем данных в файлах с результатами измерений редко превышает несколько десятков килобайт в системе будет присутствовать значительный перерасход пространства. Для оценки масштабов реального перерасхода мета было проведено исследование небольшой выборки из массива накопленных за 5 лет измерительных данных, результаты исследования приведены на рисунке 2.1.

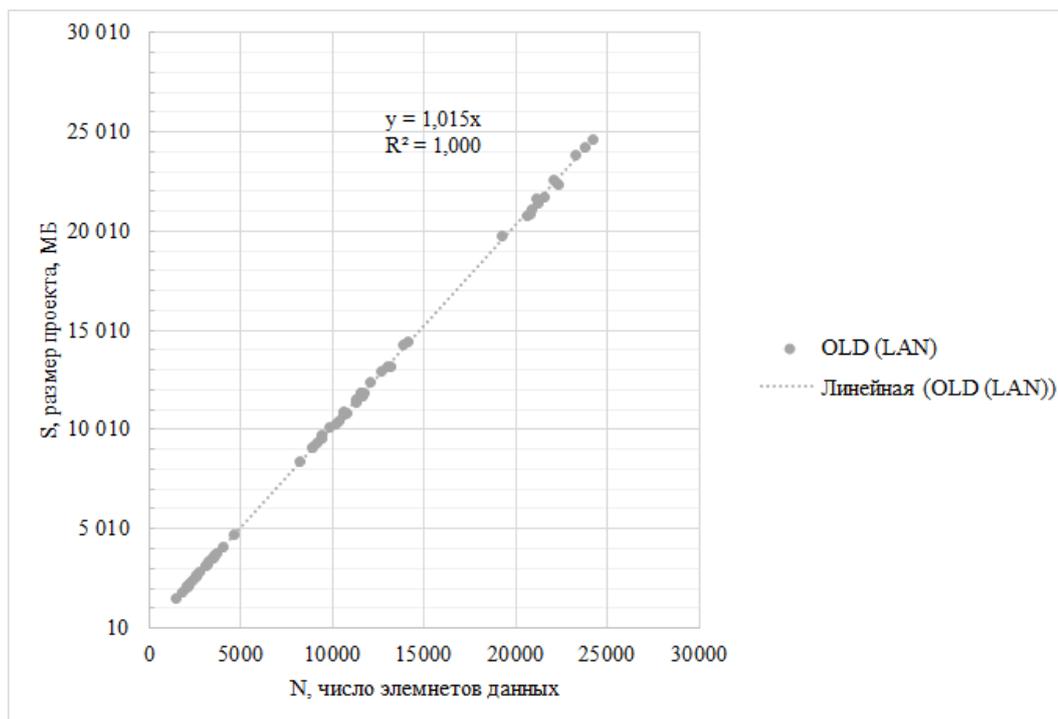


Рисунок 2.1 – Зависимость занимаемого пространства от числа элементов данных на сетевом диске

Для исследования из хранилища была выделена выборка, содержащая 60 проектов измерения пластин, выбранные за различные промежутки времени. Для каждого проекта было посчитано число файлов с данными, фактическое пространство, занимаемое на сетевом диске и полезный объем информации. Как видно рисунка 2.1, место, фактически занимаемое на сетевом диске прямо пропорционально числу файлов из-за большого размера кластера, при этом полезный объем данных в проекте, также находится в линейной зависимости от числа файлов (Рисунок 2.2), но уже с заметным разбросом.

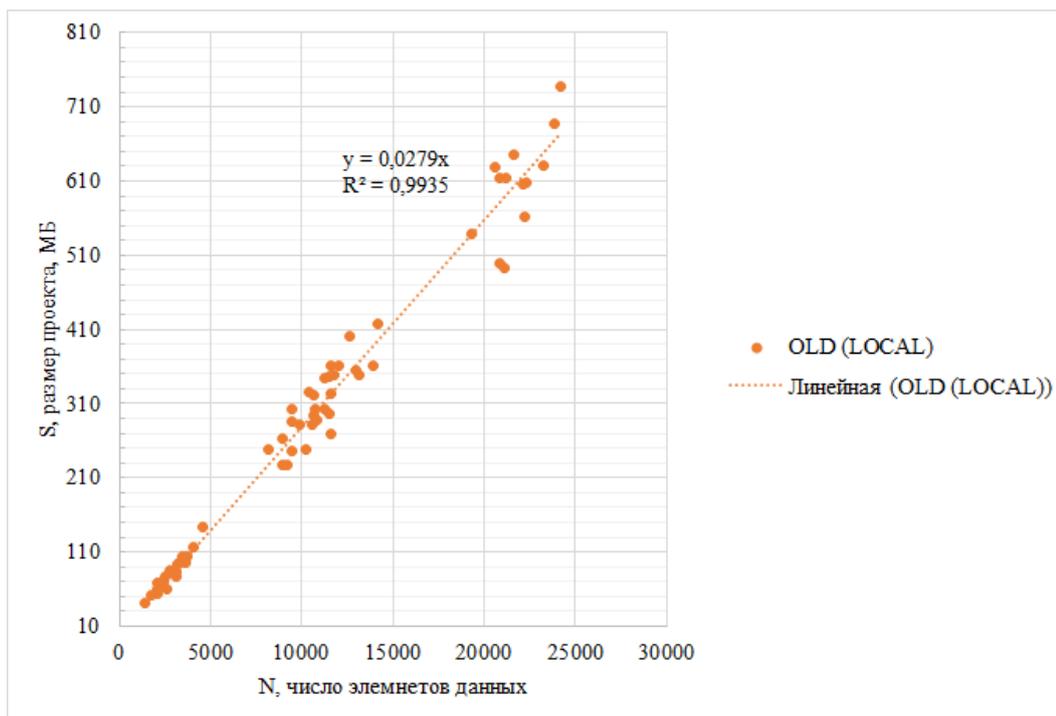


Рисунок 2.2 – Зависимость занимаемого пространства от числа элементов данных на рабочей станции

Оценку перерасхода пространства можно провести по величине отношения коэффициентов пропорциональности линий тренда построенных по экспериментальными данным:

$$S_{Over} = \frac{1,015}{0,028} = 36,2 \text{ раз}$$

Исследование показало, что в текущей ситуации на сетевом хранилище присутствует значительный перерасход ресурсов, фактически занимаемое данными место превышает их полезный объем в среднем в 36 раз.

### 2.1.2. Структура проектов пластины в формате XML

Старая модель хранения информации о измерительном проекте была одной из первых, апробированных в практическом применении. В ее основе лежит представление проекта в виде директории с файлом настроек в формате «XML» и поддиректории «data», содержащей файлы с результатами измерений в своем исходном формате.

К основным преимуществам, определившим применение данного метода, можно отнести простоту реализации, высокую надежность в виду отсутствия

дополнительной прикладной программной прослойки и возможность ручного доступа к файлам с результатами измерений посредством стандартного проводника Windows. Однако, практика применения данного метода показала, что при росте числа файлов данных в пределах проекта до нескольких десятков тысяч выявились следующие проблемы:

- в значительной степени снижается скорость загрузки данных по сети при их анализе;
- появляются сбои в функционировании сетевого диска из-за большого числа обращений в процессе ручного просмотра содержимого директорий в проводнике Windows.

### **2.1.3. Новая модель файла измерительного проекта пластины CWMP**

При проектировании системы хранения важно выбрать оптимальный способ организации данных. Существует два подхода при моделировании данных. Моделирование на основе документа с набором атрибутов и моделирование на основе контейнера элементов, описывающих более простые сущности [20]. 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 2.3.

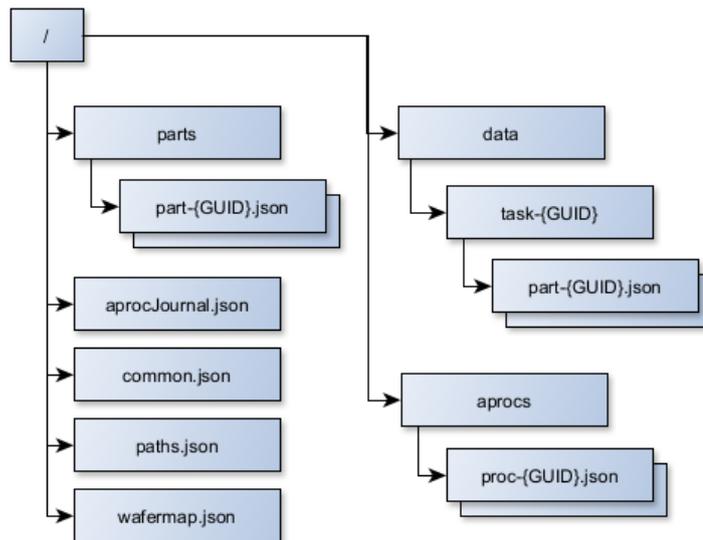


Рисунок 2.3 – Структура файла проекта CWMP

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, используются для настройки выборочного тестирования чипов или в случае деления пластины на отдельные части;
- aprocs/ содержит файлы настроек автоматизированных процессов;
- data/ содержит файлы результатов измерений и дополнительные данные которые могут быть сохранены внутри проекта.

Для упаковки данных, сформированных в соответствии с описанной моделью, в один файл можно применить различные методы сжатия информации без потерь, например, алгоритм Deflate, подробно описанный в [21].

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, сравнение занимаемого пространства старой и новой модели приведено на рисунке 2.4.

Также, после реализации предложенной модели в виде программного модуля было проведено сравнение времени загрузки данных в программу анализа результатов измерения в новом и старом формате, результаты сравнения приведены на рисунке 2.5.

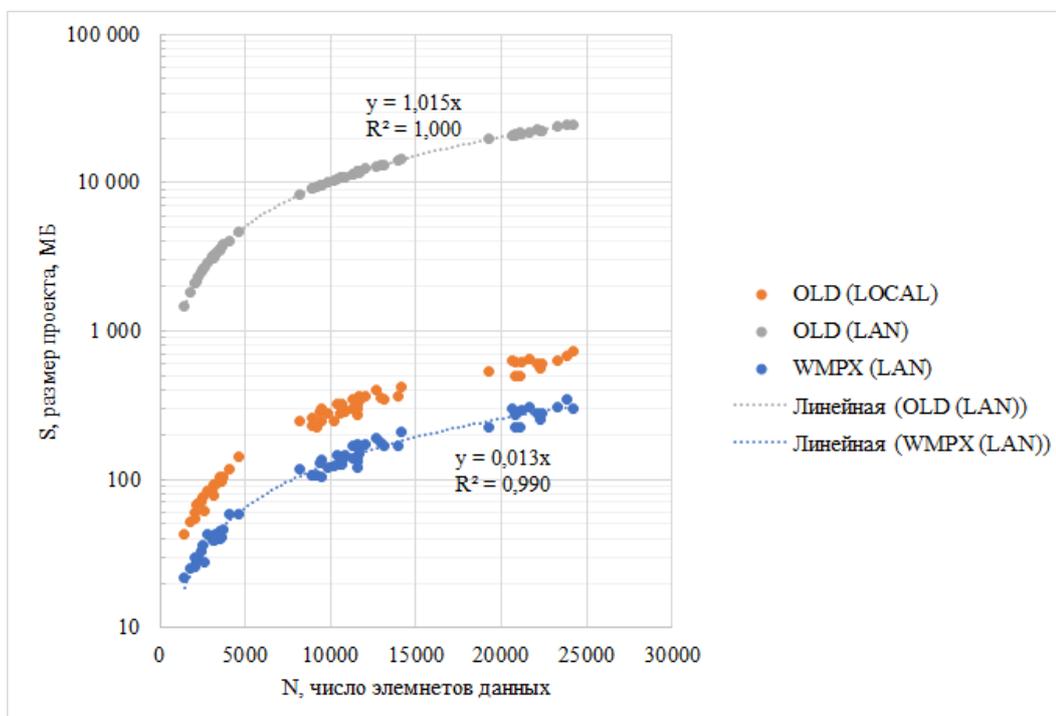


Рисунок 2.4 – Сравнение занимаемого пространства от числа элементов данных с разными моделями проекта

Как видно из графиков зависимости занимаемого пространства от числа элементов данных в проектах, в новой модели наблюдается значительное сокращение расхода дискового пространства, его оценку проведем по линиям тренда.

$$S_{Over} = \frac{1,015}{0,013} = 78,1 \text{ раз}$$

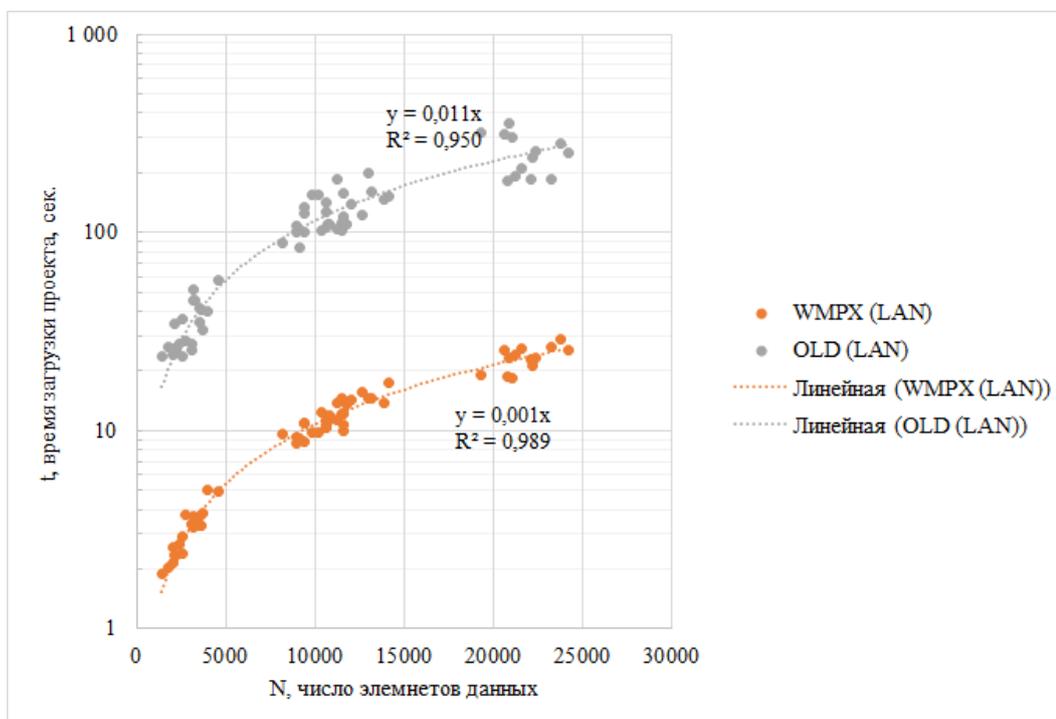


Рисунок 2.5 – Сравнение времени данных в разных моделях проекта

Из рисунка 2.5 также видно, что суммарное время обработки и передачи данных с сервера в клиентское ПО в новой модели сократилось в среднем в 11 раз, что достигается как за счет снижения объема передаваемых данных, так и за счет сокращения числа файлов до 1, что снизило нагрузку на файловую систему, однако при этом увеличилась вычислительная нагрузка на ПО на стороне клиента по причине необходимости декомпрессии передаваемых данных.

## 2.2. Алгоритм выравнивания пластины

Выравнивание пластины важная процедура, необходимая для выполнения ряда операций над пластиной на многих этапах процесса полупроводникового производства, выравнивание перед проведением зондового контроля не исключение. Процедура выравнивания включает в себе определение угла

корректировки, на который необходимо повернуть рабочий стол, чтобы направления осей X, Y установки совпали с осями X', Y' раскроя пластины (Рисунок 2.6).

В случае работы с ручными и полуавтоматическим зондовыми станциями первичное грубое выравнивание выполняет оператор, визуально контролируя положение базового среза или глобальных меток, при размещении пластины на рабочем столе установки.

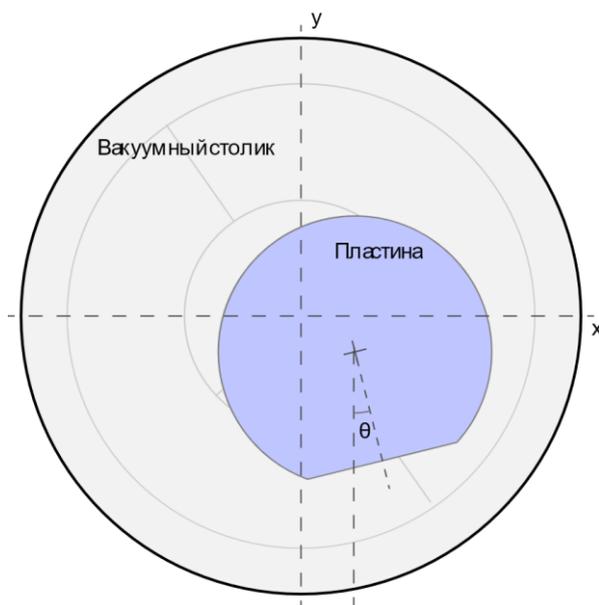


Рисунок 2.6 – Ошибка размещения пластины

Для выполнения точного выравнивания и последующего совмещения пластины с картой раскроя применяются различные инструментальные методы, как правило, на базе цифровых камер и микроскопов.

Далее приведены методы, применяемые на практике в различных программных решениях для полуавтоматических зондовых станций.

### 2.2.1. Ручное выравнивание по 2м точкам.

Суть метода заключается вычислении угла корректировки по двум точкам, полученным при совмещении перекрестья в микроскопе с метками совмещения, находящимися на одной строго горизонтальной или вертикальной линии на карте. В данном методе угол вычисляется по формуле:

$$\theta = \operatorname{atan}\left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right)$$

Для достижения максимальной точности выравнивания необходимо выбирать наиболее удаленные друг от друга точки.

### **2.2.2. Автоматический поиск натренированных меток совмещения**

Метод применяется для выравнивания и совмещения пластины с ее картой раскрыя по заранее настроенным меткам. При этом метод распознавания изображений не имеет значения, он может быть основан как на классической теории систем автоматического управления и распознавания образов, так и реализован на основе нейронных сетей. Принципиальная суть метода заключается в предварительное обучение программного обеспечения распознавать специально сформированные на полупроводниковой пластине метки совмещения и последующем их поиске на обрабатываемых пластинах. К недостаткам метода можно отнести требование к идентичности обрабатываемых пластин, они все должны содержать единообразные метки, расположенные в одинаковых местах, а также необходимость переобучения программного обеспечения при измерении формы, цвета или размера меток. Данные требования несложно обеспечить при массовом производстве однотипных изделий, однако, при экспериментальном или мелкосерийном производстве, особенно при наличии нескольких различных технологических процессов в рамках которых метки могут отличаться указанные условия не всегда возможно соблюсти, что создает дополнительные трудности при выполнении выравнивания.

### **2.2.3. Поиск базового среза по всему изображению пластины.**

Метод достаточно подробно описан Jongwon Kim в [22], позволяет одновременно выполнить выравнивание и совмещение пластины. В основе лежит применения оптической системы с несколькими CCD фотоприемниками, расположенными как показано на рисунке 2.7, позволяет выполнить первичное совмещение и выравнивание и последующее точное совмещение.

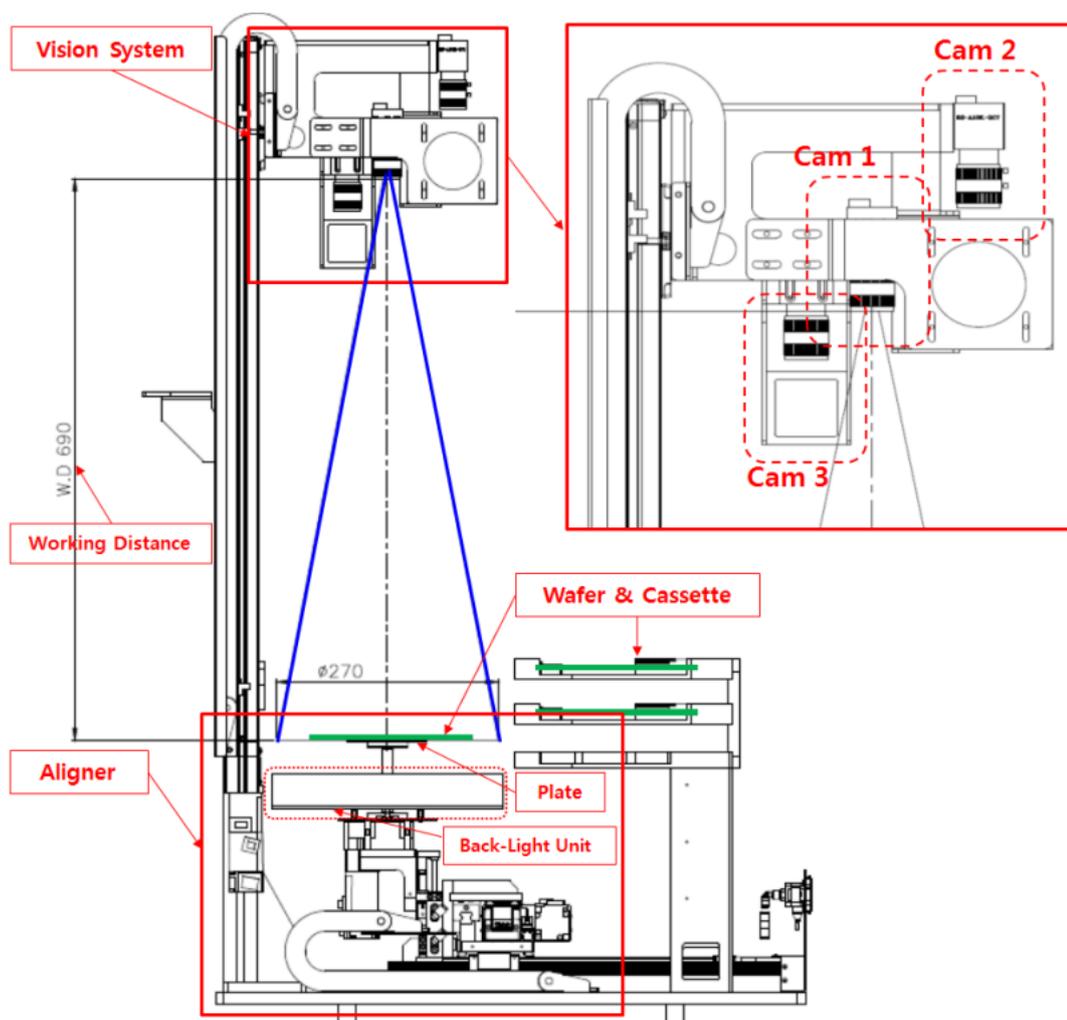


Рисунок 2.7 – Схема размещения камер [22]

На рисунке 2.7 показано, что камера 1, покрывает всю область предметного стола и отвечает за корректировку центра и угла поворота пластины, камера 2 имеет меньшую область обзора и предназначена для точного совмещения, камера 3 получает изображение профиля пластины через систему зеркал и предназначена для контроля за процессом контактирования обрабатывающего инструмента с пластиной.

Процесс совмещения состоит из двух этапов. На первом этапе выполняется поиск центра пластины и корректировка ее положения, на втором определяется положение базового среза и вычисляется угол корректировки на которые необходимо повернуть пластину, этапы представлены на рисунке 2.8.

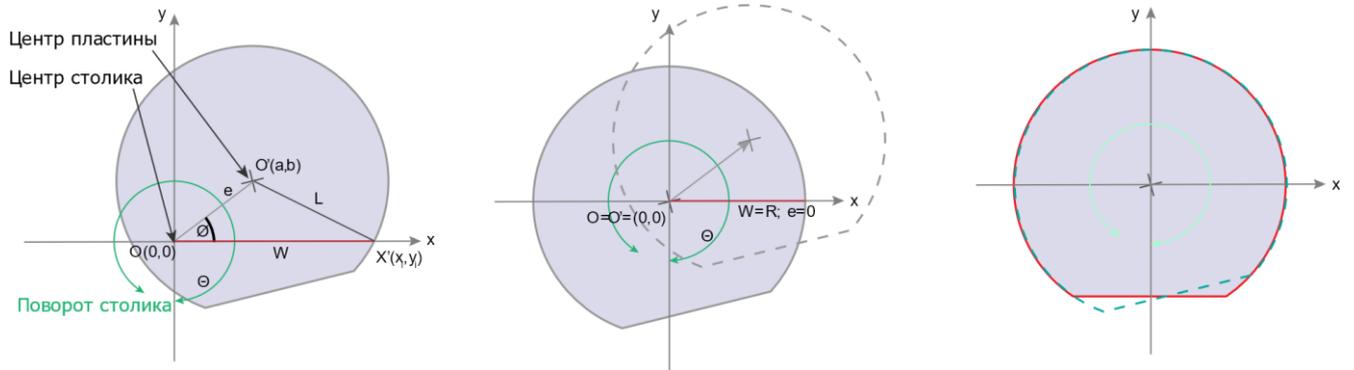


Рисунок 2.8 – Этапы выравнивания пластины

На стадии предварительного выравнивания центр системы совмещения должен быть совмещен с центром реальным пластины, однако, существует некоторая ошибка совмещения  $e$ . Для ее компенсации выполняется корректировка положения, рассчитываемая из тригонометрической функции:

$$W = \sqrt{R^2 - (e \cdot \sin(\theta - \phi))^2} + e \cdot \cos(\theta - \phi)$$

$$X_i = L_i \cdot \cos(\theta_i)$$

$$Y_i = 0$$

Здесь  $X'(X_i, Y_i)$  значение в полярных координатах, которое необходимо конвертировать в декартовы по формулам:

$$S(a, b, R) = \sum_{i=0}^N \left( \sqrt{(X_i - a)^2 + (Y_i - b)^2} \right)^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n [(X_i - a)^2 + (Y_i - a)^2 - r^2](-2)(X_i - a) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n [(X_i - a)^2 + (Y_i - b)^2 - r^2](-2)(Y_i - b) = 0$$

Описанный подход требует интеграции в технологическое оборудование комплексной прецизионной и достаточно массивной цифровой оптической системы, что сильно увеличивает габариты, поэтому применение подобных систем целесообразно при разработке полностью автоматических комплексов технологической обработки полупроводниковых пластин и нецелесообразен в небольших полуавтоматических установках.

#### 2.2.4. Выравнивание на основе Фурье преобразований изображения пластины

Данный метод предварительного быстрого выравнивания описан в [23], в его основе лежит двумерное преобразование Фурье изображения, получаемого с микроскопа станции. В результате применения ФТ к изображению получается двумерное изображение интенсивность пикселей которого отражает спектральную составляющую структуры исходного изображения.

Поскольку чипы на пластине располагаются в периодической структуре на изображении спектральной плотности можно увидеть явные пики интенсивности, соответствующие периоду структуры. Параметры линий пиков интенсивности определяются классическими алгоритмами преобразованием Хафа и градиентным спуском [24, 25].

Наиболее точным по результатам [26] является метод определения линий методом градиентного спуска,

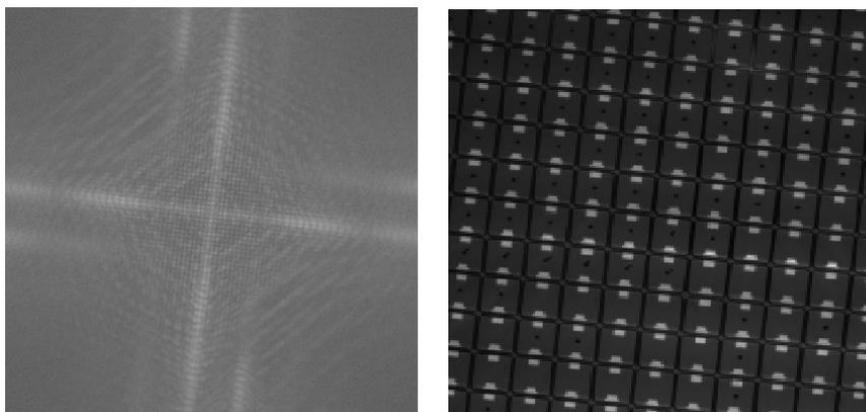


Рисунок 2.9 – Результат работы алгоритма FFT

Угол наклона линий пиков спектра соответствует углу поворота пластины. Данный метод предварительного выравнивания позволяет быстро выполнить грубую корректировку угла поворота перед выполнением более точной процедуры выравнивания и совмещения, однако требует наличия возможности захвата изображения с большим полем видимости.

### 2.2.5. Алгоритм выравнивания на основе линейной регрессии группы точек

Для автоматизации процесса выравнивания также может быть применен метод, основанный на группы точек, лежащих на одной линии при помощи системы оптического детектирования меток и последующего вычисления угла коррекции поворота пластины, анализ поведения программного некоторого программного обеспечения импортных зондовых станций показал, что реализации этого метода встречаются в программном обеспечении таких производителей как *FormFactor* и *MPI*.

Для реализации автоматизированного выравнивания полупроводниковых пластин в разрабатываемой АСУТП зондового контроля было принято решение также взять за основу данный подход, поскольку пользователи с ним уже достаточно хорошо знакомы, однако, алгоритм работы был расширен и дополнен этапом автоматического предварительного выравнивания для достижения более широкого диапазона начальных углов отклонения при которых метод будет способен выполнить точное выравнивание без вмешательства человека.

Реализация данного метода требует решения двух задач:

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

Для решения первой задачи 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 2.10) поскольку данные области являются ярко выраженными периодическими элементами пластины вне зависимости от различия топологий соседних чипов.

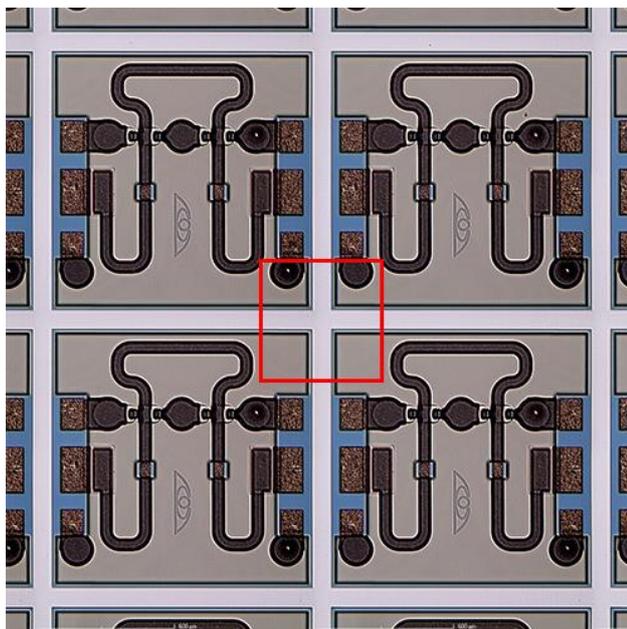


Рисунок 2.10 – Элемент совмещения на пересечении стритов

Для поиска таких элементов на изображении с микроскопа можно применить методы компьютерного зрения в области распознавания визуальных образов.

### **Поиск вхождений искомого изображения**

Достаточно распространенным методом распознавания объектов в компьютерном зрении является поиск соответствий по заданному шаблону изображения. Метод позволяет определить наличие вхождений необходимого объекта на изображении их координаты. Существует несколько различных видов реализации данного метода.

### **Поиск по сопоставлению ключевых точек**

Данный метод не выполняет поиск шаблона целиком, а определяет наличие объекта по его ключевым особенностям и делит задачу поиска вхождений на несколько этапов. Первым является поиск на искомом и проверяемом изображениях некоторых ключевых точек. Затем следует этап сопоставления ключевых точек искомого изображения с тестируемым. Существует множество способов и критериев поиска ключевых точек, все эти алгоритмы являются эвристиками, находящими какие-то характерные элементы на изображении, как правило резкие перепады цвета или углы.

### **Сопоставление контуров**

В отличие от поиска по ключевым точкам, метод оценивает не только характерные для шаблона точки-углы, но и ребра. Это решение учитывает форму объекта игнорируя его содержимое и цвет.

### **Поиск вхождений при помощи нейронных сетей**

Подход заключается в применении специальных нейронных сетей, спроектированных для решения задачи сравнения визуальных образов. Существует множество архитектур нейронных сетей, спроектированных для решения задачи поиска границ объектов на изображении. В основе большинства из них лежат свёрточные нейронные сети, при этом поиск осуществляется так называемыми скользящими окнами. Подход с нейронными сетями как правило требует длительной процедуры обучения нейронной сети на большом наборе данных для получения приемлемых результатов и требует дообучения или переобучения в случае изменения искомым объектов.

### **Поиск по соответствию шаблону (Template Matching)**

Сравнение с шаблоном – техника в цифровой обработке изображений для поиска небольшого участка изображения, совпадающего с шаблонным изображением. Метод может быть использован в производстве как часть процесса контроля качества, для навигации роботов или как способ определения границ на изображениях. 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. Когда сканирование заканчивается, на изображении выделяется область, которая соответствует шаблону в большей степени.

Преобразование Фурье функций, заданных на пространстве  $\mathbb{R}^n$

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} f(x) \cdot e^{-i \cdot x \cdot \omega} dx$$

Обратное преобразование Фурье

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} \hat{f}(\omega) \cdot e^{i \cdot x \cdot \omega} d\omega$$

Для реализации поиска меток совмещения на изображениях микрофотографий было решено применить метод свертки двумерного Фурье преобразования поскольку метки совмещения в пределах пластины имеют очень высокую степень соответствия друг другу, и от алгоритма не требуется выполнять классификацию и распознавание сложных образов.

Для определения угла коррекции применен классический метод для оценивания этих параметров — метод наименьших квадратов позволяющий вычислить коэффициенты линейной регрессии для переопределенной системы линейных уравнений, подробное описание метода приведено в [27].

Как известно, построение линейной регрессии включает оценку её параметров  $a$  и  $b$ . Метод наименьших квадратов позволяет найти такие значения параметров  $a$  и  $b$ , при которых сумма квадратов отклонений фактических значений  $y$  от теоретических значений  $y_x$  будет минимальной, то есть:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y_{x_i})^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \rightarrow \min$$

Следовательно, среди всех линий на графике линия регрессии выбирается так, чтобы сумма квадратов отклонений по вертикальной оси от точек до этой линии была минимальной.

Чтобы найти минимум функции, необходимо вычислить частные производные по каждому из параметров  $a$  и  $b$ , приравнять их к нулю.

Если обозначить  $\sum_i \varepsilon_i^2$  через  $S(a, b)$ , тогда:  $S(a, b) = \sum (y - a - b \cdot x)^2$ .

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum (y - a - b \cdot x) = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum x(y - a - b \cdot x) = 0. \end{cases}$$

Проведя несложные преобразования можно получить следующую систему линейных уравнений, позволяющих провести оценку параметров  $a$  и  $b$ :

$$\begin{cases} a \cdot n + b \cdot \sum x = \sum y; \\ a \cdot \sum x + b \cdot \sum x^2 = \sum x \cdot y. \end{cases}$$

Путем решения данной системы можно найти искомые оценки параметров  $a$  и  $b$ . Из значения коэффициента регрессии  $b$  можно определить угол наклона линии к оси  $X$  путем вычисления  $atan(b)$ .

Общая блок-схема алгоритма выравнивания полупроводниковой пластины приведена на рисунке 2.11.

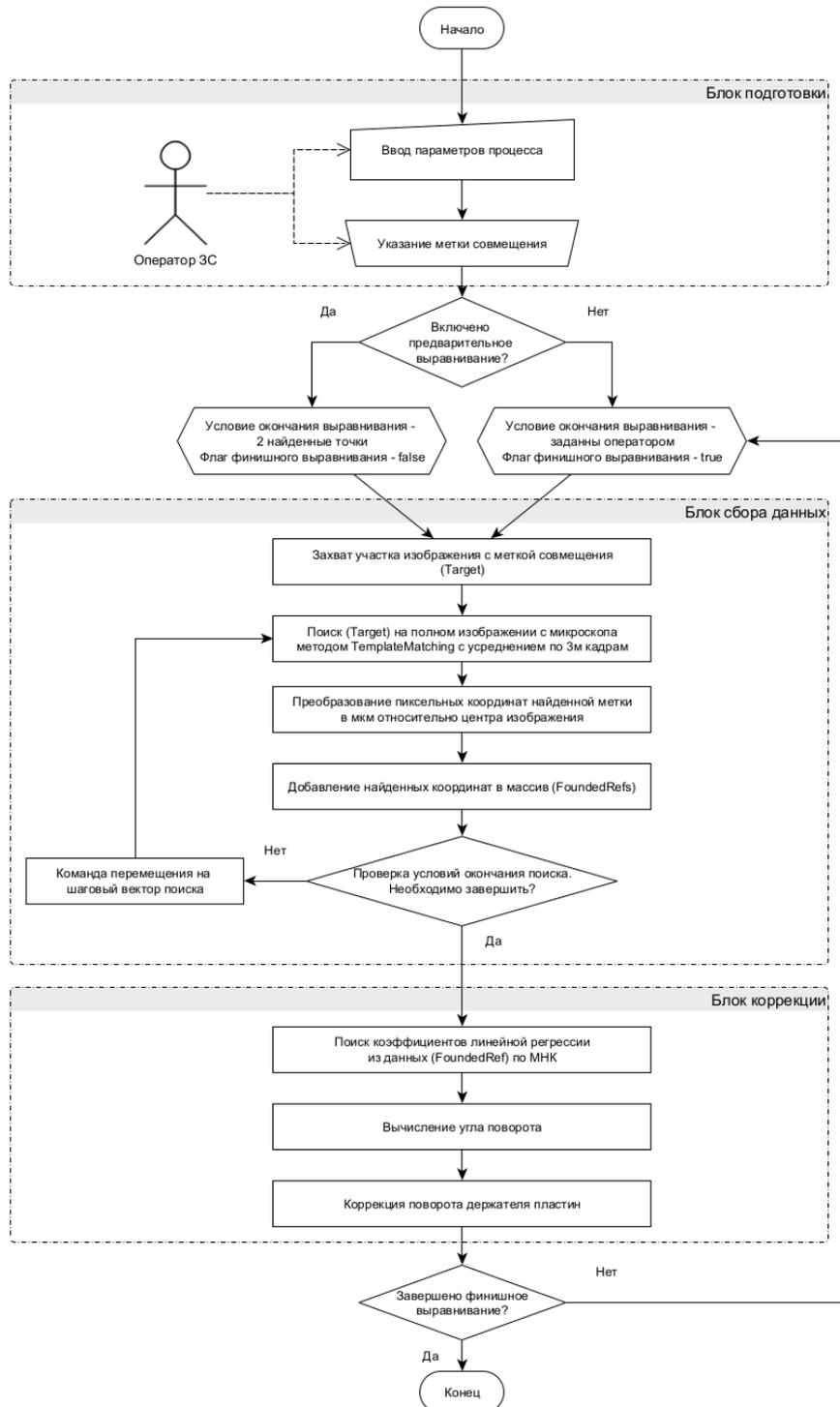


Рисунок 2.11 – Блок-схема алгоритма выравнивания полупроводниковой пластины с функцией предварительного выравнивания

Алгоритм состоит из трех основных этапов и системы управления процессом предварительного выравнивания.

На первом этапе оператору ЗС необходимо задать параметры выполнения процесса выравнивания, такие как: направление поиска меток, шаг поиска меток, флаг необходимости выполнения предварительного выравнивания, граничные условия завершения поиска меток по пройденной дистанции и числу найденных меток. Так же оператор должен 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.

### **2.3. Метод коррекции искривления линейных направляющих**

При автоматизации технологического процесса зондового контроля интегральных схем необходимо обеспечить точное позиционирование полупроводниковой пластины под контактами зондов, поскольку ошибка позиционирования может привести к преждевременному выходу из строя контактов самих зондов, а также повлечь искажение результатов автоматизированного контроля параметров изготавливаемых изделий.

Позиционирование полупроводниковой пластины осуществляется в горизонтальной плоскости XY. По результатам первичного ручного тестирования

системы перемещения полуавтоматической зондовой станции были замечены визуальные отклонения при выполнении позиционирования на контактных площадках ИС. Визуально, ошибка позиционирования выражена наличием поперечных отклонений, а также продольных отклонений при движении вдоль одной из осей.

Для количественной оценки ошибки позиционирования было предложено использовать специально изготовленный эталонный фотошаблон и алгоритм машинного распознавания меток, предложенный в предыдущем разделе. Топология эталонного фотошаблона состоит из двух пересекающихся в центре линий (окон), строго перпендикулярных друг другу, на одной из сторон каждой из линий располагаются периодические метки совмещения в виде квадратов, размером 100x100 мкм, на рисунке 2.12 представлен центральный участок топологии эталонного фотошаблона.

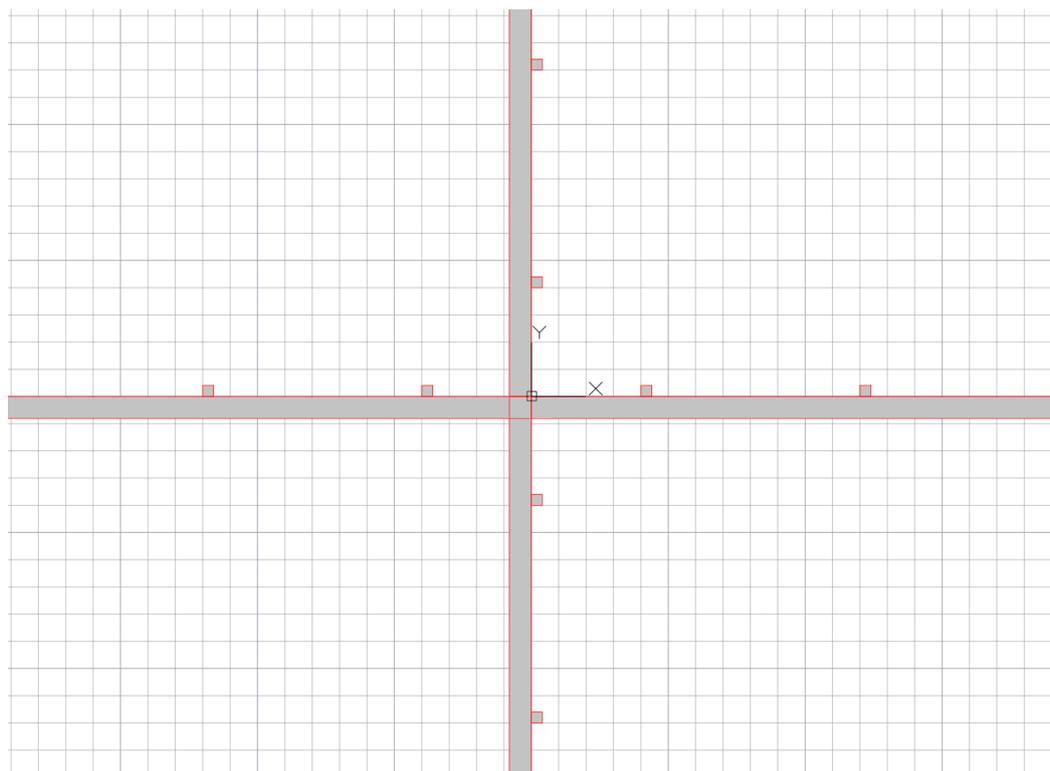


Рисунок 2.12 – Участок топологии эталонного фотошаблона

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 рисунке 2.12 представлены результаты оценки поперечной ошибки позиционирования для оси X.

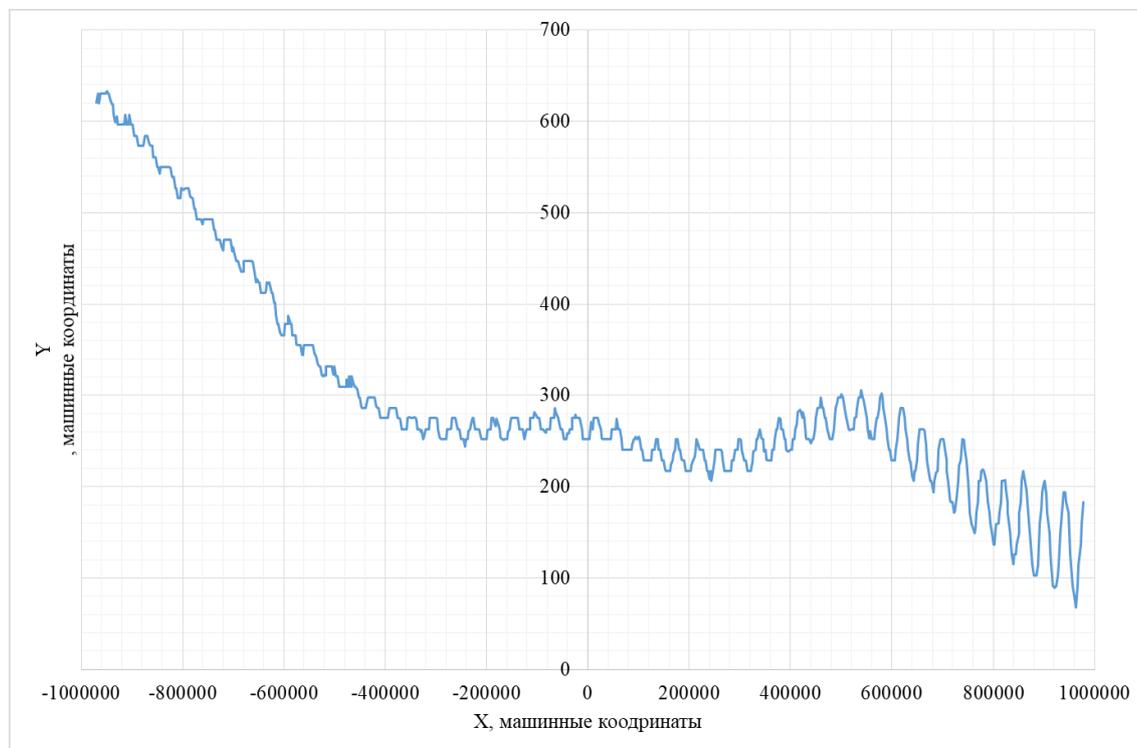


Рисунок 2.13 – Результат измерения поперечного отклонения позиционирования до введения коррекции

Результаты представлены в машинных координатах, равных 1/10 мкм. Разница между максимальным и минимальным положением метки на изображении составила 56,2 мкм. Из анализа графика выдвинуты предположения, что поперечная ошибка складывается из не ортогональности осей XY, не идеальности самой оси X и периодических колебаний, связанных с не идеальностью ходового винта.

Для исправления поперечной ошибки позиционирования предложено добавить в подсистему управления исполнительным механизмом зондовой станции, дополнительное преобразование координат, учитывающих величину коррекции в зависимости от текущего положения. Величину коррекции задать с помощью таблицы составленной по значениям, полученным в результате оценки,

путем отбрасывания промежуточных значений, не влияющих на характер зависимости. Данные таблицы коррекции представлены на рисунке 2.14 в графическом виде.

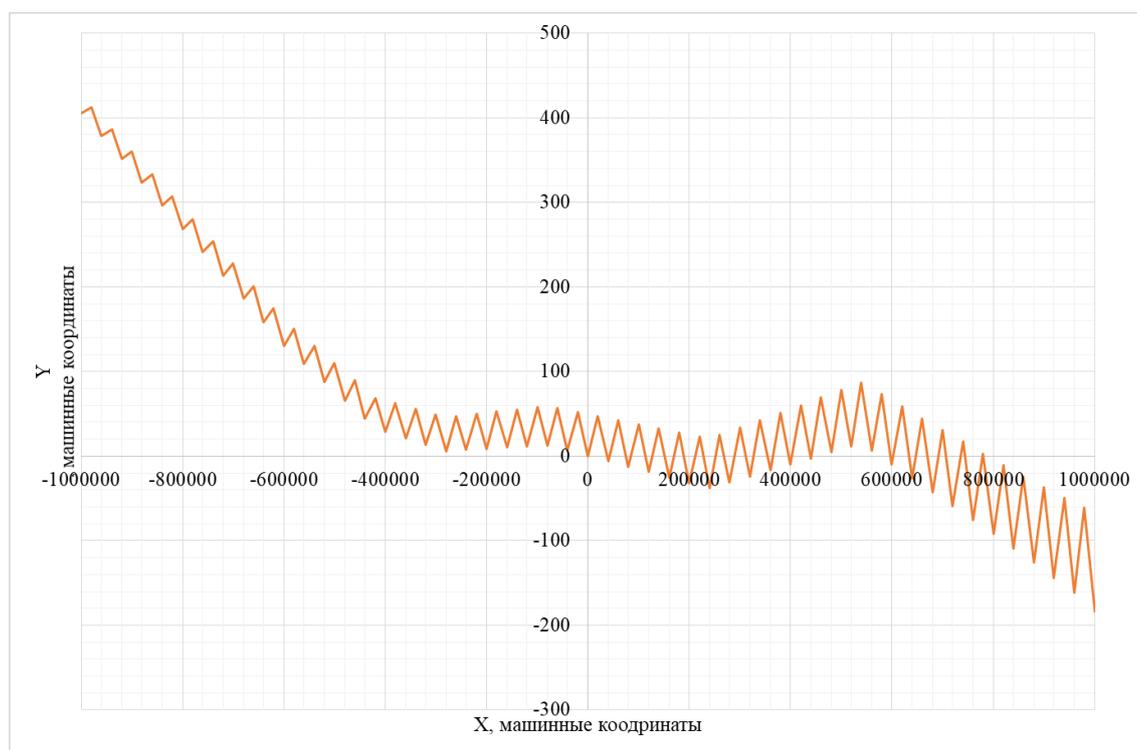


Рисунок 2.14 – Данные таблицы коррекции в графическом представлении

Для введения таблицы поперечной коррекции в подсистему перемещения необходимо решить задачу прямого преобразования координат из машинных в мкм и задачу обратного преобразования координат из мкм в машинные. Эти задачи решаются путем добавления или вычитания величины коррекции, полученной путем линейной интерполяции по таблице коррекции.

После введения в подсистему перемещения алгоритма поперечной коррекции, была проведена повторная оценка ошибки поперечного позиционирования по методу, описанному выше. Результат оценки приведен на рисунке 2.15.

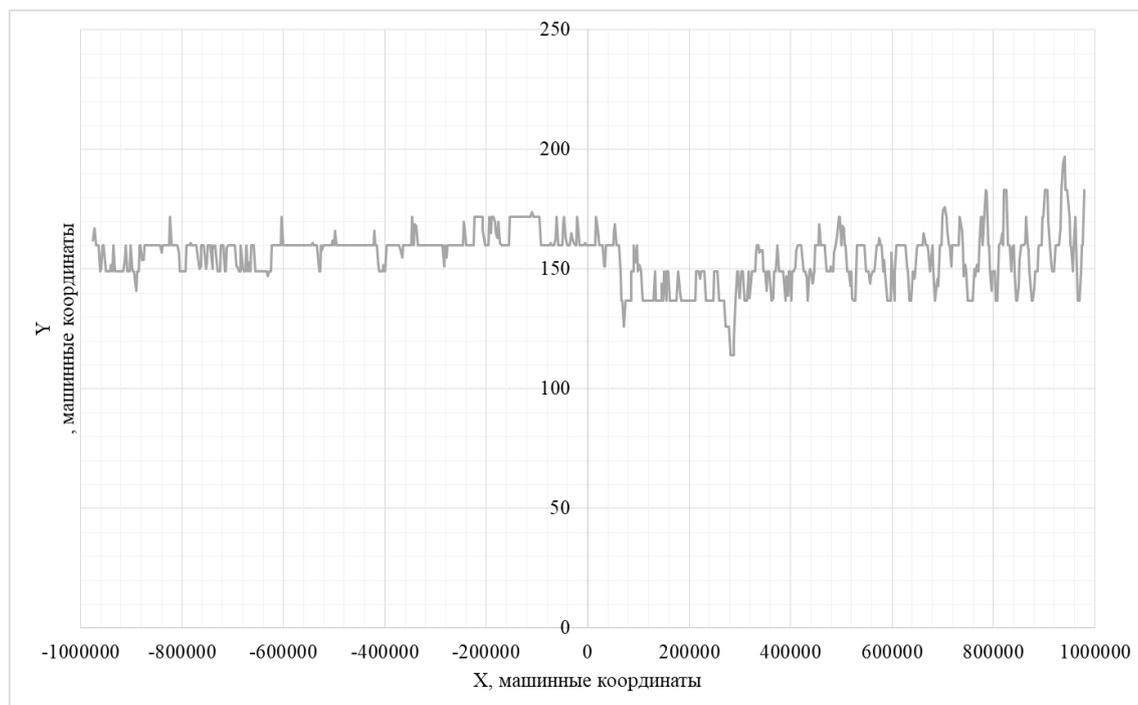


Рисунок 2.15 – Результат измерения поперечного отклонения позиционирования после введения коррекции

Как видно из экспериментальных данных, разница между максимальным и минимальным положением метки на изображении составила 8,3 мкм. По характеру графика можно судить, что предложенный метод позволил скомпенсировать не ортогональность и собственное искривление осей, а также значительно снизить влияние колебаний ходового винта.

Для верификации исправления поперечной ошибки по обоим осям было проведено измерение вектора отклонения изображения контактной площадки на изображениях цифрового микроскопа на выборке чипов по площади 76 мм полупроводниковой пластины. Полученная гистограмма распределения амплитуды векторов отклонения представлена на рисунке 2.16.

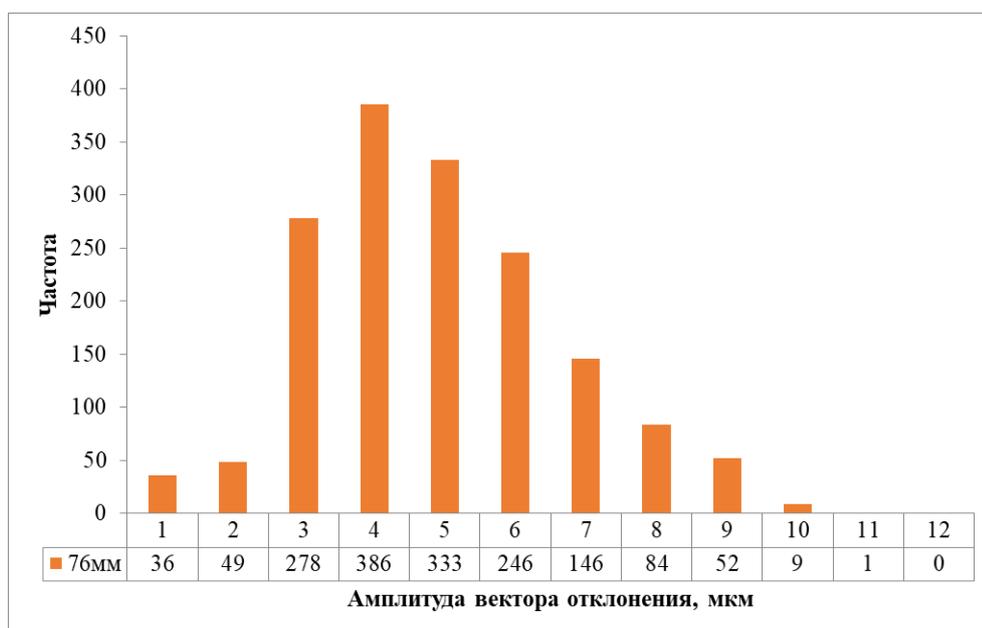


Рисунок 2.16 – Результат измерения вектора отклонения позиционирования на пластине диаметром 76 мм

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.

#### 2.4. Алгоритмы автоматизации зондовых измерений

При возникновении задачи автоматизации некоторого процесса межоперационного или выходного контроля нового изделия разработчик должен запрограммировать прикладную логику программы, описать алгоритмы выполнения измерений, создать элементы управления для конфигурирования и управления процессом. Для ускорения и упрощения цикла разработки прикладных модулей автоматизации необходимо разработать и реализовать унифицированную расширяемую систему интерфейсов и классов, позволяющую собирать вновь разрабатываемый модуль из базовых кирпичиков.

Из анализа опыта применения полуавтоматических станций не только в производственных, но и в опытно-конструкторских и исследовательских целях микроэлектронного производства было выявлено, что область их применимости

не ограничивается исключительно задачами межоперационного и выходного контроля электрических характеристик изделий. Соответственно для получения наиболее гибкого и эффективного исследовательского инструментария разрабатываемый ПАК помимо задач измерения должен позволять при необходимости легко автоматизировать более экзотические исследовательские процессы.

Дальнейшим шагом к развитию универсального программного инструментария для исследовательски-производственных задач явилась разработка процессно-ориентированной архитектуры системы автоматизации управления полуавтоматической зондовой станцией.

Типичный процесс обработки пластины на полуавтоматической зондовой станции включает следующие этапы:

**Этап 1. Открытие карты/проекта пластины** подготовительный этап, обеспечивающий возможность дальнейшей автоматизации обработки пластины на зондовой станции. Карта пластины либо создается оператором с нуля, если это новая пластина, либо может быть открыта из ранее сохраненного файла.

**Этап 2. Выравнивание и совмещение пластины с картой раскроя.** Важная процедура, необходимая для дальнейшей работы с отдельными чипами на полупроводниковой пластине. Этап можно представить, как процесс, выполняемый над пластиной в целом.

**Этап 3. Разметка периферийных чипов** на карте пластины в соответствии с их состоянием на пластине. Данный этап необходим для исключения чипов, которые могут повредить оснастку, такие чипы располагаются как правило на периферии полупроводниковой пластины и в окрестностях дефектов в виде крупных трещин и сколов. Данный этап можно представить, как процесс, выполняемый над всеми чипами или над пластиной в целом.

**Этап 4. Разметка чипов, которые необходимо подвергнуть обработке.** Как правило разметку чипов для обработки можно выполнить заранее при подготовке карты раскроя полупроводниковой пластины, однако, в случаях проведения исследовательских работ часто возникает необходимость обработки

небольшой выборки чипов из всего набора, представленного на пластине. Этап выполняется над пластиной в целом.

**Этап 5. Выполнение обработки чипов.** Ключевой этап, автоматизация которого является целью разработки ПАК. Под обработкой может скрываться: измерение электрических характеристик, фотографирование топологии, визуальный контроль, маркировка и т.д. Этап выполняется над группой чипов, которая представляет собой пересечение множеств не периферийных чипов и чипов, размеченных для обработки (Рисунок 2.17). Для сформированной группы необходимо построить последовательность определяющую очередность обработки отдельных чипов.



Рисунок 2.17 – Множество чипов подлежащих обработке в процессе

Из анализа приведенных этапов обработки пластины можно увидеть, что этапы делятся на два основных типа: операция над пластиной и операция над группой чипов.

Исходя из вышесказанного была предложена уточненная формализация технологического процесса зондового контроля изделий на полупроводниковых пластинах (Рисунок 2.18). 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 2.19).

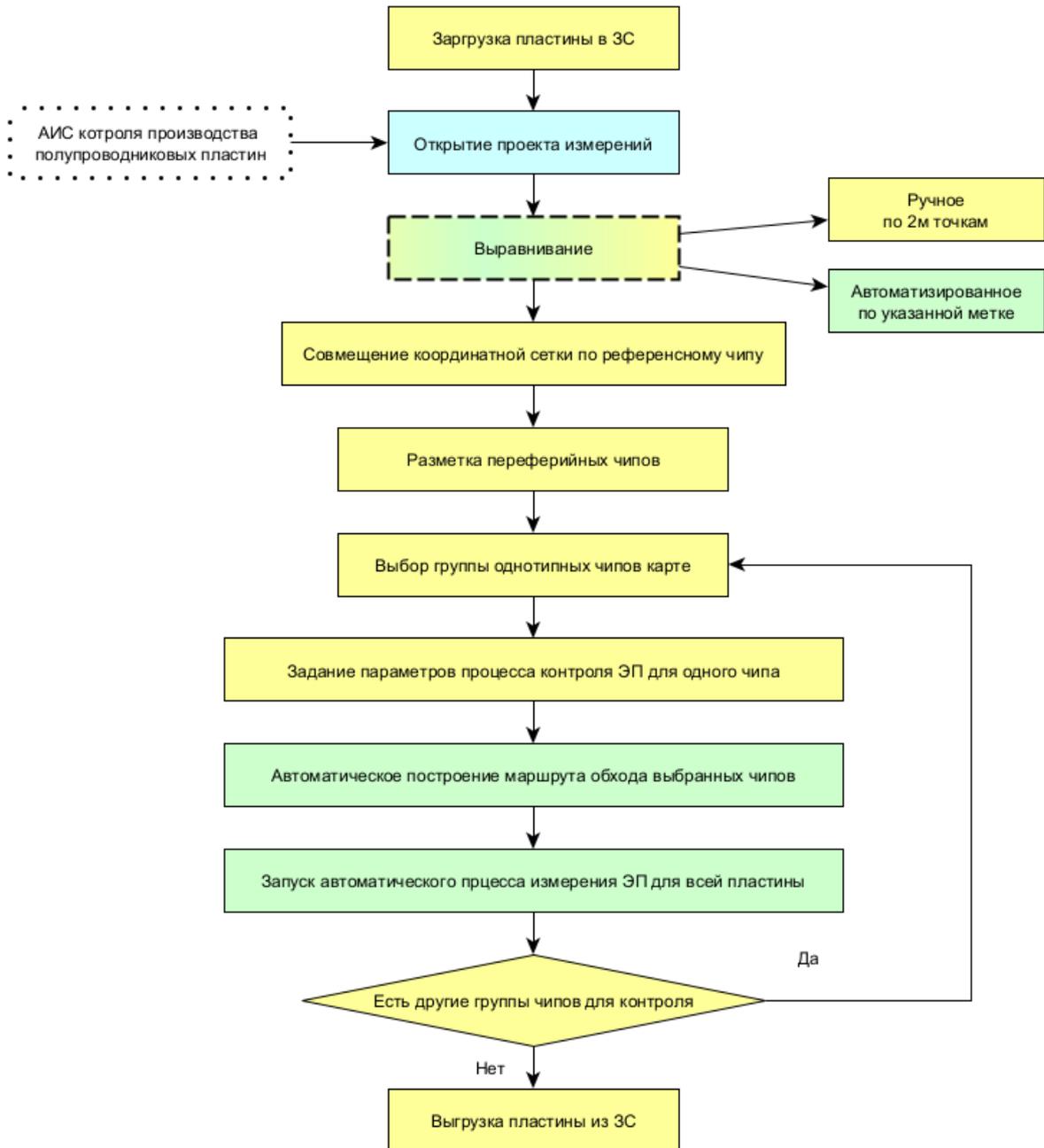


Рисунок 2.18 – расширенная последовательность операций технологического процесса зондового контроля

Желтым цветом отмечены операции требующие участия оператора, зеленым 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.



Рисунок 2.19 – Конечный автомат верхнего уровня управления

В состоянии ожидания 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.

В состоянии выполнения автоматизированной задачи программа блокирует возможность оператора установки вмешаться в процесс через пользовательский интерфейс пока задача не будет завершена. После окончания выполнения программа возвращается в состояние ожидания.

### **Процесс обработки группы чипов**

Для обработки группы чипов на заданной группе предварительно выполняется алгоритм формирования очереди обработки. Для формирования очереди обработки применяется алгоритм сортировки с реверсированием нечетных строк, его блок-схема представлена на рисунке 2.20.



Приведенный алгоритм позволяет реализовать при помощи внешнего программного модуля любую требуемую логику процесса обработки чипов начиная от измерения их электрических характеристик, заканчивая проведением автоматизированного визуального контроля или маркировки.

## **2.5. Выводы по главе**

В главе рассмотрено использование различных моделей хранения массивов данных результатов измерений характеристик интегральных схем.

Предложенный подход к структурированной упаковке сырых данных и метаданных измерительного проекта обладает значительным преимуществом в занимаемом на жестком диске пространстве, в отличие от классического файлового подхода. Что позволяет экономить ресурсы требуемые для организации системы хранения данных и значительно сократить время доступа при загрузке проектов по внутренней сети предприятия.

Описаны примеры реализации алгоритмов автоматического выравнивания полупроводниковых пластин, используемых в реальных промышленных решениях и новый алгоритм поиска угла корректировки поворота пластины на основе поиска точек совмещения методом двумерного преобразования Фурье и последующим анализом линейное регрессии методом наименьших квадратов.

Описаны предложенные алгоритмы и подходы к решению задачи автоматизации процесса обработки чипов на полупроводниковых пластинах с помощью полуавтоматической зондовой станции. Предложенный подход основан на построении модели обработки на основе процессов над пластиной и процессов над группами чипов и позволяет построить модульную систему, автоматизирующую широкий спектр задач в том числе визуальный контроль, межоперационный, выходной контроль и маркировку кристаллов перед последующей резкой и разбраковкой.

### **3. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ И ИНФРАСТРУКТУРА СИСТЕМЫ**

#### **3.1. Методология проектирования**

При проектировании программной системы сопровождения производства и зондового контроля полупроводниковых приборов и СВЧ монолитных интегральных схем необходимо решить ряд вопросов, связанных с выбором методологии проектирования, разработкой архитектуры программной системы и ее компонентов, выбором базовой программной платформы и применением методов и инструментов функционального тестирования.

Для проектирования программной системы была выбрана объектно-ориентированная методология [28]. В основе методологии лежит три составляющих: объектно-ориентированное программирование, объектно-ориентированное проектирование и объектно-ориентированный анализ.

Объектно-ориентированная методология программирования подразумевает представление программы в виде совокупности отдельных объектов, взаимодействующих между собой, при этом каждый объект является экземпляром определенного класса, совокупность которых представляет иерархию наследования.

Объектно-ориентированный анализ направлен на создание моделей максимально приближенных к реальному миру с применением объектно-ориентированного подхода, в данной методологии требования формулируются исходя из понятий классов и объектов, выявленных в моделируемой предметной области.

При применении методов объектно-ориентированного проектирования процесс сводится к объектной декомпозиции и синтезе логической, физической, статической и динамической модели системы.

К преимуществам объектно-ориентированного подхода по сравнению с структурными можно отнести:

- создание моделей более близких к реальной моделируемой системе;

- возможность применения как при проектировании информационных систем, так и аппаратно-программных комплексов;
- полноценное использование описательных возможностей объектно-ориентированных языков программирования;
- обеспечение возможности повторного использования программного обеспечения, что позволяет многократно сократить сроки разработки, объем возможных программных ошибок и затраты на поддержку разрабатываемой системы;
- поддержка итеративного процесса проектирования;
- создание более открытых систем.

При проведении анализа, описании и разработке программных систем в мировой практике наиболее часто применяется язык моделирования Unified Markup Language (UML) [29, 30]. В объектно-ориентированном проектировании язык UML используется для описания моделируемой системы, созданные в результате модели могут иметь различные уровни детализации.

### **3.2. Требования и постановка задачи**

Разрабатываемая программная система сопровождения производства и зондового контроля полупроводниковых приборов и интегральных схем должна отвечать ряду функциональных и нефункциональных требований.

Модуль автоматизации измерений должен обеспечивать реализацию следующих возможностей:

Автоматические измерения характеристик изделий на неразделенных полупроводниковых пластинах, посредством полуавтоматических зондовых станций.

Взаимодействие с аппаратной частью зондовой станции должно реализовываться в виде отдельного программного модуля, позволяющего независимо реализовывать управление различным аппаратным обеспечением.

Подсистема автоматизации измерений должна обеспечивать возможность сохранения конфигурации оборудования, последовательности обработки чипов.

Взаимодействие программного комплекса с измерительными приборами должно реализовываться в виде динамически подключаемых программных библиотек для возможности расширения спектра поддерживаемых приборов.

Возможность зонирования карты раскрытия для выборочного тестирования чипов и возможности физического разделения пластины на несколько частей.

Все классические приложения должны поддерживать протоколы обмена данными с сервером информационной системы.

Таким образом, технические требования, которым должно удовлетворять разрабатываемое программное обеспечение включают:

- 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).

### **3.3. Выбор архитектурных решений**

Основная задача для повышения производительности труда при выполнении зондовых измерений и анализа полученных данных состоит в создании ряда программных и аппаратных средств, позволяющих автоматизировать часть выполняемых процессов.

При проектировании программного комплекса первоочередным шагом был выбор программной платформы. Это обусловлено тем, что программная платформа определяет доступный спектр средств разработки, накладывает ограничения на технологические решения и влияет на методологию проектирования и архитектуру системы. Разрабатываемая программная система должна иметь модульную архитектуру, иметь возможность хранения данных в единой базе данных, использоваться в защищенной на уровне предприятия и домена среде передачи данных.

В следующих разделах данной работы будут подробно рассмотрены все аспекты и тонкости работы алгоритмов разработанного аппаратно-программного комплекса.

### **3.3.1. Выбор программной платформы**

Основные программные платформы, которые рассматривались при выборе:

- Microsoft .NET;
- Java.

Выбор был сделан в пользу платформы Microsoft .NET [31] (далее – .NET). Для технологии .NET существуют развитые средства разработки и отладки программного обеспечения, обеспечивающие быстрое создание приложений для ПК, серверных приложений и web-служб.

Современная версия .NET 6 также предоставляет кроссплатформенную переносимость разработанного программного обеспечения под различные операционные системы, что позволяет максимально эффективно проводить разработку систем с клиент-серверной архитектурой и снижает трудоемкость при развертывании web-служб в рабочей инфраструктуре.

Кроме того, использование выбранной технологии обусловлено упрощением интеграции с значительным объемом уже разработанного на данной платформе программного обеспечения, применяемого на предприятии.

### **3.3.2. Архитектура сетевого взаимодействия**

Для объединения различных программных модулей разработанного комплекса в единую систему необходимо наличие некоторой цифровой инфраструктуры, позволяющей отдельным прикладным модулям обмениваться данными как между собой, так и поддерживать связь с базой данных, предоставляя пользователям актуальные данные.

Существуют различные способы построения архитектуры распределенных сетевых приложений. Наиболее простой архитектурой клиент-сервер является двухуровневая, в которой приложение состоит из сервера и группы клиентов [32].

Существует два вида такой архитектуры:

– модель тонкого клиента. В этой модели вся работа приложения и алгоритмы управления данными выполняются на стороне сервера. На клиентской машине запускается только ПО уровня представления;

– модель толстого клиента. В этой модели сервер управляет данными, а на клиентской машине полностью реализуется работа приложения и взаимодействие с конечным пользователем.

Основной недостаток данной модели – высокая загруженность сервера и сети. Поскольку все вычисления выполняются на сервере, что может привести к значительному сетевому трафику между сервером и клиентом [33].

С другой стороны, модель толстого клиента позволяет в полном объеме использовать вычислительные мощности персональных компьютеров пользователей. Сервер в данной модели фактически выполняет только роль сервера транзакций баз данных.

Однако модель толстого клиента обладает существенным недостатком – высокая сложность поддержки и управления системой. Поскольку функции приложения в данной модели распределены между множеством различных машин. Необходимость замены приложения или способа хранения данных в БД приводит к необходимости его повторной инсталляции на всех клиентских машинах, что требует больших трудозатрат.

Для построения эффективной и легко масштабируемой инфраструктуры в качестве сетевой архитектуры было выбрано применение трехзвенной архитектуры клиент-серверного взаимодействия. Данный подход позволяет применять в качестве хранилища данных одновременно как базы данных различного типа, так и файловые системы для хранения больших объемов разнородных данных. При этом основные алгоритмы обработки поступающей в систему информации выносятся в отдельное серверное приложение, что позволяет контролировать доступ пользователей к отдельным элементам и подсистемам комплекса, а также обновлять и модернизировать алгоритмы обработки информации независимо от клиентских приложений.

Разработанная архитектура клиент-серверной системы представлена на рисунке 3.1.

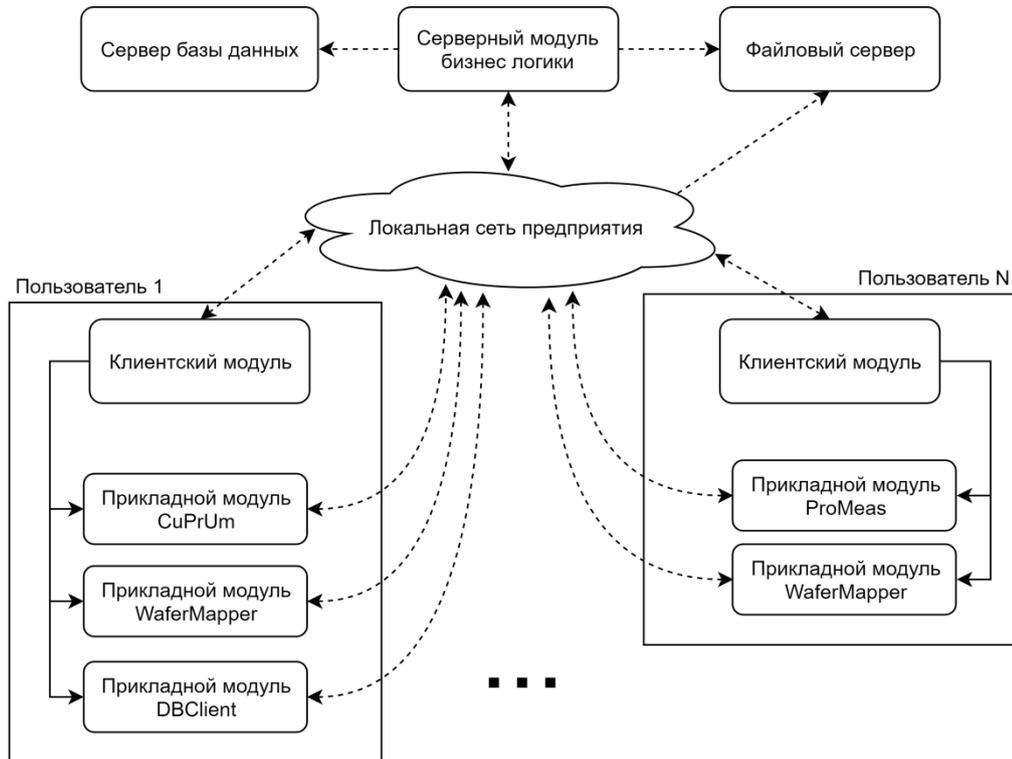


Рисунок 3.1 – Архитектура клиент-серверной системы комплекса

Хотя данный подход обладает рядом преимуществ, таких как легкая масштабируемость при увеличении нагрузки на сервер путем мультиплексирования серверных приложений и распределения подключений, а также изолированность всей логики обработки данных на центральном сервере, что обеспечивает более высокую безопасность. Однако практическая реализация трехзвенной архитектуры, как правило, является технически более сложной по сравнению с классической двухзвенной клиент-серверной архитектурой, где пользовательские приложения непосредственно взаимодействуют с базой данных.

На рисунке 3.2 представлена структура разработанного серверного приложения.

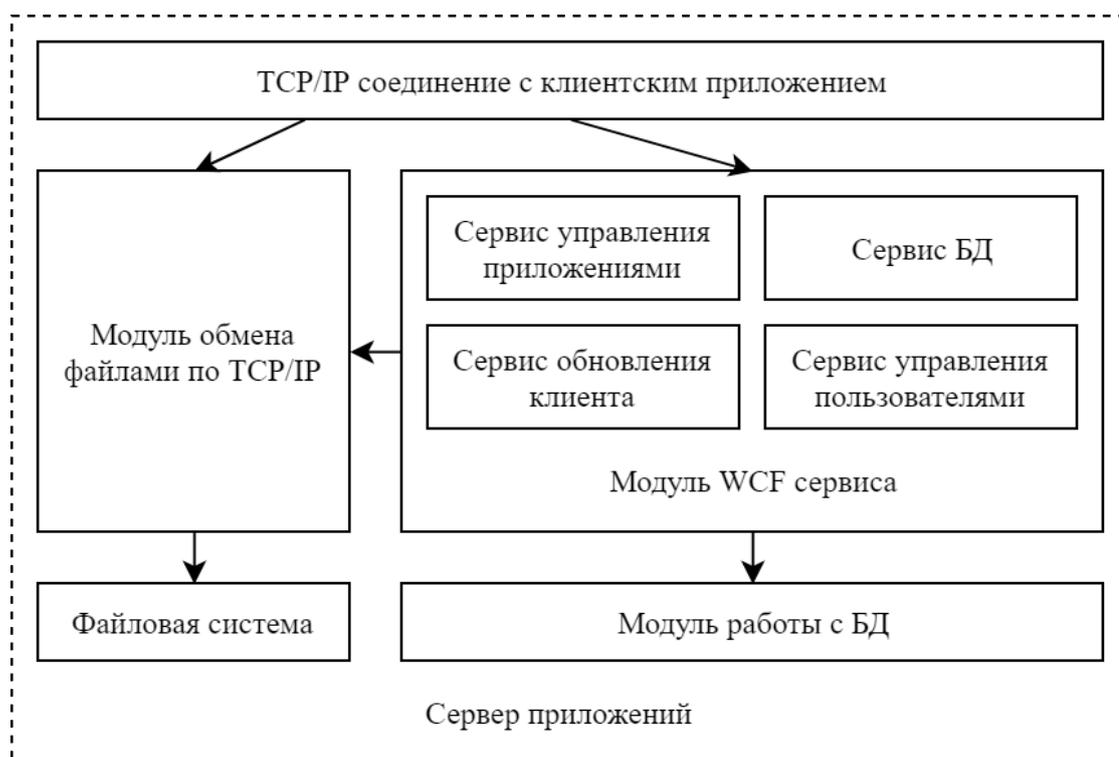


Рисунок 3.2 – Структура сервера приложений

В состав серверного приложения входит два TCP/IP сервера, первый сервер отвечает за обработку запросов от клиентских приложений, второй осуществляет двустороннюю передачу файлов между клиентом и сервером.

Для организации взаимодействия клиентских модулей с серверным слоем системы была применена архитектура SOA [34], в основе которой лежит принцип обеспечения доступности всей архитектуры системы через внешние интерфейсы (DCOM, RPC, web-сервисы), что позволяет организовать доступ приложений к данным и функциям других модулей.

Система обработки запросов от клиентских приложений построена на технологии gRPC. gRPC является системой удаленного вызова процедур, использующей в качестве транспортного протокола HTTP/2, и Protocol Buffers для описания интерфейса контрактов. gRPC обеспечивает поддержку двунаправленной потоковой передачи и возможность реализации блокирующих и асинхронных вызовов процедур с возможностью отмены.

В разработанном серверном приложении модуль gRPC сервисов содержит четыре сервиса:

– сервис управления приложениями реализует программный интерфейс IApplicationManagerService, сервис предназначен для удаленной автоматической загрузки прикладных модулей на персональные компьютеры пользователей посредством клиентского приложения комплекса;

– сервис обновления клиента реализует программный интерфейс ISDSUpdateService, сервис предназначен обработки запросов на скачивание дистрибутива клиентского приложения, а также обеспечивает функции для его удаленного обновления;

– сервис управления пользователями реализует программный интерфейс IUserManagementService, сервис предназначен для аутентификации пользователей по паре логин/пароль либо по токен ключу, также предоставляет функционал для получения расширенных учетных данных пользователя (дата последнего подключения, уровень доступа, ФИО пользователя и т.д.);

– сервис базы данных реализует программный интерфейс IDataBaseService, сервис предоставляет функционал для выполнения запросов в базе данных, все запросы сопровождаются передачей токен ключа пользователя, по которому выполняется авторизация пользователя на совершение требуемого запроса.

Модуль обмена файлами по TCP/IP представляет собой выделенный асинхронный TCP/IP сервер, осуществляющий передачу файлов в бинарном виде. Модуль организован таким образом, что передача файлов осуществляется после предварительного добавления необходимого файла в очередь ожидания от модуля gRPC сервиса, после чего gRPC сервис передает клиентскому приложению идентификатор файла, который в свою очередь инициирует загрузку необходимого файла. Модуль передачи файлов ожидает получения идентификатора загрузки, сверяет токен ключ подключившегося клиента и токен ключ получателя файла и в случае их совпадения начинает передачу файла.

### **3.3.3. Обеспечение безопасности транспортной системы**

Обеспечение безопасности системы при передаче информации по сети – критически важная задача при проектировании и разработке распределенной системы. В отличие классических от настольных приложений, где вся

информация локализована на компьютере пользователя, в распределенной системе данные постоянно передаются по между клиентом и сервером, при этом проходя через промежуточные узлы. Несмотря на использование разрабатываемой системы в защищенной сети предприятия, необходимо реализовать защиту каналов связи от перехвата третьими лицами [35].

В рассматриваемой системе для обеспечения безопасности канала передачи данных между клиентскими модулями и сервером предусмотрена возможность установки соединения с применением протокола SSL и специальных сертификатов цифровых подписей, обеспечивающих однозначную аутентификацию клиентом серверного приложения и установки симметрично зашифрованного канала передачи данных [36].

### 3.4. Клиентский модуль

На рисунке 3.3 представлен пользовательский интерфейс клиентского модуля.

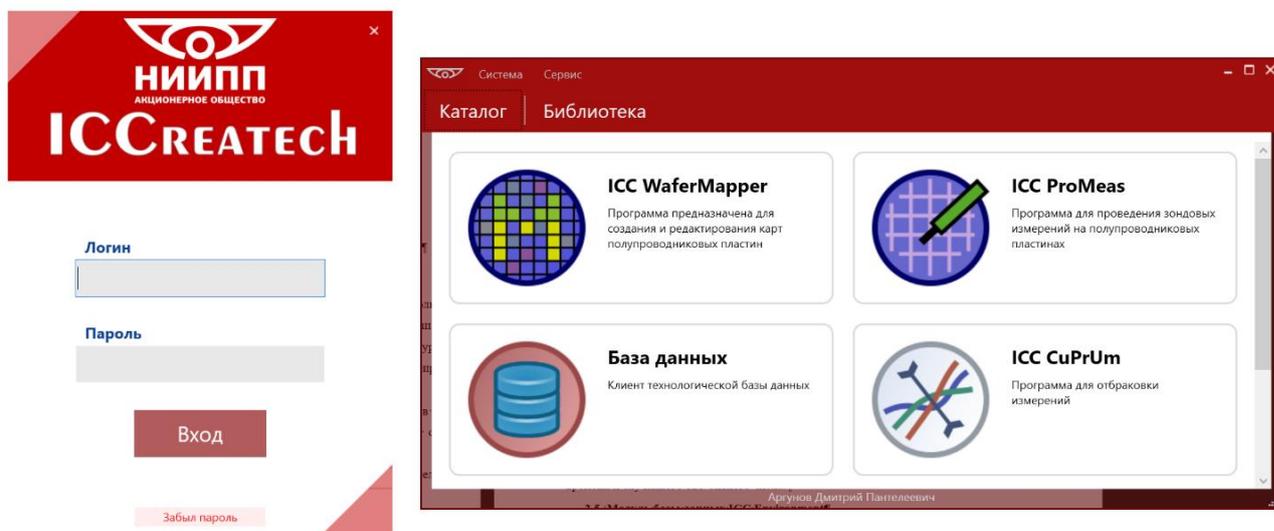


Рисунок 3.3 – Интерфейс клиентского модуля

При запуске на пользовательском компьютере клиентский модуль выполняет аутентификацию пользователя в системе, аутентификация осуществляется двумя способами:

– аутентификация по паре логин/пароль, которую пользователь вводит с клавиатуры в специальное окно, после успешной аутентификация по паре

логин/пароль сервер генерирует случайный токен ключ и передает его клиентскому модулю;

– аутентификация по сохраненному токен ключу, данный способ активируется в том случае, когда пользователь включил функцию «Автоматический вход в систему» в окне аутентификации у вошел в систему используя свой логин и пароль.

На рисунке 3.4 представлена блок-схема алгоритма аутентификации пользователя в системе при запуске клиентского модуля.

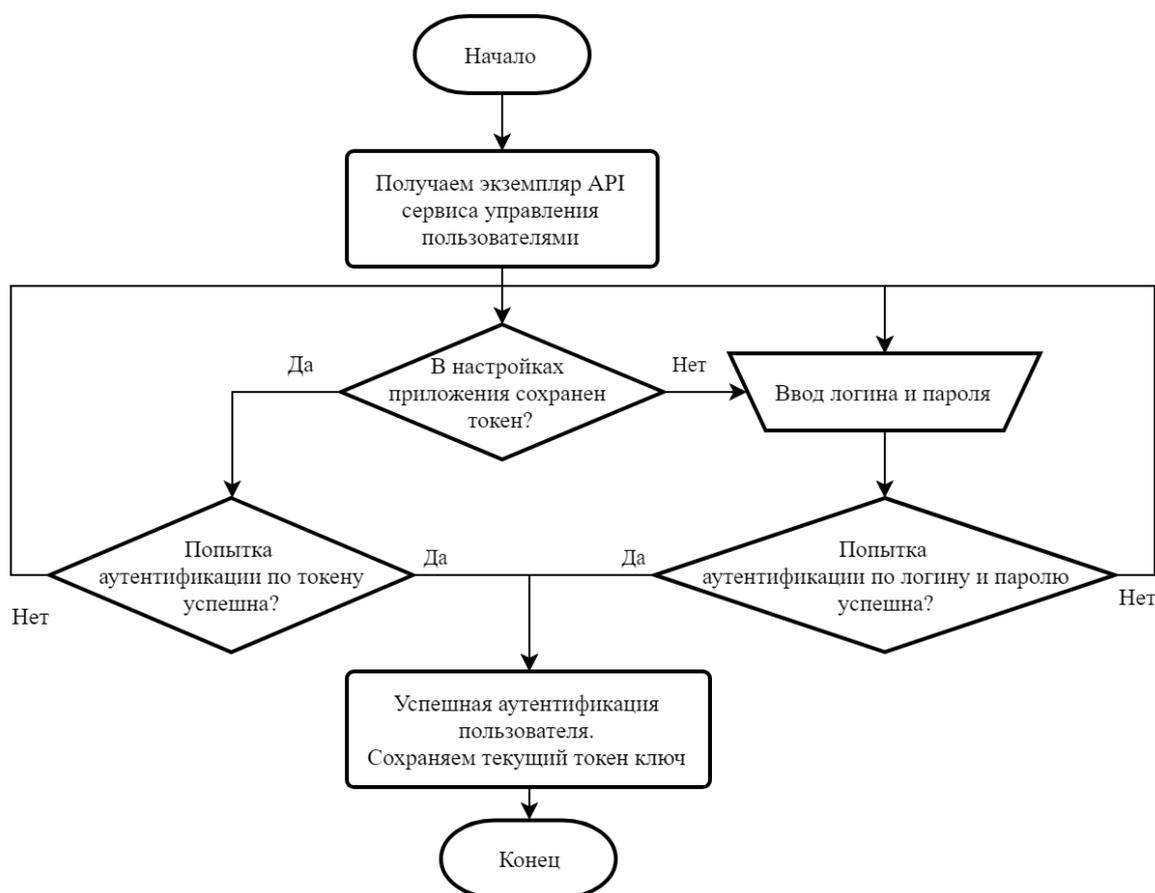


Рисунок 3.4 – Алгоритм аутентификации пользователя в клиентском модуле

После выполнения аутентификации все последующее взаимодействие с серверным модулем осуществляется при помощи сгенерированного токен ключа. Токен ключ представляет собой текстовую строку, полученную путем кодирования методом base64 комбинации текущего времени и случайного 128-битного числа.

### 3.5. Модуль базы данных ICC Environment

Прикладной модуль, предназначенный для работы пользователей с единой базой данных комплекса. Модуль используется для учета полупроводниковых пластин и регистрации соответствующих сопроводительных листов. При создании сопроводительного листа, в базе данных автоматически создаются записи межоперационного и выходного контроля, связанные с данной полупроводниковой пластиной. Программа предоставляет возможность отслеживать и анализировать данные по выходу годных на всех произведенных пластинах.

В результате анализа процесса производства и проведенных наблюдений было определено, что в первом приближении производство СВЧ МИС состоит из элементов, которые представлены на рисунке 3.5.

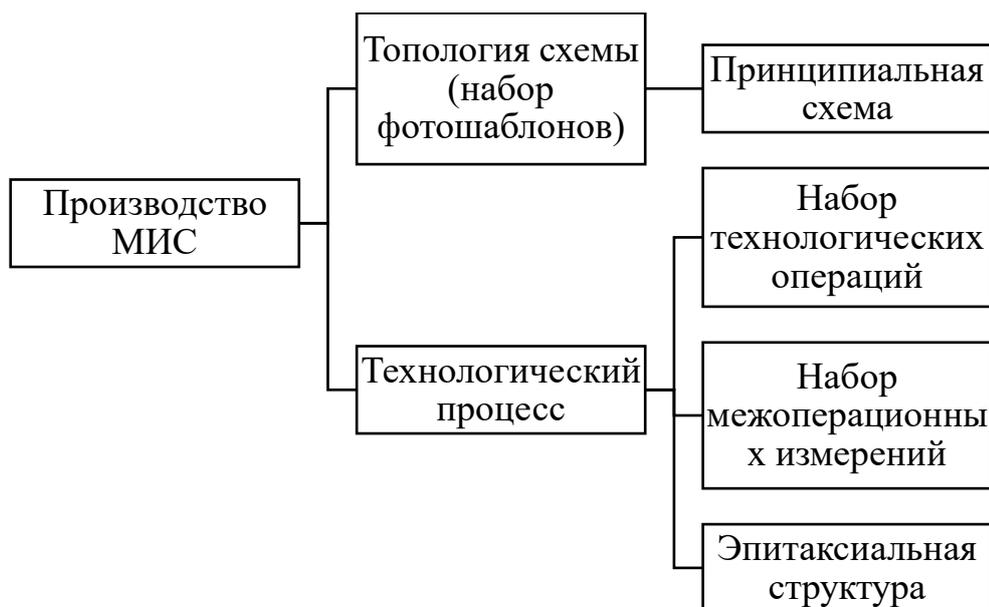


Рисунок 3.5 – Основные элементы производства СВЧ МИС

Данная структурная схема дает понимание о базовой взаимосвязи ключевых элементов, что в дальнейшем позволяет правильно определить общее направление развития разработки системы. Так же из приведенной схемы видно, что описание классов в программной реализации, соответствующих блокам схемы необходимо делать максимально независимыми друг от друга, что позволит сделать систему более гибкой к возможным изменениям и расширениям функционала.

На рисунке 3.6 представлена структура разработанного прикладного модуля взаимодействия с базой данных.

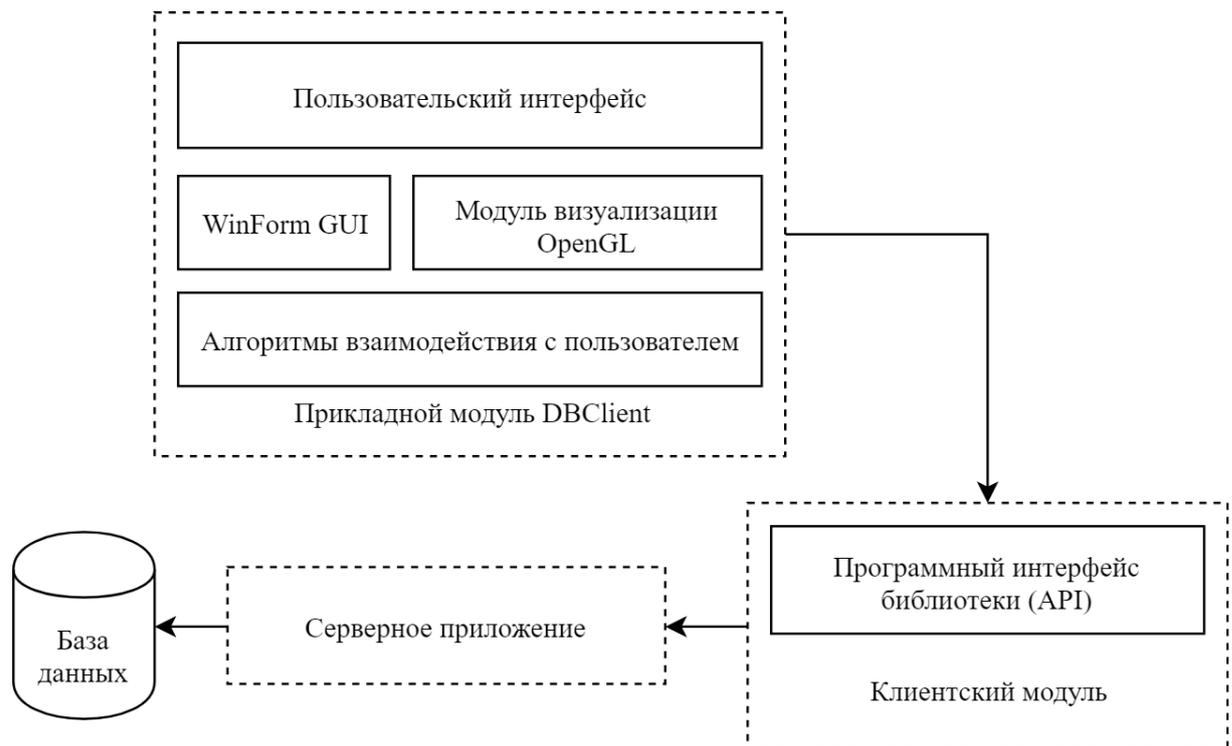


Рисунок 3.6 – Структура модуля DBClient

Прикладной модуль взаимодействия с БД использует клиентский модуль для организации обмена данными с сервером приложений и получения данных из единой БД. Единая БД содержит информацию всех зарегистрированных пластинах, сопроводительных листах, комплектах фотошаблонов и проведенных измерениях.

Модуль взаимодействия с БД также позволяет получить полную информацию по конкретной пластине путем сканирования штрих-кода, размещенного на чашке с платиной либо бумажной версии сопроводительного листа, что позволяет при необходимости оперативно открыть файлы измерительных данных путем запуска прикладного модуля CuPrUm с специальным параметром, который сообщает модулю CuPrUm местоположения файла измерительного проекта для автоматического открытия после загрузки программы.

На рисунке 3.7 представлен пользовательский интерфейс прикладного модуля DBClient.

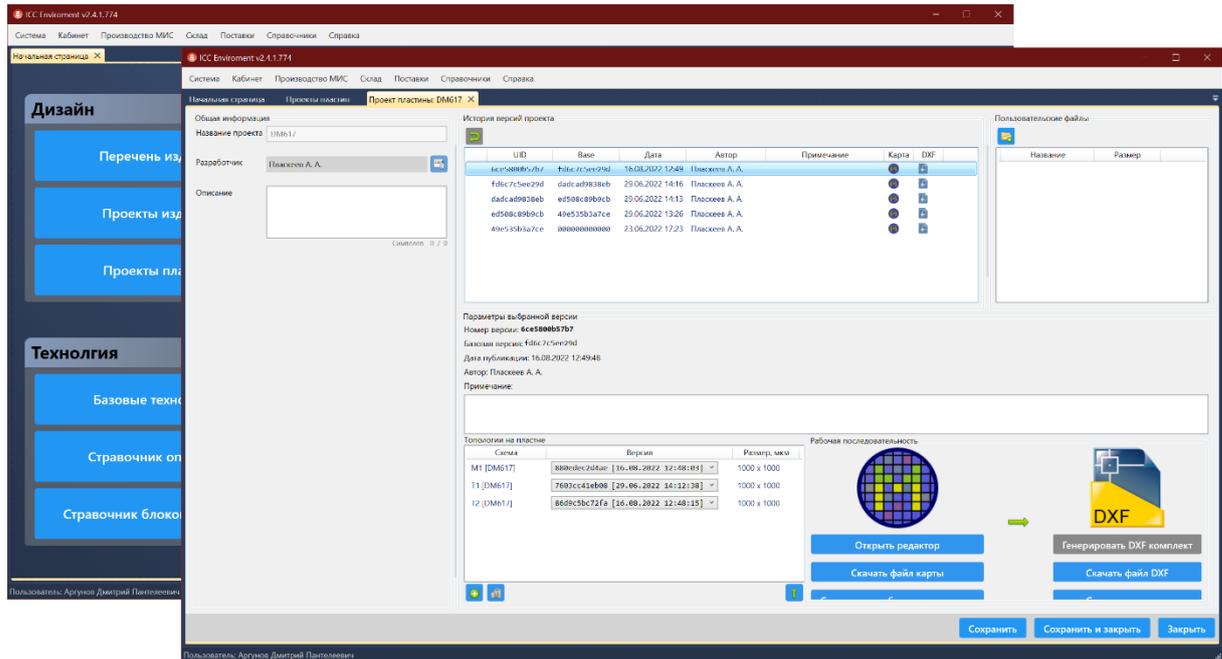


Рисунок 3.7 – Интерфейс модуля базы данных

Интерфейс модуля разделен на несколько разделов, отвечающих за предоставление пользователю информации по определенным типам записей:

- «Материал» отвечает за регистрацию партий входящих полупроводниковых пластины, эпитаксиальных структур и номера отдельных пластин в партиях;
- «Фотошаблоны» отвечает за регистрацию комплектов фотошаблонов;
- «Запуски» отвечает за регистрацию сопроводительных листов на основе данных разделов «Материал» и «Фотошаблоны».

«Выходной контроль» предоставляет информацию по текущему статусу измерений выходного контроля на полупроводниковых пластинах, выходу годных и числу кристаллов.

### 3.6. Модуль создания карт раскрыя ICC WaferMapper

Для выполнения автоматизированных зондовых измерений прежде всего необходимо правильно задать места контактирования зондов с полупроводниковой пластиной. При этом необходимо учитывать, что в пределах одной полупроводниковой пластины могут содержаться МИС, отличающиеся друг от друга расположением контактных площадок, топологией, габаритными

размерами и даже функциональным назначением, что влечет за собой усложнение настроек и конфигурации оборудования, а также, в некоторых случаях, проведение многоступенчатых измерений. Для этих целей создается так называемая карта пластины, которая содержит данные с координатами позиций, в которых необходимо провести измерения [37].

Карта полупроводниковой пластины представляет собой какое-либо совокупное представление информации о чипах, расположенных на пластине. Наиболее распространенным способом отображения карт является визуализация геометрической структуры полупроводниковой пластины в соответствии с её реальными размерами, поскольку в данном случае облегчается читаемость карт оператором, работающим с ними, и уменьшается вероятность ошибочного сопоставления данных представленных на карте с реальной пластиной.

Разработанный прикладной модуль `WaferMapper` предназначен для создания карт раскрытия полупроводниковых пластин. Модуль позволяет создавать карты со сложной периодической структурой, состоящей из повторяющихся модулей, объединяющих различные чипы. Также позволяет задавать внутри отдельных чипов точки проведения зондовых измерений для осуществления межоперационного контроля и измерения параметров тестовых структур, на рисунке 3.8 представлена структура программного модуля.

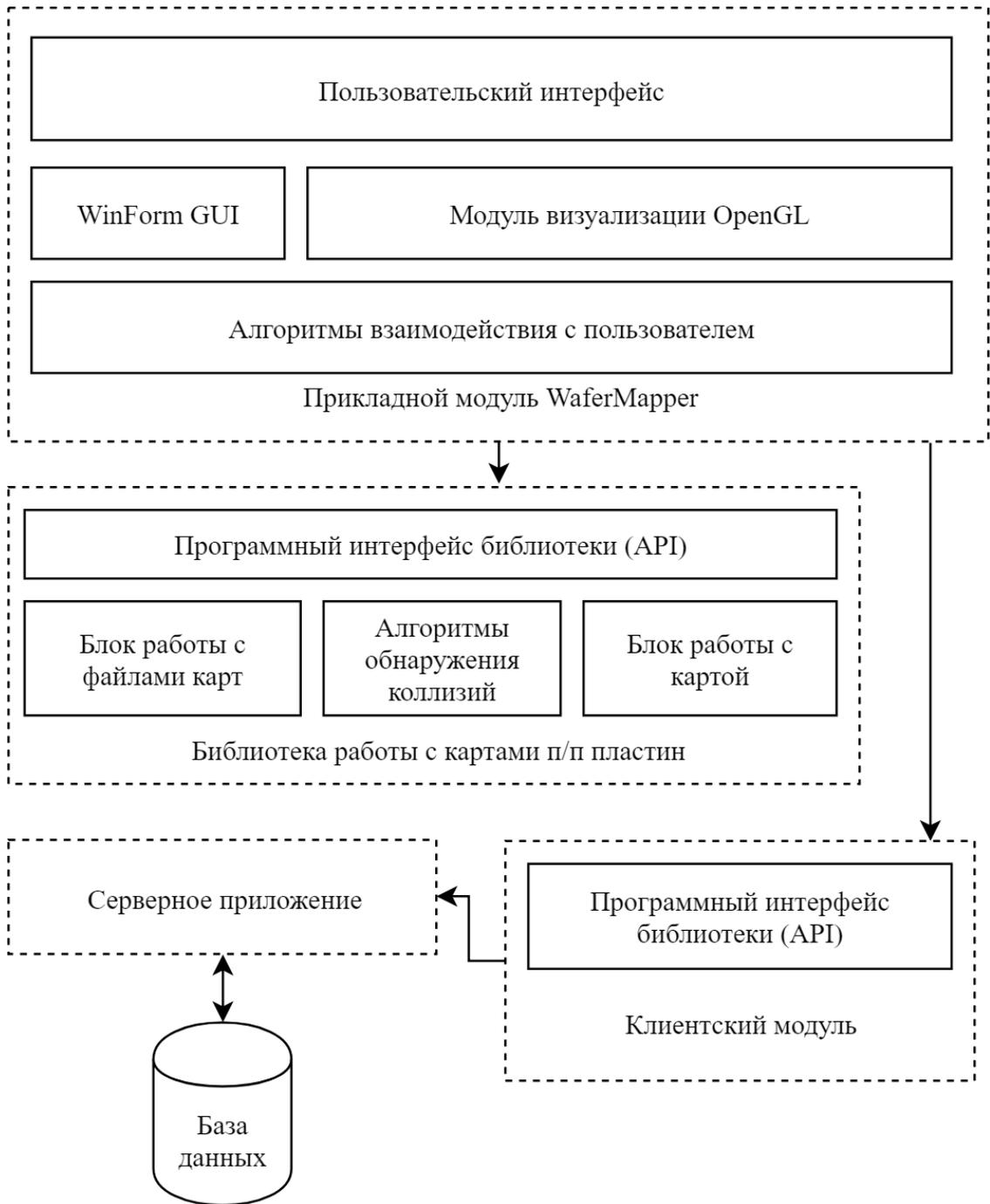


Рисунок 3.8 – Структура прикладного модуля редактора карт пластин

Как показано на структурной схеме прикладного модуля, алгоритмы, обеспечивающие работу с картами раскроя, вынесены в отдельную библиотеку и разбиты на три блока.

Блок работы с файлами карт осуществляет загрузку и сохранение данных карты раскроя в файл формата \*.XML, пример структуры файла приведен в приложении 1.

Файл карты раскроя разбит на три части:

– первая часть – <props>, в ней описываются параметры такие как название, диаметр пластин, шаг сетки по умолчанию;

– вторая часть – <elements>, в ней содержатся описания отдельных кристаллов и модулей, описания кристаллов состоят из названия, идентификатора, габаритов, цветового и буквенного обозначения, а описания модулей состоят из названия, идентификатора, габаритов модуля, а также списка и расположения кристаллов, входящих в модуль;

– третья часть – <map>, в этой части описывается сама карта пластины, описание карты представляет собой список элементов из второй части файла, расположенных в определенных координатах, каждый размещенный на карте элемент имеет свой уникальный числовой идентификатор, позволяющий его однозначно сопоставить с будущими файлами измерений.

Блок алгоритмов обнаружения коллизий, содержит алгоритмы, позволяющие определить наличие пересечений между некоторой произвольно заданной прямоугольной областью и элементами, размещенными на карте раскроя.

Блок работы с картой содержит основные функции и алгоритмы для добавления новых элементов, размещения элементов на карте, выбора элементов по заданному идентификатору и т.д.

На пластинах большого диаметра может располагаться более десяти тысяч отдельных кристаллов, для оптимизации обработки алгоритмов поиска коллизий была разработана специальная система хранения данных. В разработанной системе все доступное пространство карты разбивается на квадратные области с размером стороны 5000 мкм, каждой такой области соответствует уникальная пара из двух индексов и динамический массив объектов, содержащихся в данной области. Для определения пересечения объектов карты с некоторой точкой, из координат точки выполняется вычисление индексов сектора, соответствующего ей, далее поиск пересечений ведется исключительно в одном секторе, что многократно сокращает объем необходимых для этой задачи вычислений и повышает скорость работы приложения.

На рисунке 3.9 представлен пользовательский интерфейс прикладного модуля WaferMapper.

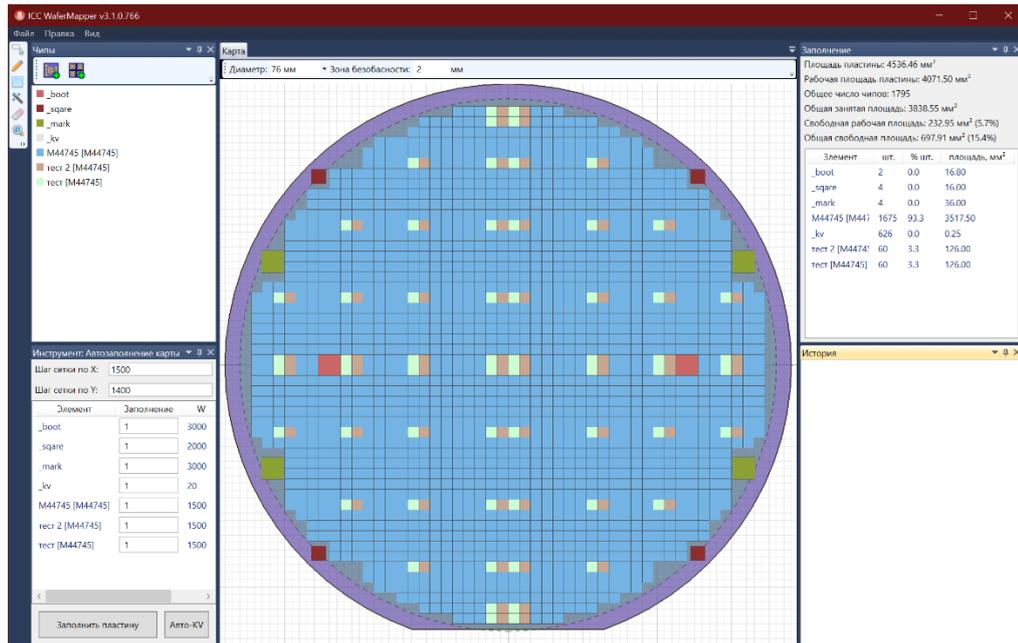


Рисунок 3.9 – Общий вид модуля WaferMapper v3.1

Основные инструменты программного модуля располагаются в левой части пользовательского интерфейса, их функциональное назначение представлено на рисунке 3.10.

В нижней части интерфейса расположены элементы управления диаметром пластины и шагом сетки.

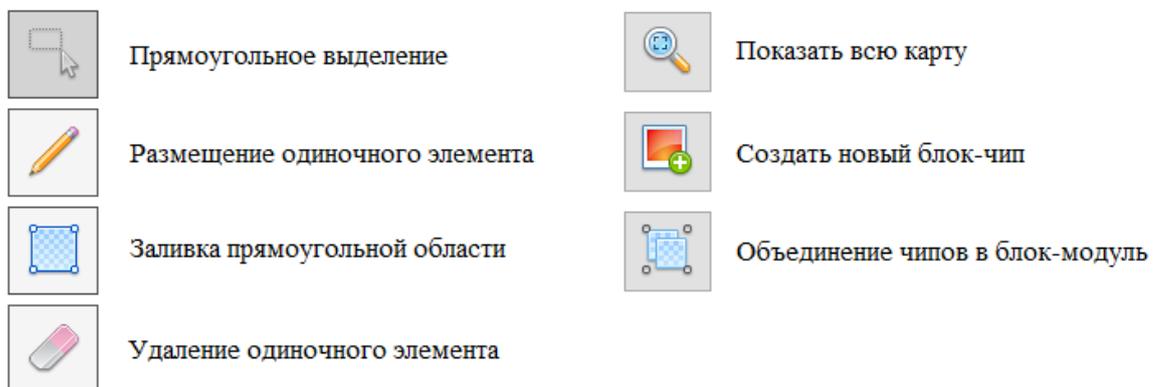


Рисунок 3.10 – Функциональное назначение основных инструментов

Создание и редактирование карт полупроводниковых пластин в данном прикладном модуле выполняется посредством размещения в рабочей области

пластины блоков, представляющих отдельные кристаллы. Параметры блоков (размер, цвет блока, буквенно-цифровое обозначение и т. д.) предварительно задаются в специальном окне. Если на одной полупроводниковой пластине производятся МИС с различной топологией, но одинаковыми габаритными размерами их, как правило, объединяют в более крупные блоки и мультиплицируют по всей поверхности пластины. Данный подход был учтен при разработке программы редактора и реализован в виде функционала, позволяющего выделить на карте ряд отдельных элементов и сгруппировать их в более крупный блок, который аналогичным образом можно размещать на карте пластины [37].

Заполнение карты можно осуществлять как путем ручного размещения отдельных чипов и модулей в области пластины, так и путем «заливки» выделенной прямоугольной области пластины заданными элементами. Блок-схема алгоритма автоматического заполнения области карты пластины представлена на рисунке 3.11. При размещении элементов на карте они позиционируются согласно границам заданной сетки, а также выполняется автоматическая проверка пересечения с уже размещёнными элементами и проверка на выход элементов за пределы рабочей области пластины. Рабочая область пластины задается путем выбора эффективного диаметра полупроводниковой пластины, на котором предполагается выполнить размещение элементов.

Визуализация карты пластины выполняется с применением библиотеки OpenGL [38], благодаря чему достигается высокая производительность при работе с картами, содержащими большое число элементов. Также это позволило разработать плавный, анимированный и эргономичный пользовательский интерфейс, что способствует комфортной работе конечного пользователя и как следствие более высокой производительности труда.

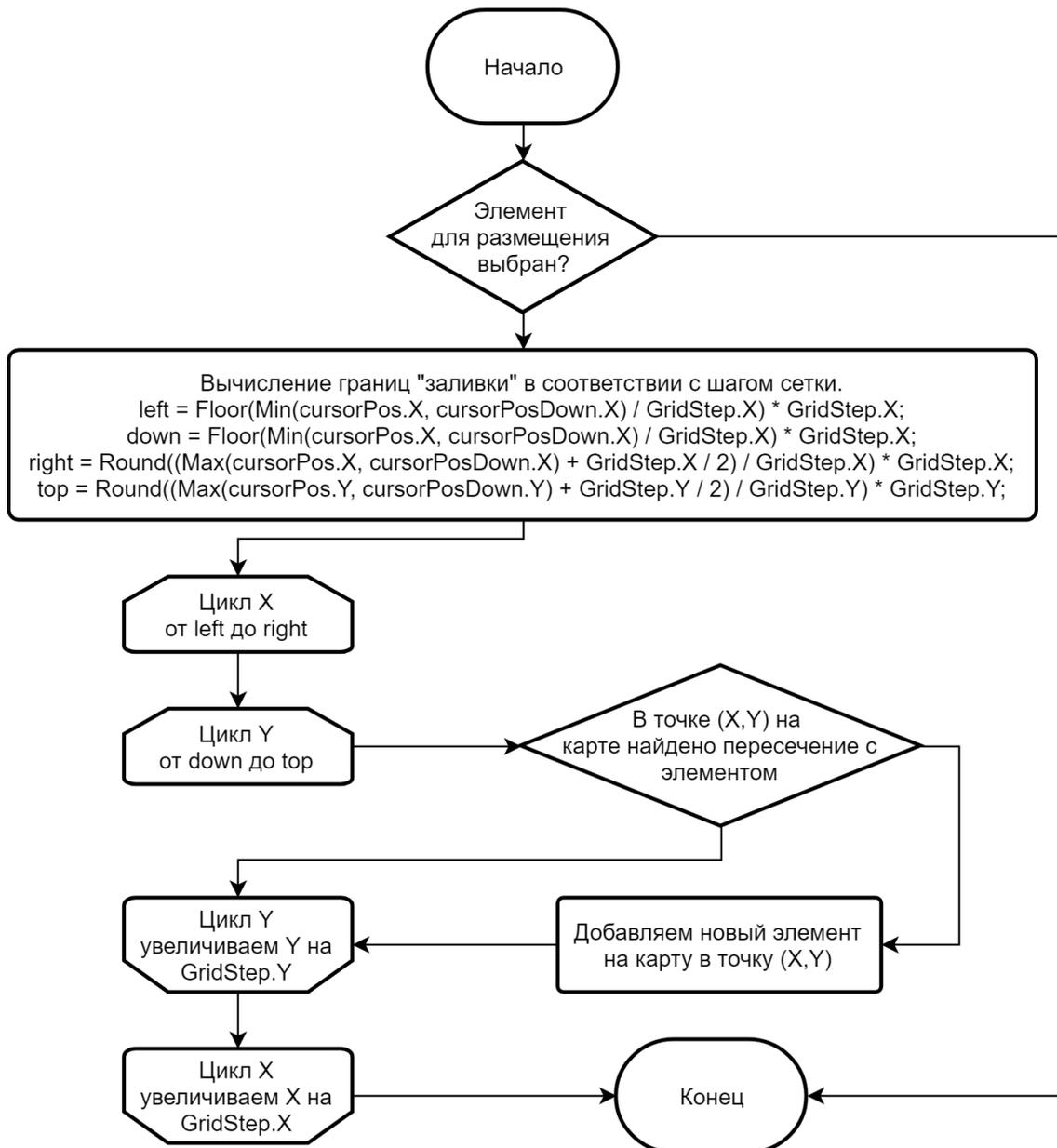


Рисунок 3.11 – Блок-схема алгоритма автозаполнения области карты

Полученную в результате карту можно сохранить для последующего использования при автоматизированных зондовых измерениях. Сохранение структуры карты выполняется либо в виде отдельного XML файла, либо в базе данных. Так же для созданной карты пластины можно вывести отчет по процентному и абсолютному значению заполнения площади пластины с детализацией по отдельным кристаллам, что позволяет быстро проанализировать результат построения карты.

### 3.7. Модуль зондовых измерений ICC ProMeas4

#### 3.7.1. Назначение

Программный модуль предназначен для проведения автоматизированных зондовых измерений на полупроводниковых пластинах. Модуль работает с измерительным проектом пластины. Измерительный проект пластины представляет собой файловый контейнер, содержащий данные о сопроводительном листе, карте пластины, данные с результатами измерений, списке измерений и их конфигурации.

Программа обеспечивает взаимодействие с аппаратной частью зондовой станции, различными измерительными приборами (источники-измерители, векторные анализаторы цепей и т.д.) и коммутирующими устройствами (переключательные матрицы СВЧ, устройства управления и т.д.) посредством периферийных интерфейсов, а также отвечает за корректное перемещение предметного столика зондовой станции в соответствии с картой раскрыя.

На рисунке 3.12 представлена структура разработанного прикладного модуля автоматизированных зондовых измерений.

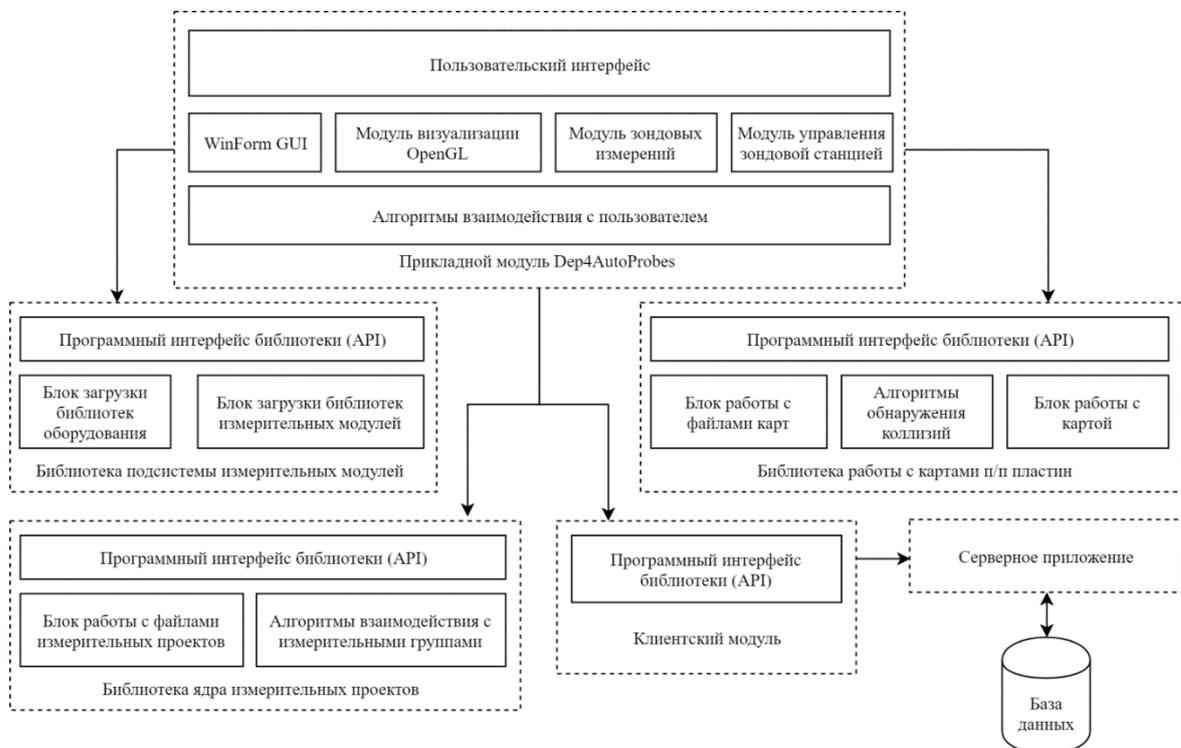


Рисунок 3.12 – Структура модуля зондовых измерений

### 3.7.2. Подсистема автоматизации измерений

Прикладной модуль использует в своем составе три отдельных программных библиотеки реализующих независимо друг от друга алгоритмы для работы с картами раскроя полупроводниковых пластин, управления дополнительным периферийным оборудованием и средствами измерения, управления и взаимодействия измерительными проектами. Также прикладной модуль автоматизированных зондовых измерений использует клиентский модуль для получения доступа к базе данных и другим функциям WCF сервисов, посредством токена ключа, передаваемого прикладному модулю при запуске.

Ключевой особенностью подсистемы измерительных модулей является то, что алгоритмы подключения и управления измерительным оборудованием реализуются в независимых динамически подключаемых библиотеках с использованием технологии динамической загрузки сборок во время выполнения основной программы. Данный подход в построении архитектуры приложения позволил достичь высокой модульности и независимости отдельных компонентов системы, что создало условия для неограниченного расширения возможностей программы путем разработки новых библиотек. Также это способствует высокому уровню повторного использования программного кода, что снижает число ошибок и упрощает их исправление на стадии поддержки программного продукта.

Аналогичным образом построена подсистема измерительных модулей. Измерительный модуль представляет собой программный класс, реализующий специальный программный интерфейс, содержащий методы предварительной конфигурации оборудования и выполнения одиночного измерительного цикла. Также библиотека, содержащая классы измерительных модулей, имеет методы, позволяющие получить её идентификационные данные и хеш-сумму исполняемого кода, для верификации метрологически значимых измерительных модулей, независимо от программы в целом. На рисунке 3.13 приведена общая архитектура разработанной подсистемы взаимодействия с измерительным оборудованием.

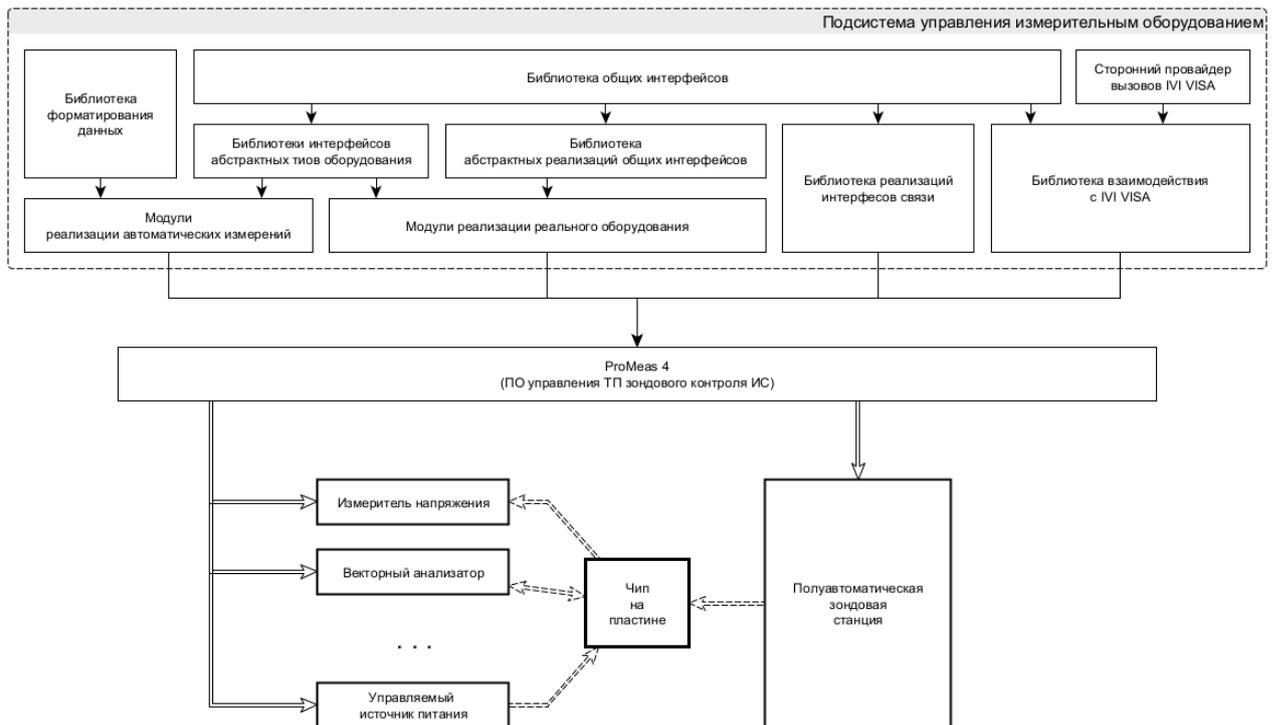


Рисунок 3.13 – Архитектура подсистемы управления оборудованием

Одним из применений разработанной подсистемы управления измерительным оборудованием была реализация процесса измерения параметров электрооптических модуляторов, проведенная 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», результаты работы опубликованы в [39].

На первых этапах разработки программно-аппаратного комплекса зондового контроля в качестве аппаратной части использовалась полуавтоматическая зондовая станция Summit 12000 компании Cascade Microtech, управление зондовой станцией осуществляется путем отправки команд программному обеспечению зондовой станции посредством протокола межпроцессного взаимодействия Dynamic Data Exchange (DDE).

DDE - давний и прижившийся протокол обмена данными между разными приложениями, появившийся еще на заре эры Windows. Приложения, использующие DDE, разделяются на две категории - клиенты и серверы. Оба

участника процесса осуществляют контакты (conversations) по определенным темам (topic), при этом в рамках темы производится обмен элементами данных (items). Устанавливает контакт клиент, который посылает запрос, содержащий имена контакта и темы. После установления контакта всякое изменение элемента данных на сервере передается данным клиента [40].

Карта раскроя полупроводниковой пластины хранит местоположение каждого отдельного чипа на пластине, координаты чипа представляют собой два числа, отражающих координаты  $x$  и  $y$  левого нижнего угла кристалла в декартовой системе. При выполнении автоматизированных зондовых измерений, для каждого выбранного чипа, зондовой станции отправляются команды для перемещения предметного столика по координатам, соответствующим центру данного чипа. После чего для выбранного измерительного модуля вызывается функция, иницирующая единичный измерительный цикл. Файлы данных, полученные в ходе выполнения измерительного цикла, сохраняются в директорию с результатами измерений, при этом названия файлов содержат специальный префикс, однозначно связывающий их с определенным чипом на карте раскроя пластины.

Перед началом измерений алгоритм выполняет сортировку выбранных на карте чипов в порядке возрастания по их координатам  $x$  и  $y$ , что оптимизирует путь перемещения предметного столика зондовой станции в процессе проведения измерений.

На рисунке 3.14 представлен пользовательский интерфейс прикладного модуля автоматизированных зондовых измерений.

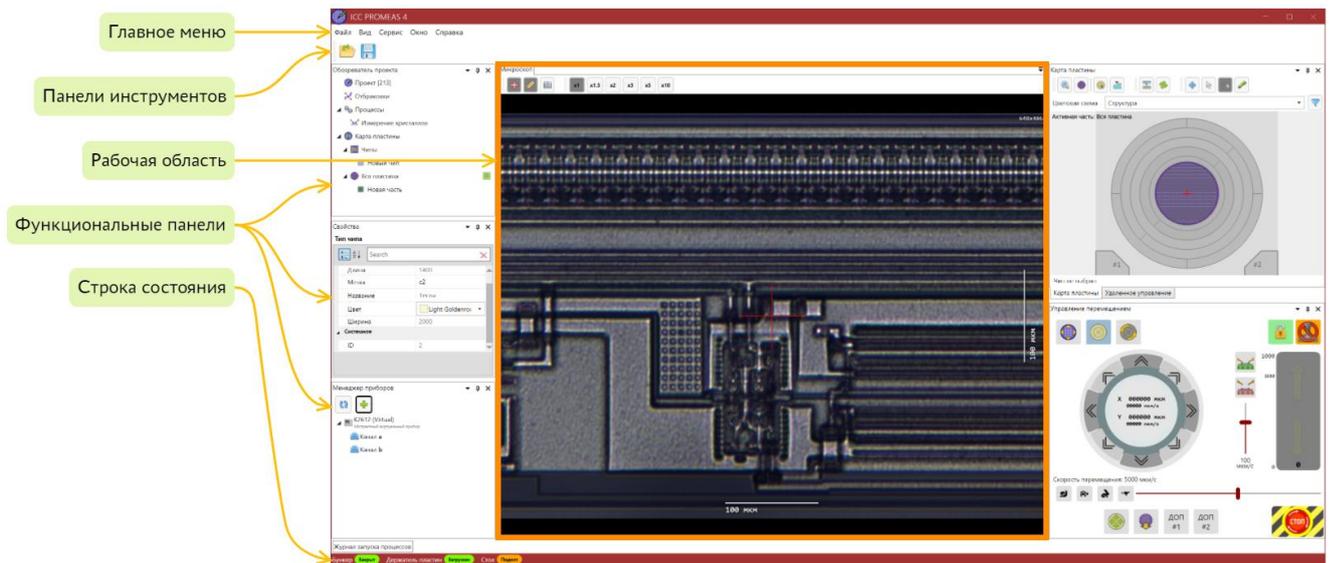


Рисунок 3.14 – Общий вид модуля зондовых измерений ICC ProMeas4

В центральной части окна расположена карта пластины и панель управления параметрами визуализации карты, которая позволяет задать режим цветового обозначения отдельных чипов (структура, статус измерения и статус отбраковки), а также режим фильтра отображаемых чипов (вся пластина, только измеряемые, из списка).

В левой части главного окна программы размещены панели управления списком измерительных групп и подключенными приборами. Панель управления списком измерительных групп позволяет добавлять в текущий измерительный проект новые измерения. Измерительная группа — это произвольный набор кристаллов на карте, объединенных в группу и имеющих идентичные настройки процесса измерения. Панель управления приборами позволяет выбирать необходимый для измерений прибор из списка подключенных, а также добавлять и отключать дополнительные приборы при необходимости путем вызова специального диалогового окна (рисунок 3.15).

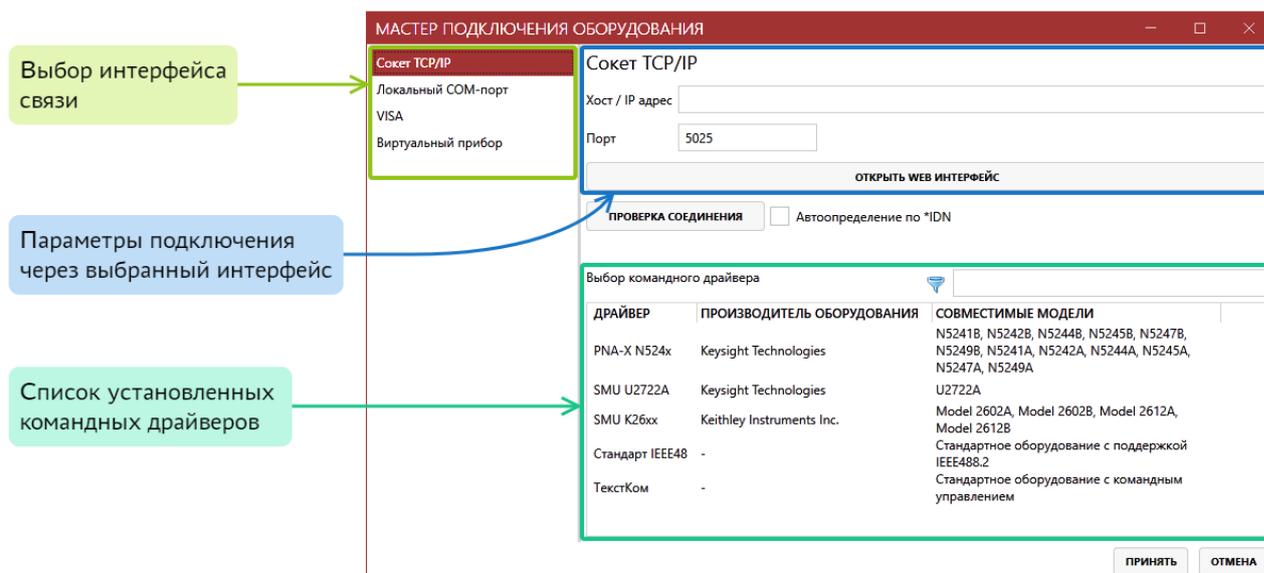


Рисунок 3.15 – Окно подключения приборов

В левой части необходимо выбрать интерфейс подключения, это может быть TCP/IP сокет, COM-порт компьютера, VISA провайдер или виртуальный прибор.

Для работы с оборудованием через измерительные модули встроенной подсистемы, в программу должен быть загружен специальный командный драйвер, запрограммированный на работу с определенной моделью прибора.

В правой части главного окна программного модуля располагаются элементы управления текущей измерительной группой, процессом измерения, а также область настройки измерительного модуля.

Перед выполнением зондовых измерений оператору необходимо выбрать из списка измерительный модуль и соединить его с подключенными приборами, путем перетаскивания их из списка доступных приборов.

Помимо выполнения процессов связанных с контролем электрических параметров интегральных схем на полупроводниковых пластинах, модульная архитектура программной системы позволяет внедрять дополнительные программные модули, расширяющие функционал программы. Одним из таких модулей является модуль процессов оптического контроля топологии интегральных схем. Данный программный модуль реализует процесс над группой чипов, при выполнении процесса для каждого чипа выполняется захват

изображения микрофотографии его топологии и выполняется анализ дефектов, результаты работы приведены в публикациях [42, 43].

### **3.8. Модуль Анализа данных измерений ICC CuPrUm**

Модуль предназначен для визуализации, анализа и обработки данных, полученных при измерениях. Данный модуль работает с файлом измерительного проекта, созданного в программе Dep4AutoProbes. Как было описано в разделе 3.7 измерительный проект содержит перечень выполненных измерений и ссылку на данные в файловой системе. 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, неудовлетворяющих заданным условиям, на экране компьютера. Также программный модуль содержит систему визуального программирования VIScript, разработанную для выполнения математической обработки исходных данных.

На рисунке 3.16 представлена структура разработанного программного модуля.

Прикладной модуль использует в своем составе четыре отдельных программных библиотеки. Библиотека для работы с картами пластин и библиотека ядра измерительных проектов описаны в разделах 3.6 и 3.7 соответственно.

Библиотека подсистемы плагинов реализует загрузку динамически подключаемых библиотек, реализующих специально спроектированный программный интерфейс.

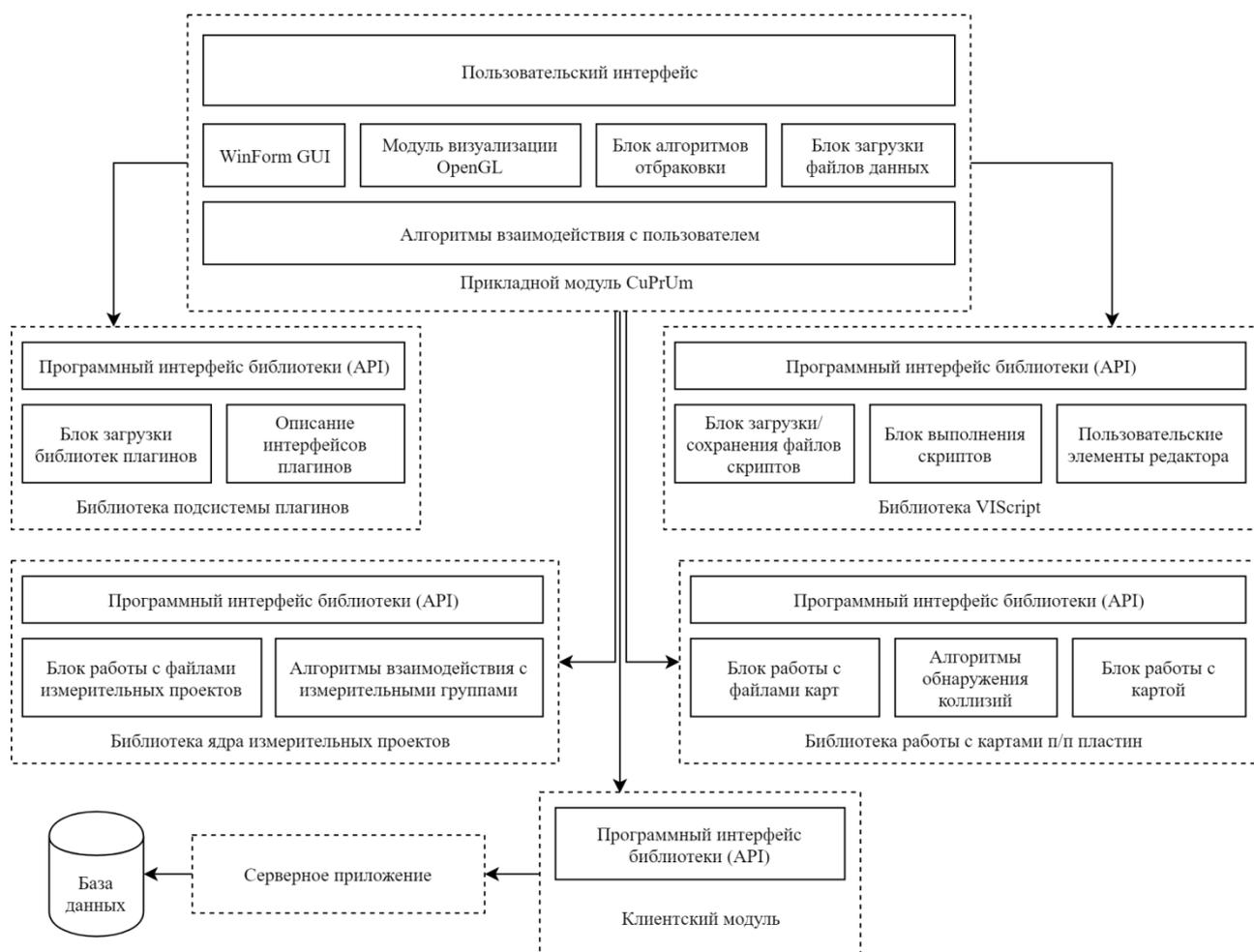


Рисунок 3.16 – Структура программного модуля CuPrUm

Для подключаемых плагинов разработано два вида программных интерфейсов:

- `IMainMenuItemCreator`, плагины реализующие данный интерфейс предназначены для добавления в главное меню программы дополнительных функциональных элементов;

- `IVIDataTransformer`, плагины реализующие данный интерфейс предназначены для добавления новых функциональных блоков в систему визуального программирования VIScript.

При инициализации плагинов главного меню посредством программного интерфейса `IMainMenuItemCreator` им передается экземпляр класса, реализующего интерфейс `IWorkspaceAPI`, который предоставляет плагинам доступ к взаимодействию с рабочим пространством программы. Интерфейс `IWorkspaceAPI` имеет методы для получения списка открытых проектов,

получения/установки статуса отбраковки отдельных кристаллов, получения перечня всех кристаллов на пластине и т.д.

При инициализации плагинов функциональных блоков VIScript посредством программного интерфейса IVIDataTransformer в графический редактор скриптов передается ссылка на функцию создания экземпляра функционального блока, реализованная в плагине.

Библиотека VIScript обеспечивает взаимодействие программного модуля с подсистемой визуального программирования.

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 использующиеся в алгоритмах VIScript. В отличии 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 [41].

Язык VIScript реализует модель исполнительного потока данных, алгоритмы, созданные на нем, представляются в виде ориентированного графа, узлы которого являются примитивными инструкциями или более сложными подпрограммами, а направленные дуги между узлами представляют зависимости данных [44].

В данном языке алгоритмы и могут быть сериализованы для последующего хранения в памяти любым удобным способом. Библиотека VIScript реализует сохранение структуры алгоритмов в \*.XML файл.

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 3.17.

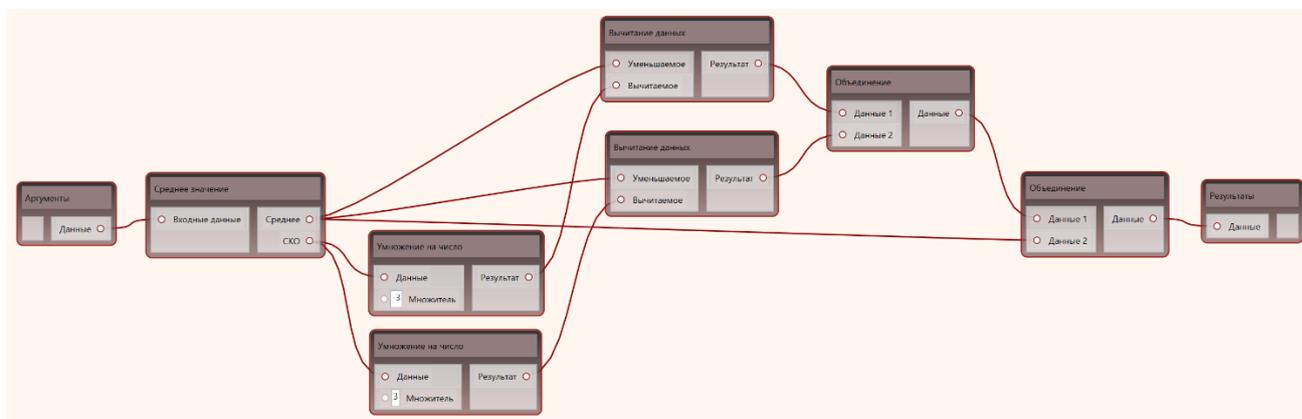


Рисунок 3.17 – Алгоритм статистической обработки массива данных на VIScript

Применение разработанного языка в интеграции с программным обеспечением автоматизации зондового контроля интегральных схем при анализе получаемых 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 3.18 представлен результат обработки массива данных 1250 графиков с результатами измерения S-параметров интегральных схем с пластины диаметром 50мм с помощью скрипта показанного на рисунке 3.17.

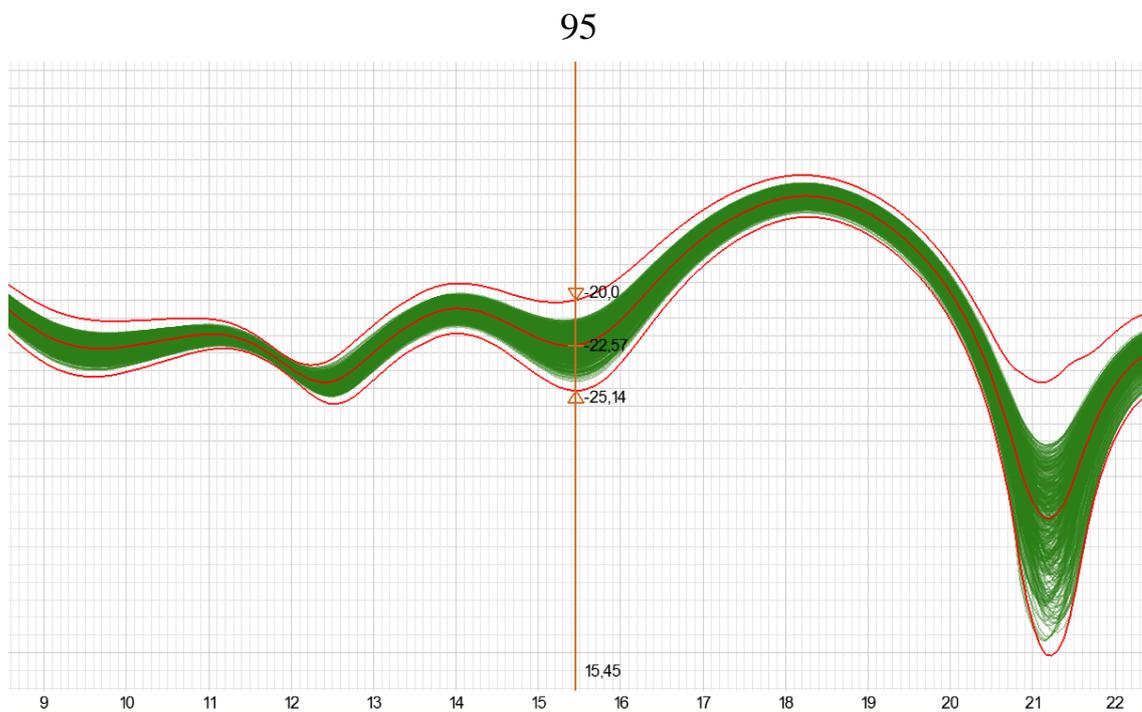


Рисунок 3.18 – Результат статистической обработки массива данных с помощью  
VIScript

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.

На рисунке 3.19 представлен пользовательский интерфейс прикладного модуля CuPrUm. Пользовательский интерфейс программы реализован в виде набора независимых перетаскиваемых панелей, данные панели имеют возможность открепления и перемещения, независимо от основного окна приложения, что позволяет пользователю настроить интерфейс под необходимые задачи.

При стандартном расположении панелей, в левой части окна программы расположены панели: «Обозреватель проектов», «Карта пластин» и «Обозреватель скриптов».

Панель «Обозреватель проектов» предоставляет средства навигации открытым проектам, каждый измерительный проект представлен в виде древовидной структуры. Первый уровень дерева представляет список открытых

проектов, на втором уровне расположены узлы «Измерения» и «Отбраковки», узел «Измерения» содержит перечень измерительных групп проекта, а узел «Отбраковки» содержит сохраненные в проекте списки годных кристаллов.

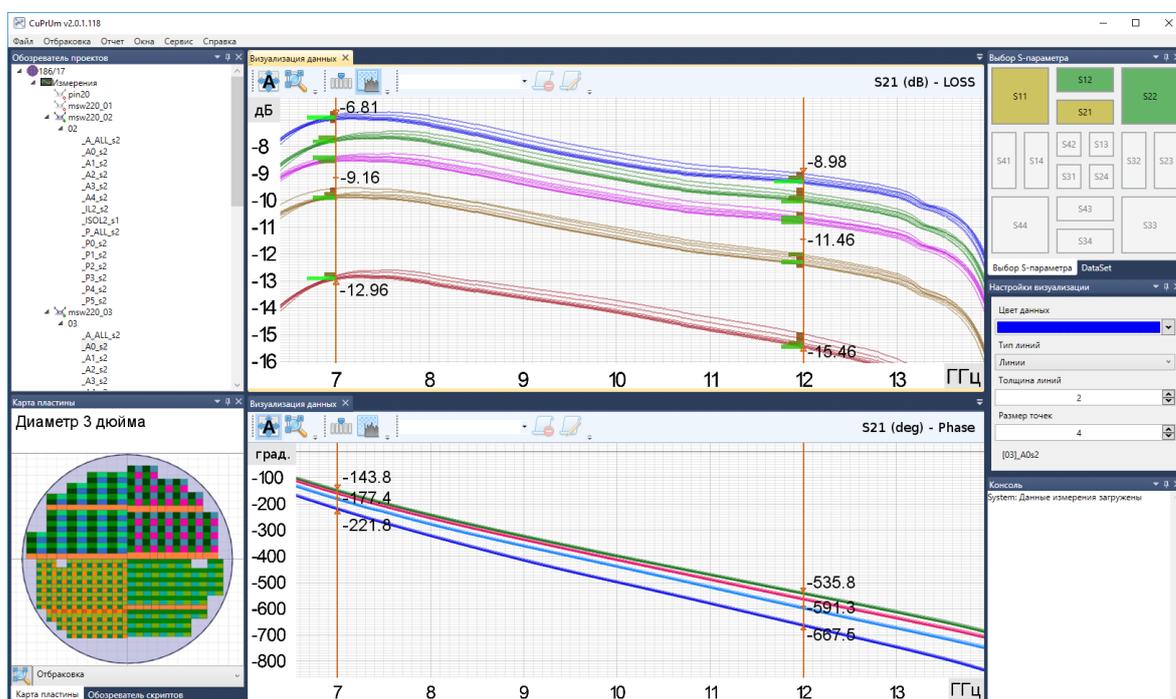


Рисунок 3.19 – Пользовательский интерфейс модуля визуализации и анализа данных измерений CuPrUm

Панель «Карта пластины» визуализирует карту раскроя, визуализация возможна в нескольких режимах цветовых схем:

- карта типов кристаллов;
- карта годных кристаллов;
- карта распределения параметра в сечении маркера.

В центральной части располагаются панели визуализации данных. Визуализация данных измерений выполняется при помощи графического API OpenGL, благодаря чему приложение способно одновременно визуализировать достаточно большие объемы данных без заметного замедления скорости работы программы. На панели визуализации данных также размещены элементы управления масштабом, маркерами и активными скриптами VIScript.

Маркеры применяются для отображения численных значений измеренных данных в заданном сечении графика вдоль оси  $Y$ , если в области визуализации

расположено несколько графиков, маркер отображает наименьшее, наибольшее и среднеарифметическое значения. Поскольку исходные измерительные данные представляют собой последовательный набор дискретных точек, для определения значений в точках пересечения линии маркера и графиков используется алгоритм линейной кусочно-полиномиальной интерполяции.

Линейная кусочно-полиномиальная функция  $L(x)$  – это функция, определенная при всех  $x$ , обладающая тем свойством, что  $L(x)$  является прямой линией между  $x_i$  и  $x_{i+1}$ . Определение допускает, что в промежутках между разными парами соседних узлов  $L(x)$  может совпадать с разными прямыми.

Линейным кусочно-полиномиальным интерполянт для набора данных  $(x_i, y_i)$  является линейная кусочно-полиномиальная функция, обладающая свойством

$$L(x_i) = y_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

На рисунке 3.20 показан линейный кусочно-полиномиальный интерполянт.

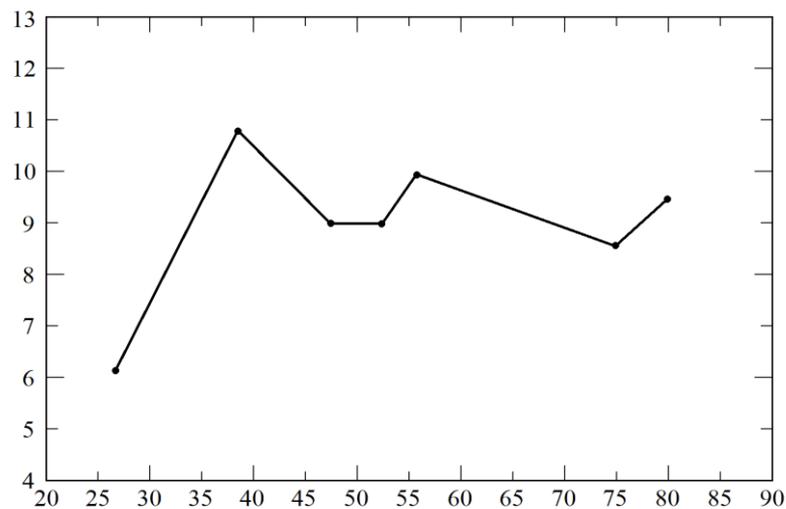


Рисунок 3.20 – Линейный кусочно-полиномиальный интерполянт

Линейный кусочно-полиномиальный интерполянт обладает таким свойством, что если  $y_i$  – значения известной непрерывной функции  $g(x)$  и если между  $x_1$  и  $x_n$  появляются дополнительные точки, то интерполянт улучшается, т.е. приближается к исходной функции. Более того, если данными  $y_i$  являются значения функции  $g(x)$ , имеющей непрерывную вторую производную, то можно доказать, что

$$|L(x) - g(x)| < \frac{1}{8} h^2 \cdot \max |g''(x)| = O(h^2),$$

где  $h$  – наибольшее из расстояний между смежными узлами.

Важность этого результата состоит в том, что выражение для оценки погрешности содержит лишь вторую производную и не зависит от числа узлов. Если удвоить число равномерно расположенных узлов, то погрешность для нового интерполанта составит около 1/4 погрешности старого. Таким образом, выбрав достаточно много узлов, ошибку интерполяции можно сделать сколь угодно малой. Конечно, на практике интерполируемая функция редко бывает известна, а добавление дополнительных точек является роскошью. Однако, подобные утверждения о сходимости дают уверенность в этом методе, особенно по сравнению с «несходящейся» полиномиальной интерполяцией [45].

Блок-схема реализации алгоритма линейной интерполяции кусочно-линейной функции  $y_i = L(x_i)$ , определённой набором связанных значений  $\{x_i, y_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  (где  $n$  – количество точек в наборе), для получения промежуточного значения  $y'$  при заданном значении  $x'$  представлена на рисунке 3.21.

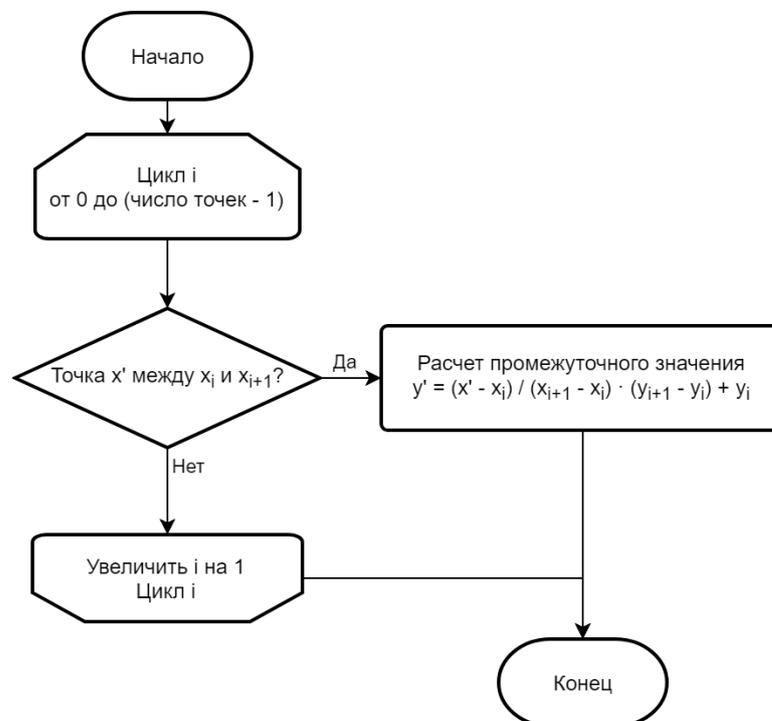


Рисунок 3.21 – Блок-схема алгоритма кусочно-линейной интерполяции

Для оценки разброса измеренных характеристик, в программе совместно с инструментом «маркер» применяется гистограмма распределения. Гистограмма распределения строится на основе данных, полученных в результате выполнения алгоритма поиска пересечений графиков с линией маркера. Характер разброса можно оценить визуально с помощью гистограммы, выводимой совместно с маркером (рисунок 3.22).

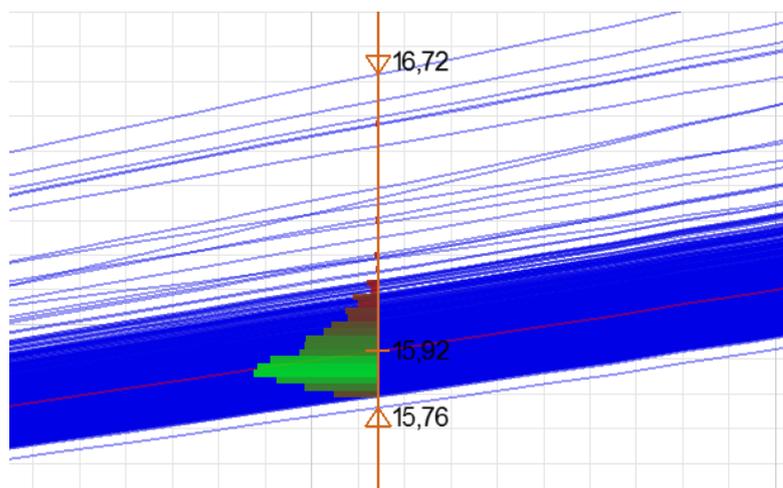


Рисунок 3.22 – Гистограмма распределения характеристик в сечении маркера

Зеленым цветом отмечаются интервалы с наибольшим относительным вхождением точек пересечения. Величина интервалов для построения гистограммы задается для каждого маркера в отдельности при его создании.

После выполнения отбраковки список годных кристаллов можно сохранить в файл проекта для выполнения маркировки негодных кристаллов на полупроводниковой пластине. Данные по проценту выхода годных автоматически передаются в базу данных посредством клиентского модуля и используются для последующего анализа статистики выхода годных.

В правой части главного окна программы расположены панели управления параметрами визуализации графиков: «Настройки визуализации», «Настройки осей», «Выбор S-параметров», «Выбор осей DataSet». Внешний вид данных панелей представлен на рисунке 3.23.

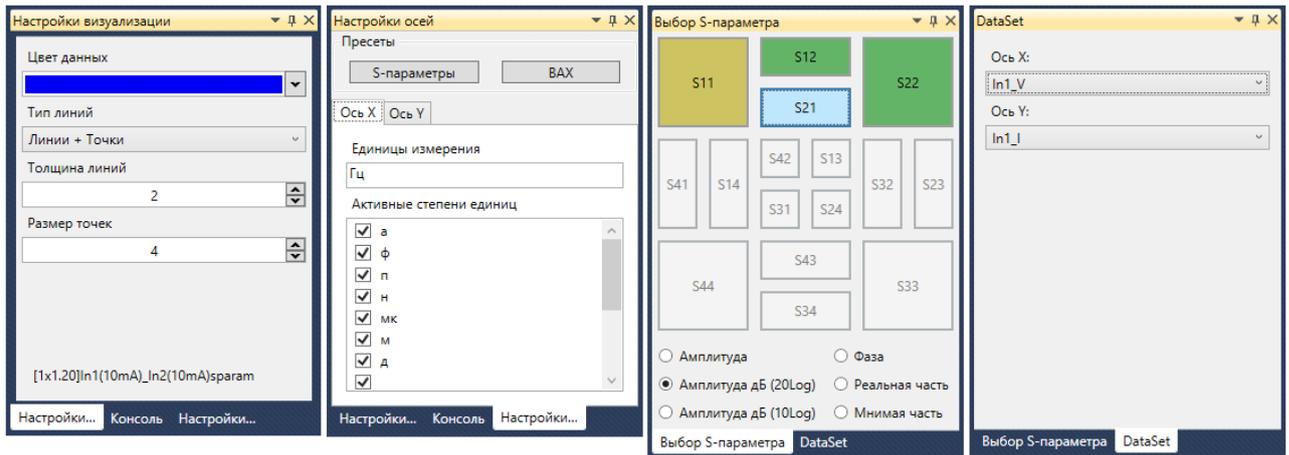


Рисунок 3.23 – Внешний вид панелей управления параметрами визуализации

Панель «Настройки визуализации» позволяет настроить цвет, тип и толщину линий данных для отдельных измерений.

Панель «Настройки осей» позволяет задать единицы измерения, отображаемые в подписях к осям, а также выбрать активные десятичные приставки в соответствии с международной системой единиц СИ.

Панель «Выбор S-параметра» предназначена для выбора отображаемого параметра матрицы рассеяния и способа его отображения по оси  $Y$  (амплитуда, амплитуда дБ, фаза, реальная/мнимая часть).

Панель «Выбор осей DataSet» предназначена для выбора отображаемой зависимости из файла данных \*.DataSet.

Файлы данных DataSet являются текстовыми файлами формата ASCII, в которых данные отображаются строка за строкой, по одной строке на точку данных, в порядке увеличения порядкового номера точки данных. В начале файла располагаются линии опций, начинающиеся с символа «#». Линия опций содержит разделенные пробелом названия столбцов с данными, число названий в линии опции должно строго соответствовать числу столбцов данных в линии данных. После линии опций в файле располагаются линии данных, каждая линия данных представляет собой набор чисел с плавающей точкой, разделенных символом пробела. Также файл может содержать линии комментариев, начинающиеся с символа «!». Линии комментариев не влияют на данные и опции, содержащиеся в файле, и несут информационный характер.

### 3.9. Выводы по главе

В главе рассмотрены постановка задачи, технические требования к системе, процесс проектирования и решения примененные при разработке инфраструктуры программного комплекса автоматизации сопровождения производства и зондового контроля полупроводниковых монокристаллических интегральных схем. Основными архитектурными принципами проектирования программного обеспечения, описанного в данной главе являются:

- применение трехзвенной архитектуры;
- проектирование системы в виде набора отдельных компонентов и модулей с четко определенными интерфейсами, что позволяет декомпозировать задачу разработки на независимые подзадачи и абстрагироваться от конкретных реализаций;
- применение современных технологий и стандартов WPF, JSON, gRPC, SSL, JWT и д.р.;
- использование единого механизма аутентификации пользователя в клиентских модулях, посредством центрального приложения;
- организация работы с информационными источниками посредством единой точки входа в виде центрального сервера, обеспечивающего виртуализацию схемы данных и независимость от фактической реализации хранилища.

Разработанная программная система, основанная на алгоритмах и методах, предложенных в данной работе, предоставляет следующие возможности:

- систематизация информационной составляющей полупроводникового производства и автоматизация учета полупроводниковых пластин;
- автоматизация проведения измерений и анализа полученных данных.
- И в качестве основных компонентов включает программные модули:
- ICC Environment программа взаимодействия пользователей с базой данных;
- ICC WaferMapper редактор карт полупроводниковых пластин;
- ICC ProMeas4 ПО для автоматизированных зондовых измерений;
- ICC CuPrUm программа анализа и обработки данных измерений.

#### **4. ОПИСАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Рассмотренная в главе 3 программная система была использована в составе вновь разработанной полуавтоматической зондовой станции Terra-200, разработки АО «НИИПП», а также внедрена в производственный цикл отдела разработки СВЧ интегральных схем и технологический комплекс интегральных схем. На компоненты разработанного программного комплекса получены свидетельства о регистрации программы для ЭВМ [46, 47].

##### **4.1. Применение программного модуля зондовых измерений в связке с полуавтоматической зондовой станцией Terra-200**

Проект разработки полуавтоматической станции зондовых измерений «Terra-200» является одной из частей комплексного проекта по разработке базовых технологий производства приоритетных электронных компонентов и радиоэлектронной аппаратуры «Разработка базовой технологии производства комплексов программно-аппаратных для измерения параметров монолитных интегральных схем (МИС) на пластине с использованием зондовых станций в диапазоне до 67 ГГц с возможностью расширения диапазона частот до 650 ГГц" (далее – комплексный проект). Комплексный проект направлен на совершенствование и разработку критических технологий Российской Федерации и решает задачи в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и техники Российской Федерации в соответствии с Указом Президента РФ от 07.07.2011 N 899 (ред. от 16.12.2015) – Перспективные виды вооружение, военной и специальной техники. В рамках данного проекта в АО «НИИПП» ведется разработка полуавтоматической зондовой станции для контроля характеристик интегральных схем на пластинах до 200 мм.

Часть разработанной программной системы, решающая задачи по автоматизации процесса зондового контроля и анализа данных, была успешно применена при разработке полуавтоматической зондовой станции (рисунки 4.1, 4.2).

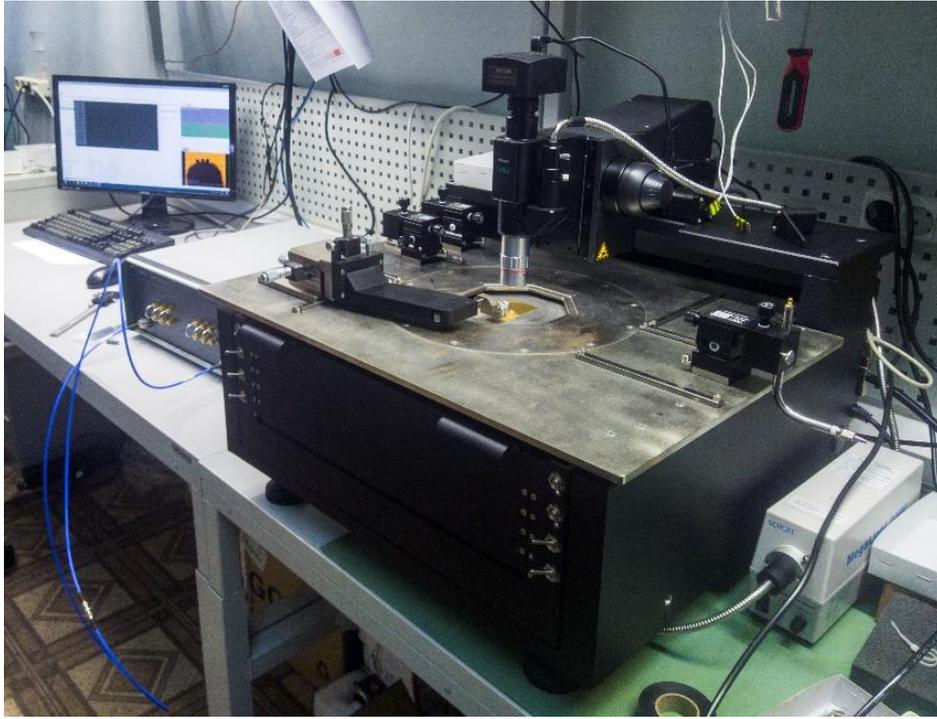


Рисунок 4.1 – Зондовая станция Terra-200 в процессе разработки

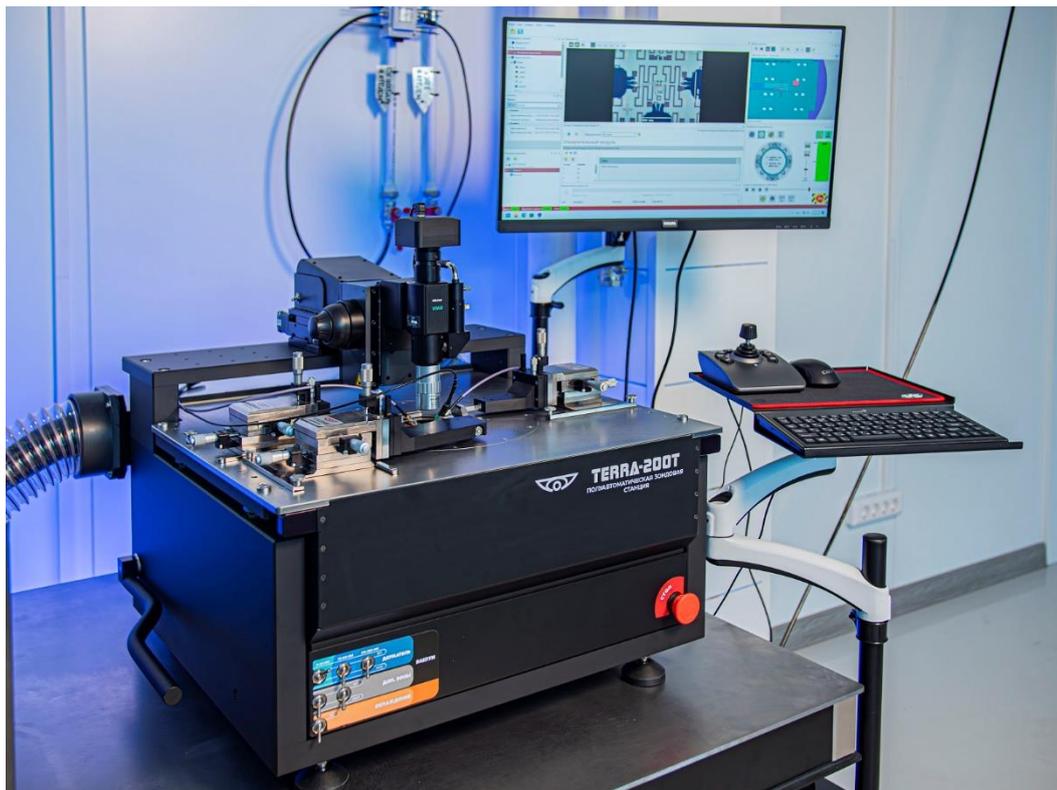


Рисунок 4.2 – Программно-аппаратный комплекс автоматизированных зондовых измерений на базе зондовой станции Terra-200 и ПО ProMeas 4

В частности, для реализации возможности управления аппаратной частью станции Terra-200 был разработан отдельный программный модуль, реализующий

общие интерфейсы 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 прошли 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.

В ходе испытаний модуля анализа данных результатов контроля были проведены автоматизированные измерения электрических характеристик полупроводниковых интегральных схем СВЧ переключателей для последующей разбраковки графическим методом (рисунок 4.3).

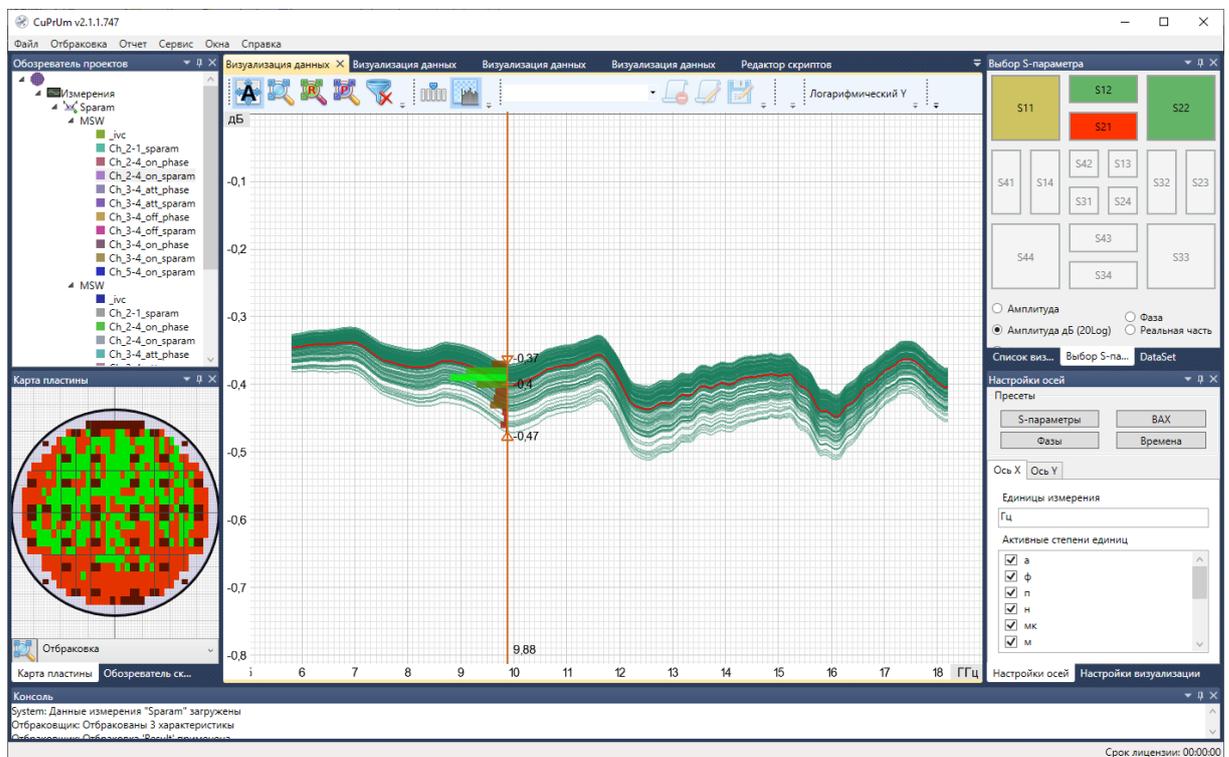


Рисунок 4.3 – Обработка результатов измерений в CuPrUm

Полученные в результате измерений данные были успешно обработаны в программном модуле ICC CuPrUm, что свидетельствовало достижении поставленной в рамках работы цели.

#### **4.2. Внедрение программного комплекса в процесс АО «НИИПП»**

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 станциями на измерительном участке.

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.

В первую очередь конструктор создает проект топологии интегральной схемы и через редактор (Рисунок 4.4) загружает в него файлы чертежей в формате \*.dxf, которые были получены при разработке топологии МИС в САПР.

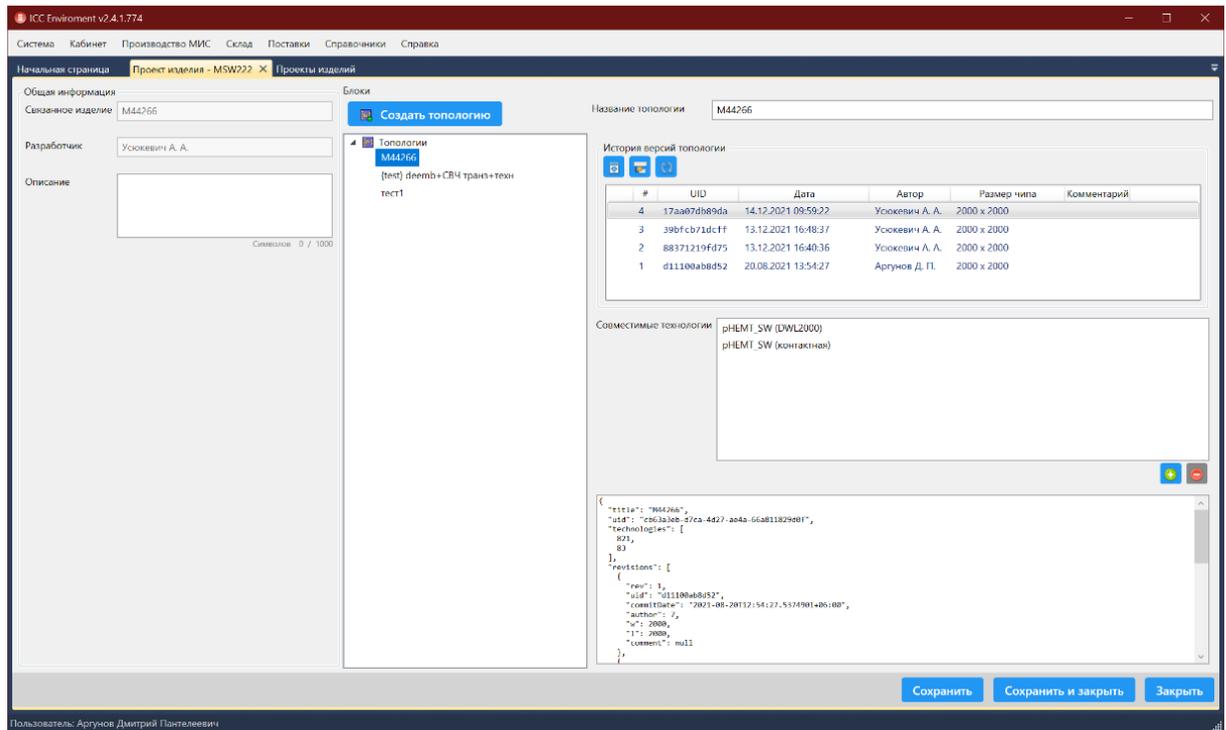


Рисунок 4.4 – Редактор проекта топологии

Редактор проекта топологии позволяет отслеживать измерения, загруженные разработчиком и при необходимости вернуться к любой версии чертежей.

Далее создается проект раскрытия пластины (Рисунок 4.5) в который конструктор добавляет необходимые топологии МИС и тестов, система отслеживает, чтобы все добавляемые топологии соответствовали одной технологии изготовления.

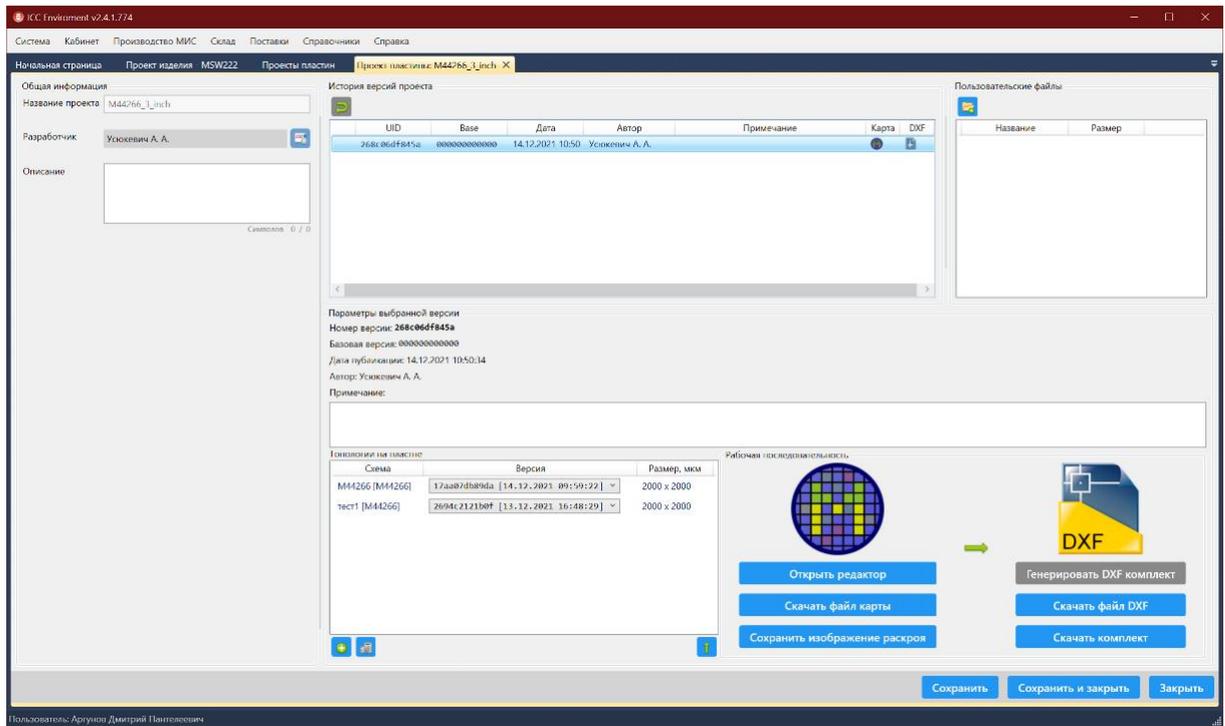


Рисунок 4.5 – Редактор проекта раскроя пластины

После добавления топологий открывается доступ к редактору карт пластин, в котором задается раскрой будущей пластины (Рисунок 4.6).

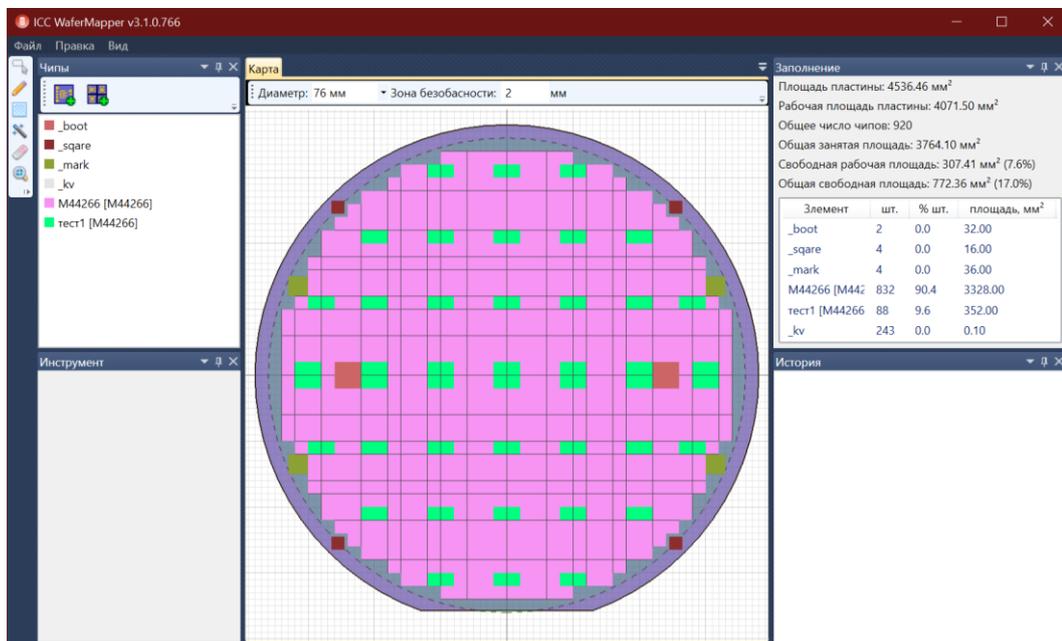


Рисунок 4.6 – Создание раскроя пластины

В редакторе карт конструктор либо вручную рисует раскрой, либо запускает модуль автоматического заполнения, позволяющий ускорить процесс разработки раскроя пластины.

После создания и сохранения проекта пластины, ответственный за запуск пластины технолог, создает сопроводительный лист на основе заранее сформированной базовой технологии и созданной проекта пластины (Рисунок 4.7).

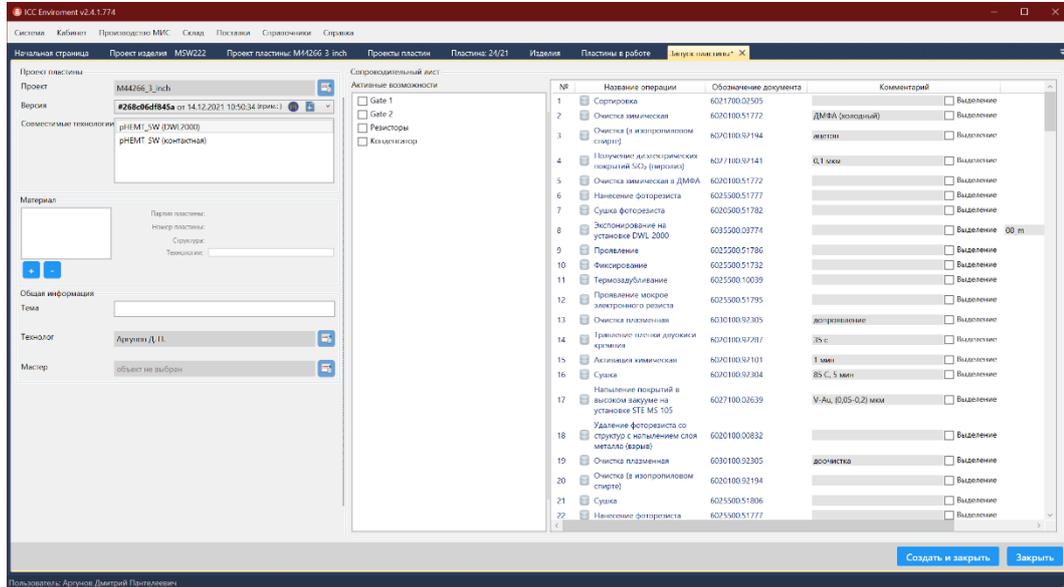


Рисунок 4.7 – Запуск пластины в производство

После запуска пластины производство программа выводит на печать необходимый комплект сопроводительных документов и наклейку на транспортную тару для пластины (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Транспортная чашка с пластиной

Для пластин, дошедших до операции зондового контроля оператор зондовой станции, считывает штрих-код на таре, и программа базы данных выдает сопроводительную информацию по пластине в цифровом формате, а

также выгружает карту раскроя для проведения автоматизированных измерений в модуле ICC ProMeas4.

#### **4.3. Выводы по главе**

Четвертая глава посвящена примерам практического применения программного комплекса автоматизации зондовых измерений и учета производства полупроводниковых пластины, разработанного в АО «НИИПП».

Показано, что созданный инструментарий работы с технологиями и топологиями позволяет систематизировать и централизовать информацию по технологическим операциям, маршрутам и топологиям изготавливаемых изделий, а также упростить процесс создания раскроя пластины и сократить время, проходящее от разработки топологии до запуска пластины в производство.

Применение модуля зондовой автоматизации зондовых измерений ICC ProMeas4 позволило реализовать комплексный проект по разработке полуавтоматической станции. И провести натурные испытания возможности ее применения для целей зондового контроля СВЧ монолитных интегральных схем на примере реальной пластины.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 «Terra-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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mpi-corporation.com/ast/engineering-probe-systems/mpl-manual-probe-systems/mpl-ts150-ts200-ts300/> (дата обращения 3.06.2024).
2. Официальный сайт Cascade Microtech [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cascademicrotech.com/> (дата обращения 13.05.2024).
3. Документация на зондовую станцию Summit 12000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.formfactor.com/download/summit-datasheet/?wpdmdl=3326&refresh=5afc84e6a93691526498534> (дата обращения 13.05.2024).
4. Документация на зондовую станцию CM300xi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.formfactor.com/download/cm300xi-datasheet/?wpdmdl=3294&refresh=5afc80ebb24cb1526497515> (дата обращения 14.05.2024).
5. Electronic Statistics Textbook [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statsoft.com/textbook/> (дата обращения 4.05.2024).
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: учебник для вузов / Е. С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 1999. – 575 с.
7. Сальников, А. С. Автоматизация измерений, построение моделей и библиотек элементов свч монолитных интегральных схем на базе отечественных GaAs и GaN технологий : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.20.01 / Сальников Андрей Сергеевич ; Томский гос. ун-т сист. упр. и рад-ки. - Томск, 2014. - 274 с.
8. ГОСТ Р 50779.42-99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 37с
9. Официальный сайт компании National Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com> (дата обращения: 7.06.2024).
10. Официальный сайт компании Keysight Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.keysight.com> (дата обращения: 7.06.2024)

11. Официальный сайт компании MathWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/> (дата обращения: 15.05.2024)
12. Wu, S. L. Industry Dynamics within Semiconductor Value Chain IDM, Foundry and Fabless: M.S. Thesis. – MIT, 2003. – 60 с.
13. Официальный сайт компании FOCUS Microwaves [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.focus-microwaves.com> (дата обращения: 8.06.2024).
14. Официальный сайт подразделения AWR компании National Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://web.awrcorp.com/> (дата обращения: 8.06.2024)
15. ССЫЛКА НА САЙТ VELOX
16. Nucleus Prober Control Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.cascademicrotech.com/files/NUCLEUS\\_DS.pdf](https://www.cascademicrotech.com/files/NUCLEUS_DS.pdf) (дата обращения 3.06.2024)
17. WaferPro Express On-Wafer Measurement Program Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.keysight.com/en/pc-240041\\_2/waferpro-express-on-wafer-measurement-program-software?cc=US&lc=eng](http://www.keysight.com/en/pc-240041_2/waferpro-express-on-wafer-measurement-program-software?cc=US&lc=eng) (дата обращения 24.05.2024)
18. MPI SENTIO® Software Suite – Feel The Difference [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mpi-corporation.com/ast/engineering-probesystems/mpi-sentio-software-suite> (дата обращения 24.05.2024)
19. Описание к программе SParamViewer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://teledynelecroy.com/support/softwaredownload/sparamviewer.aspx> (дата обращения 14.05.2024).
20. Managing Enterprise Content: A Unified Content Strategy // The Rockley Group Inc. Mar. 14, 2003
21. Ватолин Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. - 384 с
22. KIM J. New Wafer Alignment Process Using Multiple Vision Method for Industrial Manufacturing // Electronics. MDPI AG, 2018. Vol. 7, № 3. P. 39.

23. Xu. A Wafer Prealignment Algorithm Based on Fourier Transform and Least Square Regression // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017. Vol. 14, pp. 1771-1777.
24. Aggarwal N. Line detection in images through regularized hough transform // IEEE Transactions on Image Processing, 2006. Vol. 15, №3. pp. 582-591
25. Leandro A. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme // Pattern Recognition, 2008. Vol. 41, №1. pp. 299-314
26. Ким Д., Фесслер Дж.А. Оптимизированные методы первого порядка для гладкой выпуклой минимизации. Математика. Program. 159, 81-107 (2016).
27. Куприенко Н. В. Статистические методы изучения связей. Корреляционно-регрессионный анализ/Н. В. Куприенко, О. А. Пономарева, Д. В. Тихонов. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2008. – 118 с.
28. Буч Г., Максимчук Р., Энгл М., Янг Б., Коналлен Дж., Хьюстон К. Объектноориентированный анализ и проектирование с примерами приложений, 3-е изд. : Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д.Вильямс», 2008, – 720 с
29. Ларман К. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования. Практическое 155 руководство. 3-е издание. М. Пер. с англ. – М. : ООО «И.Д. Вильямс», 2009. – 736 с. : ил
30. OMG UML 2.0 Specification // <http://www.omg.org/spec/UML/2.0>
31. Рихтер Дж. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework. Мастер класс. / Пер. с англ. – 3-е изд. – М.: Издательско-торговый дом «Русская редакция»; СПб.: Питер, 2005
32. Соммервилл, И. Инженерия программного обеспечения / И. Соммервилл. – 6-е изд., пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 624 с.
33. Программная инженерия. Учебник для вузов. 5-е издание обновленное и дополненное. Стандарт третьего поколения. – СПб.: Питер, 2016. – 640 с.: ил. – (Серия «Учебник для вузов»)
34. Bianco P., Kotermanski R., Merson P. Evaluating a Service-Oriented Architecture // Technical report, September 2007 <http://www.sei.cmu.edu/reports/07tr015.pdf>

35. Ворона Владимир Андреевич, Костенко Виталий Олегович Способы и средства защиты информации от утечки по техническим каналам // Computational nanotechnology. 2016. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-i-sredstva-zaschity-informatsii-ot-utechki-po-tehnicheskim-kanalam> (дата обращения: 23.09.2024).
36. Шнайер, Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы и исходный код на C / Б. Шнайер. - СПб.: Диалектика, 2022. - 1040 с.
37. Аргунов, Д. П. Программа построения карт полупроводниковых пластин для проведения автоматизированных зондовых измерений СВЧ МИС // Сборник статей XIV международной научно-практической конференции – М.: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2018, С.34-35
38. Евчинко, А. И. OpenGL и DirectX: программирование графики. Для профессионалов / А. И. Евчинко. – СПб.: Питер, 2006. – 350 с.
39. 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.
40. Gerardus V. Dynamic Data Exchange A Complete Guide / V. Gerardus. – 5STARCOoks. – 2021. – 305 P.
41. 4GL-Технологии. Основы визуального программирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bourabai.kz/einf/4gl.htm> (дата обращения 5.06.2024)
42. 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.
43. 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.

44. Wesley, M. *Advances in Dataflow Programming Languages* / M. Wesley, J.R. Paul, R.J. Millar // *ACM Computing Surveys*. – 2004. – №. 1. – P. 1-34
45. Калиткин, Н. Н. *Численные методы: учеб. пособие* / Н. Н. Калиткин. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 592 с.
46. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667603. Программное обеспечение «CuPrUm» : №2022666830 : заявл. 13.09.2022 : опубл. 22.09.2022 / Д. П. Аргунов; заявитель АО «НИИПП»
47. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667536. Программное обеспечение «ProMeas4» : №2022666802 : заявл. 14.09.2022 : опубл. 21.09.2022 / Д. П. Аргунов, Б. В. Ширяев; заявитель АО «НИИПП»

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Свидетельство о регистрации ПО для ЭВМ «ProMeas4»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU

**2022667536**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): <b><u>2022667536</u></b>	Авторы: Аргунов Дмитрий Пантелеевич (RU), Ширяев Борис Владимирович (RU)
Дата регистрации: <b>21.09.2022</b>	Правообладатель: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (RU)
Номер и дата поступления заявки: <b>2022666802 14.09.2022</b>	
Дата публикации: <b><u>21.09.2022</u></b>	
Контактные реквизиты: <b>нет</b>	

Название программы для ЭВМ:  
**«Программное обеспечение «ProMeas4»**

**Реферат:**

Программа предназначена для управления полуавтоматической зондовой станцией и автоматизации процесса измерения электрических характеристик полупроводниковых приборов на неразделенных пластинах на стадии межоперационного и выходного контроля в полупроводниковом производстве. Программа имеет расширяемую модульную архитектуру, позволяющую реализовать поддержку широкого спектра измерительного оборудования. Программное обеспечение обеспечивает выполнение следующих функций: управление полуавтоматической зондовой станцией в ручном режиме; составление карты полупроводниковой пластины с заданным шагом; ручное и автоматическое выравнивание пластины по изображению с микроскопа; настройка маршрута и параметров автоматического обхода пластины по карте; настройка алгоритма измерения; управление измерительным оборудованием; выполнение измерений в автоматическом режиме с сохранением результатов измерений в файл проекта; открытие ранее сохраненного проекта измерений с восстановлением всех конфигураций.

**Язык программирования:** C#

**Объем программы для ЭВМ:** 110 МБ

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Свидетельство о регистрации ПО для ЭВМ «CuPrUm»

26.09.2022, 12:24

ПрЭВМ №2022667603

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2022667603

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): <u>2022667603</u>	Автор: Аргунов Дмитрий Пантелеевич (RU)
Дата регистрации: <b>22.09.2022</b>	Правообладатель: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (RU)
Номер и дата поступления заявки: <b>2022666830 13.09.2022</b>	
Дата публикации: <u>22.09.2022</u>	
Контактные реквизиты: <b>нет</b>	

Название программы для ЭВМ:  
«Программное обеспечение «CuPrUm»

**Реферат:**

Программа предназначена для обработки результатов измерения электрических характеристик полупроводниковых приборов при межоперационном и выходном контроле. Программа имеет систему визуальных скриптов, позволяющих настроить математическую обработку данных с минимальными трудозатратами. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: открытие файла измерительного проекта; загрузка и визуализация данных результатов измерений; математическая и статистическая обработка массива измерительных данных; отбраковка чипов по их характеристикам; составление и сохранение карты годных полупроводниковой пластины. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК. ОС: Windows.

**Язык программирования:** C#, C++

**Объем программы для ЭВМ:** 10 МБ

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ» (АО «НИИПП»)**

✉ Россия, 634041, г. Томск, ул. Красноармейская, 99а, ИНН/КПП 7017084932/701701001  
☎ +7 (3822) 288-288 (приемная), факс +7 (3822) 55-50-89  
E-mail: niip@niip.ru www.niip.ru

**АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

результатов диссертационной работы «Программно-аппаратный комплекс автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров интегральных схем»

Инженера-программиста 2 категории АО «НИИПП»  
Аргунова Дмитрий Пантелеевича

Настоящий Акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Д.П. Аргунова используются в процессах проектирования и технологического контроля изготовления монолитных интегральных схем СВЧ диапазона, а также в производстве полуавтоматических зондовых станций Terra-200 на предприятии АО «НИИПП».

Д.П. Аргунов является разработчиком ряда алгоритмов и архитектурных решений системы автоматизированного зондового контроля интегральных схем на основе которых был спроектирован и создан специализированный комплекс программного обеспечения. Использование данного программного обеспечения позволило реализовать сквозное информационное сопровождение производства приборов на полупроводниковых пластинах от этапа проектирования группового фотомаски до контроля электрических параметров готовых изделий.

Заместитель генерального директора  
по научной работе



А.В. Васильев

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г



УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе  
и инновациям ТУСУР Медовник А.В.

« 11 » октября 2024 г.

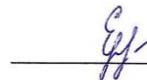
## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы «Программно-аппаратный комплекс автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров интегральных схем» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами  
Аргунова Дмитрия Пантелеевича

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Аргунова Д.П. были использованы в лаборатории интегральной оптики и радиофотоники (ЛИОР) ТУСУР при проведении зондовых измерений изготовленных СВЧ монолитных интегральных схем и СВЧ цепей радиофотонных микросборок.

Использование разработанного Аргуновым Д.П. программно-аппаратного комплекса автоматизированного технологического процесса зондового контроля электрических параметров интегральных схем позволило сократить время их отбраковки.

Заведующий ЛИОР ТУСУР,  
к.т.н.

 Е.В. Ерофеев

В. н. с. ЛИОР ТУСУР,  
к.т.н.

 И.В. Юнусов