



УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе
и инновациям ТУСУР

А.В. Медовник

« 18 » 10 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) по результатам представления диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Диссертация «Программно-аппаратный комплекс автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров интегральных схем» выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

В период подготовки диссертации соискатель Аргунов Дмитрий Пантелеевич очно обучался в аспирантуре ТУСУРа, работал в лаборатории интегральной оптики и радиофотоники кафедры ФЭ ТУСУР на должности младшего научного сотрудника.

В 2022 году окончил аспирантуру ТУСУРа по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», специальность 01.04.04 «Физическая электроника».

В 2024 году успешно сдал кандидатский экзамен по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». Удостоверение о сдаче кандидатского экзамена выдано в 2024 году федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель – Шурыгин Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем в управлении и проектировании ТУСУР.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертационная работа Аргунова Дмитрия Пантелеевича является завершённой научной работой, в которой изложены результаты экспериментальных исследований, направленных на решение научно-технической задачи разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом зондового контроля электрических параметров интегральных схем на неразделённых полупроводниковых пластинах и создания программно-аппаратного комплекса на её основе.

Решение данной задачи имеет существенное значение для развития соответствующей отрасли знаний. В работе изложены новые научно обоснованные технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны.

Актуальность диссертационной работы

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

Данные исследования являются профильным направлением исследований лаборатории интегральной оптики и радиофотоники кафедры ФЭ ТУСУР. Результаты диссертационной работы использованы в ходе выполнения проекта 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.). Помимо этого проведенные в рамках диссертационной работы исследования использованы при выполнении комплексного проекта «Разработка базовой технологии производства комплексов программно-аппаратных для измерения параметров монокристаллических 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.);

Результаты диссертационной работы использованы для решения задач зондового контроля электрических параметров в производственном цикле изготовления СВЧ монокристаллических интегральных схем в АО «НИИПП», г. Томск.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

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.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

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

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- 1) 29-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, СевГУ, 2019 г.;
- 2) международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», г. Томск, ТУСУР, 2019 г.;
- 3) международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, ТУСУР, 2019, 2020 гг.
- 4) 11-й всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем», г. Москва, Зеленоград, ИППМ РАН, 2022 г.

Научная новизна

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

2. Предложен оригинальный язык математического преобразования результатов измерения электрических параметров, отличающийся применением принципов визуального программирования для задания алгоритма преобразования данных оператором зондовой станции.

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

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 «Тетра-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.

Полнота изложенных материалов диссертации в печатных работах, опубликованных автором.

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

Статьи в печатных изданиях, входящих в перечень ВАК или индексируемые в базе данных Web of Science

1. Ширяев Б. В., **Аргунов Д. П.**, Жидик Ю. С., Ющенко А. Ю., Лаптев И. В. Алгоритм автоматического контроля внешнего вида ИС на основе вычисления пиксельного расстояния // Изв. вузов. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 432-446.

2. Юнусов И.В., Арыков В.С., Степаненко М.В., Жук Г.Г., **Аргунов Д.П.**, Шейнбергер А.А. Сверхширокополосный электрооптический модулятор с интегрированным источником излучения // Доклады ТУСУРа. – 2024. – Т 27, № 3.

3. Ширяев Б. В., **Аргунов Д. П.** Повышение эффективности алгоритма автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2022. – № 4. – С. 56-62.

4. Shiryayev B.V. Algorithm for automated visual inspection of MMIC using a classifier based on neural networks [Электронный ресурс] / B.V. Shiryayev, A.V. Bezruk, **D.P. Argunov**, A.Yu. Yushenko // ITM Web of Conferences 30, 04012 (2019). – Режим доступа: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_04012.pdf (дата обращения: 16.09.2024).

5. **Argunov D.P.** Design ICcreatech semiconductor wafer accounting and probe measurement automatization software [Электронный ресурс] / **D.P. Argunov**, B.V. Shiryayev, A.V. Bezruk, A.Yu. Yushenko // ITM Web of Conferences 30, 04012 (2019). – Режим доступа: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_04009.pdf (дата обращения: 16.09.2024).

Результаты интеллектуальной деятельности

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

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

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

8. **Аргунов Д. П.** Разработка программного обеспечения для выполнения автоматизированных зондовых измерений СВЧ-МИС / **Д. П. Аргунов** // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – № 1-3. – С. 171-174.

9. Программный комплекс ICcreatech для автоматизации учета полупроводниковых пластин, проведения измерений и анализа полученных данных / **Д. П. Аргунов**, А. В. Безрук, Б. В. Ширяев, А. Ю. Ющенко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-1. – С. 136-137.

10. Алгоритм автоматизированного визуального контроля СВЧ МИС по микрофотографиям с использованием классификатора на основе искусственных нейронных сетей / Б. В. Ширяев, А. В. Безрук, **Д. П. Аргунов**, А. Ю. Ющенко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-1. – С. 148-149.

11. **Аргунов Д. П.** Программа построения карт полупроводниковых пластин для проведения автоматизированных зондовых измерений СВЧ МИС / **Д. П. Аргунов, А. В. Безрук, А. Ю. Юшенко** // Российская наука в современном мире : Сборник статей XIV международной научно-практической конференции, Москва, 20 февраля 2018 года. – Москва: Актуальность.РФ, 2018. – С. 34-35.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности

Диссертация «Программно-аппаратный комплекс автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров интегральных схем» Аргунова Дмитрия Пантелеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Заключение принято на совместном заседании кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании факультета вычислительных систем и кафедры физической электроники факультета электронной техники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Присутствовало на заседании 8 чел. Результаты голосования: «за» - 8 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 58 от «15» октября 2024 г.

Доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры компьютерных
систем в управлении и проектировании
ФГАОУ ВО Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники



Ганджа Тарас Викторович

Подпись Ганджи Т.В. заверяю:
ученый секретарь Ученого совета
ФГАОУ ВО Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники



Прокопчук Елена Викторовна

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «НИИПП»

Е.А. Монастырев

2024 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акционерного общества «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»

Диссертация «Программно-аппаратный комплекс автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров интегральных схем» выполнена в АО «НИИПП».

В период подготовки диссертации соискатель Аргунов Дмитрий Пантелеевич работал в акционерном обществе «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» в должности инженера-программиста.

В 2015 году был принят на работу в АО «НИИПП» в 4 отдел. В 2018 году с отличием окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники с присвоением степени магистра техники и технологии по направлению «Электроника и наноэлектроника». В 2022 году получил диплом об окончании аспирантуры.

Научный руководитель – Шурыгин Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, директор департамента управления и стратегического развития ТУСУР, заведующий кафедрой компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУР.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Аргунова Дмитрия Пантелеевича является научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты исследования и разработки программной системы автоматизации зондового контроля электрических параметров интегральных схем.

Результаты, полученные в ходе исследования, имеют существенный практический интерес для предприятий, занимающихся производством и разработкой полупроводниковых интегральных схем и приборов.

Актуальность диссертационной работы обусловлена потребностью автоматизации и контроля электрических параметров как в серийном производстве, так и в лабораторных исследованиях.

Практическая значимость работы

Разработан программно-аппаратный комплекс автоматизации технологического процесса зондового контроля монокристаллических интегральных схем. Программная часть комплекса позволяет обеспечить управление процессом измерения электрических параметров и разбраковки интегральных монокристаллических интегральных схем. В совокупности с аппаратной частью, представляющей собой полуавтоматическую зондовую станцию, позволяет замкнуть технологический цикл контроля готовых изделий на неразделенных полупроводниковых пластинах.

Научная новизна диссертационной работы

Обуславливается разработкой оригинальных алгоритмов и программных решений для автоматизации технологического процесса зондового контроля интегральных схем.

1. Предложена оригинальная методика программной корректировки системы линейного перемещения зондовой станции, отличающаяся применением фотошаблона и системы машинного зрения для составления таблицы поправочных коэффициентов;

2. Впервые применен оригинальный скриптовый графический язык программирования для реализации подсистемы постобработки результатов зондового контроля интегральных схем;

3. Разработана новая специализированная программная система автоматизации технологического процесса зондового контроля интегральных схем, отличающаяся гибкостью программной конфигурации и позволяющая реализовать на полуавтоматической зондовой станции полный цикл операций по контролю и разбраковке готовых изделий.

Личный вклад автора заключается в разработке алгоритмов автоматизации технологического процесса контроля электрических характеристик интегральных схем, а также разработки программного обеспечения для программно-аппаратного комплекса полуавтоматической зондовой станции Tetra-200.

Апробация, достоверность и обоснованность

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием экспериментальных результатов полученных с применением различных методик. Результаты работы изложены в 11 работах в том числе: в 3 статьях, входящих в Перечень ВАК РФ; в 2 статьях, индексируемых в базах данных научного цитирования Web Of Science и Scopus; в 2 свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ. Основные результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на международных и всероссийских конференциях, среди них: Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2019», г.Томск, 2019; 29-я Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2019; XIV Международная научно-практическая конференция, г. Москва, 2018.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в журналах из перечня ВАК РФ и международных реферативных баз данных цитирования Web of Science и Scopus:

1. Ширяев Б. В., **Аргунов Д. П.** Повышение эффективности алгоритма автоматизированного визуального контроля монокристаллических интегральных схем // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2022. – № 4. – С. 56-62.

2. Ширяев Б. В., **Аргунов Д. П.**, Жидик Ю. С., Ющенко А. Ю., Лагтев И. В. Алгоритм автоматического контроля внешнего вида ИС на основе вычисления пиксельного расстояния // Изв. вузов. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 432-446.

3. 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.

4. Shiryayev B.V. Algorithm for automated visual inspection of MMIC using a classifier based on neural networks [Электронный ресурс] / B.V. Shiryayev, A.V. Bezruk, **D.P. Argunov**, A.Yu. Yushenko // ITM Web of Conferences 30, 04012 (2019). – Режим доступа: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_04012.pdf (дата обращения: 22.09.2021).

5. **Argunov D.P.** Design ICCreatech semiconductor wafer accounting and probe measurement automatization software [Электронный ресурс] / **D.P. Argunov**, B.V. Shiryayev, A.V. Bezruk, A.Yu. Yushenko // ITM Web of Conferences 30, 04012 (2019). – Режим доступа: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_04009.pdf (дата обращения: 22.09.2021).

Свидетельства на регистрацию ПО для ЭВМ:

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

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

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

1. **Аргунов Д. П.** Разработка программного обеспечения для выполнения автоматизированных зондовых измерений СВЧ-МИС / **Д. П. Аргунов** // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2018. – № 1-3. – С. 171-174.

2. Программный комплекс ICCreatech для автоматизации учета полупроводниковых пластин, проведения измерений и анализа полученных данных / **Д. П. Аргунов, А. В. Безрук, Б. В. Ширяев, А. Ю. Ющенко** // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-1. – С. 136-137.

3. Алгоритм автоматизированного визуального контроля СВЧ МИС по микрофотографиям с использованием классификатора на основе искусственных нейронных сетей / **Б. В. Ширяев, А. В. Безрук, Д. П. Аргунов, А. Ю. Ющенко** // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-1. – С. 148-149.

4. **Аргунов Д. П.** Программа построения карт полупроводниковых пластин для проведения автоматизированных зондовых измерений СВЧ МИС / **Д. П. Аргунов, А. В. Безрук, А. Ю. Ющенко** // Российская наука в современном мире : Сборник статей XIV международной научно-практической конференции, Москва, 20 февраля 2018 года. – Москва: Актуальность.РФ, 2018. – С. 34-35.

Соответствие диссертации научной специальности

Диссертационная работа Аргунова Дмитрия Пантелеевича «Программно-аппаратный комплекс автоматизации технологического процесса зондового контроля электрических параметров интегральных схем» рекомендуется к защите на соискание степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Заключение принято на заседании научно-технического совета АО «НИИПП».

Присутствовали на заседании 18 чел., в том числе докторов наук – 1, кандидатов наук – 5. Результаты голосования: «за» – 18 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол №11/24 от 17 октября 2024 г.

Ученый секретарь НТС,
И.о. начальника НТО



А.О. Тульчанская