

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

На правах рукописи

УДК 543.423-047.37

СИДОРЕНЯ
Илья Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР
И ДИЭЛЕКТРИКОВ МЕТОДОМ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра технических наук

по специальности 1-38 80 04 – Технология приборостроения

Минск 2017

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **Петлицкая Татьяна Владимировна**,
кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **ТОНКОВИЧ Ирина Николаевна**,
кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой информационных технологий учреждения образования «Минский инновационный университет»

Защита диссертации состоится «22» июня 2017 г. года в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П.Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс микроэлектроники, являющейся одной из приоритетных областей науки и техники и обеспечивающей темпы научно-технического прогресса, в значительной степени определяется уровнем развития физики и технологии тонкослойных систем на основе полупроводниковых и диэлектрических материалов.

В связи с распространением микроэлектронных приборов наиболее важной проблемой является улучшение методов контроля технологических процессов с целью снижения технологических потерь в процессе разработки и производства интегральных микросхем. Специфика полупроводниковой технологии потребовала разработки локальных, бесконтактных, неразрушающих методов и аппаратуры контроля, позволяющих обнаружить скрытые дефекты или отказы. Одним из таких методов, позволяющих решать указанные проблемы, является метод фотоэмиссионной микроскопии, основанный на анализе люминесценции, возбуждаемой электрическим полем, наблюдаемой в полупроводниках, атомы которых переходят в возбужденное состояние под воздействием пропущенного электрического тока или приложенного электрического поля.

На сегодняшний день существует большое число работ в области исследования полупроводниковых структур и диэлектриков методом фотоэлектронной эмиссии. Наиболее значимые результаты были получены российскими и белорусскими учеными, которые проводили исследования по применению метода фотоэмиссионной микроскопии в процессе производства интегральных микросхем (В.А. Филипеня, Т.В. Петлицкая, В.А. Горушко, А.Н. Петлицкий). Среди зарубежных авторов особый интерес вызывают работы К. Боита, Р. Шлэнгена, Ю. Керста, в которых представлено описание некоторых дефектов интегральных микросхем при помощи фотоэмиссионных микроскопов.

Разработка и внедрение в производственный процесс нового инструмента технологического контроля, снижение технологических потерь и, как следствие, повышение качества выпускаемых микросхем, доказывает актуальность темы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современные стандарты, применяемые при контроле ИМС, требуют оптимизировать время поиска локации дефекта, а также снизить стоимость применяемого лабораторного оборудования. Одним из таких методов, является метод исследования дефектов материалов полупроводниковой техники фотоэлектронной эмиссией.

Однако существующие на сегодняшний день фотоэмиссионные микроскопы имеют высокую стоимость и затрудняют идентификацию места отказа, к примеру, сложности при наблюдении за топологией ИМС.

В связи с вышесказанным, актуальной является разработка нового программно-аппаратного комплекса и соответствующей методики для регистрации фотоэлектронной эмиссии.

Степень разработанности проблемы

Исследование регистрации дефектов методом фотоэлектронной эмиссии осуществлялось на основе построения теоретических моделей с использованием работ российских, украинских и белорусских ученых: В.А. Филиппени, В.А. Горушко, Т.В. Петлицкой, В.Ф. Алексеева, А.Н. Петлицкого, а также зарубежных авторов: К. Боита, Д. Боуэна, Б. Таннер, Р. Шлэнгена, Ю. Керста и др.

Одним из недостатков исследований, представленных в современной технической литературе, является отсутствие изучения дефектов методом фотоэлектронной эмиссии при помощи специализированного оптического инспекционного микроскопа.

Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе разработки и успешного внедрения в производство нового технического решения контроля качества материалов и изделий полупроводниковой электроники.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является изучение материалов и изделий полупроводниковой техники методом фотоэлектронной эмиссии на этапах формирования, испытания и эксплуатации.

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

1. Провести обзор и анализ основных методов контроля качества и отказов на различных этапах формирования, испытаний и эксплуатации ИМС.
2. Разработать новую методику и программно-аппаратный комплекс для поиска дефектов методом фотоэлектронной эмиссии.
3. Экспериментально показать применение разработанного программно-аппаратного комплекса для изучения дефектов материалов и изделий полупроводниковой техники неразрушающим методом.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 80 04 «Технология приборостроения».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых в области исследования по применению метода фотоэмиссионной микроскопии в процессе производства и эксплуатации интегральных микросхем, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в разработке методики исследования дефектов интегральных микросхем с помощью программно-аппаратного комплекса, на основе специализированного оптического инспекционного микроскопа.

Теоретическая значимость работы заключается в анализе процессов возникновения фотоэлектронной эмиссии в дефектных областях полупроводниковых структур.

Практическая значимость диссертации состоит в разработанной модели программно-аппаратного комплекса, на основе специализированного оптического инспекционного микроскопа Nikon L200N (ф. Nikon Япония) и цифровой камеры Nikon DS-Fi2 (ф. Nikon Япония), чувствительной к ближнему ИК - излучению, который позволяет оптимизировать процесс технической диагностики полупроводниковых структур методом фотоэлектронной эмиссии.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Использование метода фотоэлектронной эмиссии как средства диагностики отказов с высокой степенью локальности.
2. Создание программно-аппаратного комплекса, на основе специализированного оптического инспекционного микроскопа Nikon L200N (ф. Nikon Япония) и цифровой камеры Nikon DS-Fi2 (ф. Nikon Япония), чувствительной к ближнему ИК – излучению для анализа материалов и изделий полупроводниковой техники методом фотоэлектронной эмиссии.
3. Экспериментально установленные области возникновения фотоэлектронной эмиссии в отказавших изделиях полупроводниковой техники.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 53-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь, 2017 г.).

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 4 печатных работах. В их числе 2 статьи и 2 тезиса докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертационной работы составляет 0,51 авторских листа.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе приведен обзор современных методов исследований материалов и изделий полупроводниковой техники, которые используются в научно-исследовательских лабораториях и научно-практических институтах. **Во второй главе** описаны физические методы возникновения фотоэлектронной эмиссии в полупроводниковых структурах, а также использование этого явления при разработке программно-аппаратного комплекса для анализа дефектов и отказов. **В третьей главе** представлен эксперимент по подтверждению применимости разработанной методики на примере различных полупроводниковых структур и диэлектриков на этапе разработки и отладки новых схемных решений. **В приложении** представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 73 страницы. Из них 43 страниц основного текста, 30 иллюстраций на 7 страницах, 2 таблицы на 2 странице, библиографический список из 70 наименований на 6 страницах, список собственных публикаций соискателя из 4 наименований на 1 странице, 3 приложений на 15 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы исследования материалов и изделий полупроводниковой техники, указаны основные направления исследований, проводимых по данной тематике, а также обоснование актуальности темы.

В **общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В первой главе приведен обзор методов исследований материалов и изделий полупроводниковой техники, которые используются в научно-исследовательских лабораториях и научно-практических институтах.

Описаны основные физические законы оптического, рентгеновского и электронно-зондового методов, а также использованное для этих методов оборудование. Основными проблемами существующих методов является отсутствие быстрого, локального и достаточно точного метода диагностики отказов ИМС.

Во второй главе описаны физические методы возникновения фотоэлектронной эмиссии в полупроводниковых структурах, а также использование этого явления при разработке программно-аппаратного комплекса для анализа дефектов и отказов.

Сущность предложенной методики заключается в регистрации и анализе слабого электромагнитного излучения оптического диапазона от кристалла работающей микросхемы, которое позволяет выявить на ней дефектные области. Основные принципы возникновения фотоэлектронной эмиссии в кристалле интегральной микросхемы основаны на испускании фотонов при переходе носителей с избыточной энергией на уровни с меньшей энергией. Так, в прямо-смещенном р–n-переходе большое количество дырок и электронов рекомбинируют по механизму межзонной рекомбинации с испусканием фотонов с энергией порядка ширины запрещенной зоны.

На основании изученных данных о регистрации явления фотоэлектронной эмиссии, была разработана и сконструирована установка фотоэмиссионной микроскопии (рисунок 1) на базе оптического инспекционного микроскопа Nikon L200ND с видеокамерой DS-Fi2 фирмы Nikon. Для снятия фотоэмиссионного изображения всей поверхности кристалла микросхемы использовался моторизованный столик L2-S8A, точность позиционирования которого составляет 2.5 мкм.

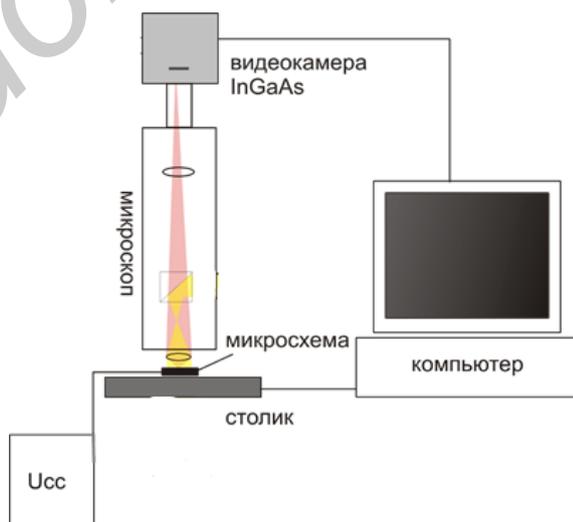


Рисунок 1 – Схема установки фотоэмиссионной микроскопии

Стоит отметить тот факт, что разработанный программно-аппаратный комплекс (рисунок 2) обладает рядом достоинств по сравнению с существующими решениями и не имеет прямых аналогов на рынке. В первую очередь хочется отметить доступность данного решения, простоту конструкции, а также возможность беспрепятственно детектировать дефекты методом фотоэлектронной эмиссии и исследовать топологическую картину ИМС.



Рисунок 2 – Программно-аппаратный комплекс для поиска дефектов методом фотоэлектронной эмиссии

В третьей главе приведены экспериментальные подтверждения применимости метода регистрации фотоэлектронной эмиссии на микросхемах СОЗУ, а также: ИС «ОСМ588ВТ1», ИМС «IZE4263», диодах Шоттки, ИМС «Дуплекс 232», ИМС «ИК3135ТВ». Все исследуемые материалы полупроводниковой техники имели один уровень металлизации.

При этом стоит отметить что, все исследования проводились при подключении к микросхемам напряжения питания в области их допустимых, рабочих значений. Время экспозиции около 20-60с. Камера регистрирующая явление возникновения фотоэлектронной эмиссии была настроена на ближнее ИК-излучение. Данная методика позволила с высокой степени точности определить дефектные области в топологическом рисунке микросхем на этапах их исследования и эксплуатации.

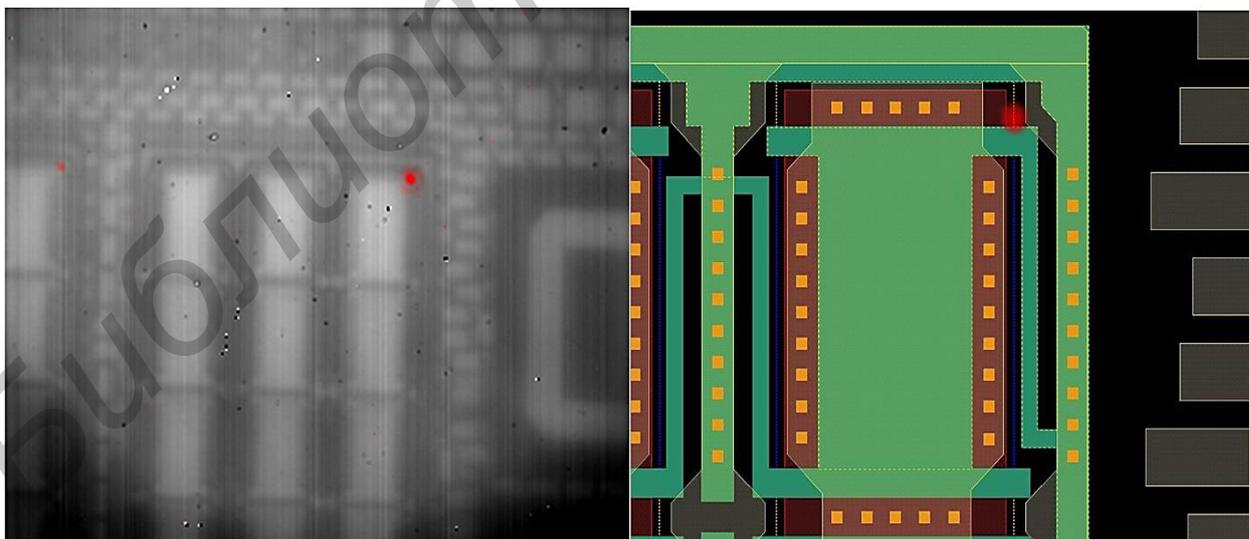
Нельзя не учесть и экспериментально отмеченный недостаток методики, заключающийся в сложности изучения дефектности интегральных микросхем по их динамическим характеристикам. Выявлена сложность в подключении оснастки к ИМС и одновременному исследованию фотоэлектронной эмиссии.

Также данная методика отработывалась на этапе формирования полупроводниковых структур (рисунок 3).



Рисунок 3 – Оценка дефектности подзатворного окисла методом фотоэлектронной эмиссии. Фото МОП конденсатора в обычном режиме (слева) и в режиме фотоэлектронной эмиссии (справа)

В результате проведенных экспериментов удалось установить локации дефектов микросхем, а также возможные причины их возникновения. На рисунке 4 продемонстрирована регистрация сигнала фотоэлектронной эмиссии дефектным конденсатором микросхемы СОЗУ.



**Рисунок 4 – Сигнал фотоэлектронной эмиссии от дефектного конденсатора микросхемы, наложенный на ее оптическое ИК изображение (слева) и на проект (справа).
Объектив 100х, выдержка 100с**

Также была выявлена зависимость яркости дефектных мест от напряжения питания, подключаемого к ИМС. При исследовании подключались три прибора ИМС «IZE4263», собранные в условный корпус. ИС с одним уровнем металлизации. Вид отказа – не соответствие ВАХ по выводам I, INH и W экспериментальной партии приборов после воздействия СЭ 2000 В. Все ИМС подключались к источнику питания с последовательным повышением напряжения питания рисунок 5 и 6. На первой стадии было зарегистрировано свечение биполярного транзистора ИМС.

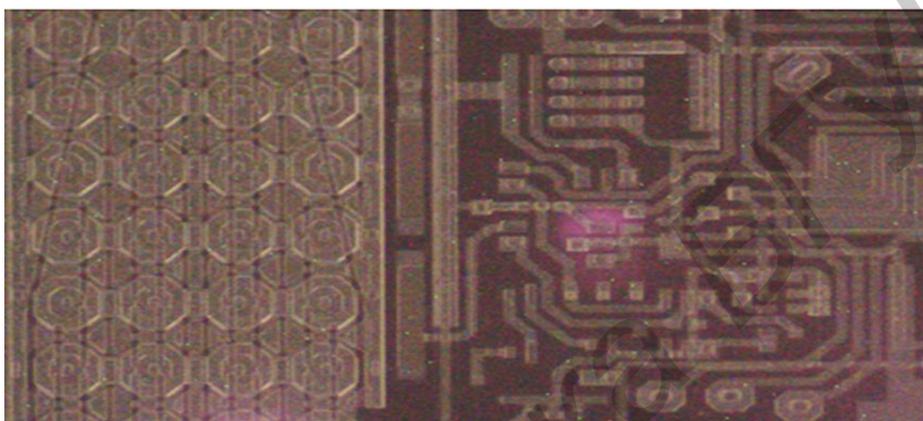


Рисунок 5 – Фото внешнего вида топологии ИМС «IZE4263» проблемного места в режиме фотоэлектронной эмиссии при напряжении питания 35В и токе потребления 11 мА

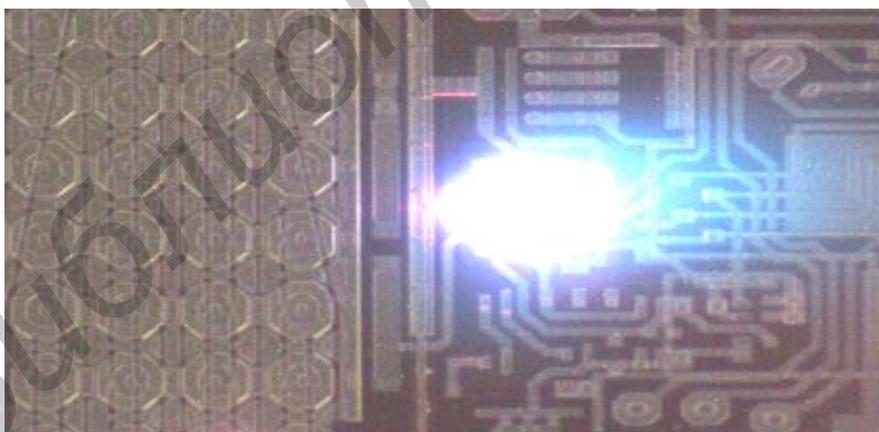


Рисунок 6 – Фото внешнего вида топологии ИМС «IZE4263» проблемного места в режиме фотоэлектронной эмиссии при напряжении питания 38 В и токе потребления 115 мА

На второй стадии исследования при повышении напряжения питания до 38В и тока потребления до 115мА, было зарегистрировано скачкообразное

свечение биполярного транзистора, а также соседствующего с ним резистора ИМС .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Выполнен анализ существующих методов контроля качества и отказов на различных этапах формирования, испытаний и эксплуатации ИМС.
2. Разработана новая методика и программно-аппаратный комплекс для поиска дефектов методом фотоэлектронной эмиссии.
3. Экспериментально показано применение разработанного программно-аппаратного комплекса для изучения дефектов материалов и изделий полупроводниковой техники неразрушающим методом.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс “Проектирование интегральных микросхем”.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в сборниках научных трудов

1. Воздействие радиоактивного излучения на параметры полупроводниковых приборов / И.С. Сидореня, С.А. Пансевич, С.С. Мурашко // физика: сб. науч. трудов по материалам междунар. Заоч. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Севастополь, Российская Федерация / ФГБОУ РО «СГЛТУ». – Севастополь. 2017.

2. Принцип контроля вертикальной структуры интегральных схем методом косо́го шлифа / И.С. Сидореня, Е.В. Шкляр, Е.В. Петровский // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. трудов по материалам междунар. Заоч. науч.-практич. конф., Воронеж, Российская Федерация / ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж. 2017. – 118–120.

Тезисы конференций

3. Сидореня И.С. Исследования МС СОЗУ и анализ возникновения дефектов методом фотоэлектронной эмиссии / И.С. Сидореня, Е.В. Шкляр, Т.В. Петлицкая // материалы 53–ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно–компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 02–06 мая 2017 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2017. – в печати.

4. Сидореня И.С. Программно-аппаратная реализация методики регистрации фотоэлектронной эмиссии / И.С. Сидореня, С.А. Пансевич, И.Н. Гусев // материалы 53–ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно–компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 02–06 мая 2017 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2017. – в печати.

РЭЗІЮМЭ

Сідарэня Ілля Сяргеевіч

Даследаванне паўправадніковых структур і дыэлектрыкаў метадам фотаэлектроннага эмісіі

Ключавыя словы: інтэгральная мікрасхема, дэфект, лакалізацыя, эмісія.

Мэта працы: вывучэнне матэрыялаў і вырабаў паўправадніковай тэхнікі метадам фотаэлектроннай эмісіі на этапах фарміравання, выпрабавання і эксплуатацыі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Выкананы аналіз існуючых метадаў кантролю якасці і адмоваў на розных этапах фарміравання, выкапытання і эксплуатацыі ІМС. Выяўлена, што ў цяперашні час у айчынных і замежных крыніцах недастаткова агляджана пытанне прымянення метадаў рэгістрацыі фотаэлектроннай эмісіі пры дапамозе спецыялізаванага аптычнага інспекцыйнага мікраскопа; распрацавана новая методыка і праграма-апаратны комплекс для пошуку дэфектаў метадам фотаэлектроннай эмісіі; у выніку праведзеных даследаванняў былі выяўлены і прааналізаваны лакацыі і прычыны ўзнікнення дэфектаў ІМС.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі "Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі ў навучальны курс "Праектаванне інтэгральных мікрасхем".

Вобласць ужывання: паўправадніковая прамысловасць, мікрапрацэсарныя сістэмы.

РЕЗЮМЕ

Сидореня Илья Сергеевич

Исследование полупроводниковых структур и диэлектриков методом фотоэлектронной эмиссии

Ключевые слова: интегральная микросхема, дефект, локализация, эмиссия.

Цель работы: изучение материалов и изделий полупроводниковой техники методом фотоэлектронной эмиссии на этапах формирования, испытания и эксплуатации.

Полученные результаты и их новизна: Выполнен анализ существующих методов контроля качества и отказов на различных этапах формирования, испытаний и эксплуатации ИМС. Выявлено, что в настоящее время в отечественных и зарубежных источниках недостаточно освещён вопрос применения методов регистрации фотоэлектронной эмиссии при помощи специализированного оптического инспекционного микроскопа; разработана новая методика и программно-аппаратный комплекс для поиска дефектов методом фотоэлектронной эмиссии; в результате проведенных исследований были выявлены и проанализированы локации и причины возникновения дефектов ИМС.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс “Проектирование интегральных микросхем”.

Область применения: полупроводниковая промышленность, микропроцессорные системы.

SUMMARY

Sidorennya Ilya Sergeevich

Investigation of semiconductor structures and dielectrics by photoelectron emission method

Keywords: integrated microcircuit, defect, localization, emission.

The object of study: To study materials and products of semiconductor technology by photoelectron emission at the stages of formation, testing and operation.

The results and novelty: The analysis of existing methods of quality control and failures at various stages of the formation, testing and operation of IC. It has been revealed that at present in domestic and foreign sources there is insufficient illumination of the question of using photo-emission emission detection methods with the aid of a specialized optical inspection microscope; A new technique and software-hardware complex for the search of defects by the method of photoelectron emission was developed; As a result of the conducted researches, the locations and the causes of the defects of the IC were identified and analyzed.

Degree of use: the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics in the training course" Design of integrated microcircuits "

Sphere of application: industry, MPU-sor system.