

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

На правах рукописи

УДК 621.3.049.77

ШКЛЯР
Евгений Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТРУКТУР МИКРОСХЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ, КОСЫХ ШЛИФОВ
И СКОЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание степени
магистра технических наук

по специальности 1-39 81 01 – Компьютерные технологии проектирования
электронных систем

Минск 2018

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: **Полозков Юрий Владимирович**
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» «Белорусского национального технического университета»

Защита диссертации состоится «27» января 2018 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

Развитие микроэлектроники, являющейся одной из приоритетных областей науки и техники, в значительной степени определяется уровнем развития физики и технологии тонкослойных систем на основе полупроводниковых и диэлектрических материалов.

В связи с распространением микроэлектронных устройств 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, оперативных, неразрушающих методов и аппаратуры контроля, позволяющих проанализировать, в том числе тонкие (менее 0,2 мкм) диэлектрические слои и металлизированные плёнки. Одним из таких методов, позволяющих определить толщину и состав пленок, являются методы сколов, вертикальных и косых шлифов. На сегодняшний день существует большое число работ в области исследования полупроводниковых структур и диэлектриков методом вертикальных, косых шлифов и сколов. Наиболее значимые результаты были получены российскими, украинскими и белорусскими учеными, которые проводили исследования по применению метода в процессе производства интегральных микросхем (В.А. Филипеня, В.А. Горушко, Т.В. Петлицкая, В.Ф. Алексеев, А.Н. Петлицкий). Среди зарубежных авторов особый интерес вызывают работы К. Боита, Р. Шлэнгена, Ю. Керста, в которых представлено описание некоторых дефектов интегральных микросхем.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Переход производства интегральных микросхем на субмикронные проектные нормы требует дальнейшего развития анализа средств контроля и совершенствования методик по пробоподготовке образцов изделий техники.

Отработанные и широко используемые методики анализа изделий полупроводниковой техники с проектными нормами более 1 мкм требуют доработки для микросхем с шириной дорожек 0,35 мкм и толщиной диэлектрических и металлизированных пленок менее 100 нм.

Несмотря на высокую эффективность метода растровой электронной микроскопии при анализе толщины и состава материалов конструкции микросхем, определить элементный состав диэлектрической пленки толщиной 80-100 нм становится проблематично из-за того, что диаметр электронного луча составляет 1,0 – 1,5 мкм.

Одним из решений проблемы при анализе элементного состава тонких

диэлектрических и металлических пленок стало предложение по использованию комбинации методов электронной микроскопии и косого шлифа. Шлифовка образцов под малыми углами (менее 3 градусов) позволяет «растянуть» пленку в десятки раз и корректно провести анализ.

Степень разработанности проблемы

Широкое использование в современной микро-, нано- и оптоэлектронике различных слоев требует совершенствование методов, позволяющих давать адекватную информацию об их химическом составе. Вопросы изучения состава и структуры материалов тесно взаимосвязаны и требуют комплексного подхода, так как информация о составе твердого тела без знания его кристаллической структуры, а также знание структуры материала без знания его химического состава является далеко не полной.

Огромное разнообразие материалов (полупроводники, диэлектрики, металлы) и их состояний (пленки, диффузионные слои, объемные тела и т.д.), используемых в электронной технике, определяет необходимость проведения комплексных физических, химических и физико-химических исследований на всех стадиях технологических процессов: от синтеза материалов с комплексом заданных свойств до контроля технологических процессов изготовления законченных изделий.

Современное состояние физики и химии материалов микро- и наноэлектроники в значительной степени обязано прогрессу в области совершенствования классических и разработки новых методов исследования их состава. Создание материалов для целого ряда отраслей новой техники, обладающих высокими физико-механическими свойствами, требует детального изучения химического состава, осуществляемого с помощью разнообразных методов химического, физико-химического и физического материаловедения. За последнее время появилось довольно большое количество сложных приборов, благодаря которым оказалось возможным применение нового количественного подхода ко многим проблемам электронного материаловедения. Помимо этого, были усовершенствованы стандартные методы исследования материалов. Работы в этом направлении продолжают

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является изучение методов анализа материалов и изделий полупроводниковой техники таких как, растровая электронная микроскопия, рентгеновский микроанализ элементного состава материалов, методы сколов, вертикальных и косых шлифов, а также комплексное использование указанных методов.

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

1. Провести обзор и анализ основных методов изучения структуры материалов и изделий полупроводниковой техники на различных этапах производства, испытаний и эксплуатации.

2. Разработать комплексную методику использования растрового электронного микроскопа и метода шлифов для изучения структуры материалов и конструктивных особенностей ИС.

3. Экспериментально показать применение разработанного комбинированного метода для изучения элементного состава интегральной микросхемы, изготовленной по КМОП-технологии.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем»

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых в области исследования по применению методов РЭМ, рентгеновского микроанализа, вертикальных, косых шлифов и сколов 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 комплексной методики исследования элементного состава тонких диэлектрических и металлических пленок в конструкции интегральных микросхем на основе специализированного растрового электронного микроскопа высокого разрешения S-4800 ф.Hitachi (Япония) и установки изготовления косых шлифов с малыми градусами.

Практическая значимость диссертации.

На основе полученной комплексной методики появилась возможность определять элементный состав тонких диэлектрических и металлических пленок толщиной менее 100 нм в составе образца интегральной микросхемы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Использование комплексного подхода к анализу элементного состава тонких диэлектрических и металлических пленок интегральных микросхем с применением методов растровой электронной микроскопии и прецизионного косого шлифа.

2. Использование метода прецизионного косого шлифа как средства пробоподготовки для анализа тонких диэлектрических и металлических пленок на специализированном растровом электронном микроскопе высокого

разрешения S-4800 ф.Hitachi (Япония).

3. Экспериментально изученная структура тонкого диэлектрического слоя пленки Si_3N_4 в составе конструкции микросхемы IL91214, изготовленной по КМОП-технологии.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, опубликованы в сборнике научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции № 8 (Воронеж, Россия, 2017.).

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 3 печатных работах. В их числе 1 статья в рецензируемом сборнике, научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции и 3 тезиса докладов на научных конференциях.

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

Структура и объем работы

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, 6 таблицы на 4 странице, библиографический список из 79 наименований на 6 страницах, список собственных публикаций соискателя из 6 наименований на 1 странице, 4 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 описано 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 ИС.

Во второй главе описана методика анализа структуры микронных интегральных микросхем при отладке проектов кристаллов микросхем и в серийном производстве.

Сущность предложенной методики заключается в анализе структуры диэлектрического слоя и металлизированной пленки микросхем с помощью шлифа. При производстве ИС важную роль играет контроль толщины диэлектрических слоёв и металлизированных плёнок, а также глубины залегания р-п-переходов диффузионных областей.

На основании изученных данных о проверке структуры микросхем, была разработана и сконструирована установка для создания шлифов на микросхемах (рисунок 1) и изучения изображения всей поверхности шлифа микросхемы растровым электронным микроскопом высокого разрешения Hitachi S-4800 (рисунок 2).



Рисунок 1 – Устройство для получения шлифа

Стоит отметить тот факт, что разработанный программно-аппаратный комплекс обладает рядом достоинств по сравнению с существующими решениями. В первую очередь хочется отметить доступность данного решения, простоту конструкции, а также низкую стоимость и трудоёмкость в процессе анализа.



Рисунок 2 – Фото растового-электронного микроскопа S-4800 (Hitachi)

В третьей главе приведены экспериментальные подтверждения применимости метода косого шлифа для полного и детального анализа структуры микросхем на примере тонально-импульсного номеронабирателя (IL91214)

Рассмотрели требования к ВАХ элементной базы разрабатываемой микросхемы тонально-импульсного номеронабирателя IL91214, представленные в таблице 1.

Таблица 1 - Требования к ВАХ микросхемы IL91214

Параметр, единица измерения	N-канальный транзистор (0,9x50) мкм (Размер затвора после травления 0,8-1,0 мкм)	P-канальный транзистор (1,0x50 мкм) (Размер затвора после травления 0,9-1,1 мкм)
Пороговое напряжение, В ($I_c=100$ нА)	0.4-0.8	0.4-0.8
Ток стока, мА (при $U_c=U_z=5$ В)	12-20	6-10
Пробивное напряжение, В ($I=10$ мкА)	10-16	10-16

Особенности технологии изготовления микросхемы IL91214 представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Особенности технологии изготовления микросхем серии

Ц91214

Параметр	Особенности технологии.
Технология	2-х карманный самосовмещенный КМОП процесс
Проектная норма	0,8 мкм
Подложка	N-тип, концентрация примеси $N=1E15 \text{ см}^{-3}$
Изоляция	Locos
Подзатворный диэлектрик	SiO_2 , $d=16 \pm 1 \text{ нм}$
Затвор	ПКК
Транзисторы	
NМОП	классический NМОП
PМОП	классический PМОП
Межслойный диэлектрик-1	БФСС
Металлизация-1	$\text{Ti}+\text{TiN}+(\text{Al}+1\%\text{Si})+\text{TiN}$
Межслойный диэлектрик-2	ПХО ТЭОС
Металлизация-2	$(\text{Al}+1\%\text{Si})+\text{TiN}$

В результате проведенного эксперимента было изучено визуальное изображение косо шлифа под микроскопом Planar micro 200, представленный на рисунке 4.

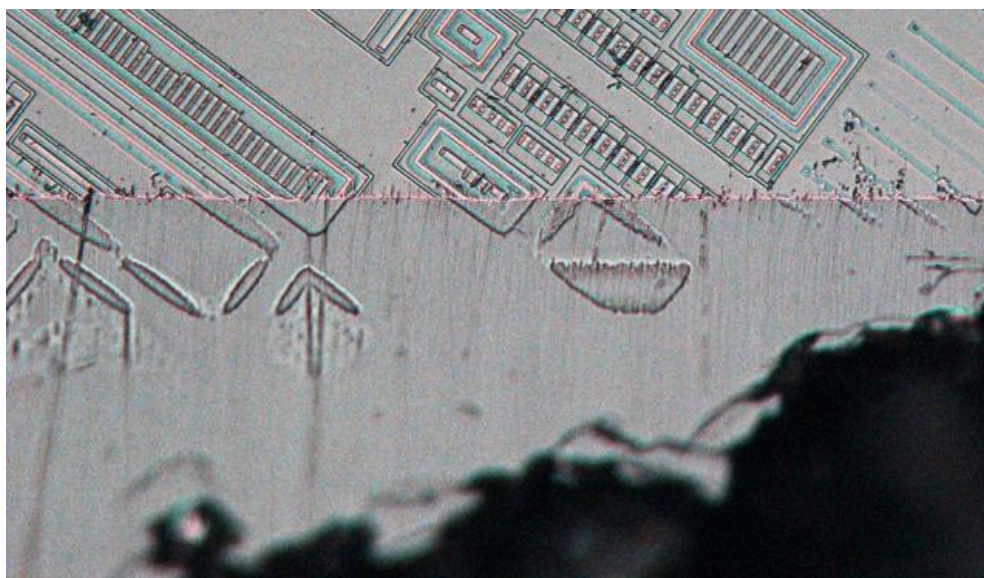


Рисунок 3 – Оптическое фото косо шлифа

Проведён полный анализ технологического маршрута изготовления

микросхемы IL91214 (рисунок 4), который показал, что в процессе формирования структуры многие элементы имеют очень маленькую толщину.

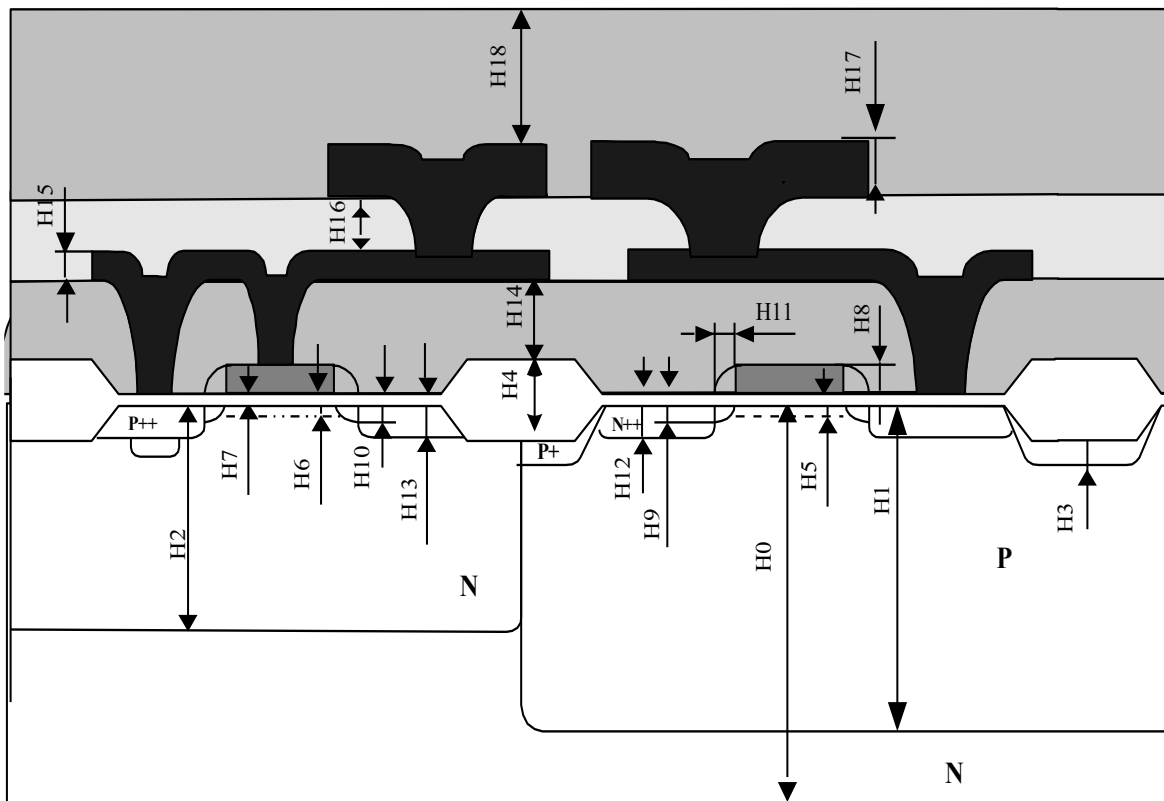


Рисунок 4 - Вертикальная структуры микросхемы IL91214

Выбрали основные правила проектирования топологии микросхем серии IL91214 представленные в таблице 3

Таблица 3 - Основные правила проектирования топологии микросхем серии IL91214

Топологический слой	Элемент, мкм	Зазор, мкм	Шаг, мкм
Затвор NМОП	0,9	1,0	1,9
	РМОП	1,0	2,0
Контакты-1	0,9x0,9	1,1	2,0
Металл-1	1,4	1,0	2,4
Контакты-2	1,2x1,2	1,4	2,6
Металл-2	1,4	1,0	2,4

А также изучена частичное распределение элементов в материале

(рисунок 5) и конечные параметры структуры микросхемы.

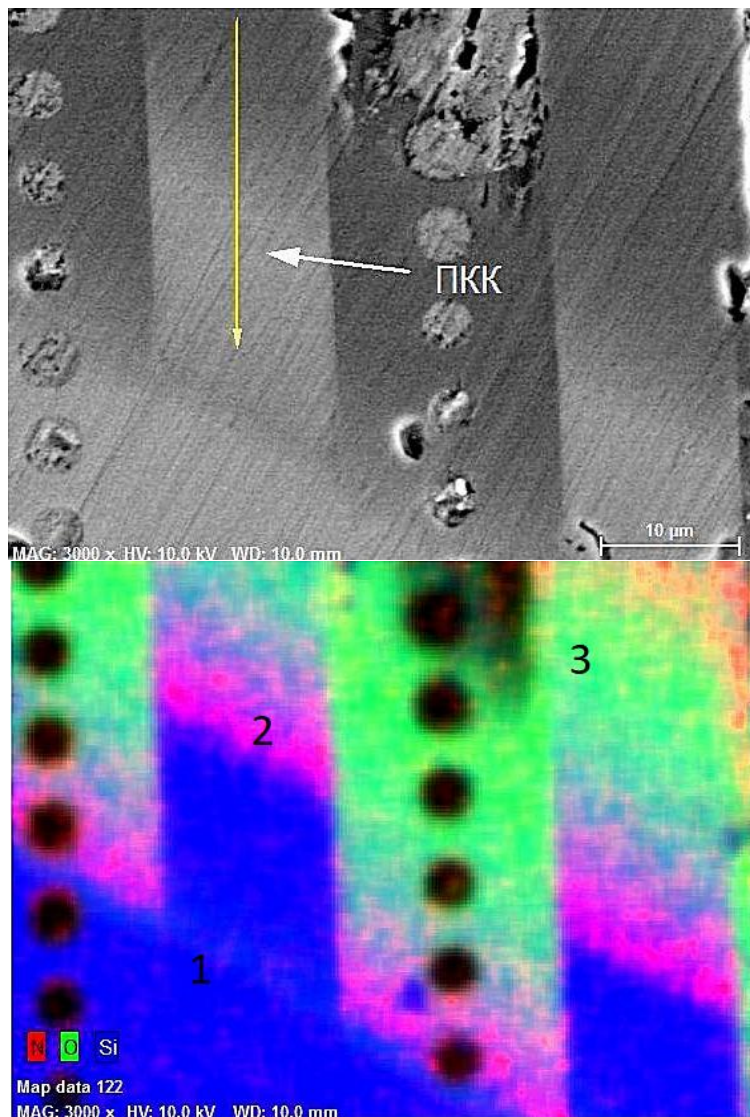


Рисунок 5 – РЭМ фото шлифа и спектральный состав материалов конструкции ИС П912114 3000х

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Выполнен анализ существующих методов анализа структуры микросхем.

2. Разработана новая комплексная методика для изучения элементного состава тонких пленок, заключающая в себя растово-электронную микроскопию и косой шлиф.

3. Экспериментально показано применение комплексной методики для изучения элементного состава пленки Si_3N_4 в составе конструкции микросхемы IL91214, изготовленной по КМОП-технологии.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационных-компьютерных систем учреждения образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс "Физические основы проектирования радиоэлектронных средств"

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в сборниках научных трудов

1. Шкляр, Е.В. Принцип контроля вертикальной структуры интегральных схем методом косоугольного шлифа / Е.В. Шкляр, И.С. Сидореня, Е.В. Петровский // II Международная открытая конференция «Современные проблемы анализа динамических систем. Приложения в технике и технологиях», Воронеж, Россия, 18-20 сентября 2017 г. / ФГБОУ ВО «ВГЛУ» – Воронеж, 2017. – С. 56-57.

2. Петровский, Е.В. Диагностика микросхем микротомографическим методом / Е.В. Петровский, Е.В. Шкляр // материалы 53-ей науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 02-06 мая 2017 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2017.

3. Петровский, Е.В. Применение растровой электронной микроскопии для диагностики интегральных микросхем / Е.В. Петровский, С.С. Мурашко, С.А. Пансевич, Е.В. Шкляр // LXI Студенческая международная научно-практическая конференция «Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ» сб. ст. по мат. LXI междунар. студ. науч.-практ. конф. № 1(60), Новосибирск, Россия, 19 января 2018 г. / АНС «СибАК» – Новосибирск, 2018.

Тезисы конференций

4. Петровский, Е.В. Методы и средства для диагностики интегральных схем / Е.В. Петровский, Е.В. Шкляр // материалы 53-ей науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 02-06 мая 2017 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2017.

5. 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.

6. Шкляр, Е.В. Принцип контроля вертикальных структур интегральных схем методом вертикальных шлифов / И.С. Сидореня, Е.В. Шкляр, Е.В. Петровский Е.В. // 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

Шкляр Яўген Віктаравіч

Даследаванне паўправадніковых структур і дыэлектрыкаў метадам фотаэлектроннага эмісіі

Ключавыя словы: інтэгральная мікрасхема, дэфект, лакалізацыя.

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

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Выкананы аналіз існуючых метадаў кантролю якасці і адмоваў на розных этапах фарміравання, выпрабаванняў і эксплуатацыі ІМС. Выяўлена, што ў цяперашні час у айчынных і замежных крыніцах дадзена тых-логія з'яўляецца вельмі дарагі пры выкарыстанне спецыяльнага абсталявання; распрацавана новая методка і праграма-апаратны комплекс для па-пазову дэфектаў метадам касога шліфу; у выніку праведзеных даследаванняў-няў былі выяўлены і прааналізаваны лакацыі і прычыны ўзнікнення дэфектаў ІМС.

Ступень выкарыстання: Атрыманыя вынікі ўкаранены ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйных-кампутар сістэм ўстановаў абробавання "Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыоэлектронікі ў навучальны курс" Фізічныя асновы праектавання радыё-электронных сродкаў "

Вобласць ужывання: паўправадніковая прамысловасць, мікрапрацэсарныя сістэмы.

РЕЗЮМЕ

Шкляр Евгений Викторович

Исследование структур микросхем методом косо́го шлифа

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

Цель работы: изучение материалов и изделий полупроводниковой техники методом косо́го шлифа 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 данная технология является очень дорогой при использовании специального оборудования; разработана новая методика и программно-аппаратный комплекс для поиска дефектов методом косо́го шлифа; в результате проведенных исследований были выявлены и проанализированы локации и причины возникновения дефектов ИМС.

Степень использования: Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационных-компьютерных систем учреждения образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс "Физические основы проектирования радиоэлектронных средств"

Область применения: полупроводниковая промышленность, микропроцессорные системы.

SUMMARY

Shkliar Eugene Viktorovich

Investigation of the structure of microcircuits by the method of oblique cuts

Keywords: integrated microcircuit, defect, localization, .

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 is performed. It is revealed that at present in domestic and foreign sources this technology is very expensive when using special equipment; A new technique and software-hardware complex for the search of defects by the method of oblique cuts has been 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 are implemented in the educational process at the Department of Design of Information-Computer Systems of the Institution of Processing "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics in the training course" Physical Basis for the Design of Radio-Electronic Means "

Sphere of application: industry, MPU-sor system.