

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

На правах рукописи

УДК 621.382:681.518.5

УСТИМЕНКО
Данута Станиславовна

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ
И ИЗДЕЛИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ
магистерской диссертации на соискание степени
магистра техники и технологии
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», начальник сектора ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» Филиала «Белмикросистемы»

Рецензент:

НОВИКОВ Сергей Олегович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические системы» учреждения образования «Белорусский национальный технический университет»

Защита диссертации состоится «26» июня 2018 года в 13⁰⁰ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., 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

В технологическом процессе изготовления микросхем необходимы эффективные методы оценки надежности ИМС, позволяющие оптимизировать процессы и обеспечить высокий уровень надежности микросхем. Решение этих проблем особенно важно для современных микросхем, базирующихся на сложной элементной базе с субмикронными проектными нормами. Актуальной задачей является обеспечение надежности ИМС на этапе их изготовления, испытаний и эксплуатации.

Диэлектрические слои во многом определяют надежность интегральных микросхем. Это обусловлено достаточно сложными физическими механизмами, лежащими в основе зарядовых свойств и их изменением при эксплуатации ИМС. Известно, что зарядовая нестабильность диэлектрических слоев приводит к изменению параметров базовых элементов и отказу ИМС. По этой причине изучение и использование методов анализа зарядовых свойств диэлектрических слоев ИМС является неотъемлемой задачей, решение которой позволит определить пути повышения качества и надежности современных субмикронных ИМС.

Применение рассмотренных в данной работе методов анализа позволит ускорить процесс проектирования и освоения новых субмикронных изделий, проводить достоверную периодическую аттестацию техпроцесса и технологического оборудования, поддерживать на должном уровне качество изготавливаемых субмикронных изделий, оперативно проводить анализ технологических потерь и причин отказов интегральных микросхем. Методики также обладают универсальностью по применению к микросхемам с подзатворным диэлектриком из различных материалов и возможностью их использования для анализа технологических процессов перспективных микросхем.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Переход производства ИМС на субмикронные проектные нормы требует дальнейшего развития аналитических средств контроля и совершенствования методик контроля параметров полупроводниковых структур.

Степень разработанности проблемы

В настоящее время существует достаточно большое количество работ в области микроэлектроники по анализу причин, видов и природы отказов микросхем, связанных с качеством подзатворного диэлектрика.

Однако представлено недостаточное количество литературных данных по комплексному анализу подзатворного диэлектрика на различных этапах формирования, испытаний и эксплуатации ИМС.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является изучение современных методов диагностики интегральных микросхем с субмикронными проектными нормами, позволяющими достоверно определить качество подзатворного диэлектрика SiO_2 .

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

1. Анализ существующих методов формирования подзатворного диэлектрика SiO_2 .
2. Изучение полного цикла формирования микросхемы «CMOS035Y5», в том числе, особенностей маршрута создания подзатворного окисла SiO_2 .
3. Анализ методов, позволяющих оценить качество подзатворного диэлектрика на различных этапах изготовления микросхемы, а также в процессе испытаний и эксплуатации микросхемы.
4. Исследования качества подзатворного диэлектрика изделия «CMOS035Y5» комплексом электрофизических методов, таких как термополевые испытания и времязависимый пробой, а также фотонной эмиссии и растровой электронной микроскопии в режиме наведенного тока.

Область исследования

Областью исследований являлись микросхемы с проектными нормами 0,35 мкм, толщиной подзатворного диэлектрика 120 нм, серийно выпускаемые на ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Содержание диссертационной работы 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 результаты известных исследований белорусских и зарубежных ученых, а также практический опыт разработчиков Филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» в области исследования качества подзатворного диэлектрика.

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

Научная новизна

Научная новизна состоит в том, что получены результаты, показывающие возможности аналитического оборудования ОАО «ИНТЕГРАЛ» по комплексному анализу качества подзатворного диэлектрика микросхем с субмикронными проектными нормами.

На основе существующих методик и имеющегося парка аналитического оборудования была проведена оценка качества подзатворного окисла серийно

выпускаемого изделия «CMOS035Y5». Установлено, что качество подзатворного окисла полностью отвечает техническим требованиям и конструкторской документации.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что в ней рассмотрены методы формирования подзатворного окисла, также рассмотрены средства, с помощью которых производится оценка качества сформированного окисла.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что на основе комплекса методик были исследованы электрофизические параметры подзатворного диэлектрика микросхемы «CMOS035Y5». Установлено, что параметры подзатворного диэлектрика соответствуют требованиям технологической и конструкторской документациям.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Анализ формирования подзатворного окисла методами сухого, влажного и пирогенного окисления.
2. Высокоточные методы исследования параметров материалов микро- и нанoeлектроники, субмикронных интегральных микросхем, в том числе и для микросхем с проектными нормами 0,35 мкм.
3. Оценка качества подзатворного окисла микросхемы «CMOS035Y5».

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: Международный форум "Техноюнити – Электронно-лучевые технологии для микроэлектроники 2017", (Москва, 9-13 октября 2017 г.); Международная научно-практическая конференция "Современные информационные и электронные технологии", (Одесса, 28 мая - 01 июня 2018 г.); XXVII Российская конференция по электронной микроскопии и 5-я Школа молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях органических, неорганических наноструктур и нано- биоматериалов», (26-30 августа 2018 г., Черноголовка).

Результаты диссертационной работы внедрены (использованы) в учебный процесс в 2018-2019 учебном году в следующем лекционном курсе: «Проектирование и системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем», а так же вошли в научно-технические отчеты ГЦ «Белмикродиагностика» Филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Опубликование результатов диссертации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 3 печатных работах, которые были опубликованы в сборниках материалов научных конференций.

Общий объем публикаций по теме диссертационной работы составляет 0,52 авторских листа.

Структура и объем работы

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 77 страниц. Работа содержит 38 рисунков. Библиографический список включает 29 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы, связанное с обеспечением надежности ИМС на этапе их изготовления, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также структура и объем диссертации.

В **первой главе** представлены методы формирования диэлектрика SiO_2 : сухое, влажное и пирогенное окисление.

Сущность метода термического окисления сводится к окислительной обработке поверхности кремниевых пластин в среде сухого, влажного кислорода или парах воды при повышенной температуре.

Процесс окисления осуществляется обычно при температурах от 900 до 1350°C. Многочисленными экспериментальными исследованиями было показано, что процесс термического окисления кремния складывается из следующих наиболее важных элементарных актов:

- диффузии окислителей из газового потока к поверхности кремния;
- адсорбции окислителей на поверхности кремния;
- диффузии окислителей через оксидный слой (коэффициент диффузии кислорода и воды в SiO_2 значительно выше коэффициента диффузии Si в SiO_2);
- химического взаимодействия окислителей с кремнием на границе раздела $\text{Si} - \text{SiO}_2$;
- отвода газообразных продуктов реакции (при участии воды).

Выбор способа окисления зависит от назначения оксида. Скорость окисления в водяном паре выше, следовательно, для получения толстых пленок этот метод предпочтительнее. При необходимости получать тонкие оксидные пленки высокой плотности с минимальным зарядом на границе кремний-оксид предпочтение отдается окислению в среде сухого кислорода. Пленки толщиной более 0,5 мкм формируют во влажном кислороде.

Так же в главе представлен полный цикл формирования микросхемы «CMOS035Y5», в том числе, особенности маршрута создания подзатворного оксида SiO_2 .

Во **второй главе** приведены методы и средства диагностики микросхем, используемые на предприятии ОАО «Интеграл». Рассмотрен метод термополе-

вых испытаний (ТПИ) и времязависимого пробоя (ВЗП) диэлектрических слоев, результаты которого приведены в третьей главе.

Надежность и стабильность ИМС во многом определяется ионными загрязнениями, присутствующими в диэлектрических слоях.

Задачей (ТПИ) является оценка изменения параметров МОП-структуры после перевода структуры в состояние принудительного распределения подвижных ионов вблизи границы раздела кремний-диэлектрик относительно исходного состояния.

Метод контроля заряда пробоя диэлектрических слоев основан на статистическом измерении величины заряда пробоя диэлектрического слоя на выборке тестовых структур (ТС) и предназначен для контроля скрытых дефектов, снижающих надежность подзатворного и туннельного диэлектриков, кремниевых интегральных микросхем (ИМС) с проектными нормами до 0,18 мкм.

На всех ТС выборки измеряется величина заряда пробоя и после измерений определяется количество ТС, имеющих величину заряда пробоя меньше установленного критерия. Такие структуры являются забракованными, т. к. они пробиваются малым по величине зарядом и, по этой причине, имеют низкий уровень надёжности.

Приведено так же описание проведения испытаний (ТПИ, ВЗП) и снятия характеристик диэлектрических слоев на аналитическом оборудовании - зондовая станция Cascade Summit 11000B-AP и измеритель параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A (рисунок 1).



Рисунок 1 – Зондовая станция Cascade Summit 11000B-AP и измеритель параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A

Характеристики измерителя параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики измерителя параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A

Диапазон измерений Agilent B1500A	
I	1fA - 100mA
C	1fF - 100μF
V	2μV - 100V
R	10μΩ - 20MΩ
T	-60°C ÷ +150°C

В настоящее время на предприятии ОАО «Интеграл» используется следующее оборудование для оценки качества подзатворного окисла: прецизионный анализатор параметров HP4156B, автоматизированная измерительная система HP4061A, оптический микроскоп Leica INM 100, растровый электронный микроскоп Hitachi S-4800.

Применение растровых электронных микроскопов для обеспечения контроля электронной компонентной базы с момента преодоления микроэлектронными приборами топологического рубежа в несколько микрон стал неотъемлемой частью оборудования для контроля и диагностики сложных многослойных, морфологически развитых гетерогенных объектов. Фото микроскопа Hitachi S-4800, используемого на предприятии, приведено на рисунке 2.



Рисунок 2 – Общий вид РЭМ Hitachi S-4800

На рисунках 3-4 представлено РЭМ-фото исследуемого тестового конденсатора в стандартном режиме и в режиме наведенного тока соответственно.

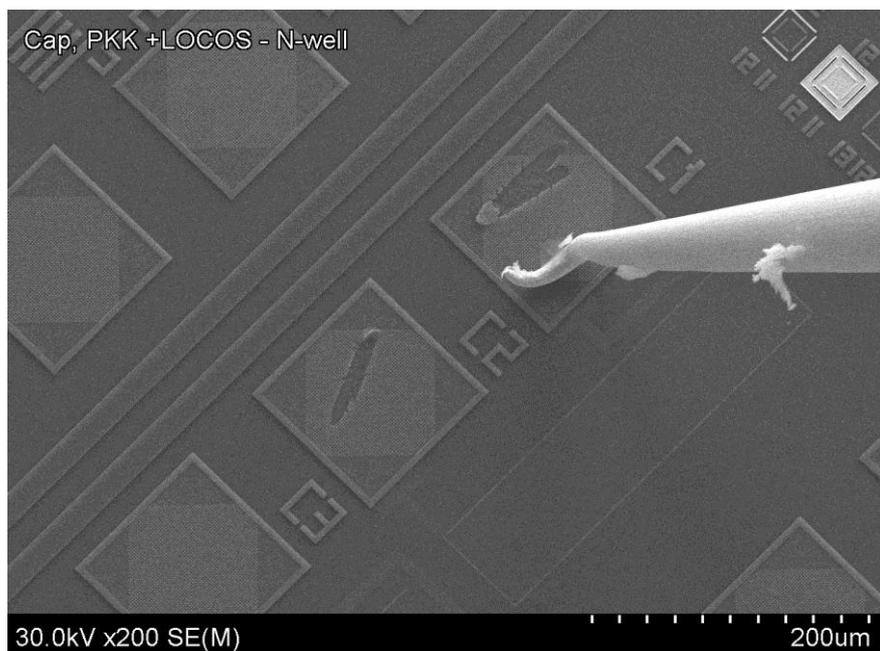


Рисунок 3 – РЭМ-фото исследуемого тестового конденсатора в стандартном режиме

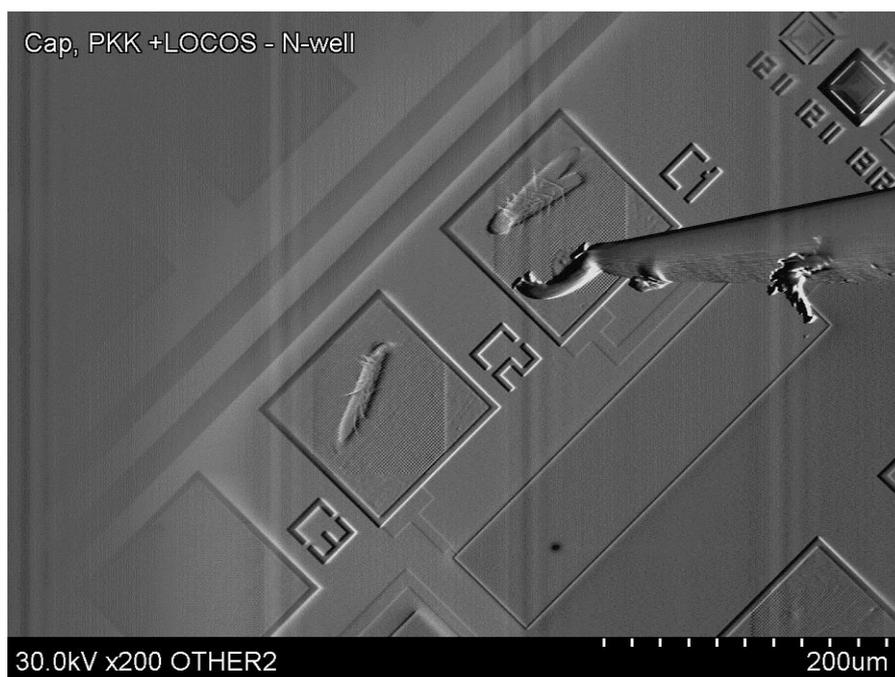


Рисунок 4 – РЭМ-фото исследуемого тестового конденсатора в режиме наведенного тока

В **третьей главе** представлены результаты практического задания, которое заключалось в исследовании качества подзатворного диэлектрика изделия «CMOS035Y5» комплексом электрофизических методов, таких как термополевые испытания и времязависимый пробой, а также фотонной эмиссии и растровой электронной микроскопии в режиме наведенного тока, на соответствие технологической документации.

Исследования параметров диэлектрика проводились не на микросхеме, а

на специальных структурах – тестовых транзисторах и конденсаторах. Тестовые структуры расположены в тестовом модуле. Фото общего вида тестового модуля представлено на рисунке 5.

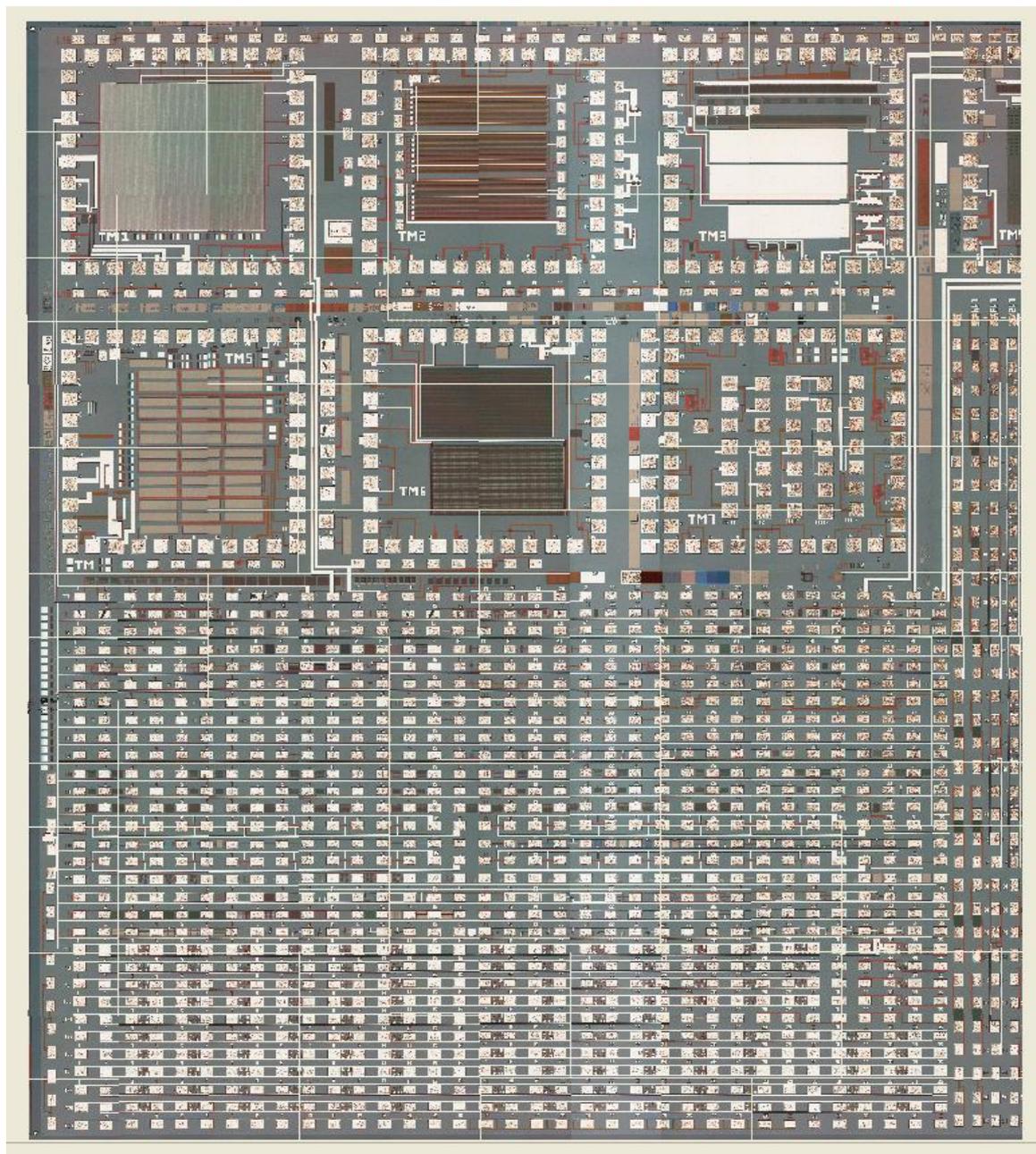


Рисунок 5 – Фото тестового модуля ИМС «CMOS035Y5»

На рисунках 6 - 7 представлено фото отдельных тестовых конденсаторов, в которых конденсаторным диэлектриком служит подзатворный окисел толщиной 120 нм. Верхняя обкладка – поликристаллический кремний (материал затвора) толщиной 0,45 мкм, нижней обкладкой служит N-карман или P-карман, сформированный в кремниевой подложке. Глубина кармана составляет от 2 до 4 мкм.

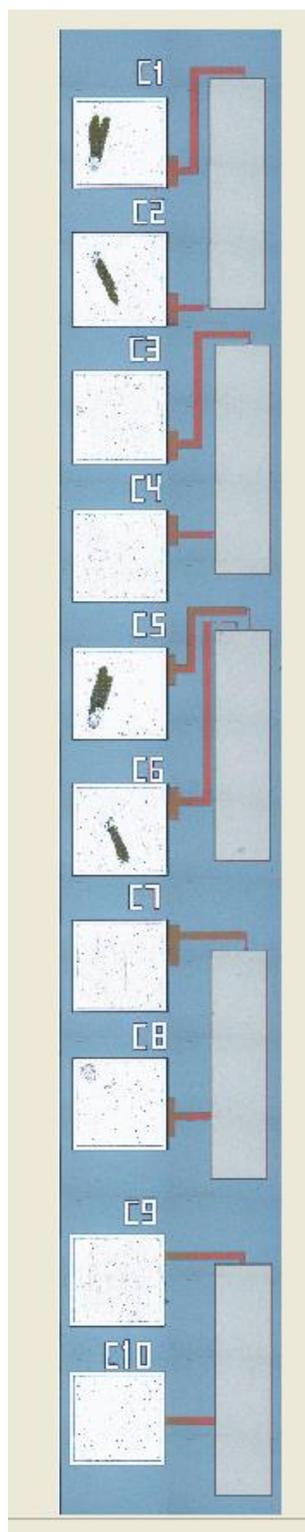


Рисунок 6 – Тестовые конденсаторы



Рисунок 7 – Тестовые конденсаторы

Результаты термополевой стабильности тестовых конденсаторов и расчётные значения сдвига напряжения плоских зон (ΔV_{fb}), изменения плотности заряда в диэлектрике ($\Delta Q_{ss/q}$), приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты термополевой стабильности тестовых конденсаторов

№ пластины	Тест	№ точки контроля	Измерения исходные		Измерения после ТПИ		Разность	
			V_{fb} , мВ	$Q_{ss/q}$, 1/см ²	V_{fb} , мВ	$Q_{ss/q}$, 1/см ²	ΔV_{fb} , мВ	$\Delta Q_{ss/q}$, 1/см ²
02	к.п. 1-2	1	-103	5.64E+10	-108	4.88E+10	-5	<1.00E+10
		2	-104	5.54E+10	-106	5.60E+10	-2	<1.00E+10
	к.п. 3-4	1	-1090	1.58E+11	-1080	1.62E+11	10	<1.00E+10
		2	-1090	1.56E+11	-1080	1.58E+11	10	<1.00E+10
10	к.п. 1-2	1	-98	6.59E+10	-97	6.63E+10	1	<1.00E+10
		2	-79	9.82E+10	-78	9.83E+10	1	<1.00E+10
	к.п. 3-4	1	-1050	9.10E+10	-1040	9.14E+10	10	<1.00E+10
		2	-1020	5.39E+10	-1030	5.40E+10	-10	<1.00E+10
22	к.п. 1-2	1	-131	1.26E+10	-134	6.48E+09	-3	<1.00E+10
		2	-128	1.72E+10	-129	1.55E+10	-1	<1.00E+10
	к.п. 3-4	1	-1110	1.89E+11	-1100	1.86E+11	10	<1.00E+10
		2	-1110	1.94E+11	-1100	1.92E+11	10	<1.00E+10

Измерения заряда пробоя подзатворного окисла Q_{bd} , Кл/см², проводились в пяти точках пластины на тестовых конденсаторах, расположенных в тестовой линейке С: к.п. 1 - 2 (поликремневая обкладка – подзатворный окисел – N-карман) и к.п. 3 - 4 (поликремневая обкладка – подзатворный окисел – P-карман).

Результаты контроля заряда пробоя подзатворного окисла и схема расположения областей контроля, в которых проводились измерения, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты контроля заряда пробоя подзатворного окисла

Область контроля	Q_{bd} , Кл/см ²		Схема контроля:
	к.п. 1-2	к.п. 3-4	
1	12.895	5.130	
2	11.760	6.169	
3	12.315	5.130	
4	12.316	5.625	
5	11.760	4.899	

В результате исследований контроля термополевой стабильности подзатворного диэлектрика и контроля качества подзатворного окисла установлено, что изделие соответствует требованиям ТД и КД.

В приложениях приведены акт внедрения результатов работы в учебный процесс, графический материал и копии публикаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Были рассмотрены такие методы формирования диэлектрика SiO₂ как сухое, влажное и пироженное окисление.

Изучен полный цикл формирования микросхемы «CMOS035Y5», в том числе, особенности маршрута создания подзатворного окисла SiO₂. Толщина окисла, выращенного методом сухого окисления, составляет 120 нм.

2. Проведен анализ методов, позволяющих оценить качество подзатворного диэлектрика на различных этапах изготовления микросхемы, а также в процессе испытаний и эксплуатации микросхемы, а именно, рассмотрены такие методы как термополевые испытания, метод времязависимого пробоя, фотонной эмиссии, РЭМНТ, которые используются на предприятии ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Приведены краткое описание и технические характеристики, используемого в работе оборудования: прецизионный анализатор параметров HP4061A, зондовая станция Cascade Summit 11000B-AP и измеритель параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A, растровый электронный микроскоп Hitachi S-4800, оптический микроскоп Leica INM 100. Обоснована необходимость развития диагностических и аналитических средств контроля ИМС в связи со стремительным переходом производства на субмикронные проектные нормы.

3. Были проведены исследования качества подзатворного диэлектрика изделия «CMOS035Y5» комплексом электрофизических методов, таких как термополевые испытания и времязависимый пробой, а также фотонной эмиссии и растровой электронной микроскопии в режиме наведенного тока, на соответствие технологической документации:

- сдвиг напряжения плоских зон не превышает 10 мВ;
- изменение плотности заряда не превышает 1.00E+10 1/см²;
- заряд пробоя на структуре поликремневая обкладка – подзатворный окисел – N-карман составляет в среднем 12,0 Кл/см²;
- заряд пробоя на структуре поликремневая обкладка – подзатворный окисел – P-карман составляет в среднем 5,5 Кл/см²;
- дефектов в виде пор, каналов пробоя и др. методами фотонной эмиссии и РЭМНТ не выявлено.

В результате исследований контроля качества подзатворного окисла установлено, что изделие «CMOS035Y5» соответствует требованиям технологической документации.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Список собственных публикаций

[1] Петлицкий, А.Н. Исследование поверхности тонкопленочного резистора методом сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) / А.Н. Петлицкий, Т.В. Петлицкая, В.А. Пилипенко, В.А. Солодуха, Д.С. Устименко, В.А. Филипеня, С.В. Шабалина // II Международный форум «Техноюнити – Электронно-лучевые технологии для микроэлектроники», Зеленоград, Россия, 9-12 октября 2017 г. / Казенное предприятие г. Москвы «Корпорация развития Зеленограда» – Зеленоград, 2017. – 128.

[2] Пилипенко, В.А. Анализ дефектов интегральных схем с использованием растрового электронного микроскопа в режиме наведенного тока (РЭМНТ) / В.А. Пилипенко, В.А. Солодуха, С.В. Шведов, А.Н. Петлицкий, Т.В. Петлицкая, Г.Г. Чигирь, Д.С. Устименко, Д.В. Жигулин, В.А. Филипеня // Международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии», Одесса, Украина, 28 мая – 1 июня 2018 г. / УО «ОНПУ». – Одесса, 2018.

[3] Пилипенко, В.А. Диагностика скрытых дефектов интегральных микросхем с использованием РЭМ в режиме наведенного тока / В.А. Пилипенко, А.Н. Петлицкий, Т.В. Петлицкая, Д.С. Устименко // XXVII Российская конференция по электронной микроскопии и 5-я Школа молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях органических, неорганических наноструктур и нанобиоматериалов», Черногловка, Россия, 26-30 августа 2018 г. / Дом ученых НЦЧ РАН. – Черногловка, 2018.

РЕЗЮМЕ

Устименко Данута Станиславовна

Электрофизические методы диагностики материалов и изделий полупроводниковой техники

Ключевые слова: интегральная микросхема, диагностика, режим наведенного тока, дефект.

Цель работы: изучение современных методов диагностики интегральных микросхем с субмикронными проектными нормами, позволяющими достоверно определить качество подзатворного диэлектрика SiO₂.

Полученные результаты и их новизна: получены результаты, которые показывают возможности аналитического оборудования ОАО «ИНТЕГРАЛ» по комплексному анализу качества подзатворного диэлектрика микросхем с субмикронными проектными нормами.

На основе существующих методик и имеющегося парка аналитического оборудования была проведена оценка качества подзатворного окисла серийно выпускаемого изделия «CMOS035Y5». Установлено, что качество подзатворного окисла полностью отвечает техническим требованиям и конструкторской документации.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в лекционный курс «Проектирование интегральных схем».

Область применения: микроэлектронная промышленность.

РЭЗІЮМЭ
Усціменка Данута Станіславаўна
Электрафізічныя метады дыягностыкі матэрыялаў і вырабаў
паўправадніковай тэхнікі

Ключавыя словы: інтэгральная мікрасхема, дыягностыка, рэжым наведзенага току, дэфект.

Мэта працы: вывучэнне сучасных метадаў дыягностыкі інтэгральных мікрасхем з субмікроннымі праектнымі нормамаі, якія дазваляюць дакладна вызначыць якасць падзатворнага дыэлектрыка SiO₂.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: атрыманы вынікі, якія паказваюць магчымасці аналітычнага абсталявання ААТ «Інтэграл» па комплексным аналізу якасці падзатворнага дыэлектрыка мікрасхем з субмікроннымі праектнымі нормамаі.

На аснове існуючых методак і існуючага парку аналітычнага абсталявання была праведзена ацэнка якасці падзатворнага вокісла серыйна выпускаемага вырабу «CMOS035Y5». Устаноўлена, што якасць падзатворнага вокісла цалкам адказвае тэхнічным патрабаванням і канструктарскай дакументацыі.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта інфарматыкі і радыёэлектронікі ў лекцыйны курс «Праектаванне і сістэмы аўтаматызаванага праектавання інтэгральных мікрасхем».

Вобласць ужывання: мікраэлектронная прамысловасць.

SUMMARY

Ustimenko Danuta Stanislavovna

Electrophysical methods of diagnostics of materials and products semiconductor technology

Keywords: integrated microcircuit, diagnostics, induced current mode, defect.

Objective: to study modern diagnostic methods for integrated microcircuits with submicron design standards, which allow to reliably determine the quality of the gate dielectric SiO₂.

The results and their novelty: the results are obtained, which show the capabilities of INTEGRAL analytical equipment for a comprehensive analysis of the quality of the gate-type dielectric of microcircuits with submicron design standards.

Based on existing techniques and the existing fleet of analytical equipment, the quality of the gate oxide of the commercially available product "CMOS035Y5" was evaluated. It is established that the quality of the gate oxide fully meets the technical requirements and design documentation.

Use degree: the results are introduced into the educational process of the Belarusian state university of informatics and radioelectronics in the lecture course "Design and systems for the automated design of integrated circuits".

Field of application: microelectronic industry.