

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.382.2:546.28

ЕМЕЛЬЯНОВ  
Антон Викторович

**ИНФОРМАЦИОННО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА  
СУБМИКРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2012

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и в ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Научные руководители: **Достанко Анатолий Павлович**, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
**Белоус Анатолий Иванович**, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке БМС ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Официальные оппоненты: **Лабунов Владимир Архипович**, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
**Залесский Валерий Борисович**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией фотоэлектрических преобразователей государственного научного учреждения «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси»

Оппонирующая организация Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «КБТЭМ-ОМО»

Защита состоится 27 декабря 2012 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220113, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovvet@bsuir.by.

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

При переходе к субмикронным проектным нормам возрастает вероятность снижения процента выхода годных и появления отказов интегральных микросхем (ИМС) из-за повышения чувствительности полупроводниковых структур, токопроводящих и диэлектрических слоев к дефектам материалов и разбросу технологических параметров.

Для решения указанных проблем в производственный процесс изготовления ИМС вводятся различные контрольные операции и используются специальные тестовые структуры (ТС), изготавливаемые в одном технологическом цикле с кристаллами микросхем, что позволяет своевременно корректировать технологические режимы для уменьшения брака на промежуточных операциях технологического маршрута изготовления ИМС. Поэтому разработка соответствующего комплекса методов и средств, включающего в себя принципы формирования и выбора базовых наборов ТС, методики измерений и статистической обработки выходных электрофизических параметров, а также математической модели, связывающие характеристики ТС с показателями надежности ИМС, является актуальной проблемой.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Тема диссертационной работы утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 19 от 25.06 2012 г.) и соответствует разделу 13 «Микроэлектроника и субмикронные технологии твердотельной электроники», пункт «Контроль процессов изготовления и параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем» «Структуры приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2011–2015 гг.» (Указ Президента Республики Беларусь от 22.07.2010 № 378), а также пункту 6.9 «Принципы схмотехнического построения и технологии создания интегральных, в том числе трехмерных, микросхем, устройств функциональной ВЧ-электроники, опто- и электромеханических систем, светодиодных и фоточувствительных приборов, высокоэффективных солнечных элементов» раздела 6 «Лазерные, оптические, оптико-, опто-, микро- и радиоэлектронные технологии и системы» Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы» (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585).

Диссертационная работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и в

ОАО «ИНТЕГРАЛ» в рамках следующих научных тем и программ:

1. Государственная программа прикладных исследований «Оптика, электроника, информатика» (2004–2005 гг.), задание 2.1.20, № ГР 2007183. Разработать элементную базу для изготовления микросхем с повышенной устойчивостью к внешним воздействиям.

2. Государственная научно-техническая программа «Микроэлектроника», подпрограмма «Микроэлектронные технологии, компоненты, оборудование» (2004–2007 гг.), задания 1.1.9, 1.1.10, 4.25, № ГР 2002149, № ГР 2002754, № ГР 2002158. Разработать блоки технологических операций КМОП СБИС с 0.5 мкм.

3. Государственная научно-техническая программа «Микроэлектроника», подпрограмма «Микроэлектроника ЭКБ» (2010–2015 гг.), задания 1, 2, 5, № ГР 20114609, № ГР 20114603, № ГР 20114604. Разработать технологический процесс устойчивых к СВВФ КМОП ИМС с 0.35 мкм.

### **Цель и задачи исследования**

Основными целями диссертационной работы являются разработка конструкций и технологических процессов формирования тестовых полупроводниковых структур, информационно-параметрических методов и средств определения структуры и свойств функциональных слоев и заданных эксплуатационных параметров субмикронных микросхем на этапах их изготовления в условиях серийного производства.

Для достижения этих целей были поставлены и решены следующие основные задачи:

- разработать требования к составу, конструкции и технологии изготовления специальных полупроводниковых тестовых структур для пооперационной оценки параметров и прогнозирования процента выхода годных микросхем;
- адаптировать и совершенствовать статистико-вероятностные методы, алгоритмы, программное обеспечение и аппаратные средства контроля характеристик разработанных тестовых структур оценки параметров субмикронных микросхем на технологических этапах их производства;
- разработать комплекс взаимосвязанных методик анализа зарядовых свойств диэлектрических слоев интегральных микросхем и контроля свойств подзатворного диэлектрика;
- разработать методы повышения электрической прочности и стойкости алюминиевых токопроводящих дорожек к электромиграции, воспроизводимости характеристик межуровневого диэлектрика многоуровневой системы металлизации и повышения его стойкости к пробоем.

Объектом исследований являются кремниевые интегральные микросхе-

мы, параметры микросхем, тестовые полупроводниковые структуры, информационно-параметрические методы и средства оценки технологического уровня процессов серийного производства микросхем.

Предметом исследования являются технологические процессы изготовления тестовых структур, физико-химические свойства, закономерности и особенности формирования функциональных слоев микросхем и методы неразрушающего контроля параметров кремниевых интегральных микросхем в процессе их серийного производства.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Закономерности изменения параметров времязависимого пробоя пленок  $\text{SiO}_2$ , полученные на основе экспериментальных зависимостей величины заряда пробоя диэлектрика в статистической выборке тестовых МОП-конденсаторов в составе ИМС при пропускании через них ступенчато-нарастающего тока, позволяющие установить степень дефектности плёнок толщиной до 5 нм и прогнозировать показатели надежности МОП ИМС.

2. Метод количественной оценки показателей надежности МОП-структур, основанный на измерении напряжения плоских зон при различных толщинах диэлектрической пленки, который позволяет повысить точность контроля плотности встроенного электрического заряда до  $10^{22} \text{ м}^{-3}$ .

3. Технологический метод формирования поликристаллического кремния, заключающийся в создании барьерного слоя гидрогенизированного аморфного кремния, обеспечивающий повышение энергии электромиграции алюминия до 1,07–1,09 эВ (по сравнению с 0,5–0,8 эВ в стандартной технологии) и повышение эксплуатационной надежности омических контактов и межсоединений субмикронных ИМС.

4. Разработанный метод формирования пленок алюминия для омических контактов и межсоединений на основе экспериментально определённых режимов термоциклической обработки, позволяющий снизить размер дефектов пленки в виде бугорков до 0,1–0,2 мкм (более 1 мкм в стандартном процессе рекристаллизации) и тем самым повысить напряжение пробоя межуровневого диэлектрика на 100–150 В.

### **Личный вклад соискателя**

В диссертации изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных автором лично и в соавторстве. В совместно опубликованных работах автором осуществлялись постановка задачи, обоснование направлений решения научных проблем, разработка методик проведения исследований, непосредственное проведение исследований, анализ результатов и формулировка выводов. Автором лично предложены: принципы формирования состава и конструкций встраиваемых полупроводниковых ТС, комплекс информационно-

параметрических методов определения закономерностей формирования структуры и свойств функциональных слоев.

Определение структуры, целей и задач исследования, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследования проводились совместно с научными руководителями: академиком, д-м техн. наук, профессором А.П. Достанко и д-м техн. наук, профессором А.И. Белоусом.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях, семинарах и симпозиумах: XX Юбилейные международные чтения «Великие преобразователи естествознания: Жорес Алферов», Минск, Беларусь, 24–25 ноября 2004 г.; 8-я Международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии», г. Одесса, Украина, 21–25 мая 2007 г.; V Белорусско-российская НТК «Технические средства защиты информации», Минск, Беларусь, 28 мая–1 июня 2007 г.; 5-я Международная конференция «Новые электро- и электронные технологии и их применение в промышленности» (NEET 2007), Закопане, Польша, 12–15 июня 2007 г.; 7-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, Беларусь, 26–28 сентября 2007 г.; 2-я Международная научная конференция «Современные информационные системы: проблемы и тенденции развития», Харьков – Туапсе, 2–5 октября 2007 г.; ESTC-2008: II Международная конференция по технологии и системной интеграции в электронике, Лондон, Великобритания, 1–4 сентября 2008 г.

### **Опубликованность результатов диссертации**

По материалам диссертации опубликовано 37 печатных работ, из них две монографии, 11 статей в рецензируемых научных журналах, 5 статей в материалах научных конференций, 3 тезиса в докладах на научных конференциях, 4 статьи в сборниках научных трудов и 12 патентов. Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 10 авторских листов.

### **Структура и объем диссертации**

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

**В первой главе** дан анализ методов контроля параметров и дефектов микросхем в технологическом процессе их изготовления. **Во второй главе** представлены результаты использования тестовых структур в технологическом процессе изготовления ИМС. **В третьей главе** представлены результаты исследования диэлектрических слоев с помощью тестовых структур. **В четвертой главе** описаны разработанные конструкции и технологические маршруты изготовления многослойных тонкопленочных токопроводящих систем. **В пятой главе** предложены методы математической обработки результатов испытаний ИМС со скрытыми дефектами. **В приложениях** приведены документы об использовании результатов диссертации.

Общий объем диссертации составляет 155 страниц. Из них 107 страниц основного текста, 64 рисунка на 26 страницах, 15 таблиц на 7 страницах, библиографический список из 104 наименований на 8 страницах, список собственных публикаций автора из 37 наименований на 5 страницах, приложения на 5 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении и общей характеристике работы** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор литературных данных в области исследований методов контроля технологических процессов производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. Показано, что для количественной оценки надежности применяют главным образом вероятностные параметры. Для описания распределения случайных дискретных величин наибольшее распространение получили биномиальный закон и закон Пуассона. Для описания показателей устойчивости полупроводниковых приборов и микросхем к эксплуатационным нагрузкам на начальном этапе эксплуатации используется распределение Вейбулла, которое позволяет соответствующим подбором параметров обеспечить хорошее согласие с экспериментальными данными. Рассмотрены основные виды, причины и механизмы отказов ИМС.

Проанализированы пути повышения качества и прогнозирования работоспособности приборов. Показано, что наиболее перспективным методом оперативного контроля качества технологического процесса ИМС является создание специальных полупроводниковых тестовых структур, изготавливаемых в едином технологическом цикле с рабочими приборами. Рассмотрена взаимосвязь измеряемых по специальным методикам электрофизических характеристик изготавливаемых приборов с показателями их надежности. На основе анализа литературных данных сформулированы основные направления, задачи и методы

исследований по теме диссертации.

Во второй главе описаны использованные в работе методы и оборудование, предназначенные для прогнозирования качества ИМС в процессе их серийного производства. Представлена разработанная методика прогнозирования показателей качества ИМС по результатам анализа температурного дрейфа порогового напряжения МОП-конденсатора, которая позволяет осуществлять контроль в широком диапазоне изменения технологических параметров, а также пооперационно, по пластине и от партии к партии.

Для прогнозирования устойчивости подзатворного диэлектрика толщиной 5–450 нм к электрическому пробоя на основании статистического анализа характера микронеоднородностей в нем предложен метод, основанный на измерениях величины заряда пробоя диэлектрика в выборке тестовых структур при пропускании через них ступенчато-нарастающего тока, что обеспечивает возможность использования тестовых структур небольшой площади. На всех структурах измеряется величина заряда пробоя и после измерений определяется количество тестовых структур, имеющих величину заряда пробоя меньше установленного критерия. С использованием распределения Пуассона при задании необходимого уровня доверительной вероятности устанавливается критерий устойчивости подзатворного диэлектрика по допустимому количеству бракованных тестовых структур в измеренной выборке.

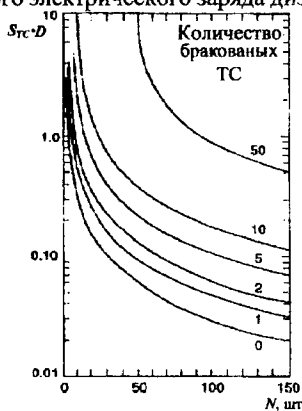
Анализ результатов основан на построении распределения Вейбулла – зависимости процента отказов с накоплением от логарифма заряда пробоя диэлектрика  $\log Q_{bd}$ . В этой зависимости проявляются две области: одна соответствует пробоя ТС с дефектами, а другая, более крутая, – пробоя ТС без дефектов структуры (собственный пробой) диэлектрика. Показано, что использование первой области при анализе дефектности структур позволяет оценить долю дефектных тестовых структур, зависящую от площади  $S_{ТС}$ , а второй – параметры области пробоя подзатворного диэлектрика свободной от дефектов.

Полученные автором расчетные зависимости (рисунок 1) реальной плотности дефектов  $D$  в диэлектрике от объема выборки  $N$  и количества бракованных ТС в выборке от 1 до 50 используются для установления реальной плотности дефектов подзатворного диэлектрика ИМС.

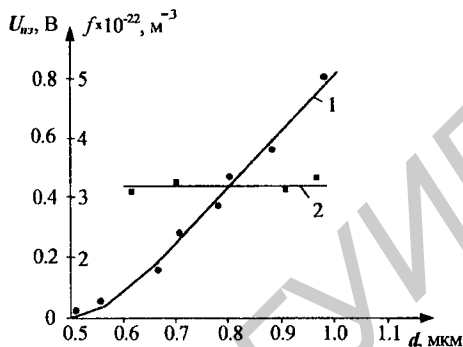
Описываемый метод контроля распределения плотности заряда по толщине диэлектрической пленки основан на создании в диэлектрической пленке клина травления. Показано, что результаты измерения напряжения плоских зон  $U_{из}$  при различных толщинах  $d$  диэлектрика дают возможность установить зависимость объемной плотности заряда  $f$  от  $d$ , что позволяет выяснить физическую природу зарядов диэлектрического слоя и характер их распределения по толщине диэлектрика в зависимости от технологических условий обработки (рисунок 2). Метод позволяет повысить точность контроля плотности встроен-



ного электрического заряда диэлектрических пленок до  $10^{22} \text{ м}^{-3}$ .



**Рисунок 1** – Расчетная зависимость реальной плотности дефектов  $D$  в диэлектрике от объема выборки  $N$  и количества бракованных TC площадью  $S_{TC}$



**Рисунок 2** – Распределение напряжения плоских зон  $U_{пз}$  (кривая 1) и объемной плотности заряда  $f$  (зависимость 2) по толщине диэлектрика

Для решения другой не менее актуальной проблемы надежности приборов микроэлектроники – контроля стабильности зарядов диэлектрических слоев – известный метод термополевых испытаний предложено дополнить комплексным анализом высокочастотных вольт-фарядных характеристик, при этом величина заряда в окисле определяется по величине смещения измеренной вольт-фарядной характеристики вдоль оси напряжения относительно идеальной характеристики.

На основании разработанных автором методов контроля зарядовых характеристик диэлектриков создан автоматизированный комплекс для измерения C-V-характеристик МОП-структур,  $p$ - $n$ -переходов и структур с барьером Шоттки на базе системы HP4061A, многозондового манипулятора и аппаратно-программного продукта, используемый в условиях серийного производства на ОАО «ИНТЕГРАЛ».

В третьей главе диссертации приведены результаты исследований диэлектрических слоев (подзатворный окисел МОП-структуры, пассивация) с использованием целого ряда специальных тестовых структур, в основу которых положен метод пооперационного разделения дефектности технологического процесса изготовления ИМС. При таком подходе каждый тип структур отвечает за оценку качества проведения строго определенных операций, что значительно облегчает анализ отказов. Анализ выхода годных  $P_i$  ИМС на  $i$ -й операции и выход годных  $P$  по технологическому маршруту в целом в зависимости

от выхода годных  $X_i$  тестовых структур на каждой  $i$ -й операции осуществляется с использованием выражений:

$$P_i = x_i^b \cdot \left( 1 \pm \frac{t}{\sqrt{M}} \cdot \sqrt{\frac{1-x_i}{x_i}} \right)^b, \quad (1)$$

$$P = \prod_{i=1}^m P_i = \prod_{i=1}^m x_i^b \left( 1 \pm \frac{t}{\sqrt{M}} \cdot \sqrt{\frac{1-x_i}{x_i}} \right)^b, \quad (2)$$

где  $b$  – отношение числа элементов в ТС к числу элементов в ИМС;

$M$  – количество измерений;

$t$  – коэффициент Стьюдента, определяемый доверительной вероятностью;

$m$  – число независимых параметров, определяющих выход ИМС.

На основе статистического анализа результатов оценки качества разработаны требования к составу элементов тестового контроля для биполярных и МОП ИС, расположенных на дорожках скрайбирования в целях экономии полезной площади пластин.

Разработаны для использования в стандартных автоматизированных измерительных системах (АИС) конструкции специализированных тестовых модулей (ТМ), содержащие тестовые структуры, позволяющие получить расширенную информацию об электрических, физических, геометрических и других параметрах ИМС, отражающих качество исследуемого технологического процесса. В состав ТМ предложено ввести два типа ТС: «параметрические» (транзисторы различной конфигурации, диоды, конденсаторы, резисторы, ячейки памяти и др.) и «статистические» (продолжительные цепочки контактов к различным слоям и полупроводниковым областям, цепочки для определения обрывов протяженных шин межсоединений, утечек и замыканий между различными слоями).

Разработанное программное обеспечение для АИС «АИК Тест-2» позволяет по результатам измерений «параметрических» ТС определить воспроизводимость контролируемых параметров по отдельной пластине, по партии пластин, по двум и более партиям за заданный промежуток времени (смена, неделя, месяц, квартал), а использование методов корреляционного анализа позволяет устанавливать диапазоны оптимальных значений параметров, существенным образом влияющих на выход годных ИМС.

Приведены результаты исследования качества подзатворного диэлектрика с использованием разработанного метода времязависимого пробоя, основанного на статистическом измерении величины заряда пробоя диэлектрического слоя на выборке тестовых МОП-конденсаторов.

Установлена зависимость зарядовых свойств диэлектрических слоев, сформированных на различных типах технологического оборудования, от различий в структуре диэлектриков и наличием ионных дефектов в них.

Работоспособность разработанных методов и средств в серийном производстве проверена на примерах изготовления ИМС различного вида. Так, анализ качества изготовления биполярной ИМС серии IZ1082 позволил установить распределение выхода годных кристаллов ИМС на основных блоках операций по различным видам дефектов, в том числе: утечка переходов эмиттер–коллектор – 94,3 %; обрыв шин Al 2 – 96,2 %; «неконтакт» Al 2–Al 1 – 96,5 %; «закоротки» шин Al 1–Al 2 – 97,5 %; обрыв шин Al 1 – 98,5 %. Анализ качества технологии изготовления субмикронной КМОП ИМС ОЗУ емкостью 72 кбит серии 1642РГ1РБМ позволил установить распределение выхода годных кристаллов ИМС на основных блоках операций по видам дефектов следующим образом: «закоротки» шин Al 2–Al 2 – 79,4 %; «закоротки» шин Al 1–Al 1 – 82,0 %; «неконтакт» Al 2–Al 1 – 92,7 %; обрыв шин Al 2 – 94,6 %; обрыв шин Al 1 – 96,5 %; «закоротки» шин Al 2–Al 1 – 97,5 %. Эта информация послужила основанием для разработки и последующей реализации в субмикронном производстве комплекса соответствующих технологических мероприятий по повышению процента выхода годных микросхем.

Разработанная система тестового контроля внедрена в серийное производство ОАО «ИНТЕГРАЛ» на всех изготавливаемых ИМС.

В четвертой главе диссертации приведены результаты выполненных автором исследований тонкопленочных токопроводящих систем (ТТС) с барьерными слоями толщиной 7–10 нм на основе кремния. Полученные экспериментальные данные с использованием разработанной методики их обработки показали, что рекомендованное понижение температуры нанесения барьерного слоя, обеспечивающее образование гидрогенизированного аморфного кремния, позволяет получать максимальные значения энергии активации электромиграции (1,09 эВ). Показано, что этот положительный эффект объясняется дополнительной пассивацией межзеренных границ металлической пленки на границе с барьерным слоем водородом, выделяющимся при взаимодействии алюминия с гидрогенизированным аморфным кремнием.

Однако для тестовых структур (ТС) с развитым топологическим рельефом, характерным для субмикронных ИМС (рисунок 3), достигнутые значения энергий активации составляют всего 0,7 эВ, что недостаточно для обеспечения качества изготавливаемых ИМС. На основе анализа конструктивных особенностей ИМС сделан вывод о необходимости планаризации поверхности таких структур, в частности, с помощью полиимидов (ПИ).

Термогравиметрические исследования процессов формирования и межфазного взаимодействия пленок ПИ с контактирующими слоями, проведенные

в ходе выполнения работы, показали, что характер межфазного взаимодействия ПИ с контактирующими слоями зависит от условий термообработки и влияет как на адгезию в многослойной структуре, так и на ее устойчивость к электромиграции. Максимальная адгезия ПИ к металлизированной подложке достигается за счет образования химической связи пленки с подложкой в процессе ее формирования при температуре выше 250 °С. Адгезия сплавов алюминия к межуровневой полиимидной изоляции также обеспечивается за счет образования химической связи пленки с подложкой, достигаемой гидролизом поверхностного слоя ПИ в щелочной среде. На основе анализа эффектов взаимодействия ПИ с алюминием рекомендовано для повышения надежности системы металлизации проводить формирование омических контактов в окислительной атмосфере (рисунок 4). Это приводит к окислению межзеренных границ металлической пленки, что повышает ее устойчивость к электромиграции. Достигнутые значения энергии активации электромиграции систем металлизации субмикронных ИМС, изготовленных с использованием ПИ, составляют приемлемую величину 1,07 эВ.

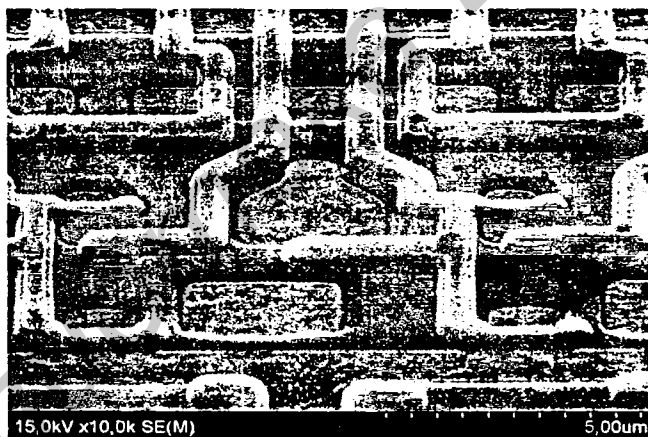
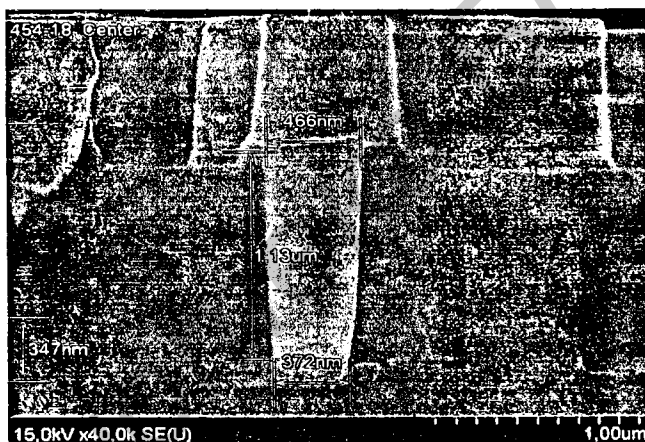


Рисунок 3 – Поверхность субмикронных ИМС с развитым топологическим рельефом

Результаты исследования влияния термоциклической обработки системы металлизации на ее электрофизические характеристики позволили определить оптимальные режимы термоциклирования ( $T_1 = 450\text{--}550$  °С,  $T_2 = 180\text{--}230$  °С,  $N = 5\text{--}20$  циклов), обеспечивающие эффективное подавление роста микронеоднородностей (бугорков) алюминиевой пленки и требуемые электрофизические характеристики системы металлизации. Показано, что полученный эффект объ-

ясняется увеличением количества центров кристаллизации металла и формированием мелкокристаллической структуры за счет постоянного перераспределения механических напряжений в структуре и возникновения новых центров кристаллизации вследствие наличия в составе металлической пленки ее оксидов. На рисунке 5, а приведено электронно-микроскопическое изображение поверхности пленки сплава алюминия с 1 % кремния после стандартной термоциклической обработки, а на рисунке 5, б – после предложенной термоциклической обработки. Их сравнение показывает, что использование термоциклирования позволяет уменьшить размеры бугорков с  $\sim 0,5$  до  $\sim 0,15$  мкм. При типичной толщине межуровневого диэлектрика  $0,5 - 0,6$  мкм такие размеры поверхностных дефектов уже незначительны вне зависимости от их плотности. В результате напряжение пробоя межуровневого диэлектрика возрастает на  $100-150$  В.



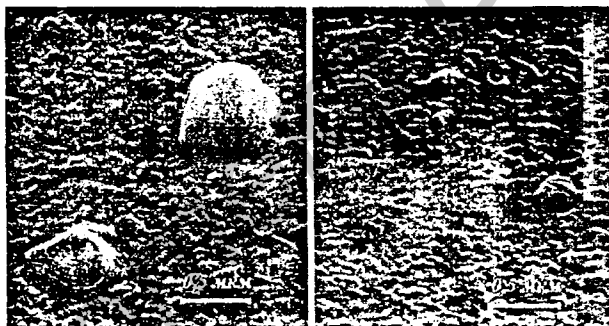
**Рисунок 4 – Контакт к активной области с использованием гидрогенизированного аморфного кремния**

Представленные в главе 4 результаты позволили сформулировать следующие рекомендации, обеспечивающие повышение качества токопроводящих систем.

Понижение температуры операции нанесения барьерного слоя, обеспечивающее образование гидрогенизированного аморфного кремния и позволяет получать максимальные значения энергии активации электромиграции. Положительный эффект достигается за счет дополнительной пассивации межзеренных границ металлической пленки на границе с барьерным слоем водородом, выделяющимся при взаимодействии алюминия с гидрогенизированным аморф-

ным кремнием. Формирование барьерного слоя непосредственно перед напылением металлической пленки является предпочтительным по сравнению с нанесением перед формированием контактных окон, что связано с частичной потерей его свойств в процессе проведения операций фотолитографии. Эти закономерности справедливы также для структур с развитым топологическим рельефом, характерным для современных субмикронных ИМС.

Использование полиимида в качестве межуровневой диэлектрической изоляции позволяет сгладить топологический микрорельеф ИМС и обеспечить неразрывность дорожек металлизации, что заметно повышает ее надежность. Поскольку взаимодействие полиамидокислот (исходного материала при получении ПИ) с алюминием протекает с образованием солей на границе их раздела и не пассивирует межзеренные границы металла, то для улучшения параметров рекомендовано проводить формирование омических контактов в окислительной атмосфере. Показано, что это приводит к окислению межзеренных границ металлической пленки, что повышает ее устойчивость к электромиграции.



а

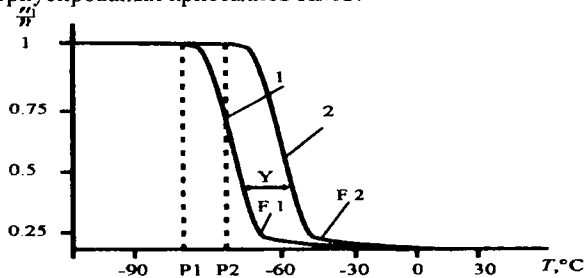
б

**Рисунок 5 – Поверхность пленки первого уровня Al металлизации после стандартной термообработки (а) и после термоциклической обработки (б)**

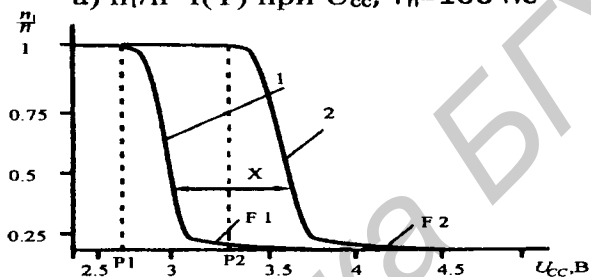
Рост бугорков алюминиевой пленки эффективно подавляется при циклической термообработке, что позволяет получать мелкокристаллические структуры. При этом кристаллизация пленки и формирование омических контактов протекает с образованием бугорков минимального размера.

В пятой главе описаны разработанные новые методы отбраковки ИМС со скрытыми дефектами. В основу методов отбраковки ИМС положена гипотеза, согласно которой наличие любых скрытых дефектов ИМС приводит к изменению допустимых границ области функционирования (ОФ) при изменении внешних воздействий (дозы облучения, температуры, напряжения питания и т.д.). Анализируя характер изменения ОФ при варьировании указанных внеш-

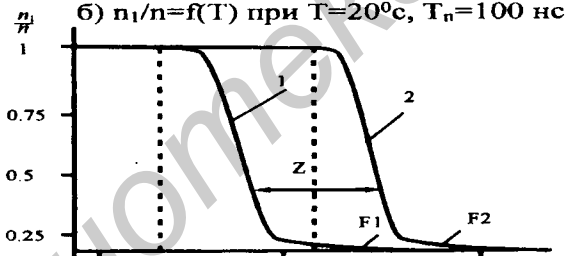
них воздействий, можно определить наличие и тип дефектов как корпусированных, так и некорпусированных кристаллов ИМС.



а)  $n_1/n=f(T)$  при  $U_{cc}, T_n=100$  нс



б)  $n_1/n=f(T)$  при  $T=20^{\circ}\text{C}, T_n=100$  нс



в)  $n_1/n=f(T)$  при  $U_{cc}=5\text{В}, T=20^{\circ}\text{C}, T_n=100$  нс;

1-бездефектная ИМС, 2-дефектная ИМС

**Рисунок 6 – Зависимости области функционирования инвертора на ТТЛШ ИМС от внешних воздействий, характеризующиеся проявлением скрытых дефектов**

Дефект в рамках этой гипотезы рассматривается как паразитный резистор, включенный случайным образом между различными элементами ИМС. Характеристики резистора определяются величиной паразитных утечек тока между этими элементами. Оценку степени влияния различных утечек на выходные параметры ИМС можно получить из выражения

$$K_{ij} = \frac{\Delta M(\Delta R_{ij})}{\Delta R_{ij}} \cdot \frac{R_{ij}}{N(R_{ij})}, \quad (3)$$

где  $K_{ij}$  – коэффициент чувствительности;

$R_{ij}$  – эквивалентный резистор канала утечки тока между  $i$ -м и  $j$ -м узлами схемы;

$\Delta M(\Delta R_{ij})$  – величина приращения параметра  $M(R_{ij})$  обусловленного изменением  $R_{ij}$  на величину  $\Delta R_{ij}$ .

На рисунке 6 представлены экспериментально полученные зависимости отношения  $n_1/n$  ( $n_1$  – количество отказов (для представленного здесь эксперимента  $n_1 = 1$ ),  $n$  – количество испытаний) от температуры испытаний  $T$ , напряжения питания  $U_{CC}$  и длительности входного сигнала  $t_n$  для бездефектного ( $F_1$ ) и дефектного ( $F_2$ ) инвертора на ТТЛШ ИМС.

Из приведенных зависимостей видно, что смещения ОФ линейно коррелируют с дефектностью ИМС и это свойство используется при испытаниях большинства ИМС в серийном производстве ОАО «ИНТЕГРАЛ».

В приложениях приведены документы об использовании результатов диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

Применительно к задаче совершенствования технологии производства субмикронных интегральных микросхем предложены принципы формирования состава и конструкций встраиваемых полупроводниковых тестовых структур (ТС), разработан комплекс информационно-параметрических методов определения закономерностей формирования структуры и свойств функциональных слоев для обеспечения заданных эксплуатационных параметров субмикронных микросхем на этапах их разработки и серийного изготовления.

1. Разработан метод анализа микронеоднородностей подзатворного диэлектрика субмикронных ИМС, основанный на статистическом измерении параметров времязависимого пробоя тестовых МОП-конденсаторов в режиме токовой развертки, что позволяет проводить контроль на тестовых структурах небольшой площади ( $\sim 100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>), которые располагаются на дорожках скрайбирования товарных пластин. На основе закона распределения Пуассона при задании необходимого уровня доверительной вероятности определяется критерий устойчивости подзатворного диэлектрика к электрическому пробоям по допустимому количеству бракованных тестовых структур в измеренной выборке. Разработанная методика обеспечивает контроль дефектности тонких подзатворных диэлектриков толщиной 5–100 нм и соответствует стандарту JESD35-A



[1–А, 2–А, 18–А, 24–А, 25–А].

2. Показано, что распределение плотности заряда по толщине диэлектрической пленки и его категорию оценивают на основе создания в диэлектрической пленке ступенчатого клина травления с последующим формированием тестовых МДП-структур. Результаты экспериментов по исследованию зарядовых характеристик различных диэлектриков с использованием разработанной методики позволили совершенствовать технологические процессы создания диэлектрических слоев и обеспечить требуемые показатели их надежности [1–А, 2–А, 18–А, 25–А].

3. В основу разработки ряда ТС положен метод пооперационного разделения дефектности ИМС. При этом каждый вид ТС обеспечивает оценку качества проведения строго определенных операций, что значительно облегчает анализ отказов. С учетом расположения ТС на скрайберных дорожках (для экономии площади кристалла) метод позволяет осуществлять автоматизированный сбор и обработку данных измерений и прогнозировать выход годных ИМС в зависимости от степени интеграции [1–А, 2–А, 18–А, 24–А].

4. Использование гидрогенизированного аморфного кремния в качестве барьерного слоя системы металлизации ИМС со слабо развитым топологическим микрорельефом позволяет достичь максимальных значений энергии активации электромиграции вплоть до 1,09 эВ. Положительный эффект достигается за счет дополнительной пассивации межзеренных границ металлической пленки на границе с барьерным слоем водородом, выделяющимся при взаимодействии алюминия с гидрогенизированным аморфным кремнием. Однако для структур с сильно развитым топологическим микрорельефом для повышения долговечности необходима планаризация поверхности структуры. Разработанная технология формирования межуровневого диэлектрика на основе полиимида обеспечивает получение необходимой степени планаризации. Однако с учетом межфазного взаимодействия на границе металл–полиимид повышение энергии активации электромиграции до значений 1,07 эВ достигается за счет проведения термообработки системы металлизации в окислительной атмосфере [2–А, 19–А, 28–А, 29–А].

5. Рост бугорков металлической пленки в составе системы металлизации эффективно подавляется при термоциклической обработке. Многократное повторение циклов нагрев–охлаждение приводит к увеличению количества центров кристаллизации металла, что позволяет получать мелкокристаллические структуры. Периодические колебания температуры в пределах от  $T_1 = 450\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $T_2 = 180\text{--}230\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводят к постоянному перераспределению механических напряжений в структуре. При этом с каждым новым циклом прекращается рост зерен металла, возникших при проведении предыдущего цикла, и начинается рост новых зерен. Поскольку длительность каждого цикла мала, мак-

симальный размер образующихся бугорков не превышает 0,1–0,2 мкм. Эти меры обеспечивают снижение дефектности межуровневого диэлектрика и повышение напряжения его пробоя на 100–150 В [10–А, 16–А, 31–А – 33–А, 35–А].

6. Наличие скрытых дефектов приводит к изменению границ области функционирования ИМС при внешних воздействиях. Предложен метод математической обработки результатов форсированных испытаний интегральных КМОП ИМС, разработанный с использованием результатов форсированных испытаний тестовых структур и корпусированных микросхем, и статистического моделирования пространственно-временной эволюции дефектов. Анализ характера изменения ОФ при варьировании внешних воздействий позволяет определить наличие дефектов внутренних элементов ИМС и определить критерии выявления потенциально ненадежных микросхем [1–А – 14–А, 17–А, 19–А, 20–А, 26–А, 27–А, 30–А].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Полученные результаты формируют теоретическую и практическую основу для повышения управляемости технологических процессов серийного производства субмикронных ИМС. Разработанная в рамках диссертационной работы система тестового контроля внедрена в серийное производство ОАО «ИНТЕГРАЛ».

2. Обеспечение требуемых характеристик вновь разрабатываемых ИМС достигается с помощью созданных специальных тестовых структур, а также с использованием разработанных методов прогнозирования и моделирования качественных характеристик ИМС, реализованных в автоматизированной системе «АИК Тест-2».

3. Контроль зарядовых характеристик диэлектриков в соответствии с разработанными методиками реализован в автоматизированном измерительном комплексе С–V-характеристик на базе системы HP4061A, а также используется на ОАО «ИНТЕГРАЛ» в условиях серийного производства ИМС.

4. Исследования, посвященные оптимизации конструкций и технологии изготовления многоуровневой системы металлизации субмикронных ИМС, позволяют повысить работоспособность приборов.

5. Результаты НИР внедрены в учебный процесс.

6. Экономический эффект от внедрения производственно-технических мероприятий составляет 87,3 млн рублей.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монографии

1–А. Белоус, А.И. Тестовые структуры в системах управления качеством интегральных микросхем / А.И. Белоус, А.В. Емельянов, Г.Г. Чигирь. – Минск, Интегралполиграф, 2008. – 208 с.

2–А. Белоус, А.И. Методы повышения надёжности микросхем на основе тестовых структур / А.И. Белоус, А.С. Турцевич, Г.Г. Чигирь, А.В. Емельянов. – Гомель, ГГУ им. Франциска Скорины. – 2011. – 239 с.

### Статьи в рецензируемых научных журналах

3–А. Горлов, М.И. Использование уровня шумов для контроля полупроводниковых изделий при термоциклировании / М.И. Горлов, Д.Ю. Смирнов, Ю.Е. Сегал, А.В. Емельянов // Известия вузов. Электроника. – 2005. – № 6. – С. 89–92.

4–А. Горлов, М.И. Технологические методы повышения надёжности интегральных схем / М.И. Горлов, А.В. Строгонов, А.В. Емельянов, В.И. Плебанович // Машиностроитель. – 2005. – № 9. – С. 59–62.

5–А. Горлов, М.И. Отбраковочные испытания как средство повышения надёжности партий ИС / М.И. Горлов, А.В. Строгонов, А.Б. Арсентьев, А.В. Емельянов, В.И. Плебанович // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 1 (7). – С. 70–75.

6–А. Боровиков, С.М. Выбор имитационных факторов при прогнозировании отказов биполярных транзисторов / С.М. Боровиков, А.И. Бересневич, А.В. Емельянов // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2006. – № 3. – С. 109–112.

7–А. Боровиков, С.М. Метод прогнозирования надёжности изделий электронной техники / С.М. Боровиков, А.В. Емельянов, А.А. Хмыль, А.И. Бересневич // Доклады НАН Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 4. – С. 105–109.

8–А. Горлов, М.И. Конструктивно-технологические особенности проектирования радиационно-стойких интегральных схем операционных усилителей / М.И. Горлов, А.В. Емельянов, В.И. Плебанович, В.Ю. Москалев // Компоненты и технологии. – 2007. – № 2. – С. 158–159.

9–А. Емельянов, А.В. Физические пределы вертикального масштабирования биполярных N-P-N-транзисторов / А.В. Емельянов, В.А. Пилипенко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки, физика. – 2007. – № 9. – С. 75–78.

10–А. Сенько, С.Ф. Влияние режимов формирования полиимидной пленки на электрофизические характеристики многоуровневой металлизации субмикронных БИС / С.Ф. Сенько, А.В. Емельянов // Доклады БГУИР. – 2007. – № 2 (18). – С. 85–94.

11–А. Боровиков, С.М. Физико-статистические модели деградации функциональных параметров изделий электронной техники / С.М. Боровиков, А.В. Шалак, А.И. Бересневич, А.В. Емельянов // Доклады НАН Беларуси. – Т. 51, № 6. – 2007. – С. 105–109.

12–А. Belous A. Model for forecasting good yield of microcircuit chips by results of test control / A. Belous, A. Emelyanov, V. Syakersky, R. Chyhir // Przegląd Elektrotechniczny. – 2008. – № 3. – P. 20–23.

13–А. Емельянов, А.В. Влияние режимов формирования барьерного слоя на надежность систем металлизации ИС / А.В. Емельянов, В.А. Емельянов, С.Ф. Сенько // Микроэлектроника. – 2011. – С. 344–350.

#### **Статьи в сборниках научных трудов**

14–А. Горлов, М.И. Проектирование радиационно-стойких интегральных операционных усилителей / М.И. Горлов, А.В. Емельянов, В.И. Плебанович, В.Ю. Москалев // Твердотельная электроника и микроэлектроника: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж. гос. техн. ун-та. – Воронеж, 2006. – С. 185–189.

15–А. Емельянов, А.В. Надежность металлизации интегральных схем с барьерными слоями гидрогенизированного аморфного кремния / А.В. Емельянов // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апр. 2007 г. В 3 т. – Т. 2. – С. 105–108.

16–А. Емельянов, А.В. Влияние термоциклирования на дефектность металлизации интегральных схем / А.В. Емельянов // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апр. 2007 г. В 3 т. – Т. 2. – С. 169–172.

17–А. Горлов, М.И. Управляемость и стабильность технологического процесса производства полупроводниковых изделий и радиоэлектронной аппаратуры / М.И. Горлов, А.В. Емельянов, М.С. Котова, В.И. Плебанович // Твердотельная электроника и микроэлектроника: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж. гос. техн. ун-та. – Воронеж, 2007. – С. 164–169.

## Статьи в сборниках материалов научных конференций

18–А. Емельянов, А.В. Полупроводниковая электроника – основа развития современного информационного общества / А.В. Емельянов // Великие преобразователи естествознания: Жюзе Алферов: XX юбилейные международные чтения, Минск, 24–25 нояб. 2004 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2004. – С. 72–75.

19–А. Ухов, В.А. Анализ отказов изделий электроники методом ОЖЕ-спектроскопии / В.А. Ухов, А.И. Белоус, А.В. Емельянов, В.С. Сякерский // Технические средства защиты информации: материалы докл. V Белорус.-российск. НТК. 28 40мая – 01 июня 2007 г., Минск. – Минск, 2007. – С. 76–77.

20–А. Емельянов, А.В. Применение ионного распыления для контроля глубины нарушенного слоя кремниевых пластин / А.В. Емельянов, В.С. Сякерский, В.А. Ухов, Г.Г. Чигирь // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 7-й междунар. конф. Минск, 26–28 сент. 2007 г. – Минск, 2007. – С. 364–365.

21–А. Белоус, А.И. Моделирование процента выхода годных микросхем в серийном производстве / А.И. Белоус, А.В. Емельянов, В.С. Сякерский, Г.Г. Чигирь // Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития: материалы 2-й междунар. науч. конф., Харьков-Туапсе, 2–5 окт. 2007 г. – Харьков, 2007. – С. 148–149.

22–А. Emelyanov, V. Evolution of VLSIs Materials and Packaging Technology Correlated with Progress of Thin Films Deposition and Outlets Bonding Methods / V. Emelyanov, V. Baranov, A. Emelyanov // ESTC-2008: II Electronics System-Integration Technology Conference, Greenwich, London, UK, 01–04 sept. 2008. – London, 2008. – V. 2. – P. 779–783.

## Тезисы докладов на научных конференциях

23–А.Белоус, А.И. Экспрессный метод прогнозирования надежности МОП-микросхем / А.И. Белоус, А.В. Емельянов, В.С. Сякерский, Г.Г. Чигирь // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ): тр. VIII междунар. НПК, 21–25 мая 2007 г., Одесса, Украина. Одесса, 2007. – С. 281.

24–А. Belous, A. Model for forecasting good yield of microcircuit chips by results of test control / A. Belous, A. Emelyanov, V. Syakersky, R. Chyhir // New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation: Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Conf. Zakopane, Poland, 12–15 June 2007. – Zakopane, 2007. – P. 22.

25–А. Belous, A. Analysis of gate spottiness in submicron IC's / A. Belous, A. Emelyanov, V. Syakersky, R. Chyhir // New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation: Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Conf. Zakopane, Poland, 12–15 June 2007. – Zakopane, 2007. – P. 23.

## Патенты

26–А. Способ обеспечения надежности интегральных схем в процессе серийного производства: пат. № 2284042 Рос. Федерации, МПК G 01 R 31/28, H 01 L 21/66 / М.И. Горлов, А.В. Емельянов; заявитель Воронежский гос. техн. ун-т. – № 2005112479/28 ; заявл: 25.04.2005; опубл. 20.09.2006 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2006. – № 26. – С. 230.

27–А. Способ отбраковки потенциально ненадежных интегральных схем: пат. № 2284538 Рос. Федерации, МПК G 01 R 31/26 / М.И. Горлов, А.В. Емельянов, В.Ю. Москалев; заявитель Воронежский гос. техн. ун-т. – № 2005105363/28 ; заявл: 24.02.2005; опубл. 27.09.2006 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2006. – № 27. – С. 189.

28–А. Способ изготовления системы металлизации кремниевых полупроводниковых приборов: пат. 9585 Респ. Беларусь, МПК H 01 L 21/02, H 01 L 23/48 / А.В. Емельянов ; заявитель Производ. РУП «Завод полупроводниковых приборов». – № а 20050436; заявл: 04.05.2005; опубл. 30.08.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 4. – С. 168.

29–А. Пленочная токопроводящая система для кремниевых полупроводниковых приборов: пат. 9889 Респ. Беларусь, МПК H 01 L 21/00, H 01 L 21/02, H 01 L 23/48 / А.В. Емельянов ; заявитель Производ. РУП «Завод полупроводниковых приборов». – № а 20050435; заявл: 04.05.2005; опубл. 30.10.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2007 – № 5. – С. 145.

30–А. Способ сравнительной оценки стойкости партий биполярных транзисторов к электростатическому разряду: пат. № 2317560 Рос. Федерации, МПК G 01 R 31/26 / М.И. Горлов, Н.Н. Козьяков, А.В. Емельянов, Л.В. Лягушенко; заявитель Воронежский гос. техн. ун-т. – № 2006122750/28 ; заявл: 28.06.2006; опубл. 20.02.2008 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2008. – № 5. – С. 697.

31–А. Способ изготовления полупроводникового прибора: пат. 11168 Респ. Беларусь, МПК H 01 L 21/02 / В.А. Емельянов, А.В. Емельянов, С.Ф. Сенько; заявитель Производ. РУП «Завод полупроводниковых приборов». – № а 20070104; заявл: 01.02.2007; опубл. 30.10.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 143.

32–А. Устройство для контроля качества поверхности изделий: пат. 14194 Респ. Беларусь МПК G 01 B 9/00, G 01 B 11/30, G 01 N 21/88, H 01 L 21/66 / В.А. Емельянов, А.В. Емельянов ; заявитель ОАО «ИНТЕГРАЛ». – № а 20090506; заявл: 09.04.2009; опубл. 30.03.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 120.

33–А. Способ контроля качества поверхности изделий: пат. 14195 Респ. Беларусь, МПК G 01 B 11/30, G 01 N 21/88, H 01 L 21/66 / В.А. Емельянов, А.В. Емельянов ; заявитель ОАО «ИНТЕГРАЛ». – № а 20090593; заявл: 21.04.2009; опубл. 30.03.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 121.

34–А. Способ формирования геттерирующего покрытия для полупроводниковых кремниевых пластин: пат. 15321 Респ. Беларусь, МПК H 01 L 21/322, C 23 C 16/22 / А.В. Емельянов, В.А. Емельянов, А.И. Гордиенко, А.Н. Петлицкий, С.Ф. Сенько ; заявитель Физ.-техн. институт НАН Беларуси. – № а 20100953; заявл: 23.06.2010; опубл. 28.02.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1. – С. – 171.

35–А. Способ изготовления системы металлизации полупроводниковых приборов: пат. 15742 Респ. Беларусь, МПК H 01 L 21/28 / В.А. Емельянов, А.В. Емельянов ; заявитель ОАО «ИНТЕГРАЛ». – № а 20100738; заявл: 14.05.2010; опубл. 30.04.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 170.

36–А. Состав для удаления фоторезиста при изготовлении системы металлизации полупроводниковых приборов: пат. 15743 Респ. Беларусь, МПК H 01 L 21/28 / В.А. Емельянов, А.В. Емельянов ; заявитель ОАО «ИНТЕГРАЛ». – № а 20100739; заявл: 14.05.2010; опубл. 30.04.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 170.

37–А. Геттерирующее покрытие для полупроводниковых кремниевых пластин: пат. 15745 Респ. Беларусь, МПК H 01 L 21/322 / А.В. Емельянов, В.А. Емельянов, А.И. Гордиенко, А.Н. Петлицкий, С.Ф. Сенько ; заявитель Физ.-техн. институт НАН Беларуси. – № а 20100954; заявл: 23.06.2010; опубл. 30.04.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 175.



## РЭЗІЮМЭ

Емельянаў Антон Віктаравіч

### **Інфармацыйна-параметрычныя метады ўдасканалення тэхналогіі вытворчасці субмікронных інтэгральных мікрасхем з ужываннем тэставых структур**

**Ключавыя словы:** інтэгральныя мікрасхемы (ІМС), тэставыя структуры, паказчыкі надзейнасці, прагназаванне адказаў, дэфекты, дыэлектрычныя слаі, металізацыя.

**Мэта работы:** распрацоўка канструкцый і тэхналагічных працэсаў стварэння тэставых паўправадніковых структур, інфармацыйна-параметрычных метадаў і сродкаў вызначэння заканамернасцяў фармавання структуры і ўласцівасцяў функцыянальных пластоў і зададзеных эксплуатацыйных параметраў субмікронных мікрасхем на этапах іх выраба ва ўмовах серыйнай вытворчасці.

**Метады даследавання:** статыстычны аналіз эксперыментальных вымярэнняў велічын, вызначаючых трываласць надзейнасці ІМС, эліпсаметрычныя, электронна-мікраскапічныя, Ожэ-, тэрмагравіметрычныя і другія метады даследавання плёначных структур.

**Асноўныя вынікі:** распрацаваны метады:

- аналізу мікранааднароднасцей падзатворнага дыэлектрыка субмікронных ІМС з выкарыстаннем вынікаў статыстычнага вымярэння залежных ад часу параметраў прабою тэставых МОП-кандэнсатараў, што забяспечвае кантроль дэфектнасці дыэлектрыкаў таўшчыняю 5–100 нм;

- вызначэнне шчыльнасці зараду па таўшчыні дыэлектрычнай плёнкі з дапамогай стварэння ў ёй ступеньчатага кліну траўлення з наступным фарміраваннем тэставых МДП-структур, што дазваляе аптымізаваць тэхналогію і забяспечыць зададзеныя эксплуатацыйныя параметры дыэлектрычных слаёў;

- паперацыйнага раздзялення дэфектнасці ІМС з выкарыстаннем тэставых структур, што забяспечвае ацэнку якасці асобных аперацый.

Паказана, што ўзрастанне мікранааднароднасцей металічнай плёнкі ў складзе сістэмы металізацыі эфектыўна прыгнятаецца пры тэрмацыклічнай апрацоўцы, што забяспечвае паніжэнне дэфектнасці міжзруўневага дыэлектрыка і павелічэнне напругі яго прабою на 100–150 В.

Статыстычнае мадэляванне прастора-часовай эвалюцыі ўтоеных дэфектаў дазваляе вызначыць межы вобласці функцыянавання ІМС пры знешніх уздзеяннях.

Ступень выкарыстання: распрацаваныя метады і сродкі павышэння і кантролю трываласці ІМС выкарыстоўваюцца ў серыйнай вытворчасці на ААТ «ІНТЭГРАЛ».

Вобласць ужывання: тэхналогія вырабу ІМС



## РЕЗЮМЕ

Емельянов Антон Викторович

### **Информационно-параметрические методы совершенствования технологии производства субмикронных интегральных микросхем с применением тестовых структур**

**Ключевые слова:** интегральные микросхемы (ИМС), тестовые структуры, показатели надежности, прогнозирование отказов, дефекты, диэлектрические слои, металлизация.

**Цель работы:** разработка конструкций и технологических процессов создания тестовых полупроводниковых структур, информационно-параметрических методов и средств определения закономерностей формирования структуры и свойств функциональных слоев и заданных эксплуатационных параметров субмикронных микросхем на этапах их изготовления в условиях серийного производства.

**Методы исследования:** статистический анализ экспериментальных измерений величин, определяющих показатели надежности ИМС, эллипсометрические, электронно-микроскопические, Оже-, термогравиметрические и другие методы исследования пленочных структур.

**Основные результаты:** разработаны методы:

- анализа микронеоднородностей подзатворного диэлектрика субмикронных ИМС с использованием результатов статистического измерения параметров времязависимого пробоя тестовых МОП-конденсаторов, что обеспечивает контроль дефектности диэлектриков толщиной 5–100 нм;
- определения плотности заряда по толщине диэлектрической пленки посредством создания в ней ступенчатого клина травления с последующим формированием тестовых МДП-структур, что позволяет совершенствовать технологию и обеспечить заданные эксплуатационные параметры диэлектрических слоев;
- пооперационного разделения дефектности ИМС с использованием тестовых структур, что обеспечивает оценку качества отдельных операций.

Показано, что рост микронеоднородностей металлической пленки в составе системы металлизации эффективно подавляется при термоциклической обработке, что обеспечивает снижение дефектности межуровневого диэлектрика и повышение напряжения его пробоя на 100–150 В.

Статистическое моделирование пространственно-временной эволюции скрытых дефектов позволяет определить границы области функционирования ИМС при внешних воздействиях.

Степень использования: разработанные методы и средства повышения и контроля надежности ИМС используются в серийном производстве на ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Область применения: технология изготовления ИМС.

## SUMMARY

Anton Victorovich Ymel'yanov

### **Information-Parametric Methods of Production Technology of the Submicron Integrated microcircuits with Test Structure Application**

**Key words:** integrated microcircuits (IC), test structures, reliability index, rejects forecasting, defects, dielectric layers, metallization.

**Research purpose:** developing the design and technological processes of creating test semiconductor structures, information – parametric methods and means of determining correlation of forming structure and characteristics of the functional layers and the given operating parameters of submicron microcircuits in their manufacture stages under the conditions of mass production.

**Analysis methods:** statistical analysis of the experimental measurements of the values, determining indexes of the IC reliability, ellipsometrical, electron-microscopic, Auger, thermal gravimetric and other analysis methods of the film structures.

**The main results:** the methods have been elaborated:

- analysis of the microheterogeneities of the gate dielectric of the submicron ICs with application of the results of statistical measurement of parameters of time breakdown of the test MOS-capacitors, which ensures defect dielectric control with the thickness of 5–100 nm;

- determination of the charge density by the dielectric film thickness by means of creating the step etching wedge in it with the subsequent formation of the test MDP-structures, which makes it possible to optimize the technology and ensure the given operating parameters of the dielectric layers;

- post-operational separation of the IC defectness with application of the test structures, which ensures the quality assessment of the individual operations.

It is shown that the growth of the microheterogeneities of the metallic film in composition of the metallization system is efficiently suppressed under the thermal cyclic treatment, which ensures the defect reduction of the interlayer dielectric and enhancement of its breakdown voltage by 100–150 V.

The statistic simulation of the space-time evolution of the buried defects makes it possible to determine the margins of the IC functioning areas under the external influences.

Degree of application: The developed methods and means of enhancing IC reliability and its control are used in the mass production at the JSC “INTEGRAL”.

Sphere of application: technology of IC application.

*Научное издание*

**Емельянов Антон Викторович**

**ИНФОРМАЦИОННО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА  
СУБМИКРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР**

Специальность 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

|                                |   |                    |
|--------------------------------|---|--------------------|
| Подписано в печать 13.11.2012. | Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> . | Бумага офсетная.   |
| Гарнитура «Таймс».             | Отпечатано на ризографе.                    | Усл. печ. л. 1,63. |
| Уч.-изд. л. 1,4.               | Тираж 60 экз.                               | Заказ 562.         |

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6