

*На правах рукописи*

Коровкина Наталья Михайловна

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальность: 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2006

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –  
кандидат физико-математических наук, доцент Ильин В. А.

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук, проф. Дедков Г.В.  
кандидат технических наук Петров А.С.

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное предприятие  
«18 центральный научно-исследовательский институт»  
министерства обороны Российской Федерации

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Мошников В. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Совершенствование методов аналитической диагностики поверхности является актуальной задачей таких направлений как физика поверхностных явлений и электроника. Развитие данных методов приводит к решению фундаментальных и прикладных задач в микро- и наноэлектронике, связанных с характеристикой объектов по топологическим, морфологическим и электрофизическим параметрам.

Наиболее информативными методами решения этих задач являются растровая электронная микроскопия (РЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), электронная Оже- спектроскопия, сканирующая туннельная микроскопия, вторично-ионная масс-спектроскопия, спектроскопия и микроскопия на основе остросфокусированных ионных пучков. В основе данных методов лежит принцип зондового сканирования поверхности объектов и регистрации частиц, излучений, силовых и электростатических взаимодействий между зондом и исследуемой поверхностью. Отличие данных методов заключается в природе физических явлений и эффектов, возникающих при взаимодействии зонда с твердым телом.

Применительно к решению задач, связанных с измерением электрического потенциала и электрофизических параметров микроэлектронных структур с высокой степенью интеграции, требующих высокой латеральной локальности, возможно использование метода РЭМ, а в последнее время и метода АСМ в различных режимах работы.

Существующие на сегодняшний день стандартные методики РЭМ и АСМ не позволяют напрямую количественно оценить многие параметры наблюдаемых объектов без проведения дополнительной, весьма сложной, подготовки исследуемых объектов, создания тестовых структур и получения на них калибровочных зависимостей, интерпретации полученных результатов.

Особенности эксплуатации цифровых схем памяти в экстремальных условиях (ионизирующее излучение, высокие температуры, химически агрессивные среды, механические нагрузки) могут приводить к нарушению связей между отдельными функциональными областями интегральных микросхем (ИМС), что исключает возможность электрического тестирования данных устройств. При этом записанная информация в изделии может сохраняться. В связи с этим, весьма актуальной задачей является выявление возможностей современных средств неразрушающей диагностики кристаллов микросхем и разработка методики восстановления утерянной информации.

Другим важным аспектом исследования полупроводниковых приборов и устройств является наблюдение и осуществление локального контроля концентрации электрически активных примесей в широком диапазоне значений.

Настоящая работа направлена на исследование возможностей применения атомно-зондовых бесконтактных неразрушающих методик для восстановления утерянной информации микросхем памяти, определение концентрации электрически активных примесей в микро областях полупроводниковых приборов на основе созданной базы тестовых структур и разработку методических и аппаратных средств их реализации.

**Целью работы** являлось исследование возможностей методов атомно-силовой микроскопии для высоко локальных измерений топологических, электрических и электрофизических параметров объектов микроэлектроники.

В соответствии с указанной целью в работе решались следующие **задачи**:

- установление корреляции между выходным сигналом в микроскопии электростатических сил (ЭСМ) и значениями потенциала в методе зонда Кельвина (МЗК) в зависимости от величины напряжения, подаваемого на образец, содержащего эквипотенциальную поверхность, для кантилеверов с различным составом покрытия;
- определение методом АСМ работы выхода металлических, полупроводниковых и диэлектрических материалов, используемых для создания приборов микроэлектроники и микросистемной техники, полученных различными технологическими методами и проведение их сопоставительного анализа;
- разработка методики определения концентрации электрически активных примесей в полупроводниковых материалах, структурах и приборах на основе емкостных измерений в АСМ. Апробация метода на тестовых объектах и изделиях электронной техники;
- изготовление тестовых структур, включающих металлические и диэлектрические поверхности, для оценки чувствительности и локальности микроскопии электростатических сил и метода зонда Кельвина и оптимизации режима работы АСМ при реализации моды электростатических сил;
- сравнение аналитических возможностей методов электронно-зондовой и атомно-силовой микроскопии по пространственному разрешению и чувствительности при измерении электрического потенциала на диэлектрических поверхностях многослойных структур;
- разработка методики и проведение исследований логических состояний ячеек памяти различных классов интегральных микросхем без удаления пассивирующих покрытий с сохранением работоспособности изделий.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Впервые разработана методика и проведены исследования логических состояний ячеек памяти двух классов интегральных микросхем без удаления пассивирующих покрытий с сохранением работоспособности изделий. Новизна научно-технических решений защищена патентом РФ.
2. Предложена модель расчета концентрации легирующих примесей в полупроводниковых структурах, основанная на результатах высоко локальных измерений в методе сканирующей емкостной микроскопии (СЕМ). На серии тестовых структур с известными уровнями легирования доказана адекватность предложенной модели.
3. Экспериментально обоснованы преимущества метода атомно-силовой микроскопии по сравнению с электронно-зондовой микроскопией при измерении статического электрического потенциала на функциональных областях дискретных полупроводниковых приборах и интегральных микросхем, включающих слои металлов, полупроводников и диэлектриков с пространственным разрешением в нано- и микро- диапазонах.
4. Экспериментально установлено, что на зависимостях уровня выходного сигнала, регистрируемого АСМ при работе в электростатической моде, от расстоя-

ния в системе «зонд-образец» имеются максимумы, появление которых связано с ограничением амплитуды прогиба балки кантилевера, а их положение определяется разностью потенциалов между зондом и поверхностью исследуемого образца.

5. Экспериментально показано влияние толщины диэлектрического покрытия и расстояния в зазоре «зонд-образец» на значения чувствительности и локальности в микроскопии электростатических сил (ЭСМ) на поверхности гетерогенных объектов.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

1. На основе метода сканирующей емкостной микроскопии разработана методика определения уровней концентрации легирующих примесей. С помощью этой методики установлены значения концентраций электрически активных примесей в полупроводниковых структурах в диапазоне  $(10^{15}-10^{19}) \text{ см}^{-3}$  и локальностью (10-30) нм.

2. Методом зонда Кельвина установлена возможность определения логических состояний ячеек памяти EPROM и EEPROM интегральных микросхем без удаления пассивирующих покрытий с сохранением работоспособности изделий с чувствительностью ~100 мВ и локальностью (10-30) нм.

3. Для обеспечения возможности проведения количественных измерений поверхностного электрического потенциала на различных материалах и структурах электронной техники установлены корреляционные зависимости между выходными сигналами в методах электростатической микроскопии и зонда Кельвина.

4. Результаты работы использованы при выполнении:

§ научно-исследовательской работы («ЭЛ/ЦМИД-70»), выполненной по программе «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (подпрограмма 208.06 «Микро и наносистемная техника») в 2004-2005гг;

§ научно-исследовательской работы («Минога-А»), выполняемой в рамках государственного контракта № 25/14-6499/ЦМИД-118 (2005-2007гг).

5. Результаты работы использованы в ЗАО «Опто-Технологическая Лаборатория» и ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ, что подтверждается соответствующими актами.

6. По результатам исследований получен патент на полезную модель № 48107 Российской Федерации МПК Н 01L 21/66 А от 10.09.2005 г.

На защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Установлено соответствие между уровнем выходного сигнала и концентрацией электрически активных примесей в рамках модели плоского конденсатора при наблюдении полупроводниковых объектов методом сканирующей емкостной микроскопии.

2. Экспериментально установлено, что при исследовании ячеек памяти полупроводниковых интегральных микросхем определение их логических состояний, характеризуемых наличием электрического заряда, может осуществляться с помощью АСМ в Кельвин-режиме без удаления с поверхности диэлектрических слоев и нарушения хранимой информации в логической ячейке.

**Апробация результатов.** Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах:

§ Международные научные конференции «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии», Кисловодск, 14-19 сентября 2003 г., 19-24 сентября 2004 г. и 18-23 сентября 2005 г;

§ XX Российская конференция по электронной микроскопии (РКЭМ-2004), Черногоровка, 31 мая-4 июня 2004 г;

§ 7-ая Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, СПб, 5-9 декабря 2005 г;

§ Научная молодежная конференция «Технология и дизайн микросхем», СПб, 15-16 ноября 2005 г.;

§ 8 и 9 Научные молодежные школы по твердотельной электронике, СПб, 27-29 мая 2005 г. и 27-28 мая 2006 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 4 статьи.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 79 наименований. Основная часть работы изложена на 144 страницах машинописного текста. Работа содержит 61 рисунок и 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, формулируется цель, определяется научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* приведен анализ современных зондовых методов диагностики электрического потенциала на поверхности гетерогенных объектов с высоким пространственным разрешением. Из локальных методов анализа наиболее предпочтительными являются растровая электронная микроскопия (РЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ) и сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), позволяющие проводить исследования на микронном, субмикронном и нано уровнях. Чувствительность и локальность метода СТМ на порядок превышают аналогичные параметры методов РЭМ и АСМ, но при этом обладает существенным недостатком, все исследуемые образцы должны быть проводящими, что неприемлемо при исследовании материалов и структур, содержащих диэлектрические слои. На основании результатов, полученных в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (СПбГЭТУ), и анализа литературных данных установлено, что при сопоставимых параметрах с РЭМ по чувствительности и локальности АСМ имеет ряд преимуществ:

1. возможность исследования материалов различной природы, включая диэлектрики, которые не могут исследоваться методом РЭМ без потери в разрешающей способности вследствие «зарядки» поверхности образца;
2. проведение измерений при атмосферных условиях;
3. неразрушающий характер воздействия на образец;
4. возможность характеристики материалов, структур и приборов по электрофизическим параметрам.

К недостаткам АСМ можно отнести:

1. малую скорость сканирования;

- ограниченные возможности проведения динамических измерений;
- ограниченное поле исследования по сравнению с растровой электронной микроскопией.

Достоверно установлено рядом зарубежных авторов, что большинство методик и средств отладки и анализа отказов ИМС ориентировано на работу с неpassивированными образцами. Поскольку passивация является диэлектриком, она препятствует регистрации сигналов. В этом случае необходимо либо удалять passивацию, что может привести к потере работоспособности изделия, либо использовать специальные методы, позволяющие регистрировать сигналы через passивацию. При этом достаточно лишь определить, в каком логическом состоянии (ноль или единица) находится проводник в заданный момент времени. Наряду с электронно-зондовой микроскопией, которая позволяет исследовать электрические параметры разрабатываемых образцов ИМС с высоким временным разрешением, существует принципиальная возможность применения метода атомно-силовой микроскопии в режимах электростатической микроскопии и зонда Кельвина для восстановления алгоритма функционирования уже готовых интегральных схем.

Также, вызывает большой интерес локальный контроль и регистрация распределения концентрации электрически активных примесей в полупроводниковых материалах и структурах, например, в областях формирования истоков и стоков в МДП-транзисторах, в широком диапазоне значений концентраций. Методом сканирующей емкостной микроскопии возможно исследовать распределение концентрации легирующих примесей с локальностью от единицы до нескольких десятков нанометров, что определяется радиусом закругления кончика АСМ зонда, в интервале  $(10^{15} \div 10^{19}) \text{ см}^{-3}$ . Однако, данный метод не позволяет проводить количественные измерения концентрации. Для этого необходимо построение калибровочной зависимости между амплитудой выходного сигнала СЕМ-моды и соответствующими ей значениями концентрации электрически активных примесей, полученными на тестовых структурах с известными уровнями легирования, что, несомненно, усложняет измерения. Решение данной задачи состоит в создании методики расчета концентрации электрически активных примесей на основе СЕМ данных, учитывающей материал исследуемого образца и геометрические параметры АСМ зонда.

На основании проведенного анализа литературы обосновывается актуальность разработки методики определения логического состояния ячеек памяти ИМС и расчета концентрации электрически активных примесей в микро областях полупроводниковых приборов с помощью неразрушающих методов атомно-силовой микроскопии. Решение данных задач было выбрано в качестве основных направлений данной работы.

*Во второй главе* рассмотрены методики измерения электрического потенциала на поверхности гетерогенных объектов методами РЭМ и АСМ, а также основные технологические операции, используемые при формировании тестовых структур и подготовке кристаллов ИМС для проведения электрических измерений с помощью РЭМ и АСМ.

Для реализации целей работы использовали атомно-силовой микроскоп Solver P47H производства компании НТ-МДТ и оригинальный низковольтный электронно-зондовый тестер, изготовленный в СПбГЭТУ. В режиме РЭМ контроль электрического потенциала поверхности осуществляли по количественным соотношениям между измеряемым током вторичных электронов и электрическим по-

тенциалом на сетке энергоанализатора. Информация о величине электрического потенциала поверхности содержится в величине сдвига по напряжению кривых задержек, представляющих собой зависимость тока вторичных электронов от напряжения на сетке для различных значений потенциала на образце. Чувствительность данного метода составила  $\sim (10-50)$  мВ в статическом режиме и динамическом режиме в диапазоне частот от 1кГц до 10 ГГц при измерении электрического потенциала на проводящих поверхностях.

Измерение электрического потенциала поверхности методом АСМ осуществляли с помощью микроскопии электростатических сил и метода зонда Кельвина. Основой этих методов является возможность регистрации механического отклика зонда под действием электростатической силы, зависящей от разницы потенциалов между зондом и поверхностью образца. При измерениях методом ЭСМ величина разницы потенциалов определяется в относительных единицах. Одним из методов абсолютного измерения потенциала является метод зонда Кельвина. Чувствительность методов ЭСМ и МЗК составила  $\sim 100$  мВ при атмосферных условиях в статическом режиме регистрации электрического потенциала. Для расчета концентрации электрически активных примесей в полупроводниковых материалах, структурах и приборах использовали амплитуду выходного сигнала сканирующей емкостной микроскопии.

В таблице 1 представлены регистрируемые сигналы при различных режимах работы АСМ.

Табл. 1

Режимы работы АСМ

Режим	Обратная связь	Сигнал
Топология (АСМ)	$A=A_0$ (изгиб кантилевера постоянен)	$\Delta Z$ (фототок датчика удерживается постоянным, сигнал $\Delta Z$ – это компенсационное перемещение образца или кантилевера)
Топология (ЭСМ, МЗК, СЕМ)	$A(\omega) = A_0$ (амплитуда изгиба кантилевера постоянна)	$\Delta Z$ (амплитуда фототока датчика удерживается постоянной, $\Delta Z$ – это компенсационное перемещение образца или кантилевера)
ЭСМ	–	$F_z(\omega) = -((U_0 - j(x, y)) \times U_1 \sin(\omega t)) \frac{\partial C}{\partial Z}$
МЗК	$A(\omega) = 0$	$U_0$
СЕМ	–	$F_z(2\omega) \approx \frac{\partial C}{\partial Z}$

Для проведения измерений электрических и электрофизических параметров объектов микроэлектроники использовали различные материалы и структуры, основная часть которых была изготовлена в СПбГЭТУ. Подготовку кристаллов СБИС для зондовой диагностики осуществляли на оборудовании Центра микро-технологии и диагностики (ЦМИД).

Оценку влияния состояния поверхности образца и окружающих условий на экспериментальные значения работы выхода, полученных методом зонда Кельвина, проводили на следующих материалах и структурах: Pt, Ti, Ni, Al, SiO<sub>2</sub>, AlN.



Осаждение металлов на кремниевые подложки осуществляли ионно-плазменным распылением на установке УРМ 3279013 (Pt), а также методом магнетронного распыления (Al, Ti, Ni) на установке Оратория 5. В качестве базовой технологии получения защитно-изолирующих покрытий использовали плазмохимическое осаждение слоев диоксида кремния в смеси паров ГМДС+O<sub>2</sub> (гексаметилдисилоксан [(CH<sub>3</sub>)<sub>6</sub>SiO<sub>2</sub>]) на установке УРМ 53. Пленки AlN были получены методом ВЧ-магнетронного распыления на модернизированной вакуумной установке типа «Вершина». Источником материала служила алюминиевая мишень, распыляемая в атмосфере аргон-азотной смеси. Толщина пленок контролировалась методом отражательной эллипсометрии.

Измерения электрического потенциала на поверхности платины толщиной 0,1 мкм, напыленной на подложку Si (100), позволили оценить чувствительность метода зонда Кельвина и микроскопии электростатических сил, а также получить количественные соотношения между выходным сигналом в ЭСМ и значениями потенциала в МЗК от напряжения, подаваемого на образец, для кантилеверов с Pt и W<sub>2</sub>C покрытиями. Данные соотношения использовали для интерпретации ЭСМ результатов, полученных на различных объектах.

Апробацию результатов расчета концентрации электрически активных примесей осуществляли на тестовых структурах с известными уровнями легирования, представляющих собой стандартные кремниевые подложки различной проводимости (КЭФ-4, КДБ-10, КДБ-1, КЭФ-0,05) и высоко легированные кремниевые образцы. В качестве электрического контакта образца с гнездом подачи напряжения (заземления) использовали алюминий, нанесенный на обратную сторону тестовых структур.

Для оценки чувствительности и локальности метода зонда Кельвина и микроскопии электростатических сил в зависимости от толщины диэлектрического покрытия предложили тестовые структуры Si/Al/SiO<sub>2</sub>, представляющие собой кремниевые подложки (КЭФ-500), на которые послойно нанесли методом магнетронного распыления (Оратория 5) алюминиевые электроды толщиной 0,3 мкм и пленки диоксида кремния в плазме ГМДС+O<sub>2</sub> на установке УРМ 53 толщиной от 0,2 мкм до 1,2 мкм. Контроль толщины пленок SiO<sub>2</sub> проводился с помощью лазерного интерферометра.

В качестве объектов исследования электрического состояния функциональных элементов ИМС, выявления диффузионных областей с различным типом проводимости использовали кристаллы интегральных микросхем, выполненных по МДП-схеме. Подготовка кристаллов включала удаление корпуса микросхемы, защитно-изолирующих и металлических слоев. Удаление полимерных корпусов ИМС осуществляли в два этапа: 1) механическая шлифовка полимерного корпуса с лицевой стороны кристалла и 2) жидкостное химическое травление полимера в горячей концентрированной серной кислоте при температуре 160°C с сохранением функционирования микросхемы. Дальнейшее удаление последовательных защитно-изолирующих и металлических слоев привело к потере работоспособности изделий. Травление защитно-изолирующих слоев SiO<sub>2</sub> осуществляли в буферном растворе (NH<sub>4</sub>F, H<sub>2</sub>O, HF) при комнатной температуре. Удаление металлизации проводили в растворе (CrO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>F, H<sub>2</sub>O) при комнатной температуре.

*Третья глава* посвящена исследованию зондовыми методами тестовых и приборных структур, элементов СБИС КМОП технологии и расчету концентрации электрически активных примесей в микро областях полупроводниковых структур.

Измерения на тестовой структуре Si/Pt зависимости выходных сигналов в микроскопии электростатических сил и методе зонда Кельвина от напряжения, подаваемого на образец, содержащего эквипотенциальную поверхность, для кантилеверов с различным составом покрытия позволили получить количественные соотношения между выходным сигналом в ЭСМ и значениями потенциала в МЗК (рис. 1).

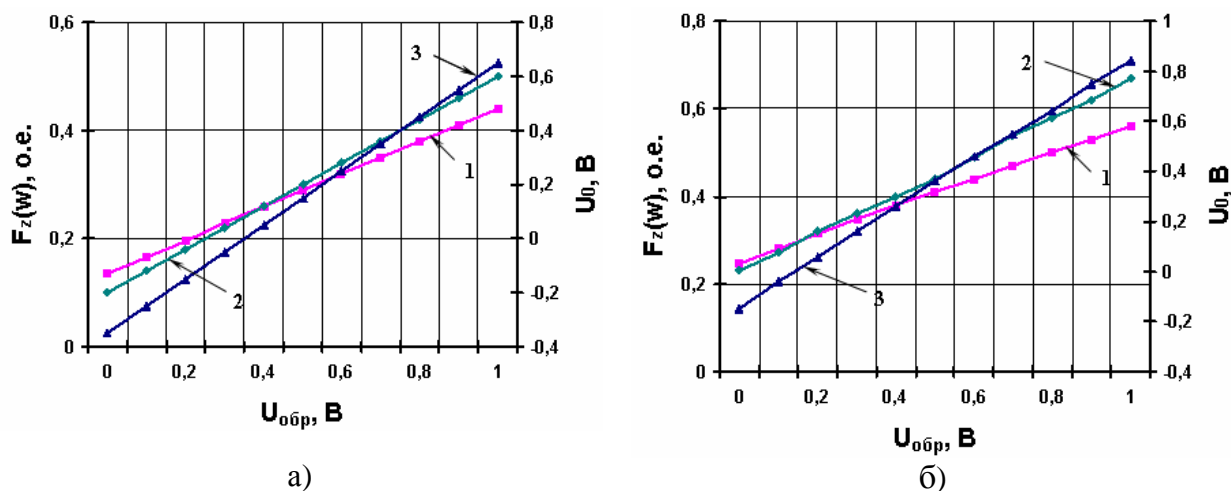


Рис. 1. Зависимости величин выходных сигналов  $F_z(w)$  (ЭСМ) и  $U_0$  (МЗК) от напряжения на образце  $U_{обр}$  для кантилеверов с Pt (а) и  $W_2C$  (б) покрытиями, где 1 и 2 – амплитуды ЭСМ сигналов, регистрируемых на выходе фотодетектора и синхронного детектора соответственно; 3 – выходной МЗК сигнал

Методом АСМ возможно определять электрофизические параметры материалов такие, как работа выхода, тип проводимости, концентрация электрически активных примесей. Экспериментальные исследования работы выхода различных материалов показали, что их значения зависят от состояния материала зонда и поверхности образца, температуры, влажности. Ошибка измерения на воздухе может составлять 30-50%. В табл. 2 приведены экспериментальные и справочные значения работы выхода различных материалов, полученных с помощью кремниевого кантилевера с Pt покрытием. Экспериментальные значения работы выхода плазмохимического  $SiO_2$  находятся в широком диапазоне (см. табл. 2), а экспериментальная величина работы выхода термического окисла (4,98 эВ) оказалась наиболее близкой к справочному значению (5,00 эВ). Таким образом, установили, что технология нанесения оксидных диэлектрических слоев при использовании термодинамически неравновесных методов осаждения влияет на величину работы выхода.

Табл. 2

Справочные и экспериментальные значения работы выхода различных материалов

Материал	Справочное значение $e_j$ , эВ	Экспериментальное значение $e_j$ , эВ
Pt	5,32	5,22
Al	4,25	4,12
C	4,70	5,12
InAs	4,90	4,97
W <sub>2</sub> C	4,58	4,92
Плазмохимический SiO <sub>2</sub>	5,00	4,82÷5,34
Термический SiO <sub>2</sub>	5,00	4,98

Результаты исследований КМОП интегральной микросхемы методом зонда Кельвина позволили однозначно интерпретировать тип проводимости различных диффузионных областей ИМС (рис. 2). Предварительно с поверхности кристалла удалили защитно-изолирующие покрытия и 2 слоя металлизации вплоть до поликремниевой разводки. Потенциальный контраст логических элементов проявляется из-за разных значений величины работы выхода у материалов *n* и *p*-типов, т.е. в областях формирования *n*- и *p*-канальных транзисторов. Величина разницы потенциалов между *n* и *p* областями составила 0,40÷0,45 В.

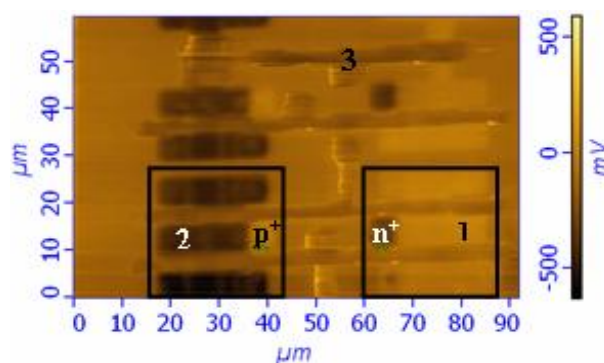


Рис. 2. МЗК изображение диффузионных областей *n*- и *p*-типа. Размер скана 50×90 мкм. 1 - МДП транзистор *p*-типа; 2 – МДП транзистор *n*-типа; 3 – поликремниевые затворы

Помимо определения работы выхода и типа проводимости интерес представляет количественное выражение концентрации электрически активных примесей в микро областях полупроводниковых приборов. Для этого на нескольких кристаллах микросхем, содержащих МДП-транзисторы, с помощью жидкостного химического травления удалили защитно-изолирующие покрытия и металлические слои до поликремниевой разводки, чтобы не нарушить целостность МДП структуры. На участках формирования МДП-транзисторов методом ионно-лучевого препарирования сделали косые шлифы под углом 5° к горизонтали. Предварительное исследование поперечных срезов данных структур показало, что топологическая норма микросхемы составляет 2,5 мкм, толщина подзатворного окисла - 90 нм, толщина слоя поликремния над затворами – 0,5 мкм.

Методом зонда Кельвина установили электронный тип проводимости диффузионных областей, прилегающих к краю шлифов. Значения амплитуды выходного СЕМ сигнала, полученных на пологих срезах, позволили идентифицировать области стоков, истоков и затворов МДП-транзисторов (рис. 3).

Расчет концентрации легирующих примесей областей стоков и истоков проводился в рамках модели плоского конденсатора, которая достаточно точно отражает зависимость производной

емкости от расстояния  $\frac{\partial C}{\partial Z}$ .

Изменение силы на второй гармонике (табл. 1), регистрируемое в емкостной микроскопии, связано с амплитудой колебания кантилевера, выраженной в единицах тока. Коэффициент перевода амплитуды колебания кантилевера из единиц тока в расстояние, полученный на данном приборе, составил 26 нм/нА. С другой стороны, амплитуда колебаний кантилевера связана с силой следующим соотношением:

$$x = \frac{2pQF(2w)}{m\omega^2},$$

где  $x$  – амплитуда колебания кантилевера;  $Q$  – добротность (на воздухе обычно 200÷300);  $m$  – масса системы ( $10^{-12}$  кг).

Общая емкость системы представляет собой последовательное соединение емкости воздушного конденсатора  $C_z$ , зависящей от расстояния между зондом и поверхностью, и поверхностной емкости  $C_{x,y}$ , которая является носителем информации о концентрации примесей в полупроводнике. Будем считать, что емкость  $C_{x,y}$  не зависит от подаваемого напряжения между зондом и поверхностью, т.е. все изменение разности потенциалов приходится на воздушный конденсатор. Производная  $\frac{\partial C}{\partial Z}$  будет равна:

$$\frac{\partial C}{\partial Z} = -\frac{\partial C_z}{\partial Z} \times C_{x,y}^2 \times \frac{1}{(C_z + C_{x,y})^2} = \frac{C_{x,y}^2 C_z}{z(C_{x,y} + C_z)^2},$$

где  $\epsilon = 1$  – диэлектрическая проницаемость воздуха;  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  – диэлектрическая постоянная, Ф/м;  $S$  – площадь контакта,  $m^2$ .

Емкость воздушного конденсатора  $C_z$ , следуя модели плоского конденсатора, определяется:

$$C_z = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

где  $d = z - z_1$  – расстояние между кантилевером и поверхностью образца с учетом прогиба балки под действием электростатической силы, м.

Аналогичное выражение используется для поверхностной емкости  $C_{x,y}$ :

$$C_{x,y} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{L_D},$$

где  $\epsilon = 12$  – диэлектрическая проницаемость Si;  $L_D$  – Дебаевская длина экранирования, см.

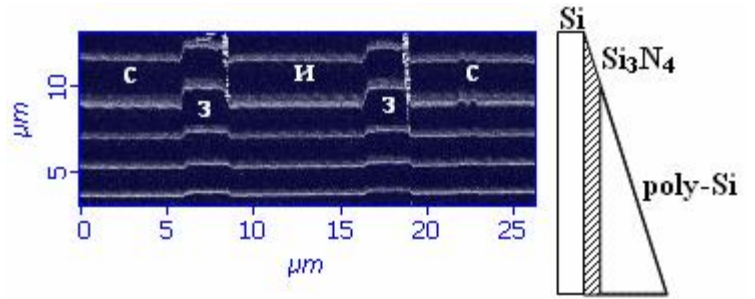


Рис. 3. СЕМ изображение областей стоков, истоков и затворов МДП транзисторов и соответствующая ему схематическая кросс-секция

Дебаевская длина экранирования зависит от уровня концентрации легирующих примесей в полупроводнике:

$$L_D = \sqrt{\frac{ee_0kT}{2e^2n}},$$

где  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $e=1,6 \cdot 10^{-31}$  – заряд электрона, Кл;  $n$  – концентрация примесей,  $\text{см}^{-3}$

Расчетное соотношение между концентрацией электрически активных примесей в полупроводнике и выходным токовым СЕМ сигналом согласуется с экспериментальным, полученным на тестовых структурах с известными уровнями легирования (кремниевые подложки различной проводимости (КЭФ-4, КДБ-10, КДБ-1, КЭФ-0,05) и высоко легированные кремниевые образцы) (рис. 4). Максимально возможная амплитуда колебания зонда над поверхностью образца в неконтактном режиме, ограниченная расстоянием зонд-образец, определяет порог чувствительности системы. Диапазон измеряемых значений концентраций составил  $10^{15} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация электрически активных примесей областей стоков и истоков МДП-транзистора составила  $7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Существенным недостатком РЭМ является «зарядка» поверхности, которая, в ряде случаев, исключает проведение измерений на образцах, содержащих диэлектрик. С помощью микроскопии электростатических сил исследовали морфологические и электрофизические особенности текстурированных пленок AlN в многослойных структурах Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/AlN, используемых в пьезоэлектрических актюаторах мембранного типа. Результаты измерения на сколе показали наличие области накопления заряда на границе раздела Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/AlN, что, безусловно, необходимо учитывать при формировании на таких структурах приборов и устройств различного функционального назначения. При исследовании электрического потенциала поверхности поликристаллического AlN было установлено, что наблюдается не эквипотенциальность между объемом кристаллитов и границами разделов.

Режим работы электронно-зондового тестера преимущественно использовался для исследования неисправностей в процессе разработки цифровых и аналоговых схем, в которых различные состояния элементов отображаются в виде темных и светлых областей. В статическом режиме получения потенциального контраста на поверхности кристалла ИМС в указанных точках измерялся электрический потенциал. РЭМ, в отличие от АСМ, позволяет наблюдать в динамике быстро протекающие процессы растекания тока, а также обеспечивать большое поле обзора. Низковольтная электронно-зондовая микроскопия позволяет исследовать диэлектрические поверхности, но при этом ухудшается разрешающая способность метода (для вольфрамовых термокатодов разрешающая способность  $\sim (0,2 \div 0,5) \text{ мкм}$ ). Альтернативным методом исследования электрического потенциала на диэлектриче-

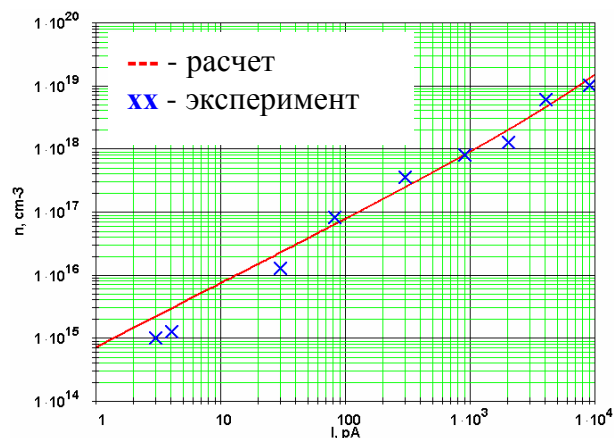


Рис. 4. Связь между концентрацией (N) электрически активных примесей и СЕМ сигналом (I)

ских поверхностях кристаллов ИМС с пространственным разрешением  $\sim (10 \div 50)$  нм может являться АСМ в режимах электросиловой микроскопии и метода зонда Кельвина.

*В четвертой главе* приводятся результаты исследования тестовых структур Si/Al/SiO<sub>2</sub> с различной толщиной диэлектрического покрытия. Обосновывается возможность регистрации и анализа электрического потенциала на пассивированных поверхностях интегральных микросхем. Разработана методика и проведены исследования логических состояний ячеек памяти двух классов микросхем без удаления пассивирующих покрытий с сохранением работоспособности изделий.

Как известно, современные микросхемы памяти могут иметь до пяти слоев металлизации при двух слоях поликремния. Основная технология формирования ИС является МДП схема. Микросхемы памяти используют в качестве базовой ячейки один, либо два МДП-транзистора с двумя затворами: регулирующего, который связан со схемой управления чтения – записи, и плавающего, который локализован между регулирующим затвором и каналом МДП-транзистора, которые полностью электрически изолированы слоем промежуточного диоксида кремния и подзатворного диэлектрика от остальной части электрической схемы. Характерные толщины этих слоев составляют  $\sim 0,1$  мкм. Размеры ячейки памяти могут составлять от  $(0,5 \times 0,5)$  мкм<sup>2</sup> до  $(10 \times 10)$  мкм<sup>2</sup>.

В качестве металла для разводки чаще всего используют алюминий. Толщина металлической разводки составляет  $\sim 0,3$  мкм. Все проводящие слои разделены межслойной изоляцией. Кроме того, на верхний слой металла наносится защитная пленка. В качестве межслойных и защитных слоев используют SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и полимерные покрытия. Характерные толщины этих слоев составляют  $\sim (0,5 \div 0,7)$  мкм и  $\sim (1,0 \div 1,5)$  мкм соответственно. При производстве корпусов в основном используют керамику и формованные пластмассы.

Для исследования логического состояния базовой ячейки микросхемы памяти необходимо, прежде всего, оценить чувствительность и локальность метода зонда Кельвина и микроскопии электростатических сил в зависимости от многослойности структуры и толщины диэлектрических слоев.

На образцах Si/Al/SiO<sub>2</sub> проводили исследования чувствительности АСМ при работе в потенциальном контрасте к изменению электрического потенциала в объеме многослойных структур. Значения толщины диэлектрика составляли от 0,2 мкм до 1,2 мкм. При наблюдении потенциального контраста в режиме Кельвина и электросиловой моды на Al электрод подавали постоянное напряжение от 0 до 1,0 В с минимальным интервалом 0,1 В. Расстояние между зондом и образцом составляло 10 нм. В качестве зондового датчика был выбран кремниевый кантилевер с проводящим Pt покрытием. Значения выходных сигналов измеряли на поверхности SiO<sub>2</sub> в зависимости от подаваемого напряжения на алюминиевый электрод. Было установлено:

1. Чувствительность метода зонда Кельвина и микроскопии электростатических сил на воздухе имеет порядок 100 мВ;

2. В режиме Кельвина и ЭСМ моде наблюдается линейная зависимость выходных сигналов от электрического потенциала металла;

3. В электростатической моде чувствительность измерений уменьшается с увеличением толщины диэлектрика (рис. 5);

4. Локальность метода ЭСМ зависит от расстояния между зондом и поверхностью образца и составляет  $\sim 0,01$  мкм при оптимальном режиме работы АСМ;

5. Выходной ЭСМ сигнал меняется от максимального значения вблизи образца к минимальному при отдалении зонда от образца. На зависимостях уровня выходного сигнала, регистрируемого в электростатической моде, от расстояния в системе «зонд-образец» имеются максимумы, соответствующие величине амплитуды колебания кантилевера. При увеличении напряжения, подаваемого на Al электрод, максимумы сдвигаются в сторону больших высот (рис. 6). Это объясняется тем, что величина амплитуды прогиба балки кантилевера становится соизмерима и больше расстояния  $Z$  между зондом и образцом. Движение кантилевера ограничивается поверхностью образца. По мере увеличения  $Z$  амплитуда ЭСМ сигнала начинает расти, пока не достигнет максимума, при котором зонд уже не касается поверхности. Дальнейший ход зависимости определяется кулоновским взаимодействием.

Результаты данной работы продемонстрировали возможность регистрации изменения электрического потенциала проводника, находящегося под слоем диэлектрика, с чувствительностью не хуже 100 мВ и локальностью  $\sim 0,01$  мкм.

Детектирование изменения электрического потенциала на поверхности кристаллов СБИС без удаления пассивирующих покрытий с сохранением работоспособности изделий позволило разработать методику по определению логического состояния ячеек памяти. На примере двух классов микросхем, содержащих ячейки памяти EPROM и EEPROM, показана применимость данной методики для анализа информации, находящейся в памяти ИМС, в виде набора логических сигналов «0»

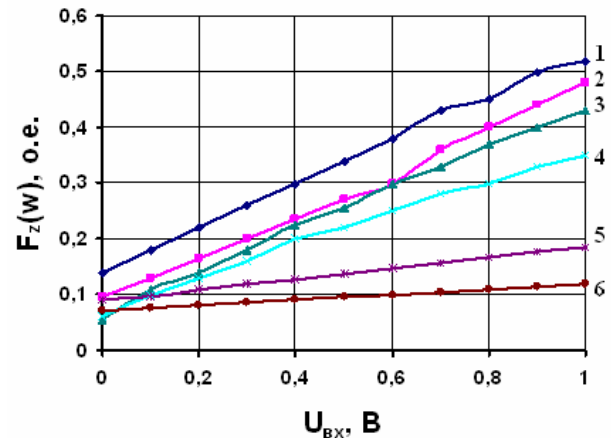


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала ЭСМ моды ( $F_z(\omega)$ ) от напряжения, подаваемого на образец ( $U_{вх}$ ), для различных толщин диэлектрика  $d$ :

1 –  $d=0,20$  мкм; 2 –  $d=0,35$  мкм; 3 –  $d=0,50$  мкм; 4 –  $d=0,70$  мкм; 5 –  $d=0,90$  мкм; 6 –  $d=1,20$  мкм

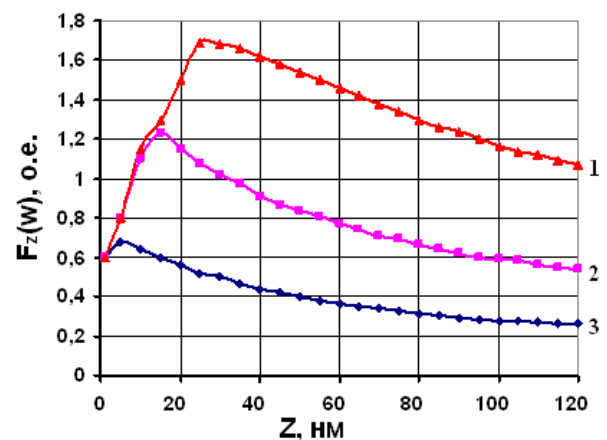


Рис. 6. Зависимость выходного ЭСМ сигнала ( $F_z(\omega)$ ) от расстояния в системе «зонд-образец» ( $Z$ ); 1 –  $U=3,00$  В; 2 –  $U=1,50$  В; 3 –  $U=0,75$  В

и «1». Данная методика включает этапы подготовки кристаллов ИМС к исследованию с помощью АСМ:

1. Удаление различных видов корпусов ИМС с сохранением работоспособности изделия;
2. Получение оптического изображения исследуемой ИМС для анализа расположения шин адреса и данных;
3. На основании последовательности срезов, перпендикулярных поверхности кристалла, определяются технология изготовления ИМС, топологическая норма, длина и структура ячейки памяти;
4. Сборка и апробация системы контактирования выводов ИМС с устройствами подачи питания и логических сигналов на входы и выходы исследуемой микросхемы;
5. Настройка конфигурации прибора для работы в режиме Кельвина или электростатической моде с последующей регистрацией потенциального контраста на выбранном участке ИМС.

Методом АСМ в режиме Кельвина исследовали микросхему памяти, представляющую собой постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и содержащую ячейки памяти EPROM (рис. 7). ПЗУ было изготовлено по МДП-технологии с топологической нормой 1,2 мкм. Ячейка памяти состояла из одного МДП-транзистора. На рис. 7-в разница потенциалов между логическими «0» и «1» составила 2,15В, что соответствует перепаду напряжений логических уровней в КМОП логике.

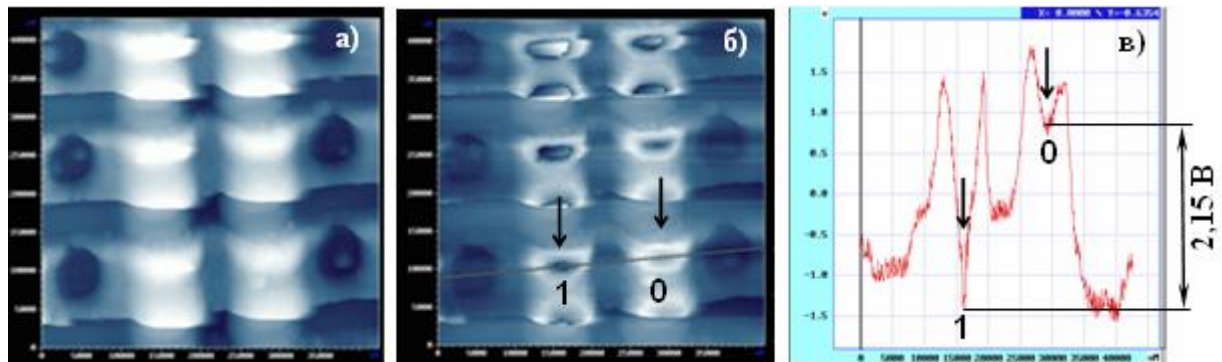


Рис. 7. Изображения фрагмента поверхности ИМС в потенциальном контрасте: (а) до подачи смещения; (б) после подачи смещения; (в) распределение потенциала вдоль линии сканирования. Размер сканов 40x40 мкм

Аналогичные измерения были проведены на микросхеме фирмы Simtek. Микросхема памяти представляла собой статическое ОЗУ (оперативное запоминающее устройство), работающее в 2-ух режимах: 1-статическое ОЗУ, 2-энергонезависимая EEPROM. Предварительно установили, что анализируемая микросхема изготовлена по МДП-технологии с топологической нормой 0,5 мкм. Ячейка памяти представляла собой 2 последовательных МДП транзистора. Первый транзистор служит для хранения 1 бита информации, второй - управляющий, отвечает за выборку данных (рис. 8).

Длина ячейки памяти составила 15 мкм. При подключении источника питания (+5 В) в память микросхемы занесли информацию, соответствующую логической «1». При отключении источника питания информация сохранилась. Методом зонда Кельвина установили наличие высокого потенциала, соответствующего ло-



гической единице, в месте расположения 1-го транзистора, отвечающего за хранение данных (рис.9).

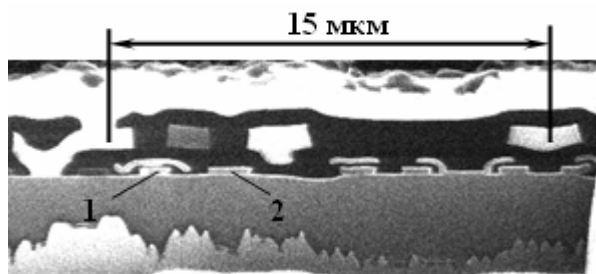


Рис. 8. FIB изображение кросс-секции ячейки памяти; 1 – транзистор хранения информации; 2 – транзистор выборки

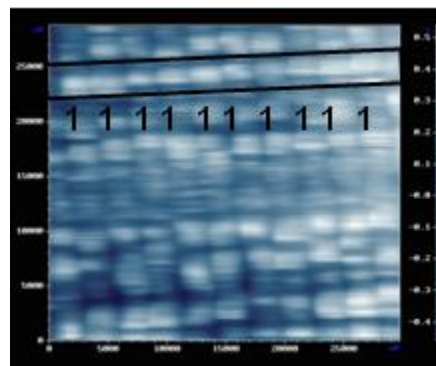


Рис. 9. Изображение области расположения 1-го транзистора, полученное методом зонда Кельвина. Размер скана 30×30 мкм

Таким образом, предложенная в работе методика определения логического состояния ячеек памяти EPROM и EEPROM с помощью атомно-силового микроскопа, позволяет анализировать информацию, хранящуюся в микросхеме, без нарушения ее работоспособности. Данная методика защищена патентом РФ на полезную модель.

## ВЫВОДЫ

Основными результатами диссертационной работы являются:

1. Экспериментально установлено, что при проведении измерений электрического потенциала поверхности твердых тел в атмосферных условиях метод зонда Кельвина и микроскопия электростатических сил обеспечивают чувствительность не хуже 100 мВ. При этом наличие диэлектрика на поверхности структуры влияет на чувствительность электростатической моды, которая уменьшается с увеличением толщины диэлектрического слоя.

2. Экспериментально установлено, что на зависимостях уровней выходного сигнала, регистрируемого АСМ при работе в электростатической моде, от расстояния в системе «зонд-образец» имеются максимумы, появление которых связано с ограничением амплитуды прогиба балки кантилевера, а их положение определяется разностью потенциалов между зондом и поверхностью исследуемого образца.

3. Предложена методика определения концентрации электрически активных примесей в микро областях приборных структур на основе высоко локальных емкостных измерений в АСМ в диапазоне концентраций  $10^{15} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

4. Экспериментально обоснованы преимущества неразрушающей атомно-зондовой диагностики по сравнению с электронно-зондовой микроскопией при измерении статического электрического потенциала на пассивированных функциональных областях интегральных микросхем с пространственным разрешением в нано- и микро- диапазонах.

5. Разработана методика и проведены исследования логических состояний ячеек памяти EPROM и EEPROM интегральных микросхем без удаления пассивирующих покрытий с сохранением работоспособности изделий.

6. Установлено, что экспериментальные значения работы выхода определяются свойствами поверхности материала АСМ зонда, условиями измерений и состоянием поверхности образца.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Эффективность сканирующей зондовой микроскопии / Н.М. Коровкина, Ю.А. Демин, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, А.В. Матузов, А.М. Тагаченков // Петербургский журнал Электроники. – 2005.-вып. 4. – С. 31-40.
2. Особенности технологии и свойств фотодетекторов на основе структур «металл-пористый карбид кремния» / А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, Н.М. Коровкина, А.Ю. Савенко // Письма в журнал технической физики. – 2005. – Т. 31, вып. 15. – С.
3. Коровкина, Н.М. Анализ интегральных микросхем методом атомно-силовой микроскопии / Н.М. Коровкина, В.А. Ильин // Петербургский журнал Электроники. – 2006.-вып. 3. – С. 85-98.
4. Коровкина, Н.М. Технология формирования платиновых электродов для субмикронных конденсаторных структур с сегнетоэлектрическими пленками / П.В. Афанасьев, Н.М. Коровкина // Вакуумная техника и технология. – 2006.-Т. 16, вып. 3. – С. 215-219.