

На правах рукописи

Савенко Алексей Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНОЙ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
НАНОРАЗМЕРНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

Специальность: 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов
электронной техники

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2008

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

Научный руководитель –
доктор технических наук Лучинин В.В.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, Лисенков А.А.
кандидат физико-математических наук, Сошников И.П.

Ведущая организация – НИИ Системных Исследований РАН, г. Москва.

Защита диссертации состоится “ 25 ” декабря 2008 г. в _____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ 25 ” ноября 2008 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских и
кандидатских диссертаций

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эволюция конструктивно-технологических решений в области разработки и создания элементной базы электронной техники характеризуется в настоящее время следующими тенденциями:

- переходом от микро- к наноразмерам, стимулированным быстрым развитием сверхинтегрированных быстродействующих информационных систем и микроволновой электроники гигагерцового диапазона частот;

- активным использованием не только поверхности кристалла, но и третьего измерения, что связано с расширением рынка изделий микросистемной техники;

- внедрением в практику структур с полной диэлектрической изоляцией, а также нетрадиционных материалов электронной техники, например, карбида кремния (SiC), что связано с ужесточением требований к надёжности и условиям эксплуатации электронной компонентной базы (ЭКБ).

Данные тенденции определяют необходимость развития прецизионных гибких методов наноразмерной обработки материалов электронной техники для решения задач создания ЭКБ и её исследования.

В качестве базовой технологии для решения вышеуказанных задач в настоящей работе выбрана наноразмерная ионно-лучевая обработка материалов. В работе проведён комплекс исследований не только в области ионно-лучевого травления, основанного на локальном ионном распылении материалов под действием остророфокусированного ионного пучка при высоких ускоряющих напряжениях, но и для реализации процессов локального избирательного травления и осаждения материалов с использованием активации остророфокусированным ионным пучком газовых реагентов, т.е. с помощью ионно-стимулированных химических реакций.

Характеризуя выбранную технологию, следует выделить следующие особенности ионного пучка как средства воздействия на вещество:

- возможность фокусировки ионного пучка в зонд с наноразмерными геометрическими параметрами, что наряду с малой длиной пробега ионов в твёрдом теле предопределяет возможность получения высокого пространственного разрешения;

- эффективное взаимодействие ионного пучка с веществом, находящимся не только в твёрдом, но и в газообразном состоянии, благодаря чему могут быть реализованы стимулированные процессы травления и осаждения;

- возможность гибкого управления ионным зондом в пространстве и во времени, что определяет малые времена адаптации ионно-лучевого технологического комплекса для решения задач наноразмерной обработки по заданному геометрическому закону;

- возникновение при взаимодействии ионного пучка с веществом вто-

ричных электронов и ионов, что определяет возможность наблюдения результата процесса обработки с высоким пространственным разрешением непосредственно в технологической камере в микроскопическом режиме с представлением информации в цифровой форме.

Ранее указанные особенности наноразмерных ионных пучков открывают новые возможности в достижении конечного результата по отношению к широкой гамме материалов электронной техники с обеспечением требуемых точностных параметров обработки и препарирования объектов микро- и нанотехники. С учётом общих тенденций внедрения процессов создания нанобъектов, выбранное направление исследований в области наноразмерных ионно-лучевых технологий следует считать весьма актуальным.

До настоящего времени аппаратуру для реализации процессов сверхпрецизионной ионно-лучевой обработки можно отнести к уникальному оборудованию и на период начала реализации данной диссертационной работы практически отсутствовали системные исследования, позволяющие целенаправленно реализовать совокупность технологических операций с использованием остросфокусированного ионного пучка для решения следующих задач:

- изготовления 3D и 2D микро- и наноразмерных объектов.
- сверхлокального препарирования гомогенных и гетерогенных микро- и наноразмерных объектов с целью анализа внутренней архитектуры и топологии;
- ремонта и реконструкции объектов микроэлектроники и микромеханики с целью обеспечения требуемых технических параметров при минимизации временных и экономических затрат.

Дополнительную актуальность данной работе придаёт и тот факт, что оборудование на основе так называемой ФИП-технологии (фокусированный ионный пучок, FIB – focused ion beam) оказалось достаточно сильно востребованным при переходе к наноразмерным объектам и становится всё более доступным для научно-производственных и образовательных организаций.

Цель работы. Исследование процессов взаимодействия остросфокусированного ионного пучка с веществом для препарирования, формирования и модификации двумерных и трехмерных микро- и наноразмерных объектов.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертации решались следующие задачи.

1. Исследование процессов обработки материалов электронной техники (кремния и карбида кремния) остросфокусированным ионным пучком с целью формирования 2D и 3D областей с минимальными геометрическими размерами и максимальным аспектным отношением в условиях обеспечения малых времён адаптации аппаратуры для создания требуемых микро- и наноразмерных объектов.

2. Исследование ионно-стимулированного химического травления кремния, карбида кремния, диоксида кремния, алюминия и углерода для дос-

тижения максимальной селективности процессов избирательного травления.

3. Исследование ионно-стимулированного химического локального осаждения по заданному топологическому закону слоёв коммутации на основе платины и изоляции в виде оксидов кремния при обеспечении максимального пространственного разрешения и требуемых электрических характеристик конструктивных элементов микроприборов.

4. Разработка комплексных маршрутов на основе операций препарирования, диагностики работоспособности и прецизионного ремонта элементной базы интегральной электроники и микросистемной техники с использованием остророфокусированного ионного пучка в режимах локального и избирательного травления, а также локального осаждения вещества.

5. Разработка методик применения ионного пучка для изготовления наноразмерных 3D систем: автоэмиссионных острий, зондов для атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Использованная аппаратура и методы исследования.

Основной цикл технологических исследований проводился на установке остророфокусированного ионного пучка Strata FIB 205 фирмы FEI. Изучение морфологии, структуры и состава поверхности после травления и осаждения материалов осуществлялось методами: растровой электронной и ионной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа, дифракции быстрых электронов и эллипсометрии. При изучении характера воздействия ионного пучка на различные материалы электронной техники использовались результаты моделирования процессов рассеяния ионов в твёрдом теле.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика ионно-лучевого формирования 2D и 3D микро- и наноразмерных объектов, основанная на процессах прецизионного травления остророфокусированным ионным пучком в режимах достижения максимальной пространственной разрешающей способности и высокого аспектного отношения.

2. Определены скорости травления и коэффициенты распыления кремния и карбида кремния сфокусированным ионным пучком в условиях различных плотностей токов с учётом геометрической формы и размеров изготавливаемых структур и возможности получения максимального аспектного отношения.

3. Определены скорости ионно-стимулированного химического травления ряда материалов (кремния, карбида и оксида кремния, алюминия, углерода) в условиях ионно-стимулированных химических процессов с участием реагентов йода, фторида ксенона, газообразных паров воды.

4. Определена зависимость скорости осаждения платины и оксида кремния от плотности ионного тока и от ускоряющего напряжения, выработаны рекомендации по оптимальным режимам осаждения для достижения высокой

скорости процесса и пространственного разрешения.

Практическая значимость работы.

1. Предложена и реализована методика прецизионного локального препарирования интегральных микросхем (ИМС) с помощью остросфокусированного ионного пучка, включающая рекомендации по обеспечению сверхлокальности и избирательности травления отдельных материалов в составе многослойной композиции (до 9 слоёв коммутации).

2. Выполнен комплекс работ по восстановлению работоспособности ИМС с субмикронной топологической нормой (0,35 мкм) с использованием операций локального 3D ионно-лучевого травления элементов коммутации и изоляции, с последующим локальным осаждением платины и диоксида кремния для внутренней перекоммутации и изоляции отдельных элементов токопроводки ИМС.

3. Разработан и реализован процесс формирования 3D наноразмерных структур в виде матриц автоэмиссионных острий на кремнии и карбиде кремния (по результатам исследований был получен патент РФ № 67775 от 02.05.07) и изготовлены образцы зондов АСМ с высоким аспектным отношением (более 1:20) при радиусе острия зонда 60-100 нм.

4. На основе разработанных методик применения фокусированного ионного пучка подготовлена и реализована в учебном процессе СПбГЭТУ лабораторная работа по дисциплине “Процессы микро- и нанотехнологии” для магистров, обучающихся по направлениям “Электроника и микроэлектроника” и “Нанотехнологии”.

5. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР: ЦМИД-131 “Шельф-ЦМИД”, ЦМИД-152 “Скальпель”, ЦМИД-156 “Аналитика-FIB”, ЦМИД-165 “Эпитаксия” и ОКР: ЦМИД-145 “Зонд-4”, ЦМИД-158 “Зонд-7”, ЦМИД-159 “Зонд-8”, а также договоров на оказание услуг: ЦМИД-135, 167, 171, 183.

6. Имеются акты, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы в НИИСИ РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОАО “НИИ “Тириконд”.

Положения, выносимые на защиту:

1. При ионно-лучевом травлении материалов наноразмерным сфокусированным ионным пучком латеральное пространственное разрешение определяется в первую очередь диаметром остросфокусированного ионного пучка, величина которого зависит от тока пучка и ускоряющего напряжения, а глубина обработки преимущественно определяется током пучка и продолжительностью процесса травления; таким образом, основным параметром оптимизации в достижении требуемого пространственного разрешения и аспектного отношения при ионно-лучевом наноразмерном травлении является ток ионного пучка.

2. При ионно-стимулированном химическом травлении скорость про-

цесса травления различных материалов определяется выбором активируемого химического агента и плотностью тока ионного пучка, а обеспечение требуемой селективности травления достигается выбором оптимального значения плотности тока при определённых ускоряющих напряжениях.

3. При ионно-стимулированном осаждении материалов определяющим фактором в обеспечении скорости процесса является плотность тока ионного пучка, оптимальное значение которой устанавливается, исходя из соотношения скоростей процессов осаждения и перераспыления осаждаемого материала, а локальность процесса осаждения, т.е. латеральное пространственное разрешение, ухудшается в условиях больших значений токов и ускоряющих напряжений.

Апробация результатов работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Научные молодёжные школы по твердотельной электронике, СПб, 2004-2008; Научно-технические семинары “Вакуумная техника и технология”, СПб, 2004, 2006, 2008; V Международная научная конференция “Химия твёрдого тела и современные микро- и нанотехнологии”, Кисловодск, 18-23 сентября 2005; Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Микроэлектроника и информатика», Зеленоград, 2005, 2006; 8-й всероссийский семинар “Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики”, Москва, 29-30 мая 2007; Международная конференция по нанонауке и технологии (ICN+T 2007), Стокгольм, Швеция, 2-6 июля 2007; Итоговый семинар по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга, 29 ноября 2007; 12-я Российская конференция по электронной микроскопии, 3-6 июня 2008, Черногоровка.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них: 10 статей (3 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК), 1 работа – параграф в монографии, 1 патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 45 наименований. Основная часть работы изложена на 95 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 84 рисунка и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определяется цель и формулируются задачи исследования, указываются методы исследования, научная новизна, значимость полученных научных и практических результатов.

В первой главе диссертации дано введение в технологию сфокусированного ионного пучка. Приводится краткое описание оборудования, устройство и принцип действия основных узлов. Описываются возможности технологии для решения задач обработки и анализа материалов и элементной базы

электронной техники с помощью наноразмерного ионного пучка.

Представлена краткая характеристика комплекса острогофокусированного ионного пучка (FIB-станция). Комплекс основан на галлиевом источнике



Рис. 1. Комплекс фокусированного ионного пучка.

ионов с возможностью их ускорения до 30 кВ. Согласно паспортным данным минимальный диаметр ионного пучка составляет 7 нм. Переход от технологических к микроскопическому режиму работы комплекса осуществляется варьированием величины ионного тока в диапазоне от 1 до 20 000 пА. В камере установлен автоматически управляемый прецизионный механический стол, на котором размещены 4 электрических зонда с пьезоприводом для их перемещения. Точность позиционирования зондов 4 нм. Зонды обеспечивают возможность контактирования с токоведущими элементами любого исследуемого объекта. Все процессы осуществляются в вакууме.

Базовыми технологическими операциями, которые могут быть реализованы в FIB-станции, являются:

- ионно-лучевое травление, основанное на сверхпрецизионном ионном распылении под действием острогофокусированного ионного пучка при высоком ускоряющем напряжении;

- селективное ионно-стимулированное травление, основанное на локальной ионной активации процесса при введении в зону обработки химически активного газа-травителя;

- ионно-стимулированное осаждение, основанное на локальной ионной активации процесса при введении в зону обработки химически активного газа – источника осаждаемого материала.

В техническом описании к установке приведены лишь базовые режимы работы, и практически полностью отсутствуют информация и рекомендации по реализации на базе ФИП конкретных технологических операций. На основании чего был сделан вывод о необходимости проведения комплексного исследования процессов взаимодействия острогофокусированного ионного пучка с различными веществами при препарировании, формировании и модификации двумерных и трёхмерных микро- и наноразмерных объектов. Основной целью исследования являлось установление связи между достигаемыми технологическими характеристиками и режимами работы ионно-зондовой аппаратуры, включая оптимизацию её энергетических параметров (токов ионного пучка, ускоряющих напряжений) и используемых химических источников для достижения максимального пространственного разрешения, аспектного отно-

шения и избирательности.

Во второй главе диссертации представлены результаты исследования процессов ионно-лучевого травления материалов наноразмерным сфокусированным ионным пучком без использования дополнительных химических реагентов. Анализируются экспериментальные данные по установлению взаимосвязи диаметра ионного пучка с величиной ионного тока. Исследуется влияние ускоряющего напряжения, качества фокусировки и продолжительности воздействия ионного пучка на конечный результат создания структур, т.е. получения наилучшего или контролируемого пространственного разрешения и аспектного отношения.

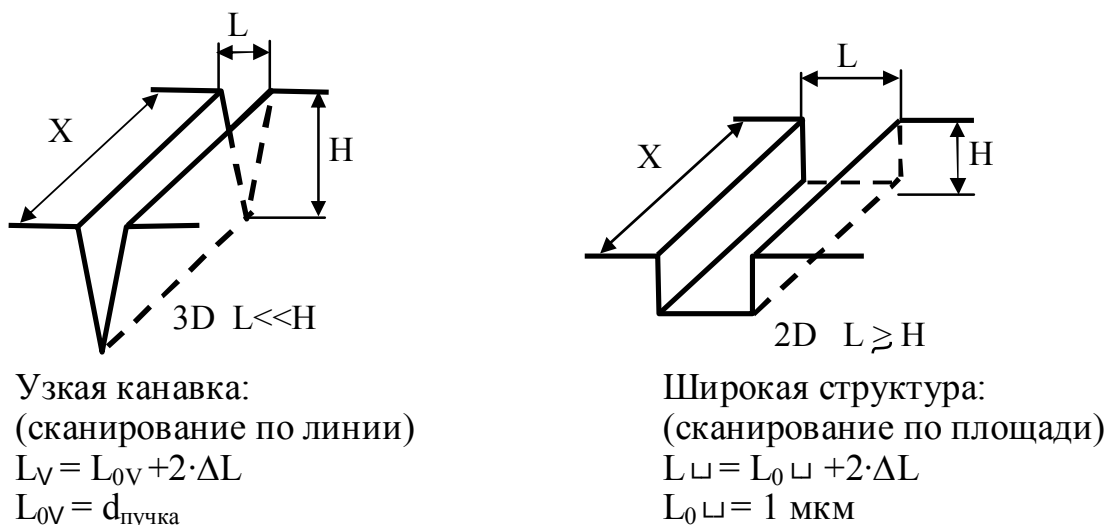


Рис. 2. Два вида реализуемых тестовых структур.

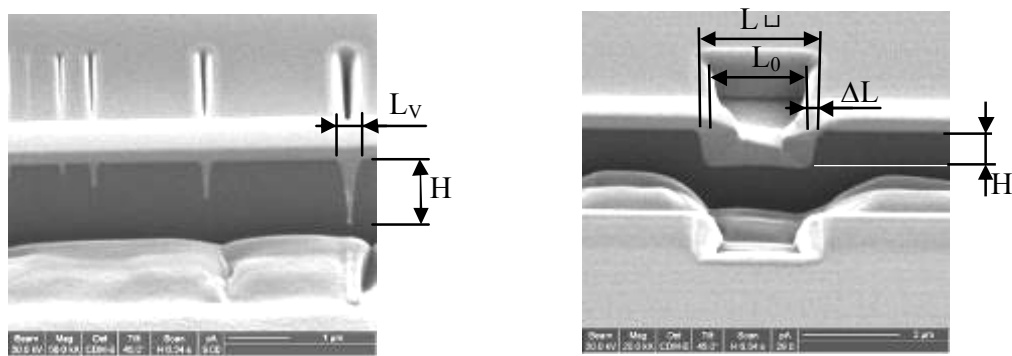


Рис. 3. Внешний вид изготовленных на кремнии тестовых структур.

Объектами исследования являлись два типа структур: структуры с большим аспектным отношением (рис. 2, а) и предельно высоким латеральным пространственным разрешением и 2D плоские структуры (рис. 2, б) с задаваемыми латеральными размерами 1x5 мкм.

Установлено, что при травлении узких трёхмерных канавок с требованиями максимального аспектного отношения имеет место 5-8 кратное увеличение зоны обработки по сравнению с диаметром ионного пучка (рис. 4). Аналогичная тенденция наблюдается и для 2D структур, однако, данный эф-

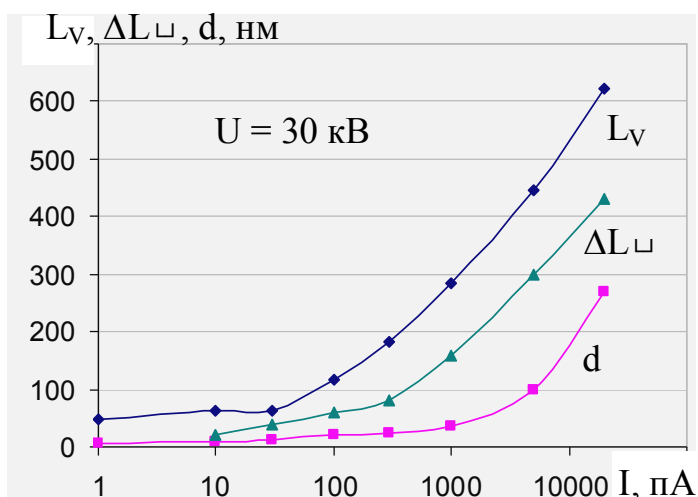


Рис. 4. Зависимость минимальной ширины структуры L_V , уширения 2D структуры ΔL_{\square} и диаметра ионного пучка d от тока пучка.

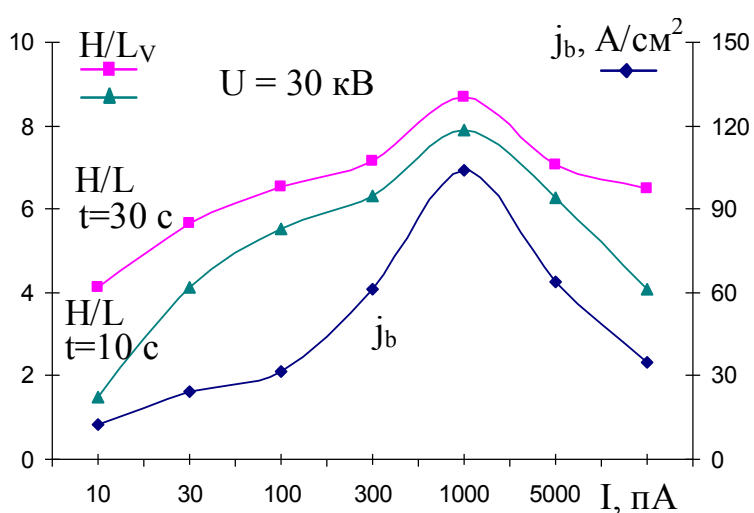


Рис. 5. Аспектное отношение H/L в зависимости от тока I и плотности тока ионного пучка j_b .

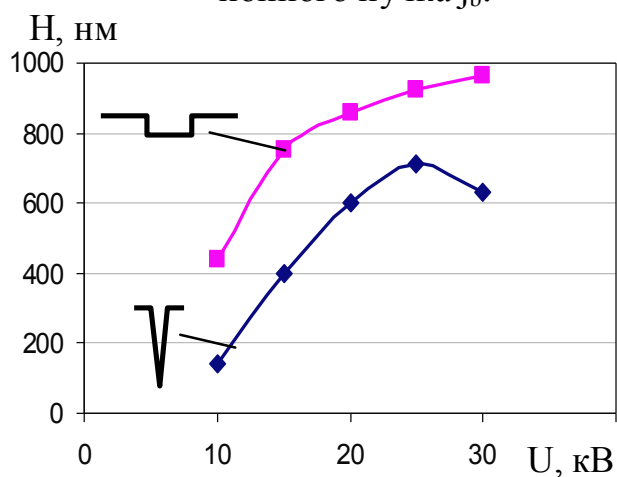


Рис. 6. Зависимость глубины травления кремния от ускоряющего напряжения.

фekt проявляется слабее. По мере увеличения тока ионного пучка имеет место ухудшение разрешения, определяемое уширением ионного пучка.

При оценке величины аспектного отношения в зависимости от тока пучка для 3D канавок установлено (рис. 5), что, исходя из конструктивных особенностей фокусирующей колонны, в интервале токов ионного пучка 500–3000 пА достигается максимальная плотность тока j_b в ионном пучке (примерно 100 А/см²).

В этих условиях величина аспектного отношения для 3D структур достигает 1:8. При этом с увеличением продолжительности процесса экспонирования глубина обработки растёт. В то же время, очевидно, что увеличение глубины травления в узкой канавке будет стимулировать ухудшение пространственного разрешения за счёт неидеальности фокусировки ионного пучка и влияния продуктов распыления.

Анализ влияния ускоряющего напряжения на глубину травления для двух типов канавок показал (рис. 6), что, как и ожидалось, с ростом ускоряющего напряжения глубина обработки растёт. Однако для 3D структур, т.е. узких канавок, в силу ранее указанных особенностей распыления, определяемых не только плотностью, но и ускоряющим напряжением,

может наблюдаться эффект уменьшения скорости травления при росте ускоряющего напряжения. Очевидно, что рост глубины травления отрицательно сказывается на процессе удаления материала из зоны обработки, особенно в условиях узких канавок.

С целью определения влияния угла падения ионного пучка на процесс распыления были сняты зависимости (рис. 7) коэффициента распыления при различных углах падения ионов на подложку кремния. Было установлено сильное влияние угла падения ионов на коэффициент распыления по ранее известному закону $1/\cos\varphi$. При нормальном падении ионов коэффициент распыления кремния составлял 2,5 атома/ион, что достаточно хорошо совпадает с известными литературными данными.

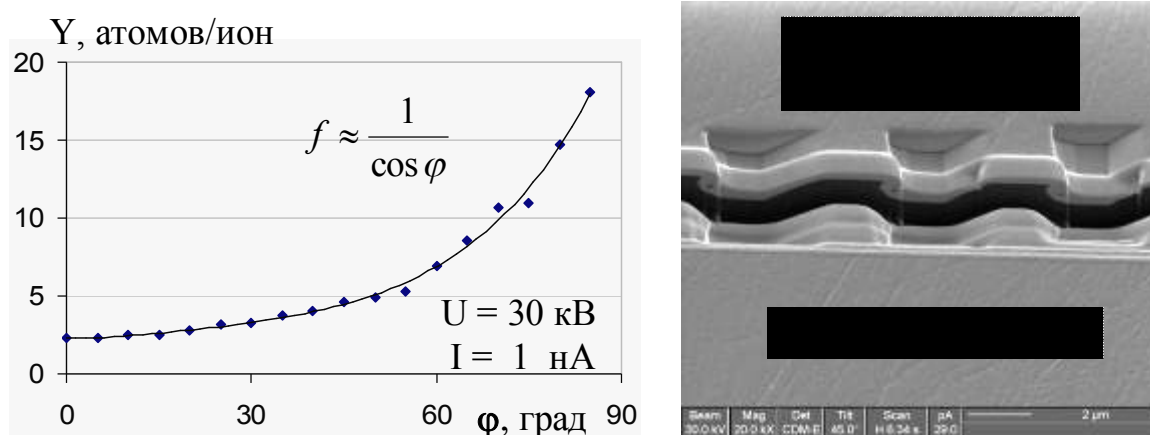


Рис. 7. Коэффициент распыления Si в зависимости от угла падения ио-

С целью сравнения коэффициентов распыления традиционного (кремния) и перспективного (карбида кремния) материалов электронной техники была осуществлена их экспериментальная оценка в зависимости от токов ионного пучка (рис. 8). Спад значений коэффициента распыления с ростом значений ионного тока может быть объяснён эффектом расфокусировки ионного пучка, что указывает на необходимость тщательного контроля данного параметра.

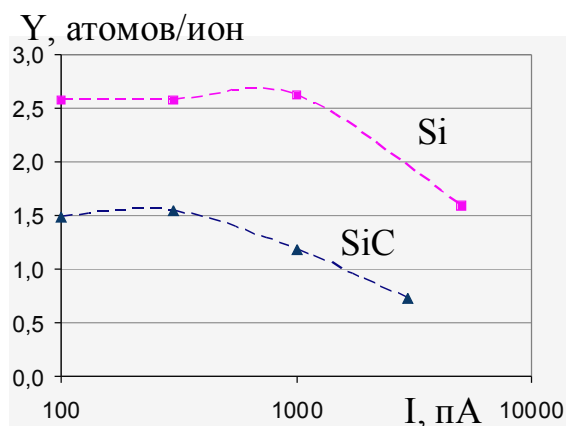


Рис. 8. Коэффициент распыления кремния и карбида кремния.

Таким образом, установлено, что при ионно-лучевом травлении материалов острогофокусированным ионным пучком основным параметром оптимизации в достижении требуемого пространственного разрешения и аспектного отношения при ионно-лучевом наноразмерном травлении является ток ионного пучка.

Исследование методами рентгеноспектрального микроанализа и дифракции быстрых электронов влияния

ионов галлия достаточно высоких энергий на поверхность обрабатываемого материала при высоких ускоряющих напряжениях (до 30 кВ) и дозах до 10 мкКл/см² показало значительную модификацию структуры приповерхностного слоя кремния с образованием аморфизированного слоя толщиной до 20 нм. Одновременно установлено, что обрабатываемая ионным пучком поверхность кремния содержит значительное количество галлия. Данный обнаруженный эффект может быть учтён на последующих этапах обработки материалов остросфокусированным ионным пучком, когда вместо жёсткого ионно-лучевого воздействия на твёрдое тело, используется стимулированное ионным пучком газовое химическое травление за счёт введения в зону реакции химически активных сред в виде XeF₂ или I₂.

Третья глава диссертации посвящена исследованию процессов ионно-стимулированного химического травления различных материалов электронной техники Si, SiC, SiO₂, Al, C (графит) с помощью химических реагентов I₂, XeF₂, H₂O, вводимых в реакционный объём.

Основной задачей данного раздела являлось установление оптимальных режимов ионно-стимулированного травления в отношении достижения скорости травления и избирательности. Сканирование осуществлялось по шаблону 1x5 мкм.

Рис. 9 иллюстрирует изменение скорости травления одного из наиболее устойчивых к химическому травлению материалов – карбида кремния. Табл. 1 обобщает результаты исследований по оценке скорости (эффективности) травления, представленной как количество травящегося объёма по отношению к дозе воздействия (мкм³/нКл). Как и предполагалось, фторсодержащие реагенты, наиболее эффективны по отношению к кремнию и кремнийсодержащим соединениям, в то время как для металла алюминия наиболее пригоден галоген йод.

Полученные данные по скоростям травления газовыми реагентами в условиях ионно-стимулированных химических реакций позволили построить диаграмму избирательности процессов ионно-стимулированного химического

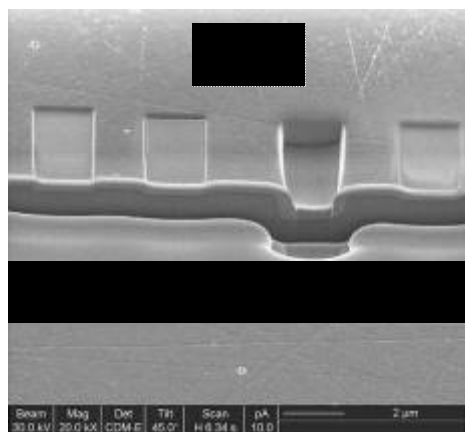


Рис. 9. Ионно-стимулированное химическое травление SiC.

Табл. 1. Скорость (эффективность) ионно-стимулированного химического травления, мкм³/нКл.

Материал	Реагент			
	Ga ⁺	I ₂	XeF ₂	H ₂ O
Si	0,35	0,88	9,52	0,45
SiC	0,23	0,16	0,93	0,20
Al	0,29	2,18	0,43	0,10
C (графит)	0,23	0,41	0,80	0,35
SiO ₂	0,35	0,32	1,47	0,17

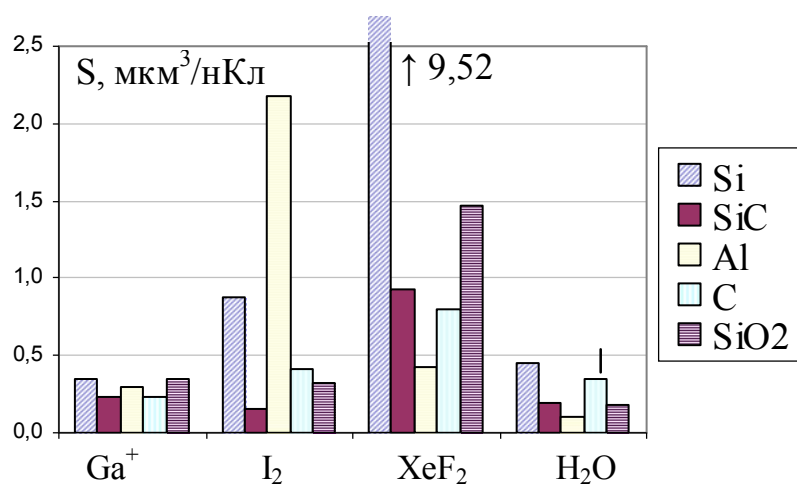


Рис. 10. Диаграмма избирательности процессов ионно-стимулированного химического травления.

травления (рис. 10). Например, в случае травления кремния переход от ионно-лучевого травления ионами галлия к ионно-химическому травлению с XeF₂ обеспечивает увеличение скорости почти в 30 раз.

В условиях ионно-стимулированного химического травления определено влияние

плотности тока и ускоряющего напряжения на химическую избирательность процесса и эффективность травления (рис.11). Установлено значительное влияние плотности ионного тока, с возрастанием которого эффективная скорость травления падает, достигая скоростей ионно-лучевого распыления. Поэтому в качестве одного из основных контролируемых параметров в ионно-стимулированном процессе выбрана именно плотность ионного тока j_s . При её высоких значениях ухудшается селективность процесса, но она необходима для достижения собственно процесса травления по заданному геометрическому закону.

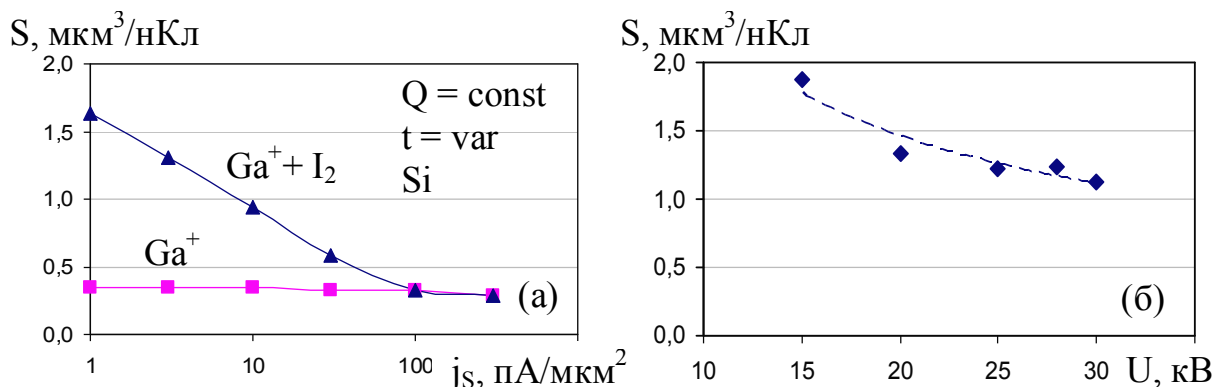


Рис. 11. Эффективность ионно-стимулированного химического травления с участием I₂ в зависимости от: а) плотности тока, б) ускоряющего напряжения.

Экспериментально установлено также уменьшение эффективности травления от ускоряющего напряжения. При контролируемых (устанавливаемых оператором) токах ионного пучка рост ускоряющего напряжения способствует фокусировке и приводит к увеличению плотности тока в зоне обработки, что повышает локальность процесса, но уменьшает его химическую составляющую.

Таким образом, установлено, что при ионно-стимулированном химическом травлении скорость процесса травления различных материалов опреде-

ляется выбором активируемого химического агента и плотностью тока ионного пучка, а обеспечение требуемой селективности травления достигается выбором оптимального значения плотности тока при определённых ускоряющих напряжениях.

В четвёртой главе рассмотрены процессы ионно-стимулированного осаждения материала. Исходя из предоставленных аппаратурой возможностей, исследовались процессы ионно-стимулированного осаждения платины из её металлоорганического соединения и оксида кремния из тетраэтоксисилана.

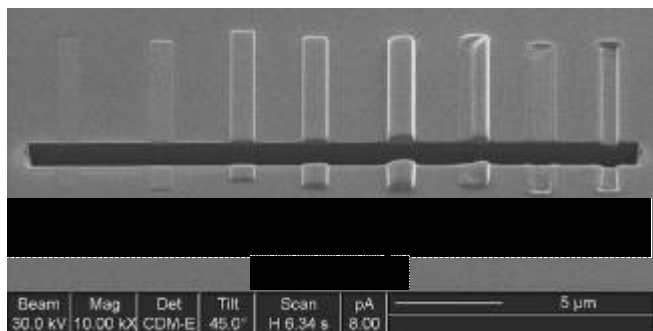


Рис. 12. Осаждение структур Pt.

Предметом исследования являлась достижимая скорость осаждения вышеуказанных материалов и оценка ухода реальных геометрических параметров в зоне осаждения Pt и SiO_x от заданной области сканирования ионным пучком. Результаты исследования в зависимости от плотности тока (как и в случае ионно-химического травления) представлены на рис. 12.

В рамках практически используемых плотностей тока, которые, как ранее было показано, должны влиять на скорость протекания ионно-стимулированных химических процессов и на пространственное разрешение, установлено значительное раз-

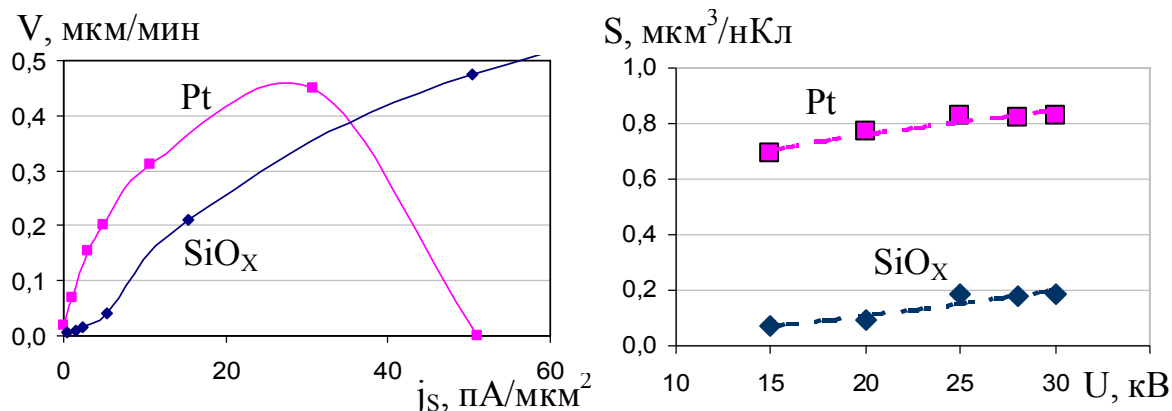


Рис. 13. Ионно-стимулированное химическое осаждение: зависимость скорости от плотности тока и эффективности от ускоряющего напряжения.

личие в поведении зависимостей скоростей осаждения Pt и SiO_x (рис. 13). В случае осаждения Pt установлено оптимальное значение плотности тока, выше которой наблюдается вместо роста скорости осаждения материала её спад вплоть до перехода от роста к травлению. В условиях высокой плотности ионного тока проявляется недостаток химически активного реагента для протекания стимулированных химических реакций, что повышает вероятность перехода к ионно-лучевому травлению. В то же время в указанном интервале плотностей тока для SiO_x спад скорости роста не наблюдался, что может найти своё объяснение в более низкой активности процесса разложения тетра-

этоксисилана по сравнению с металлорганическим соединением Pt.

На это же указывает зависимость (рис. 13) эффективности осаждения Pt и SiO_x (в ранее принятой форме $\text{мкм}^3/\text{нКл}$) от ускоряющего напряжения, значение которых отличаются в несколько раз. Рост ускоряющего напряжения вызывает незначительное увеличение эффективности осаждения, что объясняется повышением энергии ионного пучка, стимулирующего химические превращения.

Таким образом, при ионно-стимулированном осаждении материала определяющим фактором в обеспечении скорости процесса является плотность тока ионного пучка, оптимальное значение которой устанавливается, исходя из соотношения скоростей процессов осаждения и перераспыления осаждаемого материала, а локальность процесса осаждения, т.е. латеральное пространственное разрешение, ухудшается в условиях больших значений токов и ускоряющих напряжений.

Анализ состава осаждаемых слоёв Pt и SiO_x показал, что, несмотря на их пригодность для выполнения функций коммутации и изоляции, в их состав входят химические элементы, присутствующие в исходных газовых реагентах.

Пятая глава посвящена вопросам практического использования полученных результатов ионно-лучевой и ионно-стимулированной обработки материалов для решения задач прецизионного сверхлокального препарирования ИМС с субмикронными топологическими нормами и наноразмерной обработки кремния, карбида кремния и вольфрама для формирования матриц автоэмиссионных острий и ионной заточки зондов атомно-силовой микроскопии.

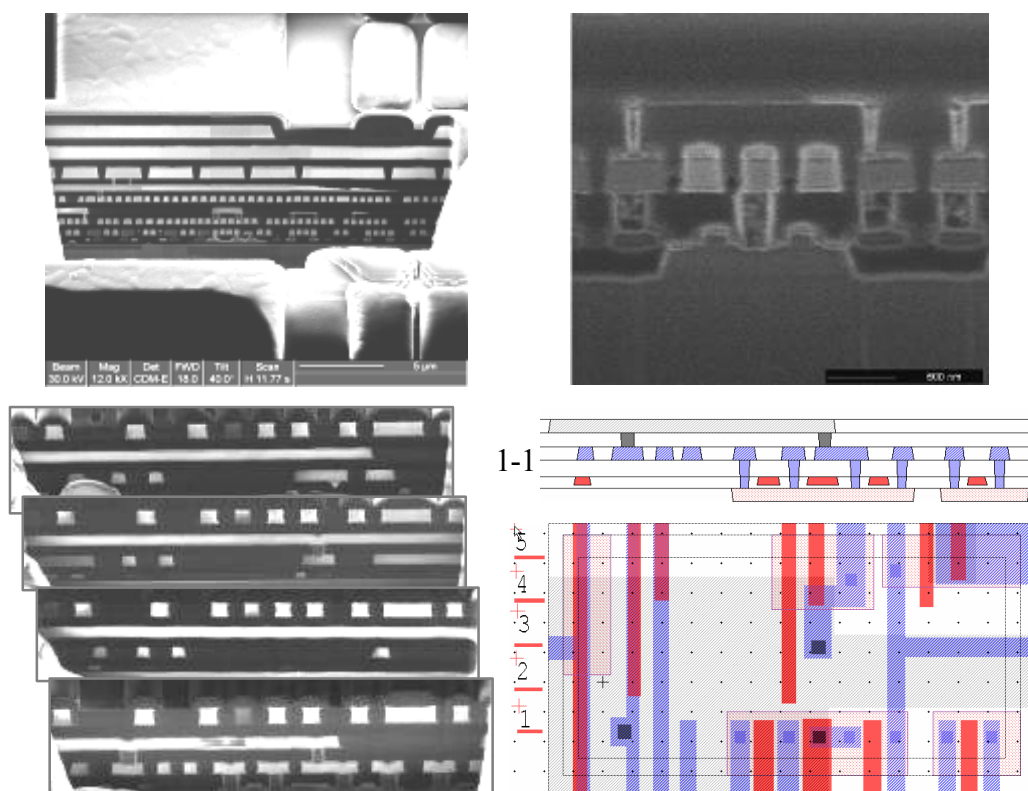


Рис. 14. Последовательность процесса препарирования ИМС.

Разработанные маршруты препарирования ИМС включали выбор интересующего участка на поверхности ИМС, получение поперечного сечения методом локального ионно-лучевого травления, дополнительное декорирование поверхности сечения с использованием ионно-химических процессов, послойную съёмку последовательности срезов поперечных сечений фрагмента ИМС с шагом не хуже топологической нормы, формирование панорамного изображения и восстановление фрагмента топологии. Рис. 14 иллюстрирует процесс препарирования ИМС с топологической нормой 130 нм, содержащей 9 слоёв коммутации.

Возможность реализации ионно-лучевой наноразмерной обработки практически любых материалов предопределила использование в данной работе ионного пучка для ионного утонения (заточки) зондов для атомно-силовой микроскопии с целью получения зондов с максимальным аспектным

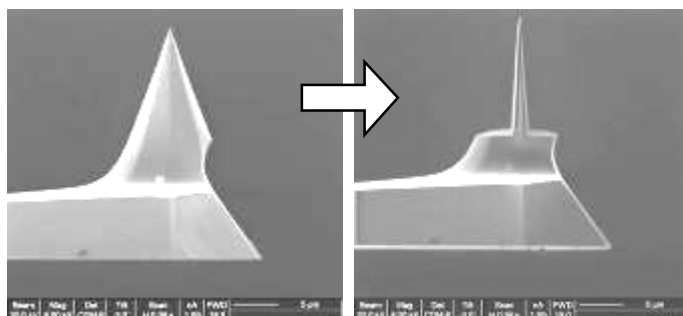


Рис. 15. Заточка зонда АСМ.

отношением (рис. 15). В ходе выполнения экспериментов на базе стандартных кантилеверов были получены образцы АСМ-зондов с аспектным отношением до 1:20 при радиусе активной части в интервале 60–100 нм.

В рамках использования ионно-лучевых технологий для формирования нового поколения 2D и 3D приборов с наноразмерными активными областями были созданы планарные и трёхмерные автоэмиссионные структуры (рис. 16). Планарные конструкции формировались в виде вольфрамового острия на диэлектрической подложке, а 3D структуры представляли собой матрицы автоэмиссионных острий из кремния и карбида кремния. Сформированные автоэмиссионные структуры показали свою работоспособность, что подтверждено получением экспериментальных вольт-амперных характеристик, которые имеют вид типичный для автоэлектронной эмиссии в рамках представлений Фаулера-Нордгейма. На созданные таким способом автоэлектронные структуры получен патент России.

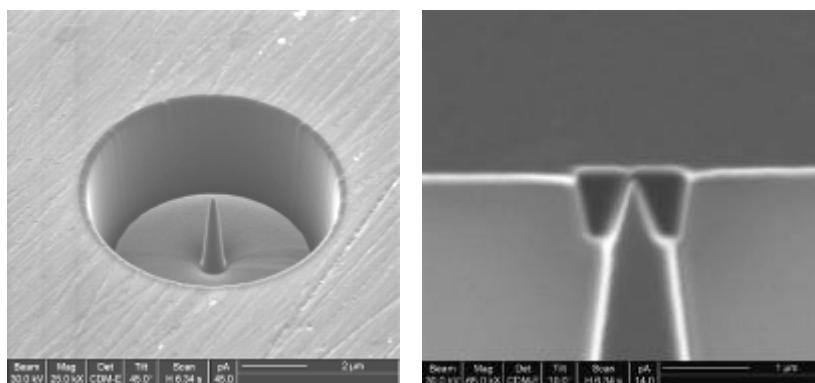


Рис. 16. 3D и 2D автоэмиссионные структуры на кремнии и вольфраме.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследованы процессы обработки материалов электронной техники остросфокусированным ионным пучком, разработана методика ионно-лучевого формирования 2D и 3D микро- и наноразмерных объектов и показано, что основным параметром оптимизации в достижении требуемого пространственного разрешения и аспектного отношения при ионно-лучевом наноразмерном травлении является ток ионного пучка. Определены коэффициенты распыления базовых материалов электронной техники кремния и карбида кремния, а также определены зависимости скорости ионно-лучевого распыления материалов от угла падения ионного пучка.

2. Исследованы процессы ионно-стимулированного химического травления Si, SiC, SiO₂, Al, C (графит), разработана методика высокоразрешающего локального селективного травления гетерогенных многослойных объектов и показано, что при ионно-стимулированном химическом травлении скорость процесса травления различных материалов наряду с составом активируемого химического агента в значительной степени определяется выбором плотности ионного тока. Определены селективности травления совокупности материалов электронной техники по отношению к двум основным ионно-активируемым химическим агентам I₂ и XeF₂, и установлено, что переход от ионно-лучевого травления галлием к ионно-стимулированному химическому травлению позволяет повысить скорость травления до 30 раз.

3. Исследованы процессы ионно-стимулированного химического локального осаждения платины и оксида кремния, разработана методика их нанесения по заданному топологическому закону для формирования слоёв коммутации на основе Pt и изоляции в виде SiO_x. Показано, что при ионно-стимулированном осаждении материалов определяющим фактором в обеспечении скорости процесса является плотность ионного тока, а локальность, т.е. латеральное пространственное разрешение, ухудшается в условиях больших значений токов и ускоряющих напряжений ионного пучка.

4. Разработан комплекс процессов препарирования, модифицирования и формообразования объектов интегральной электроники и микросистемной техники с использованием остросфокусированного ионного пучка в режимах локального и избирательного травления, а также локального осаждения вещества. Разработанный комплекс применён в условиях:

- прецизионного локального препарирования ИМС с топологической нормой 0,13 мкм и 9 слоями коммутации;

- восстановления работоспособности ИМС с топологической нормой 0,35 мкм локальной внутренней перекоммутации отдельных элементов во втором и третьем уровнях токоразводки ионно-стимулированным осаждением Pt и SiO_x;

- формирования 3D наноразмерных структур в виде Si и SiC матриц автотэмиссионных острий, а также зондов АСМ с высоким аспектным отношением при радиусе острия 60-100 нм.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:
Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:*

1. 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 журнала технической физики, 2005. -Т.31. Вып. 15. -С. 1-6.

2. Фокусированный ионный пучок как технология локального прецизионного травления / В.В. Лучинин, А.Ю. Савенко // Вакуумная техника и технология, 2008. -Т.18, № 3. -С. 191-195.

3. Ионно-лучевая технология сверхлокального препарирования интегральных схем / М.А. Кузнецова, В.В. Лучинин, А.Ю. Савенко // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. Серия “Физика твёрдого тела и электроника”, 2006. -№ 2. -С.28-35.

Другие статьи и материалы конференций:

4. Лучинин, В.В. Наноразмерные ионно-лучевые технологии / В.В. Лучинин, А.Ю. Савенко // Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы. Монография. / Под ред. В.В. Лучинина и Ю.М. Таирова. – М.: Физматлит, 2006. -С. 284-304.

5. Устройство для моделирования вакуумной электродной системы: пат. RU67775 Рос. Федерация: МПК H01J 37/20, H01J 37/30/ Савенко А.Ю., Лучинин В.В.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербург, СПбГЭТУ - 2007116547/22; заявл. 02.05.2007; опубл. 27.10.2007, Бюл. № 30. - 2 с: ил.

6. Методы микро- и наноразмерной обработки материалов и композиций / В.В. Лучинин, А.Ю. Савенко, А.М. Тагаченков // Петербургский Журнал Электроники, 2005. -№ 2. -С. 3-14.

7. S.G. Zybtsev, V.Ya. Pokrovskii, I .G. Gorlova, Yu.I. Latyshev, V.V. Luchinin, A.Yu. Savenko, and V.N. Timofeev, “Nucleation of normal phase in dynamic resistive state in submicron Bi2212 bridges” (Образование нормальной фазы в состоянии динамической резистивности в субмикронных мостиках Bi2212), J. Low Temp. Phys., 139, 351 (2005).

8. S.G. Zybtsev, V.Ya. Pokrovskii, I.G. Gorlova, Yu.I. Latyshev, V.V. Luchinin, A.Yu. Savenko, “Switching and Hysteresis on the I-V Curves of Submicron BSCCO (2212) Bridges” (Переключение и гистерезис на вольт-амперных зависимостях субмикронных мостиков BSCCO), J.Low Temp.Phys.,139, 281 (2005).

9. Анализ технологии и топологии ИМС с помощью остророфокусированного ионного пучка / Д.А. Евдокимов, М.А. Кузнецова, А.Ю. Савенко // Сборник статей по материалам научной молодёжной школы “Технология и дизайн микросхем”. - СПб, 2005. -С. 17-25.

10. Наноразмерные ионно-лучевые экспресс-технологии / В.В. Лучинин, А.Ю. Савенко // Индустрия, 2006. -№ 2 (44). -С. 42-43.

11. Сверхлокальное избирательное ионно-лучевое препарирование интегральных схем / М.А. Кузнецова, В.В. Лучинин, А.Ю. Савенко // Петербургский Журнал Электроники, 2006. -№ 3. -С. 25-38.

12. Макропористый кремний при препарировании ионным пучком / Э.Ю. Бучин, С.П. Зимин, Ю.М. Канагеева, В.В. Лучинин, В.А. Мошников, А.Ю. Са-

венко // Петербургский Журнал Электроники, 2007. -№ 1. -С. 30-34.