

На правах рукописи

КОЛПАКОВ Всеволод Анатольевич

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ
ПРОСТРАНСТВЕННО-СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВЛЕНИЯ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
НАПРАВЛЕННЫМ ПОТОКОМ ВНЕЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ**

Специальность

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

САМАРА – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» и Учреждении Российской академии наук Институте систем обработки изображений РАН

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Казанский Н.Л.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Степанов С.А.
доктор физико-математических наук, доцент
Шишковский И.В.
доктор технических наук, профессор
Комов А.Н.

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт электронной техники» (технический университет) (г. Москва)

Защита состоится «__» _____ 2010 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 в СГАУ по адресу:
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор

В.Г. Шахов

Общая характеристика работы.

Диссертация посвящена разработке теоретических основ, приборов и методов пространственно-селективного травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов направленным потоком внеэлектродной плазмы.

Актуальность проблемы. Диэлектрические и полупроводниковые материалы применяются во всех отраслях народного хозяйства. Плазменное травление указанных материалов широко используется в микро-, наноэлектронике, дифракционной оптике и нанофотонике. Развитие перечисленных отраслей определяется расширением спектра формируемых микро-, наноструктур, прецизионностью и высокой равномерностью вакуумно-плазменной обработки широкоапертурных пластин. Возникают задачи увеличения аспектного отношения канавок получаемых структур.

Современные технологии вакуумно-плазменной обработки материалов используют реакторы, в которых плазма генерируется газовым разрядом в межэлектродном пространстве (Орликовский А.А., 2006 год, Путря М.Г., 2005 год, работы К.Н. Schoenbach, R. Verhappen, Stark Robert H., Кудряшова С.А., Яфарова Р.К., J.R. Woodworth, G.A. Heбner). Электроды, при этом, могут находиться внутри вакуумной камеры, в которой располагается реактор, либо вынесены за ее пределы. Такой подход отличается увеличением конструктивной сложности, энергоемкости источников плазмы и не устраняет для всех рассмотренных вакуумно-плазменных систем и разрядов, формирующих плазму, общих для них недостатков: уменьшения скорости травления с увеличением относительных размеров поверхности, в том числе за счет ионного затенения и затенения нейтралами, эффекта микрозагрузки; необходимость оптимизации параметров систем (ВЧ-смещение, мощность, давление и др.); взаимодействие плазмы со стенками реактора; влияние материала, геометрии и свойств поверхности подложки на параметры газовых разрядов; зависимость параметров заряженных частиц от режимов работы газоразрядного устройства.

От перечисленных недостатков можно избавиться в случае применения плазмы, генерируемой газовым разрядом во внеэлектродном пространстве. Сформировать такую плазму, согласно работам Вагнера И.В., Болгова Э.И. и др. (1974 год), позволяет высоковольтный газовый разряд, открытый в институте электросварки имени Е.О. Патона Академии наук УССР в 70-х годах прошлого столетия. Однако в настоящее время отсутствуют реакторы, в которых направленные широкоформатные потоки низкотемпературной внеэлектродной плазмы генерируются данным разрядом. Как следствие, отсутствуют и сведения о комплексных теоретических, экспериментальных исследованиях физических явлений, порождаемых этим классом объектов, в целях их применения для пространственно-селективного травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов.

С другой стороны, качество травления определяется технологиями контроля степени чистоты исходной поверхности.

Существует широкий спектр методов и средств измерения чистоты поверхности подложек (Перескокова А.П., 1979 год, Нефедов В.И., Черепнин В.Т., 1983 год, Вудрав Д., Делчар Т., 1989 год, Борисов С.Ф., 2001 год, Волков А.В., Моисеев О.Ю., Бородин С.А., 2006 год). Однако, проведение экспресс – контроля требует быстрого и достоверного определения соответствия состояния поверхности контролируемых подложек технологической чистоте. Многие из существующих методов и реализующих их приборов для этой цели неприемлемы в связи с ограниченной мобильностью, специальными условиями эксплуатации и низкой производительностью. Это объясняет применение в процессе измерения специальной технологической операции очистки поверхности зонда-индентора, а для калибровки параметров прибора - подложек с эталонным загрязнением поверхности. Недостатками перечисленных методов являются возможность проведения измерения только конкретного типа загрязнений на исследуемой поверхности, ее загрязнение в процессе контроля, нестабильность показаний приборов. Методы электронной оже-спектроскопии (ЭОС), нейтронно-активационного анализа (НАА), растровой электронной микроскопии, масс-спектроскопии вторичных ионов (МСВИ) и т.д., обладая достаточной точностью контроля $10^{-6} \div 10^{-10}$ г/см², являются аналитическими, требуют значительных затрат времени при контроле широкоформатных (50-70 мм) поверхностей. Вследствие этого, создание методов экспресс – контроля чистоты поверхности, отличающихся простой конструкцией применяемых приборов, малой длительностью проведения процесса измерения, не требующих применения специальных зондов, операций калибровки прибора, очистки поверхности зонда-индентора и методов обработки их поверхности, отсутствием механических повреждений и изменений свойств поверхности исследуемой подложки, является актуальной проблемой.

Указанное доказывает актуальность данной диссертации, её целей и задач.

Связь с государственными и международными программами.

Работы по теме диссертации выполнялись в соответствии с планами фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ по программам:

российско-американская программа «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE, CRDF Project, гранты № RUX0-014-SA-06 и № Y3-P-14-03); аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)»; гранты Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ № НШ-1007.2003.01, № НШ-3086.2008.9 и № МК-

3038.2007.9; гранты Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №07-07-97601 и № 04-02-08094).

Цель и задачи работы. Целью настоящей работы является создание приборов и методов пространственно-селективного травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов направленным потоком внеэлектродной плазмы.

В соответствии с поставленной целью определены и основные задачи диссертации, а именно:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование электрофизических характеристик высоковольтного газового разряда, физических основ его возникновения и самоподдержания;
2. Создание и апробирование газоразрядных приборов, формирующих направленные потоки внеэлектродной плазмы с заданным сечением.
3. Разработка методов оценивания величин изменения поверхностной концентрации загрязнений, адгезии тонких металлических пленок, скоростей травления материалов и температуры их поверхности при обработке внеэлектродной плазмой; экспериментальное исследование зависимостей перечисленных величин от физических факторов (тока разряда, ускоряющего напряжения, длительности, температуры обработки) для ряда материалов (диоксид кремния, карбид кремния, алмазоподобные пленки и полимеры);
4. Разработка методов очистки и увеличения адгезионной прочности маскирующих слоев во внеэлектродной плазме на основе трибометрического экспресс – контроля чистоты поверхности подложек;
5. Создание методов пространственно-селективного травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов направленным потоком внеэлектродной плазмы.

Научная новизна. При выполнении настоящей диссертационной работы впервые:

1. Построены модели взаимодействия частиц внеэлектродной плазмы с полимерами, гетероструктурами, атомно-молекулярными комплексами поверхности твердого тела, позволяющие оценить величины изменения поверхностной концентрации загрязнений, адгезии тонких металлических пленок, скорости плазмохимического и ионно-химического травления материалов, температуры их поверхности, высоты стравленного слоя полимера при обработке поверхности в плазме;
2. Предложен и апробирован новый класс газоразрядных приборов, формирующих направленные потоки внеэлектродной плазмы, для пространственно-селективного травления широкоформатных пластин диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов;

3. Экспериментально исследованы зависимости величины изменения поверхностной концентрации загрязнений, адгезионной прочности тонких металлических пленок, скоростей травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов (диоксида кремния, карбида кремния, алмазоподобных пленок и полимера) от физических параметров внеэлектродной плазмы;
4. Разработан прецизионный метод экспресс-контроля чистоты поверхности подложек, использующий для контроля чистоты коэффициент трения скольжения и позволяющий измерять чистоту поверхности в диапазоне $10^{-6} - 10^{-10}$ г/см², отличающийся простой конструкцией применяемого прибора, малой длительностью проведения процесса измерения (5-15 с), не требующий применения специальных зондов и методов обработки их поверхности, не приводящий к механическому повреждению и изменению свойств исследуемой поверхности;
5. Разработаны методы финишной очистки поверхности, формирования маскирующих слоев с повышенной адгезионной прочностью, плазмохимического и ионно-химического травления материалов во внеэлектродной плазме, позволяющие осуществлять очистку поверхности до уровня 10^{-9} г/см², формировать маскирующие металлические слои со значением адгезионной прочности 25 Н/мм² и пространственно-селективное травление поверхности на широкоформатных пластинах;
6. Обнаружен и экспериментально подтвержден эффект экстракции химически неактивных частиц плазмы из области травления материала;
7. Обнаружен эффект увеличения адгезии тонких металлических пленок в структуре металл-диэлектрик после бомбардировки ее поверхности потоком заряженных частиц внеэлектродной плазмы, объясняемый диссоциацией молекул углеводородных загрязнений и образованием активных радикалов и химических соединений на поверхности раздела металл-диэлектрик;
8. Обнаружен эффект объемной модификации полимера, объясняющий с единой точки зрения кинетику травления полимерной матрицы и образования модифицированных слоев во внеэлектродной плазме;
9. Разработан метод формирования микрорельефа на поверхности полупроводниковых материалов на основе экспериментального исследования механизма их аномального растворения в расплаве при обработке структуры металл-полупроводник внеэлектродной плазмой.

Практическая ценность результатов работы определяется следующим:

- экспериментально доказана эффективность практического использования внеэлектродной плазмы для очистки поверхности подложек, увеличения адгезии тонких металлических пленок, пространственно-селективного травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов, изготовления микроструктур с помощью применения каталитической маски, разработаны

соответствующие методы, реализация которых отличается низкими себестоимостью и энергоемкостью;

- разработанные метод и прибор экспресс-контроля чистоты поверхности являются неразрушающими, свободны от недостатков, характерных существующим зарубежным и отечественным аналогам;

- уменьшены требования к технологическому процессу пространственно-селективного травления в низкотемпературной плазме на основе снижения процентного содержания кислорода в плазме, загрязнения продуктами травления поверхности материала, требований к чистоте рабочих газов и поверхности;

- показана возможность формирования микроструктур на пластинах большого диаметра (78 мм и более).

В целом, создание уникального класса приборов, теоретических основ и методов пространственно-селективного травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов направленным потоком внеэлектродной плазмы позволяет получить комплексные технологические решения проблемы мелкосерийного и серийного изготовления широкого спектра микроструктур на пластинах большой апертуры.

На защиту выносятся:

- класс газоразрядных приборов, формирующих направленные потоки низкотемпературной внеэлектродной плазмы;

- концепция формирования низкотемпературной плазмы в виде направленного потока активных частиц в области поверхности материала, включающая модели взаимодействия частиц внеэлектродной плазмы с полимерами, гетероструктурами, атомно-молекулярными комплексами поверхности твердого тела, позволяющие оценить величины изменения поверхностной концентрации загрязнений, адгезии тонких металлических пленок, скорости плазмохимического и ионно-химического травления материалов, температуры их поверхности и высоты стравленного слоя полимера;

- трибометрический метод неразрушающего экспресс-контроля чистоты поверхности подложек, использующий для контроля чистоты коэффициент трения скольжения;

- экспериментально установленные зависимости величин изменения поверхностной концентрации загрязнений, адгезионной прочности тонких металлических пленок, скоростей травления диоксида кремния, карбида кремния, алмазоподобных пленок и полимера от электрофизических параметров плазмы;

- экспериментально установленные закономерности влияния режимов очистки, формирования маскирующих слоев, травления на параметры тестовых микроструктур (высота микрорельефа, вертикальность стенок ступеньки микрорельефа, шероховатость) во внеэлектродной плазме;

- методы пространственно-селективного травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов направленным потоком внеэлектродной плазмы;
- экспериментальные результаты, подтверждающие эффект экстракции химически неактивных частиц из области травления;
- теория формирования металлизированных маскирующих слоев, отличающихся особой стойкостью к плазменному воздействию, включающая механизм увеличения их адгезии к поверхности диэлектрика в результате обработки внеэлектродной плазмой;
- теоретическое описание процесса плазмохимического травления полимера, включающее механизм образования под действием внеэлектродной плазмы модифицированного слоя в объеме полимерной матрицы, дополняющее известную концепцию К-слоя.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Электроника и информатика-97», г. Москва (г. Зеленоград) (1997 г.); Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем», г. Пенза, (1997 г.); Международная конференция «Математическое моделирование», г. Самара, (2001 г.); II Международный симпозиум «Аэрокосмические приборные технологии», г. Санкт-Петербург (2002 г.); Международная конференция «Микро- и наноэлектроника-2003», г. Москва (г. Звенигород); Третья конференция научно-образовательных центров программы «Фундаментальное исследование и высшее образование», г. Москва (2003 г.); Конференция молодых ученых Научно-образовательного центра математических основ дифракционной оптики и обработки изображений, г. Самара, (11 июня 2003 г. 22-25 октября 2003 г.); Международная конференция «Микро- и наноэлектроника-2005», г. Москва (г. Звенигород); VII-ая Международная научно-техническая конференция «АВИА-2006», г. Киев (2006 г.); Всероссийская научно-техническая конференции «Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники», г. Пенза (2006 г.); Всероссийская научно-техническая конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», г. Самара (2006 г.); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск (2006 г.); VIII-ая Международная научно-техническая конференция «АВИА-2007», г. Киев (2007 г.); Международная конференция «Микро- и наноэлектроника-2007», г. Москва (г. Звенигород); Научные семинары «Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники» Физико-технологического института РАН (ФТИАН), Московского государственного университета электронной техники (МИЭТ), Самарского государственного

аэрокосмического университета и Института систем обработки изображений РАН (2007-2009 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 54 печатные работы, в том числе 1 монография и 8 патентов на изобретение. При этом 20 работ опубликовано в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав с краткими выводами, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Она изложена на 278 страницах машинописного текста и содержит 124 рисунка, 46 таблиц. В списке цитируемой литературы 262 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи диссертации, дан обзор научных работ по рассматриваемой тематике, приведены основные положения, представляющие научную новизну и практическую ценность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

Первая глава содержит результаты теоретического и экспериментального исследования электрофизических характеристик высоковольтного газового разряда, физических основ возникновения и самоподдержания разряда. Полученные результаты доказывают способность высоковольтного газового разряда формировать широкоформатные направленные потоки (78 мм и более) внеэлектродной плазмы с высокой степенью равномерности распределения заряженных частиц по сечению с целью ее применения для пространственно-селективного травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов.

Возникновение высоковольтного газового разряда наблюдается при сближении электродов до темного астонового пространства и наличии в аноде сквозного отверстия, что приводит к значительному искривлению в данной области силовых линий электрического поля. Проведенный анализ распределения эквипотенциалей электрического поля показал увеличение длины прямолинейного участка силовой линии в направлении оси симметрии отверстия в аноде. Теоретически и экспериментально подтверждено участие осевой зоны отверстия в аноде в самоподдержании разряда, в то время как в области края отверстия длина прямолинейного участка меньше длины свободного пробега электрона, и высоковольтный разряд не возникает.

На основе проведенных исследований предложен и апробирован новый класс газоразрядных приборов, формирующих направленные потоки внеэлек-

тродной плазмы с заданным сечением для пространственно-селективного травления широкоформатных пластин диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов. Обоснована концепция формирования низкотемпературной внеэлектродной плазмы в виде направленного потока активных частиц в области поверхности материала.

Результаты исследований использовались для создания физических и математических моделей взаимодействия частиц внеэлектродной плазмы с атомно-молекулярными комплексами поверхности твердого тела, гетероструктурами и полимерами.

Во второй главе решаются проблемы создания эффективных методов экспресс-контроля чистоты поверхности и удаления с нее загрязнений на основе теоретического и экспериментального исследования механизма очистки поверхности во внеэлектродной плазме с целью повышения качества пространственно-селективного травления. Разработан трибометрический метод экспресс-контроля чистоты поверхности подложек, использующий для ее оценки коэффициент трения скольжения, реализуемый прибором (трибометром), внешний вид и схема конструкции подложкодержателей которого представлены на рис. 1 а, б.

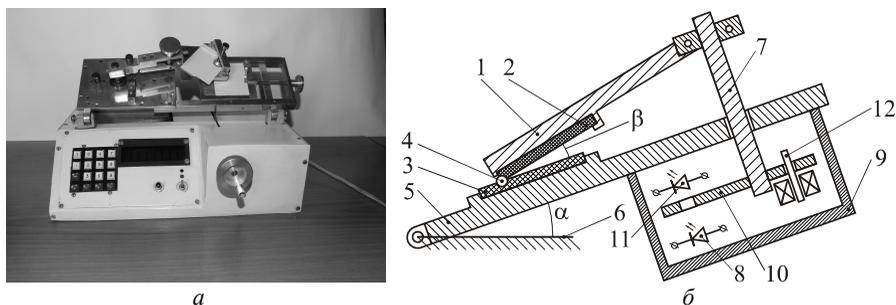


Рисунок 1 – Внешний вид (а) и схема конструкции подложкодержателей трибометра (б): 1 - подложкодержатель подложки-зонда; 2 - подложка-зонд; 3 - исследуемая подложка; 4 – точка трибометрического взаимодействия двух подложек; 5 - подложкодержатель исследуемой подложки; 6 - корпус трибометрического прибора; 7 - штанга крепления подложкодержателя подложки-зонда; 8 - светодиод; 9 - светонепроницаемая крышка; 10 - металлический диск; 11- фотодиод; 12 - фиксатор штанги

С помощью атомно-силовой микроскопии контролируемой поверхности до и после трибометрического взаимодействия подложек доказано, что разработанные метод и прибор являются неразрушающими. Представленные неразрушающие трибометрический метод и прибор экспресс-контроля не требуют применения эталонных поверхностей для калибровки трибометра,

специальных зондов и методов обработки их поверхности. Оценка чистоты поверхности проводится исходя из значения коэффициента трения скольжения, что расширило диапазон измеряемой степени чистоты поверхности подложек по сравнению с зарубежными и отечественными аналогами до 10^{-6} – 10^{-10} г/см² и сократило время измерения до 5 – 15 с.

Предложенная модификация трибометра, основанная на включении в оптическую схему прибора специальной дифракционной решетки и использовании автоматизированной обработки экспериментальных данных, существенно увеличила его разрешающую способность (в 16 раз). С помощью полученных результатов разработана методика экспресс-контроля чистоты поверхности, позволяющая оценить степень её загрязнения сразу после плазменной очистки, до разгерметизации вакуумной камеры, и проводить экспресс-отбраковку подложек.

Построены физическая и математическая модели взаимодействия частиц внеэлектродной плазмы с атомно-молекулярными комплексами органических загрязнений, адсорбированных на поверхности твердого тела, на основе экспериментального исследования механизма очистки поверхности в плазме. Показано, что основными процессами данного механизма являются: физическое распыление отрицательными ионами; химическое травление отрицательными ионами; химическое травление радикалами, образованными за счет диссоциации нейтральных молекул вследствие их ионной бомбардировки отрицательными ионами; химическое травление радикалами, образованными за счет диссоциации нейтральных молекул электронным ударом. Математическая модель представляет собой аналитическое описание перечисленных процессов, конечное выражение которого связывает величину остаточной концентрации органических загрязнений с физическими параметрами обработки в плазме:

$$C_d = \rho h - \frac{BM}{N_A} \left[\frac{(k_1 + k_3^C + k_3^H) \exp\left(\frac{U - U_{gr}}{U}\right) - 1}{k_i^* k_1 J_i^- \theta + k_e^* k_1 J_e \theta} \right] J_i^- (1 - \theta) + t, \quad (1)$$

$$\theta = \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{NO}) J_i^-}{s_a J_n^{NO}}} + \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{NO_2}) J_i^-}{s_a J_n^{NO_2}}} + \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{N_2O}) J_i^-}{s_a J_n^{N_2O}}} + \frac{1}{1 + \frac{(k_1 + k_2^{O_2}) J_i^-}{s_a J_n^{O_2}}}$$

где U – ускоряющее напряжение; t – длительность процесса обработки; h – толщина пленки загрязнений; ρ – плотность загрязнений; B – значение штрафной функции, полученной из натурального эксперимента, являющееся константой; M – молярная масса органических загрязнений; U_{gr} – напряжение на электродах газоразрядного прибора, при котором энергия иона в момент подлета его к поверхности обработки находится на границе энергий плазмохимического и ионно-

химического травления; k_1 – коэффициент плазмохимического травления; k_3^C, k_3^H , – коэффициенты физического распыления атомов углерода и водорода; k_e^* – безразмерный коэффициент электронно – стимулированного травления; k_i^* – безразмерный коэффициент ионно – стимулированного травления; $k_2^{N_2O}, k_2^{O_2}$ – коэффициенты десорбции нейтральных молекул; $J_n^{N_2O}, J_n^{O_2}$ – потоки нейтральных молекул на поверхность; J_i^- – поток отрицательных ионов на поверхность; s_a – коэффициент прилипания химически активных частиц к поверхности; N_A – число Авагадро.

Во внеэлектродной плазме воздуха экспериментально исследованы зависимости величины изменения поверхностной концентрации загрязнений от физических параметров: ускоряющего напряжения, тока разряда, длительности процесса очистки (рис.2 а, б) на основе предложенных метода и прибора трибометрического экспресс-контроля чистоты.

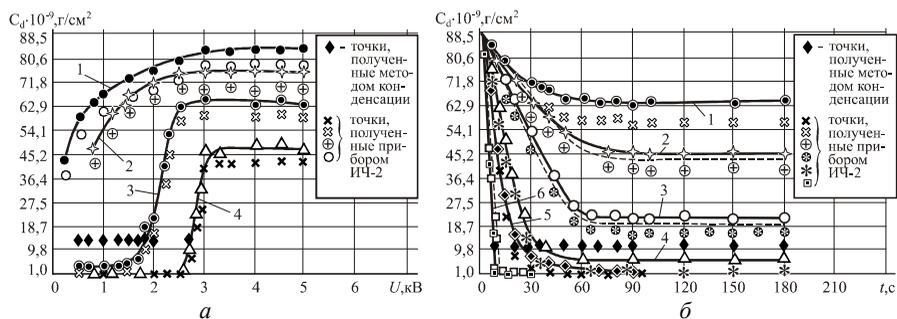


Рисунок 2 – Зависимость остаточной концентрации органических загрязнений на поверхности подложки от физических факторов процесса очистки: а – ускоряющего напряжения (1 – 0,5 мА; 2 – 1 мА; 3 – 2 мА; 4 – 3 мА; $t = 10\text{с}$); б – длительности очистки: (1 – 0,5 мА; 2 – 1 мА; 3 – 1,4 мА; 4 – 1,5 мА; 5 – 2,6 мА; 6 – 3 мА; $U = 3 \text{кВ}$).

Штриховыми линиями показана расчетная зависимость (1)

Достоверность математической модели и её адекватность физическому процессу очистки подтверждается анализом теоретических и экспериментальных кривых, представленных на рис. 2 б, расхождение между которыми не превышает 10%, применением стандартных прецизионных методов и средств измерения.

В результате проведенных исследований с использованием разработанных приборов предложены эффективные методы формирования поверхности с заданными свойствами, включая метод очистки поверхности. Методами атомно-силовой и растровой электронной микроскопии доказано, что разра-

ботанный метод очистки позволяет производить очистку поверхности до уровня 10^{-9} г/см², отличается низкими себестоимостью и энергоемкостью.

Полученные результаты могут быть использованы в технологиях изготовления элементов микро-, нанoeлектроники и дифракционной оптики.

В третьей главе приведены результаты комплексного теоретического и экспериментального исследования механизма адгезии в структурах металл-диэлектрик после их обработки внеэлектродной плазмой, а также методы формирования маскирующих слоев с повышенной адгезионной прочностью (A) и оценивания данной величины. Проведенные исследования показали влияние на адгезионную прочность тонких металлических пленок (с толщиной 50-100 нм) к поверхности диэлектрических подложек времени обработки, тока разряда, ускоряющего напряжения.

Установлено, что ионно-электронная бомбардировка поверхности структуры металл – органические загрязнения – подложка ($Me - C_xH_y - Sub$) способствует активной диссоциации углеводородных молекул. Обнаружен эффект увеличения адгезии металлических пленок к поверхности диэлектрической подложки при бомбардировке их поверхности ионно-электронным потоком, который обеспечивается диссоциацией органических молекул слоя загрязнений на границе раздела металл – подложка в результате установления теплового равновесия в системе $Me - C_xH_y - Sub$. Максимальные значения величины A у необработанных и обработанных структур наблюдаются при $t_{zagr} = 3$ мин. (рис. 3) из-за образования при данном времени мономолекулярного слоя загрязнений, стадия формирования которого зафиксирована с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Philips XL 40 Series (рис. 4). Поверхностные атомы данного слоя вступают либо в химическую связь (после их диссоциации в результате бомбардировки, кривая 2) с поверхностными атомами металла и подложки, либо в связь, определяемую силами Ван – дер – Вальса (кривая 1) вдоль всей границы раздела $Me - C_xH_y - Sub$. Характер изменения кривой 3 (рис. 3) свидетельствует о формировании технологически чистой поверхности и подтверждает эффективность методов, разработанных в главе 2 диссертации.

Построена модель взаимодействия частиц внеэлектродной плазмы с гетероструктурой $Me - C_xH_y - Sub$, позволяющая оценить величину адгезионной прочности тонких металлических пленок. В рамках модели рассмотрен количественный подход, базирующийся на механизме температурных клиньев и зависимости адгезии от числа разорванных (свободных) связей на поверхности промежуточного слоя органических загрязнений, величину которого предлагается описать выражением:

$$N_{sum} = N + N_{obl}, \quad (2)$$

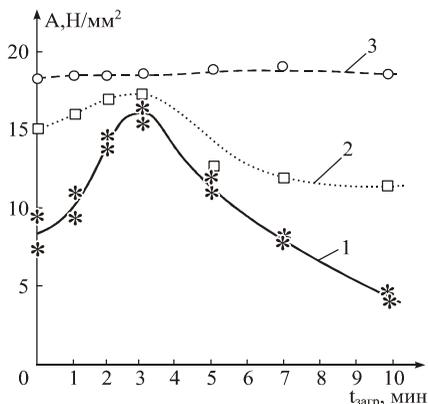


Рисунок 3 – Зависимость адгезии пленки Cr от времени загрязнения поверхности подложки: 1 – до облучения подложки; 2 – после облучения в режиме $I = 100$ мА; $U = 2$ кВ; $t = 5$ мин; 3 – адгезия пленок Cr на подложках, прошедших финишную очистку в режиме $I = 3$ мА; $U = 1,2$ кВ; $t = 10$ с

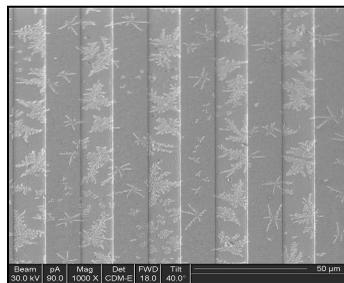


Рисунок 4 – Вид адгезионных центров с участием молекул углеводов в локальных областях поверхности подложки, полученный с помощью РЭМ Philips XL 40 Series

где N – число разорванных связей на поверхности промежуточного слоя; N_{obl} – количество свободных связей органических молекул, образовавшихся в результате обработки системы $Me - C_xH_y - Sub$ ионно-электронным потоком. Выражения для N и N_{obl} предлагается записать в следующем виде:

$$N = N_0 \exp \left[-\exp \left(\frac{E_{Sub-C_xH_y}}{E_{Me-C_xH_y}} \right) \right], \quad (3)$$

$$N_{obl} = N \left(\frac{t_{obl}}{t_{tb}} \right)^{3/2} \exp \left(1 - \frac{E_{Me-C_xH_y}}{E_n(U)} \right), \quad (4)$$

где $E_{Sub-C_xH_y}$, $E_{Me-C_xH_y}$ – энергии единичных связей материала подложки и напыленного металла с органикой, соответственно; $E_n(U)$ – энергия, передаваемая частицами ионно-электронного потока поверхности металлической пленки, зависящая от ускоряющего напряжения; t_{tb} – время установления теплового равновесия (temperature balance) в системе, вычисляемое по формуле:

$$t_{tb} = \frac{V_1^{2/3}}{4\pi D_0^{(1)}} \exp \left(\frac{E^*}{JSt_{obl} E_n(U)} \right), \quad (5)$$

где V_l – объем подложки; E^* – способность материала к потерям энергии, определяемая его свойствами и процессами взаимодействия заряженных частиц ионно-электронного потока с обрабатываемой поверхностью, при конкретном значении подводимой к ней энергии. Тогда, конечное выражение, связывающее величину адгезии с физическими параметрами газоразрядного прибора, примет вид:

$$A = N_0 \exp \left[- \exp \left(\frac{E_{Sub-C_x H_y}}{E_{Me-C_x H_y}} \right) \right] \left[1 + \left(\frac{t_{obl}}{t_{tb}} \right)^{3/2} \exp \left(1 - \frac{E_{Me-C_x H_y}}{E_n(U)} \right) \right] \frac{1}{V_{gr} N_a} \sum_{i=1}^l \Delta E_i, \quad (6)$$

где V_{gr} – объем межфазной границы; ΔE_i – разность энергий единичных связей для i – ой компоненты межфазной границы; l – число компонент (материалов), образующих межфазную границу.

Адекватность разработанной модели физическому процессу подтверждается результатами экспериментального исследования влияния на адгезию параметров обработки ионно-электронным потоком, представленными на рис. 5 а, б, в.

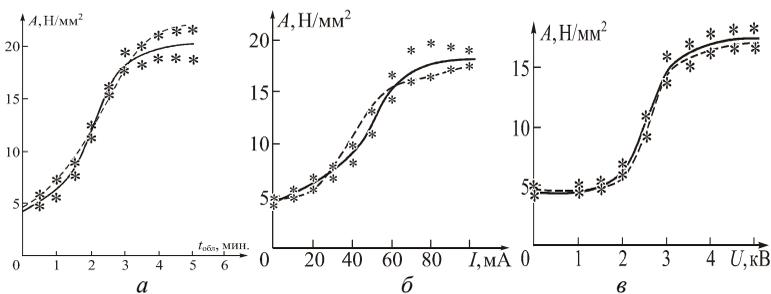


Рисунок 5 – Зависимость адгезионной прочности медной пленки к поверхности ситалловой подложки от длительности бомбардировки структуры $Me - C_x H_y - Sub$ в режиме $I = 100$ мА; $U = 2$ кВ; $t_{zagr} = 10$ мин (а), тока разряда при $U = 2$ кВ; $t_{obl} = 3$ мин; $t_{zagr} = 10$ мин (б) и ускоряющего напряжения ($I = 20$ мА; $t_{obl} = 3$ мин; $t_{zagr} = 10$ мин) (в); штриховой линией показана зависимость (б)

Проведенные исследования позволили предложить метод увеличения в 4 - 7 раз адгезии тонких металлических пленок во внеэлектродной плазме, отличающийся низкими себестоимостью и энергоемкостью, а также десятикратным уменьшением времени обработки по сравнению с существующими аналогами.

Приведены практические рекомендации по применению разработанного метода в технологическом процессе изготовления маскирующих слоев повышенной адгезионной прочности, которые могут быть использованы при формировании микроструктур.

Четвертая глава посвящена созданию методов пространственно-селективного травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов направленным потоком внеэлектродной плазмы на основе теоретического и экспериментального исследования механизмов травления поверхности во внеэлектродной плазме, а также построения моделей, связывающих величины, определяющих кинетику травления материалов, с физическими параметрами обработки в плазме.

Систематически изложена методика подготовки образцов для проведения эксперимента по травлению диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов направленным потоком внеэлектродной плазмы.

Применение для измерения параметров образцов такого стандартного и прецизионного оборудования, как сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) P4-SPM-MDT, «SMENA» в комбинации с P47H, Solver PRO-M фирмы «NT-MDT», микроинтерферометр фирмы Zygo «New-View-5000», растровый электронный микроскоп Philips XL 40 Series и ионно-лучевой микроскоп FIB 200 марки FEI Corporation, установка ДРОН-2.0 для рентгеноструктурного анализа состава материалов, позволяет считать полученные результаты достоверными.

Разработаны методы оценивания скоростей плазмохимического и ионно-химического травления материалов (диоксида кремния, карбида кремния, алмазоподобных пленок и полимеров), основанные на концепции формирования низкотемпературной внеэлектродной плазмы в виде направленного потока активных частиц в области поверхности. Данная концепция определяет величины скоростей травления в плазмохимической (V_{ph}) и ионно-химической (V_{iht}) областях внеэлектродной плазмы выражениями:

$$V_{ph} = \frac{B k_1 M_{mat}}{\rho N_A} \left(1 - \frac{d}{2c \operatorname{tg}[\pi(U - U_1)/2U]} \right) \frac{I}{qeS_K} \theta, \quad (7)$$

$$V_{iht} = \left(\frac{B(k_1 + k_3) M_{mat}}{\rho N_A} \right) \left(1 - \frac{d}{2c \operatorname{tg}[\pi(U - U_1)/2U]} \right) \frac{I}{qeS_K} \left| \exp\left(\frac{U - U_{gr}}{U}\right) - 1 \right| \times, \quad (8)$$

$$\times \left(1 - \left(\frac{\gamma_e \eta}{1 + \gamma_e} \right) \exp[(\alpha - \alpha_n) d_{\max}] \right) \left(1 - \frac{d}{d_{\max}} \right) \frac{I}{qeS_K} \left(1 - \frac{\gamma_e \eta}{1 + \gamma_e} \exp[(\alpha - \alpha_n) d_{\max}] \right) = J_i^-, \quad (9)$$

где $(1 - d/d_{\max})$ – множитель, численно характеризующий долю ионов от общего потока, достигших поверхности образца и принимающих участие в его травлении при условии, что $d_{\max} > d$; d_{\max} – максимальное расстояние, на которое распространяется внеэлектродная плазма, d – расстояние до подложки; I – ток разряда; S_K – площадь катода; q – геометрическая прозрачность сетча-

того анода; γ_e , η , α , α_n – коэффициенты вторичной эмиссии, фокусировки электронного потока, ионизации и прилипания, соответственно.

На основе выражений (7), (8) разработаны алгоритмы и программный комплекс, позволяющие проводить автоматизированный расчет параметров травления в реальном масштабе времени.

Экспериментально исследованы зависимости скорости травления диоксида кремния, карбида кремния, алмазоподобных пленок и полимера от ускоряющего напряжения, тока разряда, процентного содержания кислорода в плазме и температуры поверхности (см. рис. 6, рис. 7 а, б, рис. 8 а, б и таблицу 1).

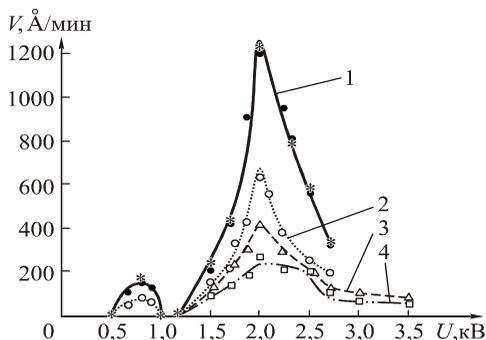


Рисунок 6 – Зависимости скорости травления от напряжения на электродах газоразрядного устройства при разных значениях тока разряда: 1 – 140 мА, V=1; 2 – 120 мА, V=0,625; 3 – 80 мА, V=0,588; 4 – 50 мА, V=0,555; штриховыми линиями показаны зависимости (7) и (8)

Установлено, что плазмохимическая обработка материалов характерна для напряжений 0,5-1 кВ и токов разряда 120-140 мА (рис. 6, кривые 1,2), ионно-химическая - 1,2-2 кВ и 120-140 мА (кривые 1,2,3,4), соответственно. Переходная область характеризуется нулевыми значениями скорости травления в диапазоне напряжений 1-1,2 кВ.

Добавление кислорода в плазму основного рабочего газа оказывается наиболее эффективным в диапазоне 0,8-2 % при токах разряда 80 - 120 мА, что следует из сравнительного анализа зависимостей, представленных на рис. 7 а, б. Увеличение тока разряда выше значения $I=120$ мА (в случае плазмы CF_4/O_2) приводит к снижению скорости травления из-за чрезмерного количества химически активных частиц (ХАЧ), находящихся на поверхности обработки и препятствующих тем самым удалению продуктов реакций. Лимитирующей стадией в этом случае становится отвод продуктов реакций от поверхности. Сделанное утверждение доказывают и результаты по травлению полимерных пленок в плазме кислорода, представленные в таблице 1, и результаты исследования температурных зависимостей.

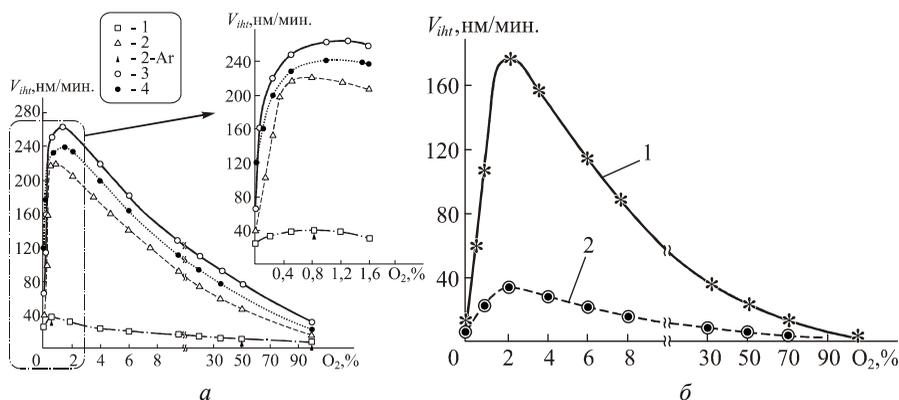


Рисунок 7 – Зависимости скорости ионно-химического травления материалов от процентного содержания кислорода в плазме CF_4/O_2 при различных значениях тока разряда: а) – диоксида кремния: 1 – 50 мА; 2 – 80 мА; 3 – 120 мА; 4 – 140 мА; (2 – Ar – значения скоростей травления при соответствующем содержании аргона в плазме CF_4/Ar ; б) – карбида кремния (кривая 1) и алмазоподобных пленок (кривая 2) ($I=120$ мА, $U=2$ кВ)

Для оптимального травления карбида кремния и алмазоподобных пленок по сравнению с диоксидом кремния требуется большее значение величины $O_2 = 2\%$ (рис. 7 б), по-видимому, из-за отсутствия кислорода в химической структуре данных материалов. Присутствие аргона в плазме CF_4 снижает скорость травления до нулевых значений (рис. 7 а, зависимость 2-Ar) из-за его химической нейтральности, как к травимым материалам, так и к основному газу.

Таблица 1 - Зависимости скорости травления некоторых материалов от величины тока разряда

Ток разряда, мА	50	80	120	140
Скорость травления в плазме CF_4 , нм/мин.				
Карбид кремния	4,3	6,2	10	18,7
Алмазоподобные пленки	4,1	4,4	7,3	13,7
Скорость травления в плазме CF_4/O_2 , нм/мин.				
Карбид кремния	23,1	142,1	175	158
Алмазоподобные пленки	4,6	28,4	35	31,6
Скорость травления в плазме кислорода, мкм/мин.				
Полимерные пленки	2	3	5	5,8

Предложен метод определения температуры поверхности в области ее взаимодействия с потоком низкотемпературной плазмы на основе аналитического решения уравнения теплопроводности для одномерного случая с помощью интегральных преобразований Лапласа, которое при граничных и начальных условиях:

$$\begin{cases} T(x,0) = T_0 \\ T(b,t) = T_1(t) \\ q(0,t) = q_1 \end{cases} \quad (10) \text{ имеет вид} \quad T_{surf}(p) = T_0(p) + Q_1(p)K_2(p) + \frac{K_1(p)}{K_2(p)}(T_{low}(p) - T_0(p) - Q_1(p)K_1(p)), \quad (11)$$

где $T_0(p)$, $Q_1(p)$ – соответствующие изображения начальной температуры T_0 , теплового потока $q_1(\varepsilon)$; $K_1(p)$, $K_2(p)$ – изображения производных функций температурной реакции $\theta(b,t)$, $\theta(0,t)$ по времени:

$$K_1(b,t) = \frac{a}{b\lambda} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^k \exp\left(-\frac{k^2 \pi^2 a t}{b^2}\right) \right]; K_2(0,t) = \frac{a}{b\lambda} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \exp\left(-\frac{k^2 \pi^2 a t}{b^2}\right) \right], \quad (12)$$

где b – толщина образца; $a = \lambda/C$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований полученных соотношений показал, что разработанный метод расчета позволяет оценить значение температуры с точностью 12 % (расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышало 12 %). Даны практические рекомендации по применению метода при формировании микроструктур в низкотемпературной плазме. С помощью предложенного метода установлено, что максимальные скорости травления достигаются при температурах подложки 360 К, являющейся температурой летучести SiF_4 , (для плазмохимического травления) и 390-440 К (для ионно-химического травления) (см. рис. 8).

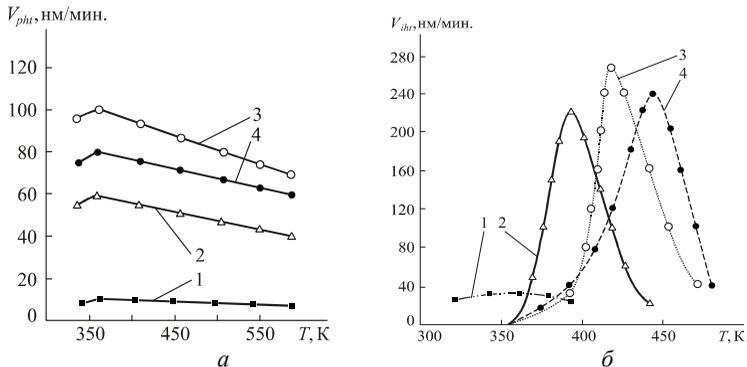


Рисунок 8 – Зависимости скорости травления от температуры подложки в плазме CF_4/O_2 при разных значениях тока разряда:

а) – скорости плазмохимического травления, б) – ионно-химического травления: 1 – 50 мА; 2 – 80 мА; 3 – 120 мА; 4 – 140 мА

Выполненные эксперименты (см. рис. 9) по травлению полимерной матрицы во внеэлектродной плазме подтверждают возможность существования модифицированного слоя не только в приповерхностной области полимера, как это отмечалось в работах Валиева К.А., Орликовского А.А., Махвиладзе Т.М., Сарычева М.Е., но и в его объеме, на глубине проникновения электрона в материал (L). У кривых 1,2 на участке $0 \leq t \leq 18$ с наблюдается одинаковый характер их изменения: при $0 \leq t \leq 6$ с и $15 \leq t \leq 18$ с (для кривой 1 – $15 \leq t \leq 21$ с) – рост величины h , объясняемый возбуждением электронами атомов полимера, а при $6 \leq t \leq 15$ с – замедление травления, определяемое разрывом (ослаблением) связей и формированием модифицированного слоя в полимере на глубине L . Такой вид кривых 1 и 2 доказывает, что процесс удаления полимера состоит из двух подпроцессов: травления немодифицированных и модифицированных слоев. При этом второй подпроцесс для отдельно взятого участка полимера по времени отстает от первого на величину t_m , где t_m – время травления немодифицированного полимера. Число таких слоев пропорционально толщине пленки полимера, а степень их однородности зависит от равномерности распределения заряженных частиц по сечению плазменного потока, дозы и энергии электронного облучения в расчете на число атомов углерода в слое с разным числом разорванных (ослабленных) связей и, соответственно, с разной степенью модификации. На рис. 10 представлена схема формирования электронами модифицированного слоя.

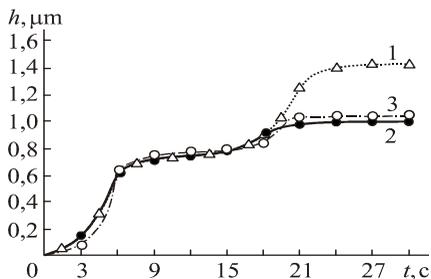


Рисунок 9 – Зависимость толщины стравленного слоя полимера от времени травления при $I = 100$ мА и $U = 2$ кВ: 1 – начальная толщина полимерной пленки 1,4 мкм; 2 – начальная толщина полимерной пленки 1 мкм; 3 – расчетная зависимость для начальной толщины полимерной пленки 1 мкм

На основе предложенного механизма и полученных экспериментальных результатов разработан метод оценки высоты стравленного слоя полимера, описываемый аналитической зависимостью:

$$h = \sum_{n=0}^{l-1} \left[\int_{nT}^{t_m+nT} V_0(t) dt + \int_{t_m+nT}^{(n+1)T} V_m(t) dt \right], \quad (13)$$

где $T = t_m + t_k$, (t_k – время травления модифицированного полимера); $n=0,1,2..l-1$, (l – число модифицированных слоев); t – время травления;

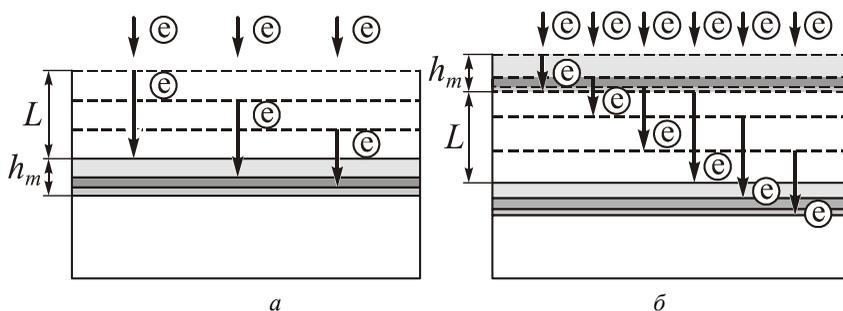


Рисунок 10 - Схема формирования электронами модифицированного слоя:
 а) – стадия травления полимера с исходными свойствами;
 б) – стадия травления модифицированного слоя полимера

$V_0(t) = V_0 N_a(t)/N_{sn}$, $V_m(t) = V_m(1 - N(t)/N_{sm})$ – скорости травления полимера и модифицированного слоя; $N_a(t) = N_0 \exp(J_e S E_e t / E^*)$, $N(t) = N_0 \exp[J_e S (E_e - E^*) t / N_{sm} E_{nop}]$ – число активных связей возбужденных атомов полимера и разорванных (ослабленных) связей, соответственно; N_{sn} , N_{sm} – общее число связей в немодифицированном и модифицированном слоях с толщинами L и h_m ; N_0 – число связей на поверхности полимера (порядка 10^{16}); $E^* = N_{sn} E_{nop}$ – суммарная энергия, необходимая для возбуждения атомов полимера в слое толщиной L ; E_{nop}^* – пороговая энергия возбуждения атома полимера; E_e – энергия электрона. Предложенная теория, включающая механизм образования под действием внеэлектродной плазмы модифицированного слоя в объеме полимерной матрицы, дополняет концепцию К-слоя травления полимеров в низкотемпературной плазме, выдвинутую группой ученых научной школы академика Валиева К.А. (Валиев К.А., Орликовский А.А., Махвиладзе Т.М., Сарычев М.Е.).

Для оценки качества травления были изготовлены тестовые микро-структуры на диоксиде кремния, карбиде кремния и алмазоподобных пленках с периодами 32 мкм и 12 мкм, высотой микрорельефа 0,08-1,1 мкм. На рис. 11 представлены результаты измерений микрорельефов, полученные с помощью методов атомно-силовой микроскопии и микроинтерферометрии. Анализ результатов измерений показывает возможность формирования с помощью внеэлектродной плазмы микрорельефа как с синусоидальным профилем, так и со ступенчатым, который обладает практически вертикальными стенками. В обоих случаях наблюдается оптически гладкая поверхность, включая дно канавок.

На рис.12 представлены результаты рентгеноструктурного анализа слоя загрязнений, адсорбированных на поверхности катода, которые подтвержда-

ют наличие в составе данного слоя элементов рабочего газа (C , O_2), травимых материалов (SiO_2 , SiC , Si , C , H_2), маскирующих слоев (Cr_2O_3 , CrO_3 , Al_2O_3 , C , H_2), материала катода и различного рода окислы. Отсутствие фторсодержащих элементов подтверждает участие фтора в травлении материала в виде ХАЧ. Присутствие в загрязняющем поверхность катода слое таких соединений как SiO_2 , SiC , Si , C , указывает на проявление во внеэлектродной плазме эффекта экстракции химически неактивных частиц (продуктов реакции) из области травления, что позволяет снизить требования к чистоте рабочих газов без ухудшения качества травления.

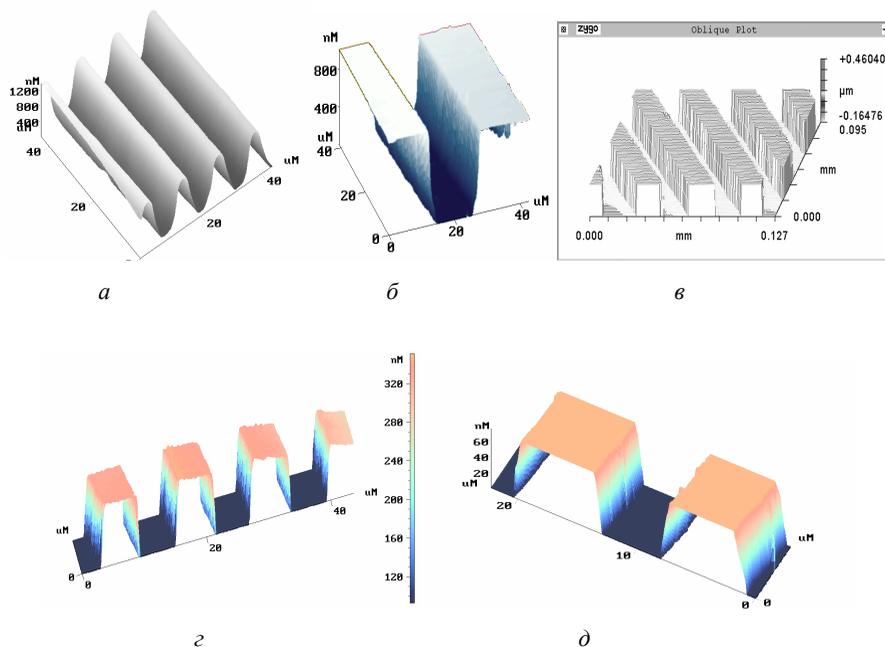


Рисунок 11 – Результаты измерений микрорельефов на диоксиде кремния (а, б, в), карбиде кремния (z) и алмазоподобной пленке (д), сформированных в плазме CF_4/O_2 : а), б), z), д) – полученные на СЗМ «SMENA» в комбинации с P47H фирмы «NT-MDT»; в) – на микроинтерферометре фирмы Zygo «New-View-5000».

Режимы травления: а) – $I=140$ мА, $U=2$ кВ; б), в) – $I=120$ мА, $U=2$ кВ, $O_2=1,3$ %

Во всех случаях во внеэлектродной плазме наблюдался анизотропный характер травления, при этом его неравномерность по всей поверхности подложки не превышала 1 %.

Проведенные исследования экспериментально доказывают эффективность применения внеэлектродной плазмы для травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов.

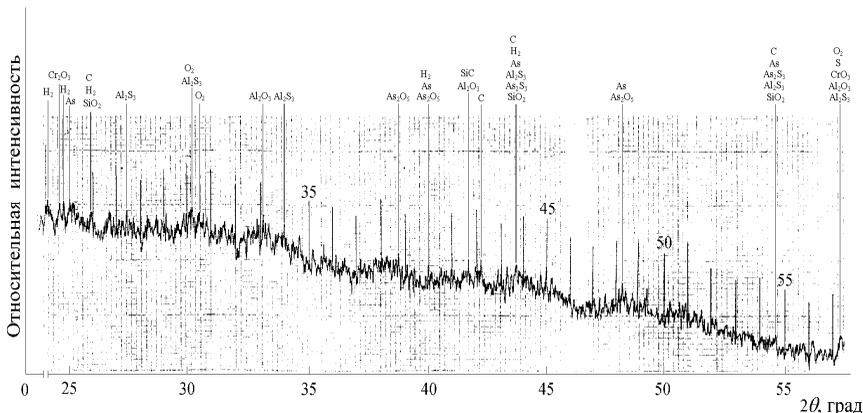


Рисунок 12 – Рентгенограмма слоя загрязнений, адсорбированных на поверхности катода: θ – угол отражения рентгеновских лучей от атомарной плоскости кристалла; длина волны рентгеновского излучения – 0,154 нм

Пятая глава посвящена разработке метода формирования микроструктур на поверхности полупроводниковых материалов на основе экспериментального исследования механизма их аномального растворения в расплаве при обработке структуры металл-полупроводник внеэлектродной плазмой.

Предложен метод оценки процесса аномального растворения атомов полупроводника в жидкой фазе металла при облучении структуры алюминий (Al) - кремний (Si) ионно-электронным потоком, описываемый системой уравнений диффузии второго порядка, определяющих растворение Si в Al при наличии потока «вакансий»:

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} = D_v \frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_v}{C_0} \frac{\partial}{\partial x} \left(C_v \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (14)$$

с граничными и начальными условиями вида:

$$C_v|_{x=L} = C_{v0}; \quad \frac{\partial C_v}{\partial x}|_{x=0} = 0; \quad C_v|_{t=0} = \begin{cases} C_{v0} & \text{при } x = L \\ 0 & \text{при } 0 \leq x < L \end{cases}$$

$$C|_{x=0} = C_0; \quad \frac{\partial C}{\partial x}|_{x=L} = 0; \quad C|_{t=0} = \begin{cases} C_0 & \text{при } x = 0 \\ 0 & \text{при } 0 < x \leq L \end{cases}. \quad (15)$$

Решение системы (14) с учетом начальных и граничных условий (15) осуществлено методом прогонки с использованием консервативной разностной схемы. Результаты численного решения приведены на рис. 13 а, б, в.

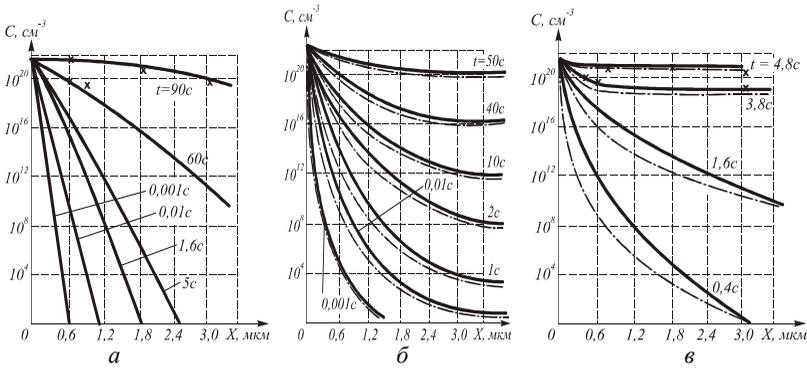


Рисунок 13 – Распределение концентрации атомов кремния по сечению расплава алюминия: а) $C_{V0} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ($A=0$); б) $C_{V0} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ($A=2 \cdot 10^{18}$); в) $C_{V0} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ($A=4 \cdot 10^{18}$). Для всех случаев $D_v=5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ (непрерывные линии описывают решения системы уравнений (14); штрих-пунктирные – решения (14) при наличии градиента «вакансий», распределение которого по сечению расплава описывается функцией $C_v = Ax+B$; x – экспериментальные значения величины концентрации атомов кремния, измеренные на MAP-2)

Совместный анализ результатов численного решения и исследования косоуго шлифа микроструктуры Al-Si-Al (рис. 14) подтверждает стимуляцию «вакансиями» диффузии атомов Si в жидком Al при ионно-электронном облучении. Стимуляция приводит к аномальному характеру растворения атомов полупроводника в расплаве. В этом случае варьированием режимов облучения достигается дозированное изменение концентрации атомов кремния в расплаве, а, следовательно, и глубины легирования (h_l) маскирующего материала в приповерхностную область полупроводника, т.е. в случае формирования ступенчатого микрорельефа его глубина будет определяться величиной h_l (см. рис. 14).



Рисунок 14 – Косой шлиф микроструктуры алюминий – кремний – алюминий после обработки при одной и той же температуре, равной 1123 К, верхней стороны плазмой, а нижней – тепловым полем

После облучения насыщенный полупроводником слой алюминия удался в смеси плавиковой и азотной кислот, при этом на поверхности подложки оставался сформированный ступенчатый микрорельеф.

Заключение

В диссертации разработаны теоретические основы, приборы и методы, обеспечивающие системную реализацию последовательности технологических процессов пространственно-селективного травления диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов направленным потоком внеэлектродной плазмы для создания микроструктур на широкоформатных пластинах.

Основными результатами работы являются следующие:

1. Теоретически и экспериментально доказана способность высоковольтного газового разряда формировать широкоформатные потоки низкотемпературной плазмы диаметром 78 мм и более вне электродов газоразрядного устройства в диапазоне ускоряющих напряжений 0,3-6 кВ.

2. Экспериментально подтверждено возникновение и самоподдержание высоковольтного газового разряда на прямолинейных участках силовых линий электрического поля осевой зоны отверстия анода, установлена высокая степень равномерности распределения заряженных частиц по сечению плазменного потока (не хуже 98%), что позволяет обеспечить анизотропное и равномерное травление материалов на больших площадях (4775 мм² и более).

3. Создана модификация газоразрядного прибора, обеспечивающего за счет введения новых конструктивных элементов отсутствие паразитных микроразрядов и стабильность параметров плазменного потока в диапазоне токов разряда 0-140 мА и ускоряющих напряжений 0,3-5 кВ.

4. Разработаны и экспериментально апробированы многолучевой генератор и фокусатор газоразрядной плазмы, формирующие потоки низкотемпературной плазмы с заданными формой (круг, прямоугольник, S-образная), определяемой одинаковой геометрией отверстий, выполненных в аноде, катоде, изоляции и направлением, соответствующим кривизне поверхностей электродов при токах разряда 100-2000 мА, ускоряющих напряжениях 0,3-1кВ.

5. Экспериментально доказана эффективность использования внеэлектродной плазмы для очистки поверхности диэлектрических подложек, увеличения адгезии тонких металлических пленок, плазмохимического, ионно-химического травления материалов, разработаны соответствующие методы, реализация которых отличается низкими себестоимостью и энергоемкостью, позволяет производить очистку поверхности до уровня 10⁻⁹ г/см² при дли-

тельности облучения $t = 10$ секунд, токе разряда $I = 3$ мА, ускоряющем напряжении $U = 1,2$ кВ, достичь значения адгезионной прочности 25 Н/мм^2 при $t = 3$ минут, $I = 80$ мА, $U = 4$ кВ, обеспечить пространственно-селективное травление диэлектрических и полупроводниковых оптических материалов с максимальными значениями скоростей травления, достигаемыми при $I = 80\text{-}140$ мА, напряжении на электродах газоразрядного устройства – $0,8$ и 2 кВ, температурах подложки – $360\text{-}440$ К, процентном содержании кислорода в плазме – $0,8\text{-}2$ %, и неравномерностью травления по поверхности пластины не более 1 %.

6. Разработаны трибометрический метод и прибор экспресс – контроля чистоты поверхности подложек, не требующие применения специальных зондов и методов обработки их поверхности. Оценка чистоты поверхности проводится, исходя из значения коэффициента трения скольжения, что расширило диапазон измеряемой степени чистоты поверхности подложек по сравнению с трибометром ИЧ-2 до 10^{-9} – 10^{-10} г/см² и сократило время измерения до 5 – 15 с.

7. Построены модели, связывающие величины остаточной концентрации органических загрязнений, адгезионной прочности, скоростей травления материалов, температуры их поверхности и высоты стравленного слоя полимера с физическими параметрами газоразрядного прибора (напряжение на электродах, ток разряда, время обработки), а также с параметрами самих процессов обработки (отношение потоков частиц, степень заполнения поверхности активными частицами, коэффициенты десорбции, прилипания и распыления). Экспериментально доказана достоверность построенных моделей.

8. Разработаны алгоритмы и программный комплекс, позволяющие в режиме диалога определить значения параметров режимов травления.

9. Разработан метод формирования микроструктур на поверхности полупроводниковых материалов на основе экспериментального исследования механизма их аномального растворения в расплаве при обработке структуры металл-полупроводник внеэлектродной плазмой, реализация которого позволяет изменением режимов облучения и топологии металлизированного слоя управлять параметрами микрорельефа.

**Основное содержание диссертации опубликовано:
в монографии**

1. Казанский, Н.Л. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда. Монография [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков. – М.: Радио и связь, 2009. – 220 с. – ISBN 5-89776-011-X.

в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией

2. Колпаков, В.А. Устройство экспресс-контроля чистоты поверхности диэлектрических подложек [Текст] / В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский // Приборы и техника эксперимента. -1995. -№5. - С.199-200.
3. Колпаков, В.А. Ионно-плазменная очистка поверхности контактов реле малой мощности [Текст] / В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский // Электронная промышленность. – 1996. – №2. – С. 41-44.
4. Колпаков, В.А. Устройство экспресс-контроля параметров полупроводниковых приборов [Текст] / В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, В.А. Маклашов, А.В. Балакин // Приборы и техника эксперимента. – 1998. – №6. – С.142.
5. Колпаков, В.А. Исследование эффекта увлечения атомов кремния «вакансиями», возникающими в расплаве алюминия при облучении его поверхности ионно – электронным потоком [Текст] / В.А. Колпаков, А.И. Колпаков // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т.25. – В.15. – С.58-65.
6. Волков, А.В. Расчет скорости плазмохимического травления кварца [Текст] / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков // Компьютерная оптика. – 2001. – №21. – С. 121-125.
7. Колпаков, В.А. Моделирование процесса травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа [Текст] / В.А. Колпаков // Микроэлектроника. – 2002. – Т.31. – №6. – С. 431-440.
8. Казанский, Н.Л. Исследование механизмов формирования каталитической маски при облучении структуры алюминий-кремний частицами газового разряда высоковольтного типа [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков // Компьютерная оптика. – 2002. – №24. – С. 84-90.
9. Казанский, Н.Л. Исследование механизмов формирования низкотемпературной плазмы газовым разрядом высоковольтного типа [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков // Компьютерная оптика. – 2003. – №25. – С. 112-117.
10. Казанский, Н.Л. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков // Микроэлектроника. – 2004. – Т.33. – №3. – С. 218-233.
11. Казанский, Н.Л. Оптимизация параметров устройства трибометрического измерения чистоты поверхности подложек [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский, Н.А. Ивлиев // Компьютерная оптика. – 2005. – №28. – С.76-79.
12. Казанский, Н.Л. Моделирование процесса очистки поверхности диэлектрических подложек в плазме газового разряда высоковольтного типа [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Компьютерная оптика. – 2005. – №28. – С.80-86.
13. Kazanskiy, N. L. Studies into a Mechanism of Catalytic Mask Generation in Irradiation of an Al-Si Structure with High-Voltage Gas-Discharge Particles

- [Текст] / N. L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, A.I. Kolpakov // Optical Memory and Neural Networks. – 2005. – V.14. – №3. – p. 151-159.
14. Kazanskiy, N.L. Studies into mechanisms of generating a low-temperature plasma in high-voltage gas discharge [Текст] / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov // Optical Memory and Neural Networks. – 2006. – №4. – P.163-169.
 15. Колпаков, В.А. Механизм адгезии в структурах металл – диэлектрик после бомбардировки потоком заряженных частиц. Часть 1. Моделирование механизма увеличения адгезии [Текст] / В.А. Колпаков // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – №.5. – С.41-48.
 16. Колпаков, В.А. Механизм адгезии в структурах металл – диэлектрик после бомбардировки потоком заряженных частиц. Часть 2. Влияния параметров бомбардировки на адгезию [Текст] / В.А. Колпаков // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – №.1. – С.53-58.
 17. Казанский, Н.Л. Метод определения температуры поверхности в области её взаимодействия с потоком низкотемпературной плазмы [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, В.Д. Паранин // Журнал технической физики. – 2007. – Т.77. – Вып.12. – С.21-25.
 18. Казанский, Н.Л. Исследование особенностей трибометрического взаимодействия диэлектрических подложек при экспресс – контроле степени чистоты их поверхности [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский, Н.А. Ивлиев // Компьютерная оптика. – 2007. – т.31. – №1. – С.42-46.
 19. Kazanskiy, N.L. Parameter Optimization of a Tribometric Device for Rapid Assessment of Substrate Surface Cleanliness [Текст] / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, A.I. Kolpakov, S.V. Kritchevsky, M.V. Desjatov // Optical Memory and Neural Networks. – 2008. – V.17. – №2. – P. 167-172.
 20. Kazanskiy, N.L. Interaction of Dielectric Substrates in the Course of Tribometric Assessment of the Surface Cleanliness [Текст] / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, S.V. Karpeev, S.V. Kritchevsky, N.A. Ivliev // Optical Memory and Neural Networks. – 2008. – V.17. – №1. – P. 37-42.
 21. Казанский, Н.Л. Эффект объемной модификации полимеров в направленном потоке низкотемпературной плазмы [Текст] / Казанский Н.Л., В.А. Колпаков // Журнал технической физики. – 2009. – Т.79. – Вып.9. – С.41-46.

в патентах на изобретения

22. Патент на изобретение № 2295791 Российская Федерация, МПК Н 01 В 7/18. Кабель для электропитания генераторов низкотемпературной плазмы. [Текст] / Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Кричевский С.В.; № 2005118364; заявл. 14.06.05; опубл. 20.03.07, Бюл. № 8. – 5 с.
23. Патент на изобретение № 2307339 Российская Федерация, МПК G 01 N 19/08. Способ измерения чистоты поверхности подложек [Текст] / Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Кричевский С.В., Ивлиев Н.А.; № 2005118279; заявл. 14.06.05; опубл. 27.09.07, Бюл. № 27. – 5 с.

24. Патент на изобретение № 2333619 Российская Федерация, МПК H05N 1/24. Многолучевой генератор газоразрядной плазмы [Текст] / Сойфер В.А., Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И.; № 2006121061; заявл. 13.06.06; опубл. 10.09.08, Бюл. № 25. – 5 с.
25. Патент на изобретение № 2348738 Российская Федерация, МПК C23C 14/24 Испаритель многокомпонентных растворов [Текст] / Сойфер В.А., Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Подлипов В.В.; № 20071112611; заявл. 04.04.07; опубл. 10.03.09, Бюл. № 7. – 5 с.
26. Патент на изобретение № 2339191 Российская Федерация, МПК H05N 1/24, H01J 37/077 Фокусатор газоразрядной плазмы [Текст] / Сойфер В.А., Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И.; № 2006146571; заявл. 25.11.08; опубл. 20.11.08, Бюл. № 32. – 5 с.
27. Патент на изобретение № 2328707 Российская Федерация, МПК H 01 B 7/18. Способ измерения температуры поверхности образца, облучаемого газоразрядной плазмой. [Текст] / Сойфер В.А., Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Паранин В.Д.; № 2005118364; заявл. 14.06.05; опубл. 10.07.08, Бюл. № 8. – 5 с.
28. Патент на изобретение № 2366978 Российская Федерация, МПК G 01 T 1/29. Способ определения параметров потока заряженных частиц. [Текст] / Сойфер В.А., Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Паранин В.Д., Десятов М.В.; № 2008109677 /28(010467); заявл. 11.03.08.
29. Патент на изобретение № 2380684 Российская Федерация, МПК G 01 N 13/02, 21/88. Способ измерения чистоты поверхности подложек [Текст] / Сойфер В.А., Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Подлипов В.В. ; № 2008141189; заявл. 16.10.08; опубл. 27.01.10, Бюл. № 3. – 7 с.

в других изданиях

30. Мышкина, В.В. Применение метода конформного отображения для расчета распределения электростатического поля в газоразрядных устройствах высоковольтного типа [Текст] / В.В. Мышкина, В.А. Колпаков // Тезисы докладов Международного семинара «Дифференциальные уравнения и их приложения», Самара. – 1996. – Ч.2. – С. 32.
31. Колпаков, В.А. Повышение проводимости контактов сверхминиатюрных реле космического исполнения облучением их поверхности ионно-плазменным потоком [Текст] / В.А. Колпаков // Тезисы докладов I-ой Международной молодежной школы-семинара «БИКАМП-98». – Санкт-Петербург, 1998. – С. 38.
32. Колпаков, В.А. Плазмохимическое травление диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа [Текст] / В.А. Колпаков, А.И. Колпаков // Труды III Международной конференции «БИКАМП-2001», Санкт-Петербург. – 2001. – С. 90-92.
33. Волков, А.В. Моделирование процесса плазмохимического травления микроструктур на кварцевых подложках [Текст] / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков // Труды Всероссийской научно-технической

- конференции «Микро- и нанoeлектроника-2001», Звенигород. – 2001. – С. 198-199.
34. Колпаков, А.И. Исследование механизмов формирования каталитической маски микрорельефа оптических элементов при облучении структуры Al-Si частицами газового разряда высоковольтного типа [Текст] / А.И. Колпаков, Н.Л.Казанский, В.А. Колпаков // Труды Международной конференции «Математическое моделирование», Самара. – 2001. – С. 133-135.
 35. Казанский, Н.Л. Моделирование механизма ионно-плазменной очистки поверхности диэлектрических подложек [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Сборник материалов II-го Международного симпозиума «Аэрокосмические приборные технологии», Санкт-Петербург. – 2002. – С.89-90.
 36. Колпаков, В.А. Моделирование характера распределения эквипотенциалей электростатического поля в газоразрядном устройстве высоковольтного типа [Текст] / В.А. Колпаков, А.Н. Осипов // Труды IV Международной конференции «БИКАМП-2003», Санкт-Петербург. – 2003. – С. 335-338.
 37. Kazanskiy, N. Simulation of technological process by etching of microstructures in high-voltage gas discharge plasma [Текст] / N. Kazanskiy, V. Kolpakov // Abstracts of international conference «Micro- and nanoelectronics-2003», Moscow (Zvenigorod). – 2003. – P.1-53.
 38. Kazanskiy, N. Simulation of technological process of microstructures etching in high-voltage gas discharge plasma [Текст] / N. Kazanskiy, V. Kolpakov // Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5401. – P. 648-654.
 39. Kazanskiy, N.L. Simulating the process of dielectric substrate surface cleaning in high-voltage gas discharge plasma [Текст] / Kazanskiy, N.L., Kolpakov, V.A., Kritchevsky, S.V. // Book of abstracts of international conference «Micro- and nanoelectronics-2005», Zvenigorod. – 2005. – P1-43.
 40. Kazanskiy, N.L. Simulating the process of dielectric substrate surface cleaning in high-voltage gas discharge plasma [Текст] / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, S.V. Kritchevsky // Proceedings of SPIE. – 2006. – V.6260. – P. 62601V-1 - 62601V-8.
 41. Казанский, Н.Л. Неразрушающая диагностика чистоты поверхности диэлектрических подложек [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский // Материалы VII Международной научно-технической конференции «АВИА-2006», Киев: НАУ. – 2006. – Т.1. – С. 11.65-11.68.
 42. Казанский, Н.Л. Исследование механизмов очистки поверхности подложек потоком газоразрядной плазмы высоковольтного типа [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции «Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники», Пенза. – 2006. – С. 19-22.
 43. Казанский, Н.Л. Динамический испаритель материалов сложного состава [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский, В.В. Подлипов // Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции

- «Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники», Пенза. – 2006. – С. 25-27.
44. Казанский, Н.Л. Исследование механизма трибометрического взаимодействия диэлектрических подложек в устройстве контроля чистоты их поверхности [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский, Н.А. Ивлиев // Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции «Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники», Пенза. – 2006. – С. 32-35.
 45. Казанский, Н.Л. Исследование механизмов формирования газоразрядной плазмы высоковольтного типа [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский, В.Д. Паранин // Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции «Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники», Пенза. – 2006. – С. 35-39.
 46. Казанский, Н.Л. Моделирование механизма электронно-ионной очистки поверхности диэлектрических подложек [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции «Методы создания, исследования материалов, приборов и экономические аспекты микроэлектроники», Пенза. – 2006. – С. 58-62.
 47. Колпаков, В.А. Трибометрический метод оценки степени чистоты поверхности диэлектрических подложек [Текст] / В.А. Колпаков, Н.А. Ивлиев // Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск. – Ч.2. – 2006. – С. 36-37.
 48. Казанский, Н.Л. Исследование механизмов очистки поверхности диэлектрических подложек в плазме газового разряда [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский, В.В. Подлипнов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» / под ред. И.Г. Мироненко, М.Н. Пиганова, Самара: СГАУ. – 2006. – С.88-99.
 49. Казанский, Н.Л. Применение метода трибометрии для измерения чистоты поверхности диэлектрических подложек [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков, С.В. Кричевский, В.В. Подлипнов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» / под ред. И.Г. Мироненко, М.Н. Пиганова, Самара: СГАУ. – 2006. – С.148-159.
 50. Kazanskiy, N.L. The method of thin metal films adhesion increasing for the lowered dimensions structures [Текст] / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, V.D. Paraniin, M.S. Polikarpov // Book of abstracts of international conference «Micro- and nanoelectronics - 2007», Zvenigorod. – 2007. – P.1-44.
 51. Колпаков, В.А. Кабель для электропитания генераторов низкотемпературной плазмы [Текст] / В.А. Колпаков, В.Д. Паранин, Д.А. Мокеев // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии», Томск. – Т.1. – 2007. – С. 86-88.
 52. Казанский, Н.Л. Метод увеличения адгезии тонких металлических пленок в структурах пониженной размерности [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А.

- Колпаков, М.С. Поликарпов // Сборник материалов «Наноматериалы технического и медицинского назначения» III международной школы «Физическое материаловедение» / под ред. А.А. Викарчука. – Тольятти: ТГУ. – 2007. – С. 353-355.
53. Казанский, Н.Л. Метод оценки остаточной концентрации органических загрязнений на поверхности диоксида кремния [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский // Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2007». Київ: НАУ. – 2007. – Т.1. – С. 14.5-14.8.
54. Kazanskiy, N.L. The method of thin metal films adhesion increasing for the lowered dimensions structures [Текст] / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, V.D. Paragin, M.S. Polikarpov // Proceedings of SPIE. – 2008. – V.7025. – P. 70250H-1-70250H-9.