

ВЕТОШКИН ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ КВАРЦА**

01.04.01- «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ижевск – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО “Удмуртский государственный университет”

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент

Крылов Петр Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Баянкин Владимир Яковлевич

кандидат физико-математических наук

Когай Владимир Янсунович

Ведущая организация: ГОУ ВПО “Ижевский государственный
технический университет”

Защита состоится 28 декабря 2009 г. в 17:00 в ауд. 2 на заседании диссертационного совета ДМ 212.275.03 в Удмуртском государственном университете по адресу: 426034, Ижевск, ул. Университетская, 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу:

426034, Ижевск, ул. Университетская, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Удмуртского государственного университета, с авторефератом – на сайте УдГУ <http://v4.udsu.ru/science/abstract>.

Автореферат разослан _____ ноября 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

к.ф.-м.н., доцент

Крылов П.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В производстве микросхем в настоящее время широко используются процессы, происходящие в низкотемпературной плазме, например, для очистки поверхности подложек, травления рабочих слоев, удаления резиста. Плазменные технологии позволяют увеличить разрешающую способность литографии, повысить производительность труда, автоматизировать производство микросхем. Хотя физические явления, происходящие в плазме и на поверхности подложек, до конца не исследованы, они весьма перспективны для изготовления различных изделий.

В частности низкотемпературную неравновесную плазму перспективно применять для травления кварца, который широко используется в качестве материала чувствительного элемента твердотельного волнового гироскопа, корпусов специализированных микросхем, подложек для ГИС СВЧ и устройств на поверхностных акустических волнах. Плазменное травление кварца можно применять как для удаления «трещиноватого» слоя, возникающего при его механической обработке, так и для его высокоточной размерной обработки.

Состояние поверхности оказывает заметное влияние на различные физические свойства конденсированных слоев. Развивающееся в последнее время направление нанотехнологии ужесточает требования к шероховатости поверхности. Наличие микрошероховатостей на границах наноструктур является немаловажным фактором при создании приборов, основанных на квантовых процессах. Шероховатости уменьшают коэффициент отражения оптических элементов, оказывают деструктивную роль в рентгеновских телескопах, зонных пластинках, зеркалах, используемых для работы с синхротронным излучением. Одним из методов уменьшения шероховатости является ионно-плазменная обработка подложек.

При реактивном ионно-плазменном травлении используются высокотоксичные газы и жидкости, поэтому задача утилизации продуктов реакции также требует своего решения.

Целью настоящей работы является разработка экспериментальной установки для проведения ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов и анализ влияния физико-химических процессов в низкотемпературной плазме аргона, кислорода, фтор - и хлорсодержащих газов на поверхность кварца.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка оборудования и приборов, обеспечивающих высокоскоростное размерное травление, ионно-лучевую и ионно-плазменную полировку кварца.
2. Разработка устройства утилизации хлорсодержащих газов, переводящего хлорсодержащие газы в неактивные соединения с низким давлением насыщенных паров.
3. Исследовать возможности использования твердотельного источника фтора для ионно-лучевого травления кварца.
4. Определить режимы ионно-лучевых и ионно-плазменных процессов травления и полировки кварца.

Научная новизна работы

1. Впервые разработана конструкция и схема расположения катодного и анодного узлов, обеспечивающие высокие скорости ионного и реактивно-ионного травления различных материалов. Определены оптимальные режимы травления кварца.
2. Впервые предложено устройство для утилизации хлорсодержащих газов и (или) изменения состава рабочего газа.
3. Определены оптимальные режимы процессов реактивного ионно-лучевого травления кварца в различных хлорсодержащих газах.
4. Впервые исследованы возможности использования твердотельного источника фтора для ионно-лучевого травления кварца.

5. Определены оптимальные режимы ионно-лучевых и ионно-плазменных процессов полировки кварца.

Практическая ценность работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке процессов изготовления изделий из плавленного кварца, а также при финишной обработке подложек. Разработанные конструкции и устройства могут быть использованы в лабораторных устройствах, в технологических процессах изготовления изделий микромеханики и микроэлектроники.

Положения, выносимые на защиту

1. Конструкция электрода с кольцевым выступом, обеспечивающим напуск рабочего газа непосредственно в зону эрозии, увеличивает скорость травления в 4-5 раз и позволяет получать углубления до 150 мкм с резко обозначенным профилем.
2. Расположение цилиндрического магнетрона на реакторе и напуск газа через него позволяют изменять состав реактивного рабочего газа. Использование цилиндрического магнетрона при расположении его между реактором и высоковакуумным насосом позволяет утилизировать хлорсодержащие газы и защищать средства откачки. Наиболее эффективно (95-98%) утилизация хлорсодержащего газа происходит при использовании мишени из молибдена.
3. Максимальная скорость реактивного ионно-лучевого травления плавленного кварца в SiCl_4 определяется давлением рабочего газа и ускоряющим напряжением, а в CCl_4 - еще и концентрацией кислорода в смеси рабочего газа.
4. Использование твердотельного источника фтора при ионно-лучевом травлении кварца дает увеличение скорости в 1,7 – 2,8 раза.
5. Определены режимы ионно-плазменной обработки, обеспечивающие уменьшение шероховатости кварца.

Личный вклад автора

Диссертация является самостоятельной работой, обобщившей результаты, полученные лично автором. Постановка задач исследований, определение методов решения и анализ результатов исследований выполнены совместно с научным руководителем и соавторами опубликованных работ.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на:

- Всесоюзном постоянном научно-техническом семинаре «Низкотемпературные технологические процессы в электронике», Ижевск, 1990;
- Первом Всесоюзном постоянном семинаре «Низкотемпературное легирование полупроводников и многослойных структур микроэлектроники», Устинов, 1987;
- Всесоюзной научной конференции по микроэлектронике, Тбилиси, 1987;
- Научной конференции с международным участием «75 лет высшему образованию в Удмуртии», Ижевск, 2006;
- XVIII Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью», Москва, 2007.

Публикации

Общее число публикаций – 15. Из них 7 статей, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, 1 авторское свидетельство, 7 публикаций в материалах научно-технических конференций. Список работ приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Она включает 138 страниц машинописного текста, 42 рисунка, 10 таблиц и библиографию из 84 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткое обоснование актуальности исследования, формулируются цель и задачи диссертации, изложены новизна работы, ее научная и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, приведены данные об апробации работы, указан личный вклад автора, описана структура диссертации.

В первой главе проанализированы основные физико-химические процессы в низкотемпературной газоразрядной плазме. Приведен обзор литературных данных по использованию плазменных процессов травления кварца. Дан обзор рабочих реагентов, используемых в процессах реактивного травления. Описано оборудование для плазменного травления и влияние вакуумно-технических параметров на травление материалов.

Проведен сравнительный анализ различных методов плазменного травления и обоснован выбор реактивного ионно-плазменного (РИПТ) и реактивного ионно-лучевого травления (РИЛТ), при которых удаление материала происходит как за счёт физического распыления ускоренными ионами химически активных газов, так и в результате реакций между химически активными частицами и поверхностными атомами подвергнутого травлению материала. Показана перспективность использования разновидности РИПТ ВЧ - магнетронного травления, как максимально полно обеспечивающего высокие скорости, селективность и анизотропность. Проанализировано влияние газовых добавок (особенно O_2) на процесс травления материалов.

Описаны особенности методов вакуумно-плазменного травления кварца. Для травления SiO_2 используют фторсодержащие газы CF_4 , SF_6 , CHF_3 . В плазме они разлагаются с образованием радикалов фтора F^* , вступающих в реакцию с кварцем с образованием четырёхфтористого кремния SiF_4 . В конце главы дано описание известных методов и устройств для травления кварца.

Во второй главе описана разработанная установка ионно-плазменного травления микроструктур со сканируемым ВЧ - магнетроном (рис.1).

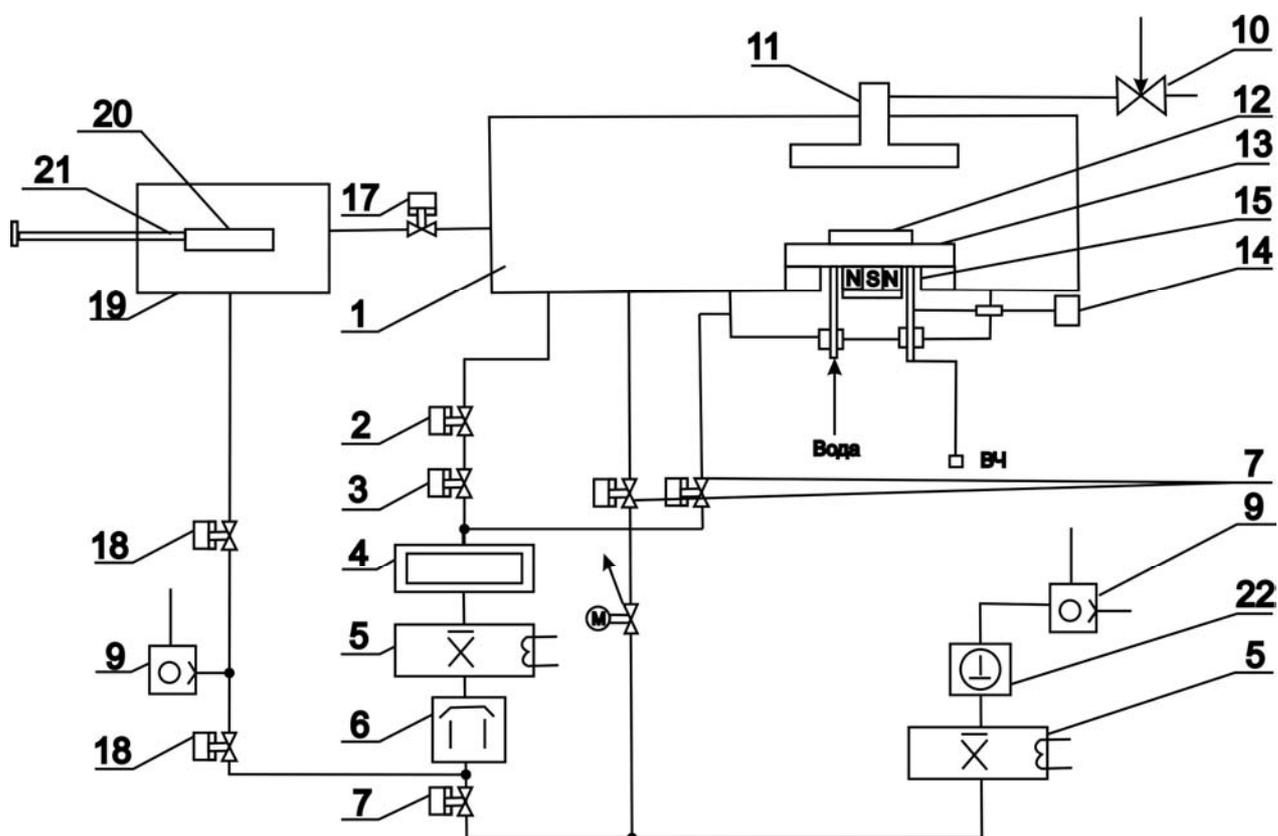


Рис 1. Структурная схема вакуумного агрегата:

1 - реакционная камера, 2 - высоковакуумный затвор, 3 - регулятор потока высоковакуумной магистрали, 4 - азотная ловушка, 5 - водяная ловушка, 6 - паромасляный насос, 7 - вакуумный клапан, 8 - регулятор потока, 9 - форвакуумный насос, 10 - натекатель рабочего газа, 11 - анод, 12 - подложка, 13 - катод, 14 - привод сканирования магнетрона, 15 - магнетрон, 16 - камера магнетрона, 17 - высоковакуумный затвор, 18 - высоковакуумные клапаны D_y 56, 19 - шлюзовая камера, 20 - подложкодержатель, 21 - ручной манипулятор, 22 - насос АВР

Использование магнетронной системы позволяет расширить диапазон рабочих давлений, увеличить скорость травления, улучшить анизотропность (отношение вертикальной и горизонтальной составляющих скоростей травления). Равномерность травления обеспечивается возвратно-поступательным движением магнетронного узла, собранного из постоянных феррит - бариевых магнитов. Максимальный диаметр обрабатываемых подложек 100 мм. Между паромасляным и форвакуумным насосом установлен дополнительный двухроторный насос (22) АВР-50. Это позволило сократить время форвакуумной откачки, проводить переключение на высоковакуумную откачку при более низком давлении, что повышает ресурс работы паромасляного насоса и сокращает время выхода на

предельный вакуум. Использование двухроторного насоса дает возможность расширить диапазон рабочих давлений в режиме форвакуумной откачки с 5-133 Па до 0,5-133 Па.

Для обеспечения шлюзовой загрузки пластин в рабочую камеру был подобран и установлен затвор (17), а также спроектирована и изготовлена шлюзовая камера (19). Загрузка осуществляется ручным манипулятором (21). Откачка шлюзовой камеры до давления 1 Па проводится форвакуумным насосом 2НВР-5ДМ (9) через пневматический клапан (18). Для более полного использования форвакуумного насоса была установлена дополнительная магистраль с пневматическим клапаном (18) между насосом 2НВР-5ДМ и паромасляным насосом (6). Это позволяет длительное время эксплуатировать установку в режиме форвакуумной откачки рабочей камеры химостойким насосом (9) и агрегатом АВР-50, не переключая их на подкачку паромасляного насоса.

Наличие регулятора потока рабочего газа в высоковакуумной магистрали (3) позволяет менять рабочее давление в рабочей камере при фиксированном расходе рабочего газа в режиме высоковакуумной откачки. Аналогично регулятор потока рабочего газа в форвакуумной магистрали (8) позволяет менять рабочее давление в рабочей камере при фиксированном расходе рабочего газа в режиме форвакуумной откачки.

Для возбуждения высокочастотной плазмы в рабочей камере используется генератор ВЧ на частоте 13.56 МГц с регулируемой выходной мощностью от 0.1 до 1 кВт. Согласование ВЧ - генератора с нагрузкой обеспечивается устройством в виде П-образного LC - контура с отдельной регулировкой всех его элементов.

Система оптического контроля окончания процесса травления (рис. 2) устанавливается на рабочей камере (3) рядом с камерой магнетрона (4). В крышке камеры (2) размещены анод (1) и два оптических окна (5). Через первое к подложке (8) направляется луч лазера (6), отражается от нее и

выходит через второе окно. Над вторым окном расположен регистрирующий фотоприемник (7) сигнал с которого поступает на самописец.

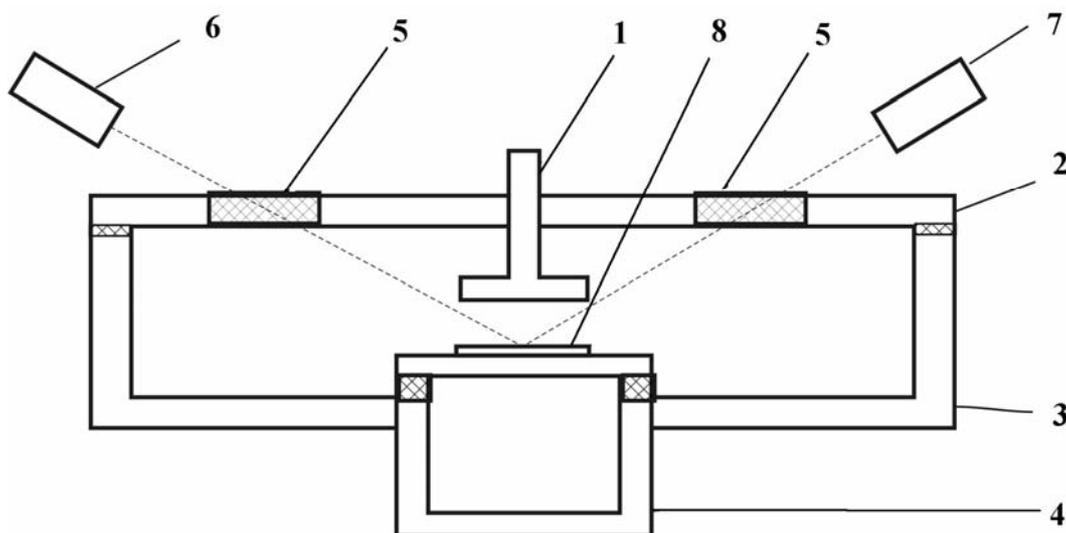


Рис.2. Система оптического контроля: 1 - анод, 2 - крышка камеры, 3 - камера, 4 - камера магнетрона, 5 - кварцевые окна, 6 - лазер, 7 - фотоприемник, 8 – подложка

Описана модернизированная установка УРМ 3.279.029 для проведения процессов ионно-плазменного и ионно-лучевого травления и обработки кварца, вакуумная камера которой изображена на рис. 3. Внутри вакуумной камеры (1) горизонтально расположены 5 подложкодержателей (2), которые с помощью двигателя и планетарного механизма (карусели) (5) могут подводиться к источнику ионов и магнетрону. На этих подложкодержателях размещались образцы на расстоянии 40-130 мм от источника.

Источник ионов (3) и магнетрон (6) вакуумно-плотно пристыковывались к вакуумной камере, снабженной двухступенчатой системой откачки на базе форвакуумного и паромасляного насосов производительностью 16 л/с и 2500 л/с соответственно. Предельный вакуум в камере $1 \cdot 10^{-3}$ Па. В ходе работы камера (1) откачивалась до давления $2 \cdot 10^{-3}$ Па перед травлением в смесях с кислородом и до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па перед травлением в чистых газах. Вместо магнетрона (6) возможна установка ВЧ-электрода.

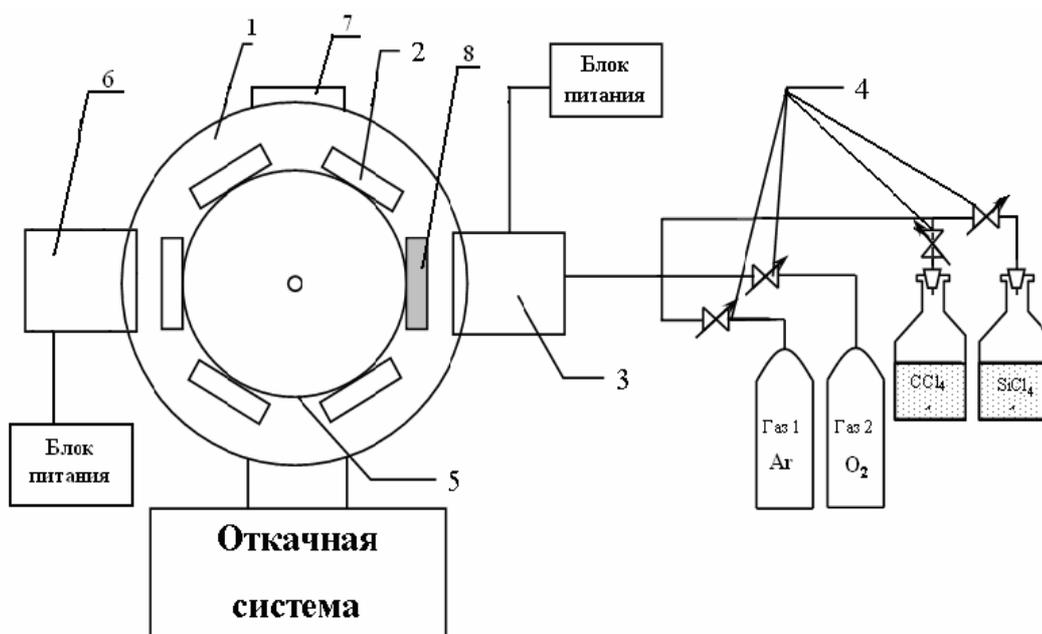


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 - рабочая камера, 2 - подложкодержатель, 3 - ионный источник, 4 - натекатели, 5 - карусель, 6 - магнетрон, 7 - смотровое окно, 8 - технологический подложкодержатель

Для проведения процесса травления был выбран пучковый источник ионов «Радикал М-100» (рис.4).



Рис.4. Ионный источник «Радикал М-100»: 1 - ионный источник, 2 – натекатель

В третьей главе приведено описание устройства для утилизации хлорсодержащих газов, разработанное на базе магнетрона, предназначенного для очистки аргона магнетронным разрядом. Для более эффективной

утилизации атомарного и молекулярного хлора был спроектирован и изготовлен новый магнитный узел (рис.5).

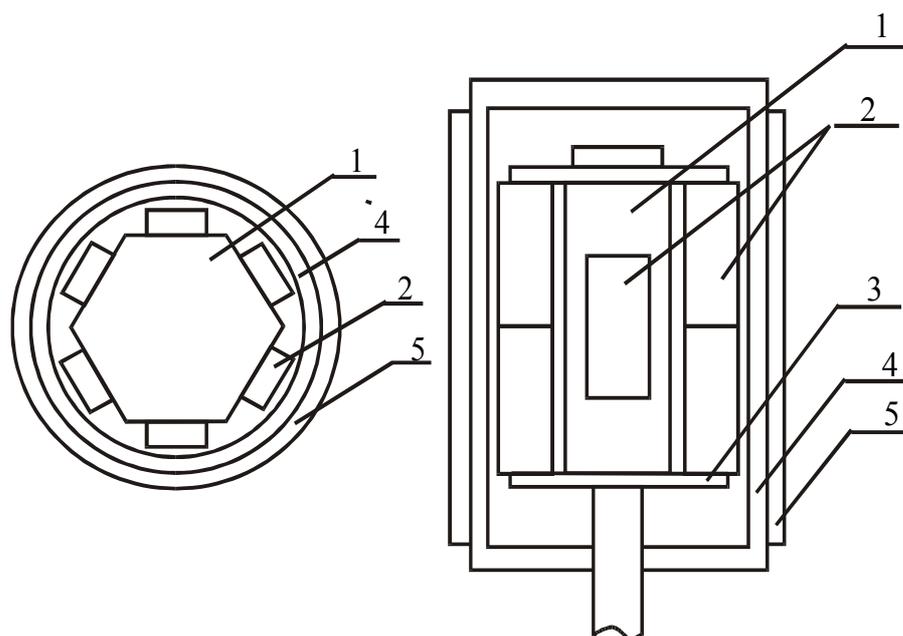


Рис.5. Магнитный узел: 1 - магнитопровод, 2 - магниты, 3 - магнитопровод, 4 - корпус, 5 – мишень

Магнитопровод (1) изготовлен из шестигранника с размером под ключ 36, длиной 80 мм, на трех его гранях через одну расположены шесть магнитов (2) из сплава 200 МСА-1 (неодим-железо-бор) размерами 12×8×40 (12 мм - высота, 8 мм - ширина, 40 мм - длина). На остальных гранях симметрично относительно середины расположены три таких же магнита по одному на грань. На торцы шестигранника устанавливаются два концевых магнитопровода (3). Магнитный узел расположен в корпусе из нержавеющей стали (4). Мишень (5) надевается на корпус. На поверхности мишени данным магнитным узлом обеспечивается индукция магнитного поля 0.085 - 0.095Тл.

Эффективность утилизации рассчитывалась по формуле $K=A_0/A_{вч} \cdot 100\%$, где A_0 – интенсивность регистрируемой массы без подачи ВЧ мощности, $A_{вч}$ - интенсивность регистрируемой массы при работе магнетрона и представлена в табл.1. Для проведения анализа спектра радикалов, образующихся при работе устройства, был разработан вакуумный пост на базе турбомолекулярного насоса ТМН - 500 и форвакуумного насоса 2 НВР -

5ДМ. Разработанный пост обеспечивал предельный вакуум в анализаторе масс-спектрометра МХ - 7304 10^{-5} Па.

Эффективность утилизации табл.1

Регистрируемая масса	Радикал	Мощность разряда, кВт	Эффективность утилизации, %					
			Cu	Nb	Mo	Ti	Сталь 12Х 18Н 10Т	Al
35	Cl	0.5	70	20	95	64	60	46
		0.9	80	40	95	78	70	67
47	CCL	0.5	89	90	95	80	73	75
		0.9	95	95	97	86	77	85
82	CCl ₂	0.5	95	95	96	88	90	92
		0.9	98	98	97	95	95	94
117	CCl ₃	0.5	96	96	96	95	94	94
		0.9	98	98	98	98	97	96

Показано, что наиболее эффективно процесс утилизации (95-98%) происходит при использовании мишени из молибдена.

При этом, учитывая, что рабочее давление утилизатора (основной узел которого ВЧ - магнетрон) составляет 0,2 - 10 Па, его можно располагать между реактором и высоковакуумным насосом. Это обеспечит не только утилизацию, но и защиту откачных средств.

Описано оборудование и методика для замера скорости травления кварца и шероховатости его поверхности. Приведена методика использования микроинтерферометра МИИ - 4 в комплексе с монохроматором, увеличивающая точность замера толщины слоя.

В четвертой главе рассмотрено травление кварца в различных газах. Проведено моделирование процессов травления кварца с использованием комплекса универсальных программ расчета параметров многокомпонентных гетерогенных термодинамических систем, разработанных в МВТУ им. Баумана.

Моделирование процессов разложения показало, что концентрация радикалов хлора Cl₂^{*} и Cl^{*} пропорциональна температуре и имеет оптимум

при определенном давлении. Эффективность генерации радикалов хлора Cl_2^* и Cl^* при разложении CCl_4 в 2-3 раза выше, чем при разложении SiCl_4 .

Моделирование разложения CCl_4 выявило также образование конденсированной фазы углерода, концентрация которого растет пропорционально росту температуры.

Экспериментальная проверка проводилась на описанном во второй главе оборудовании. Была исследована зависимость скорости травления кварца от рабочих режимов при использовании CF_4 , SF_6 , CHF_3 , CCl_4 и SiCl_4 и твердотельного источника фтора. В плазме данные газы разлагаются с образованием радикалов фтора F и Cl, вступающих в реакцию с кварцем с образованием летучих соединений четырехфтористого кремния SiF_4 или четыреххлористого кремния SiCl_4 (рис. 6).

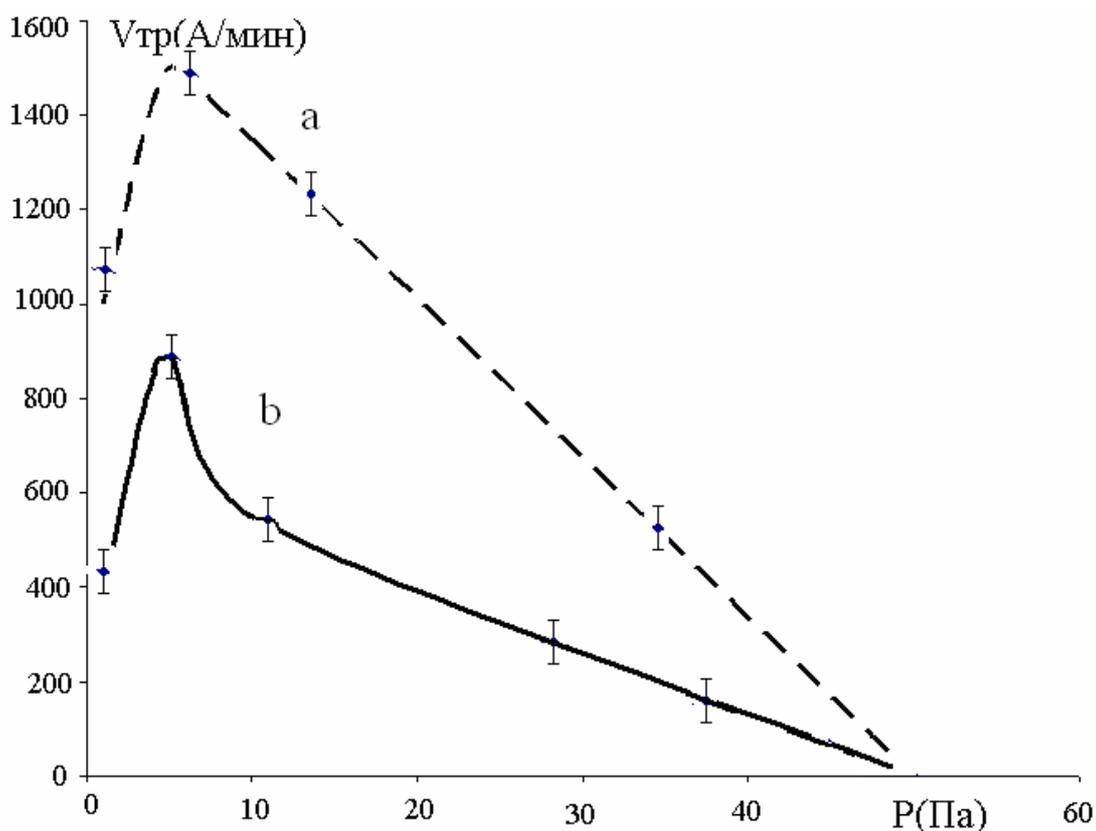


Рис. 6. Зависимость скорости травления кварцевого стекла от давления при $N=200$ Вт: а - SF_6 ; б - CF_4

Используя режим травления кварца без сканирования, были получены углубления 150 мкм диаметром 4 мм. В качестве маски использовалась кварцевая пластина с отверстием. Процесс носит воспроизводимый характер,

обладает высокой анизотропностью. Отклонение стенок от вертикали не обнаружено.

На основании полученных данных разработано устройство для обработки подложек в вакууме (рис.7).

В камере расположен электрод подложкодержатель, установленный на изоляторе. Под электродом расположена магнитная система, содержащая наружный и внутренний магниты. Система вращается валом. Заземленный электрод с кольцевым выступом установлен в крышке камеры, с возможностью перемещения по вертикали и фиксируется гайкой.

В данном устройстве при травлении кварца в CHF_3 скорость травления составила 8 мкм в минуту.

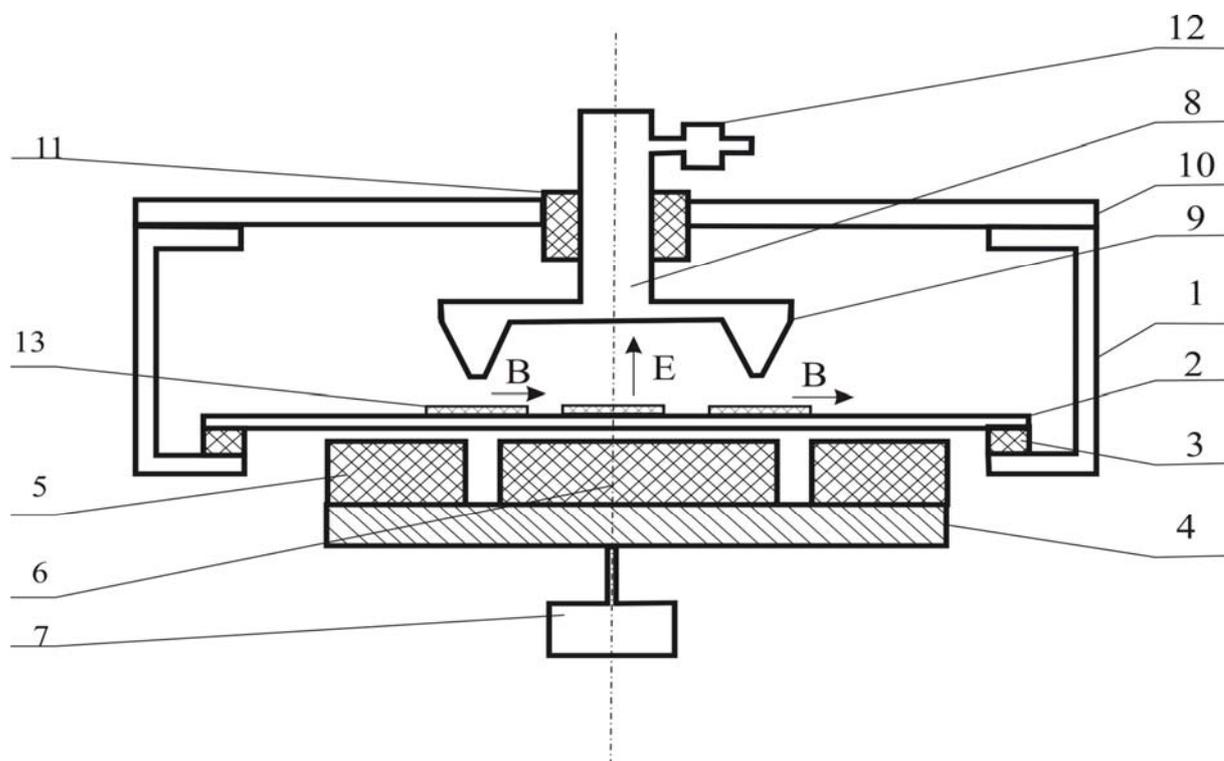


Рис. 7. Устройство ионного и реактивно ионного травления: 1 - камера, 2 - подложкодержатель, 3 - изолятор, 4 - магнитная система, 5 - наружные магниты, 6 - внутренние магниты, 7 - привод вращения, 8 - заземленный электрод, 9 - кольцевой выступ, 10 - крышка камеры, 11 - фиксирующая гайка, 12 - натекаТЕЛЬ рабочего газа, 13 - подложки

При ионно-лучевом травлении кварца в аргоне высокие скорости наблюдались в присутствии твердотельного источника химически-активных частиц (фторопласта-4). Влияние фторопласта на скорости травления объясняется следующим. Фторопласт - 4 – полимерное соединение,

состоящее из цепочек $(-CF_2-CF_2-)_n$. Эти цепочки под действием высокоэнергетичных ионов, ускоренных ионным источником, способны разрушаться. При этом происходит высвобождение атомарного фтора и образование его радикалов (F^*), вступающих в реакцию с кварцем с образованием четырёхфтористого кремния SiF_4 . Поэтому, кроме чисто ионной составляющей травления в аргоне, у процесса появилась реактивная составляющая, что дало увеличение скорости в 1,7 – 2,8 раза (рис.8).

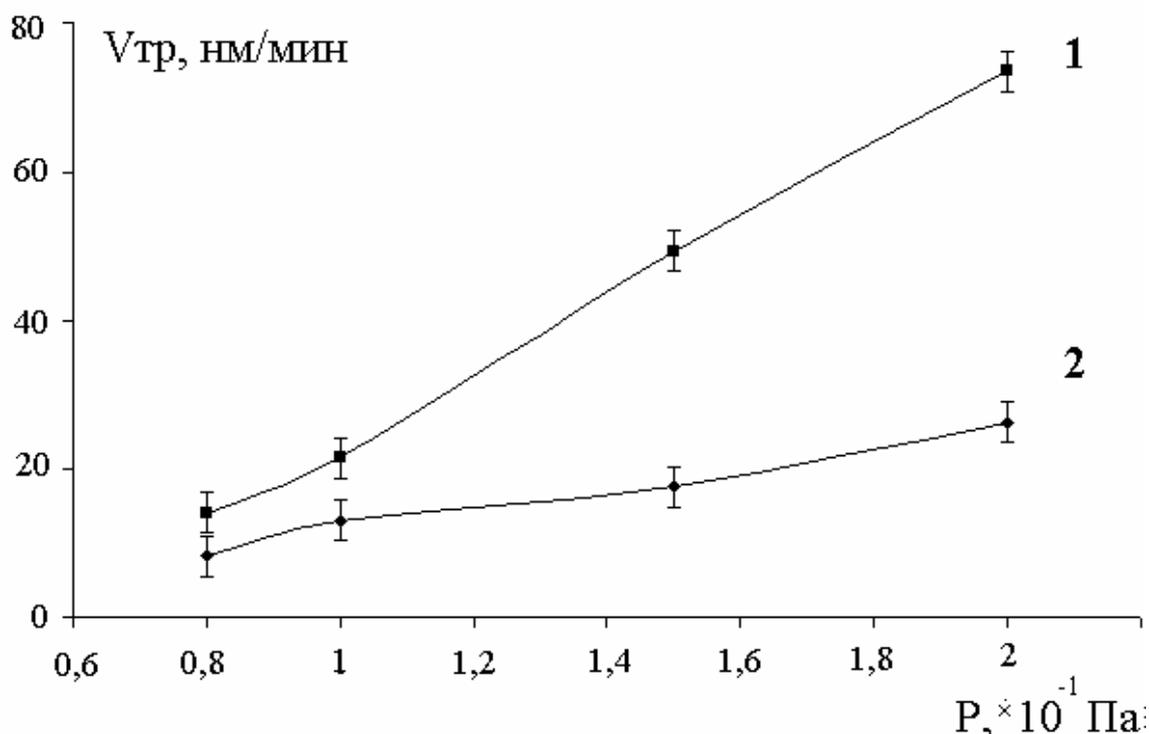


Рис.8. Зависимости скорости травления SiO_2 в Ar от давления при $U=1$ кВ:
1 - образец на фторопласте, 2 - образец на алюминии

Оптимальные режимы, обеспечивающие высокие скорости травления кварца ионным источником «Радикал М-100», следующие:

1) травление в $SiCl_4$: рабочее давление - $1,2 \cdot 10^{-1}$ Па, ускоряющее напряжение - 1,5 кВ, ток разряда - 110 мА, скорость травления - 61 нм/мин;

2) травление в CCl_4 : рабочее давление - $1,4 \cdot 10^{-1}$ Па, ускоряющее напряжение - 1,5 кВ, ток разряда - 160 мА, скорость травления - 158 нм/мин, оптимальная концентрация O_2 в CCl_4 - 20 %;

3) травление в CF_4 : рабочее давление - $1 \cdot 10^{-1}$ Па, ускоряющее напряжение -1,25 кВ, ток разряда - 170 мА, скорость травления - 220 нм/мин, оптимальная концентрация O_2 в CF_4 - 30 %;

4) травление кварца в аргоне в присутствии твердотельного источника химически-активных частиц (фторопласта-4): рабочее давление - $2 \cdot 10^{-1}$ Па, ускоряющее напряжение - 1 кВ, ток разряда - 170 мА, скорость травления - 73 нм/мин, оптимальная концентрация O_2 в CF_4 - 10 %.

Скорости травления в CF_4 оказались выше, чем скорости травления в CCl_4 в 2 - 2,5 раза, а по сравнению с ионно-лучевым травлением в аргоне - в 12 - 15 раз (рис. 9).

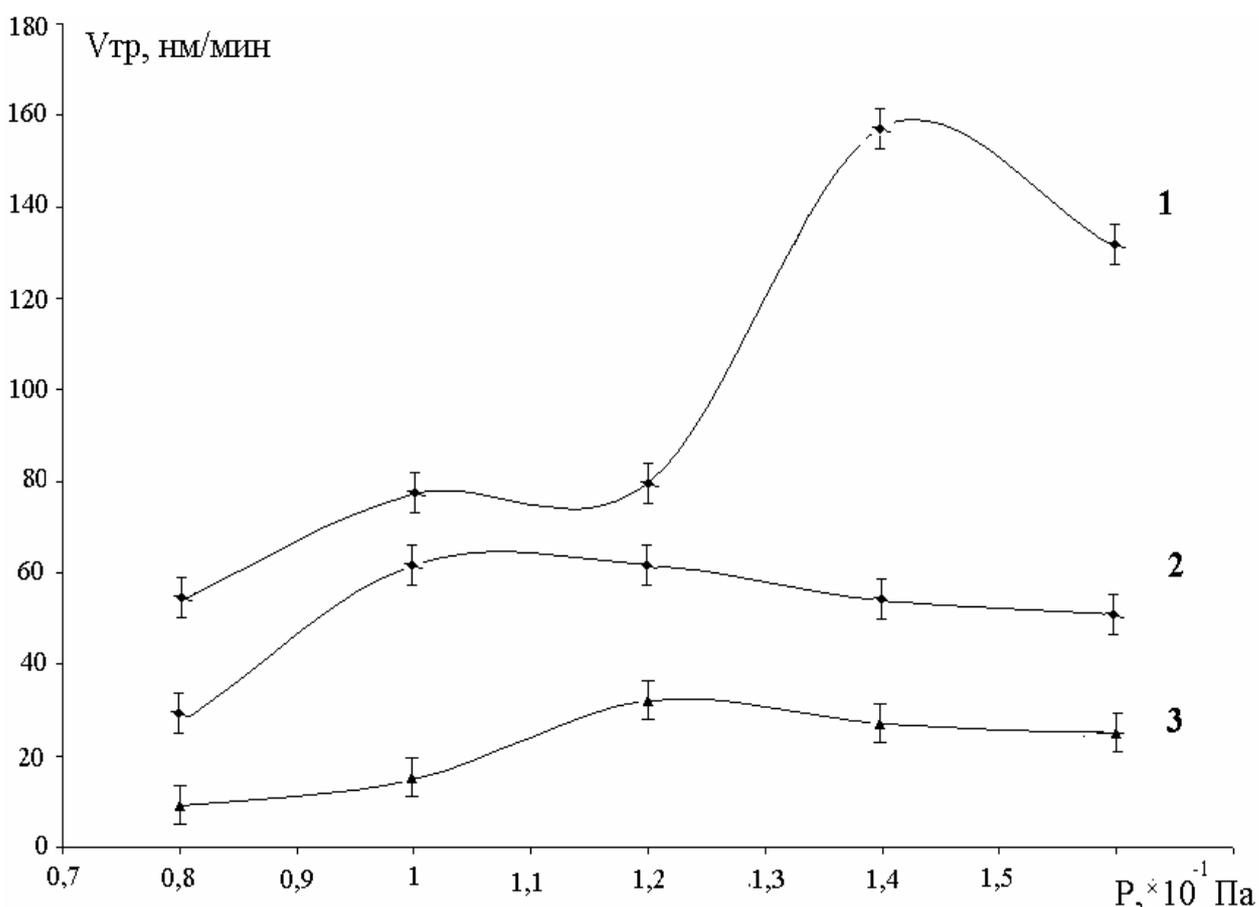


Рис.9. Зависимость скорости травления кварца от рабочего давления в камере при постоянном $U=1.5\text{кВ}$: 1 - CCl_4 , 2 - SiCl_4 , 3 - Ar

Скорость травления SiO_2 радикалами хлора ниже, чем радикалами фтора из-за более низкой химической активности хлора.

В пятой главе рассмотрено влияние ионно-плазменной и ионно-лучевой обработки кварца на его шероховатость. Для анализа поверхности подложек

использовался метод атомно - силовой микроскопии (АСМ). Типичные АСМ - изображения поверхности кварца до (а) и после (б) обработки представлены на рис.10.

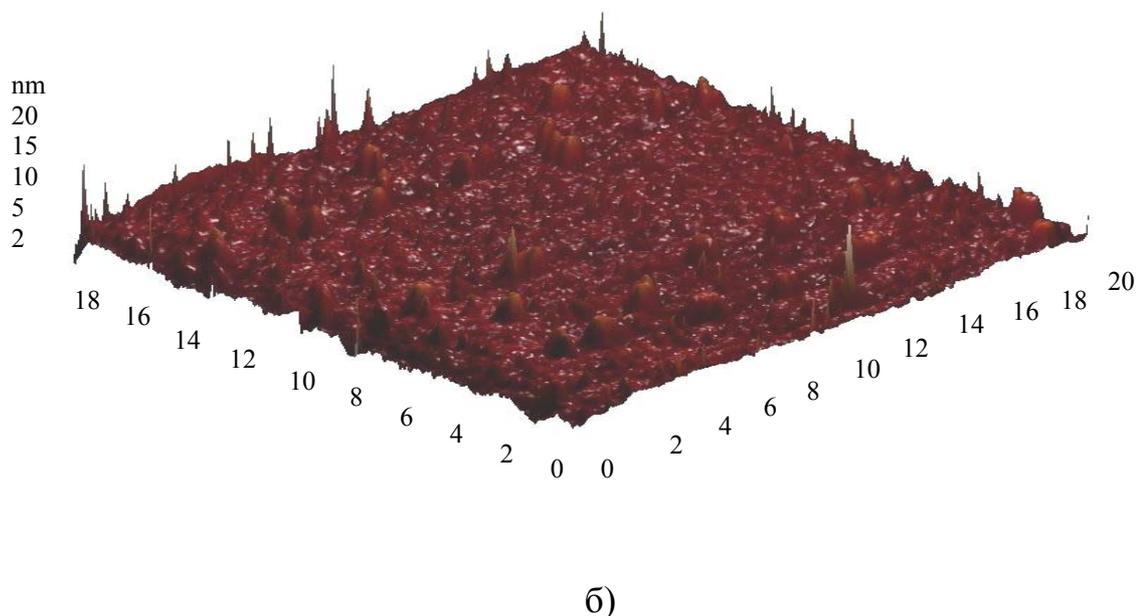
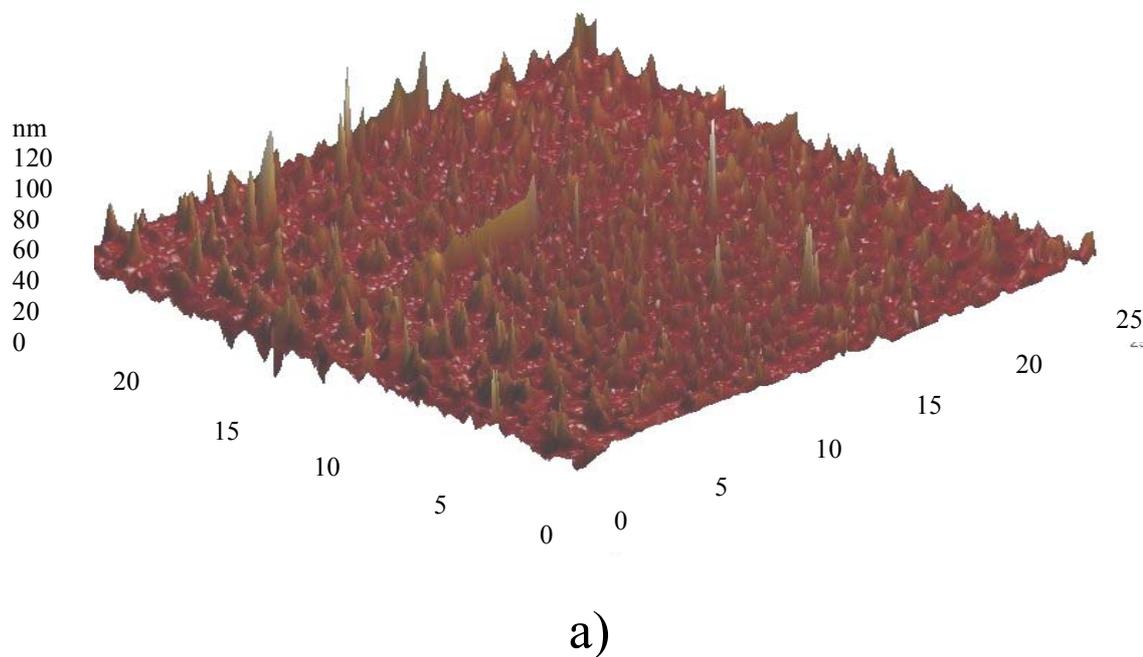


Рис.10 АСМ - изображения поверхности кварца до (а) и после (б) обработки

При ИЛТ в аргоне происходит улучшение параметров шероховатости поверхности кварца на 75%.

При реактивном ионно-лучевом травлении в SiCl_4 и CCl_4 наблюдается увеличение параметров шероховатости по сравнению с исходными образцами на 80%.

Метод ионно-плазменной обработки является более перспективным. В среде кислорода достигнуто уменьшение шероховатости в 5 раз, в среде аргона - в 3 раза (рис.11).

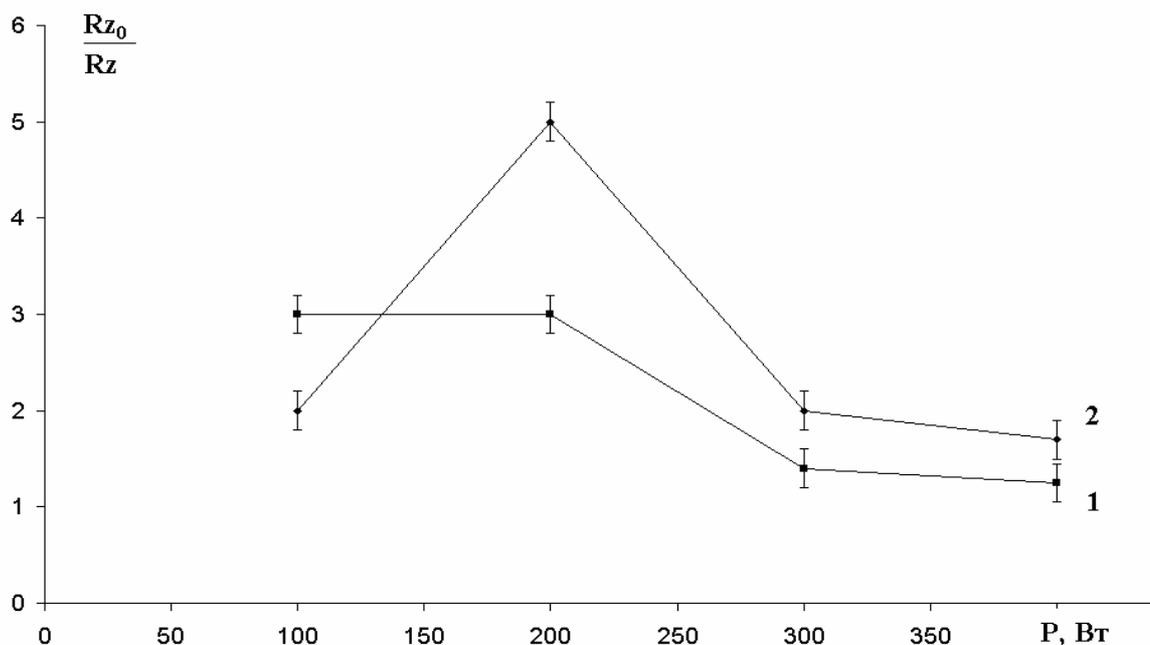


Рис.11. Зависимость изменения шероховатости от рабочей мощности ($P_{\text{раб}} = 1$ Па, $t = 300$ с): 1 – Ar, 2 - O₂

Шероховатость является техническим параметром, характеризующим гладкость поверхности. На рис. 12 приведены зависимости фрактальной размерности D от рабочей мощности ВЧ - разряда в среде аргона и кислорода. Фрактальная размерность имеет ряд преимуществ перед амплитудными параметрами: у идеальной поверхности она равна 2.0 и увеличивается с ростом шероховатости.

С увеличением мощности ВЧ - разряда фрактальная размерность при ионно-плазменной обработке уменьшается (рис. 12), что показывает улучшение параметров шероховатости поверхности. Расчёт фрактальной размерности проводился по озёрному алгоритму.

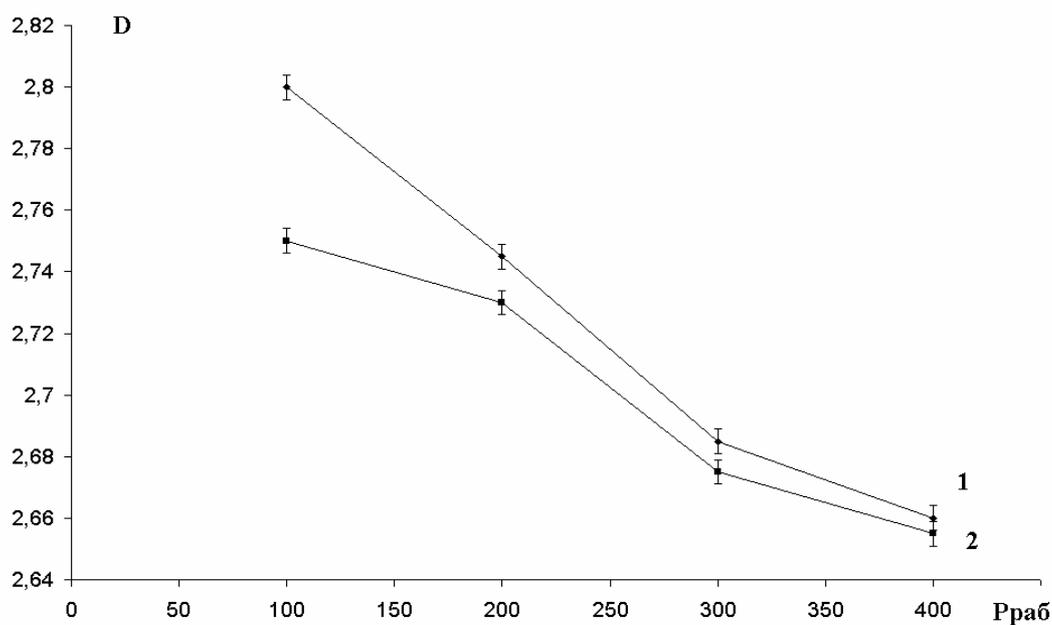


Рис. 12. Зависимость изменения фрактальной размерности D от рабочей мощности $P_{раб}$ (Вт) и среды травления: 1 - O_2 ; 2 – Ar

В заключении сформулированы основные научные результаты работы:

1. Разработана конструкция и схема расположения катодного и анодного узлов, обеспечивающие высокие скорости ионного и реактивно-ионного травления различных материалов.
2. Разработано устройство для утилизации хлорсодержащих газов и (или) изменения состава рабочего газа. Наиболее эффективно (95-98 %) утилизация происходит при использовании мишени из молибдена.
3. Оптимальные режимы реактивного ионно-лучевого травления кварца в хлорсодержащих газах, обеспечивающие высокие скорости травления:
 - травление в $SiCl_4$: давление - $1,2 \cdot 10^{-1}$ Па, ускоряющее напряжение - 1,5 кВ, ток разряда - 110 мА, скорость травления - 61 нм/мин;
 - травление в смеси CCl_4 и O_2 : рабочее давление - $1,4 \cdot 10^{-1}$ Па, ускоряющее напряжение - 1,5 кВ, ток разряда - 160 мА, скорость травления - 158 нм/мин, оптимальная концентрация O_2 в CCl_4 - 20 %;
4. Использование твердотельного источника фтора при ионно-лучевом травлении кварца дает увеличение скорости травления в 1,7 – 2,8 раза.

5. Определены режимы ионно-плазменной обработки, обеспечивающие уменьшение шероховатости кварца в 5 раз: мощность разряда - 300 Вт, давление - 1 Па, среда - O₂.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Ветошкин В.М., Васюта О.К., Крылов П.Н., Алалыкин С.С. Локальное высокочастотное магнетронное реактивно-ионное травление кварца. //Приборы и техника эксперимента, 2002, №6, С. 123-126.
2. Ветошкин В.М., Крылов П.Н., Данилов А.А. Использование высокочастотного магнетронного разряда для утилизации хлорсодержащих газов. //Приборы и техника эксперимента. 2003, № 4. С. 134-137.
3. Ветошкин В.М., Крылов П.Н., Алалыкин А.С. Исследование процессов ионно-лучевого и реактивного ионно-лучевого травления плавленого кварца. //Вакуумная техника и технология, 2005, Т. 15. №3. С. 239-246.
4. Ветошкин В.М., Крылов П.Н. Влияние обработки низкоэнергетическими ионами на шероховатость подложек из ситалла, поликора, кварца.// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008, №10. С. 57-59.
5. Ветошкин В.М., Крылов П.Н., Романов Э. А. Исследование влияния режимов ионно-плазменной обработки на шероховатость подложек из кварца, поликора и ситалла. //Вакуумная техника и технология, 2008, Т.18. № 2. С. 81-86.
6. Ветошкин В.М., Крылов П.Н. Особенности ионно-лучевого травления кварца в среде хлорсодержащих газов. //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009, № 1. С. 93-95.
7. Акашкин А.С., Ветошкин В.М., Печенкин Н.Е. Устройство для обработки подложек в вакууме. Автор. свид.№1665858 С23С 14/34 зарегистр. 22. 03. 1991.

8. Ветошкин В.М., Крылов П.Н., Шинкевич М.В. Особенности ионно-лучевого травления кварца и кремния в среде хлорсодержащих газов. //Вестник УдГУ, сер. "Физика". 2007, №4. С. 67-76.
9. Акашкин А.С., Ветошкин В.М., Печенкин Н.Е. Особенности ВЧ - магнетронного травления кварцевого стекла. //Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара «Низкотемпературные технологические процессы в электронике». Ижевск. 1990, С. 101.
10. Акашкин А.С., Ветошкин В.М., Перевозчиков Б.Н., Мартынова Т.Н. Утилизация продуктов плазмохимических реакций. Материалы Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Рига. 1994, С. 9.
11. Ветошкин В.М., Крылов П.Н. Высокоскоростное ВЧ - магнетронное реактивно-ионное травление кварца. //Труды IV Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск. 2001, С. 87.
12. Ветошкин В.М., Крылов П.Н. Травление кварца и кремния в среде $\text{SiCl}_4, \text{CCl}_4$ //Тезисы докладов научной конференции с международным участием «75 лет высшему образованию в Удмуртии». Ижевск. 2006, С. 48.
13. Ветошкин В.М., Крылов П.Н., Шинкевич М.В. Влияние ионно-лучевой обработки на шероховатость поверхности подложек. //Тезисы докладов научной конференции с международным участием «75 лет высшему образованию в Удмуртии». Ижевск. 2006, С. 47.
14. Ветошкин В.М., Крылов П.Н. Влияние обработки низкоэнергетическими ионами на шероховатость подложек из ситалла, поликора кварца //Труды 18 международной конференции ВИП-2007. М., 2007, Т.1. С. 127-129.
15. Ветошкин В.М., Крылов П.Н. Особенности ионно-лучевого травления кварца в среде хлорсодержащих газов //Труды 18 международной конференции ВИП-2007. М., 2007, Т.1. С. 130-132.

Подписано в печать 25.11.09. Формат 60 x 84 1/16.

Печать лазерная. Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,3

Тираж 100 экз. Заказ № 1987

Отдел оперативной полиграфии ООО “Знак-Ижевск”.

426004, г. Ижевск, ул. Советская, 22а