

Удмуртский государственный университет

на правах рукописи

ВЕТОШКИН ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВА-
НИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ КВАРЦА**

01.04.01 - «Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.ф.-м.н., доцент
П.Н. Крылов

Ижевск

2009

Оглавление

Список сокращений и обозначений	4
Введение	5
Глава 1. Плазменные процессы травления и обработки кварца	9
1.1. Классификация методов травления и обработки материалов с использованием низкотемпературной газоразрядной плазмы.	10
1.2. Вакуумно-технические параметры травления материалов	12
1.3. Сравнительный анализ различных методов травления	15
1.3.1. Ионно-плазменное травление	15
1.3.2 Ионно-лучевое травление	20
1.3.3. Реактивное ионно-плазменное и реактивное ионно-лучевое Травление	22
1.3.4. Плазменное травление	27
1.4. Особенности построения оборудования для реализации процессов вакуумного плазменного травления	28
1.4.1. Требования к откачным средствам	28
1.4.2. Особенности построения реакторов для реализации ВПТ	29
1.5. Особенности ВПТ кварца	31
Глава 2. Оборудование для травления и обработки кварца.	
2.1. Установка для высокоскоростного травления кварца	36
2.1.1. Базовая установка травления	36
2.1.2. Модернизация установки травления	41
2.2. Установка для проведения процессов ионно-плазменного и ионно-лучевого травления и обработки кварца	
Глава 3. Приборы контроля газовой среды и изменяя ее состава, методика измерения скорости травления кварца и изменения шероховатости его поверхности при ВПТ.	56
3.1 Устройство для утилизации хлорсодержащих газов	56
3.2. Методы контроля с результатов травления и обработки кварца	65

3.2.1. Контроль скорости травления	65
3.2.2. Методика замера скорости травления кварца	66
3.2.3. Контроль результатов обработки кварца	69
3.2.4. Методика измерения шероховатости кварца	69
Глава 4. Особенности вакуумного плазменного травления кварца	71
4.1. Необходимость разработки методов ВПТ кварца	71
4.2. Моделирование процессов травления кварца	72
4.3. Локальное ВЧ магнетронное реактивно-ионное травление кварца	75
4.4. Особенности ионно-лучевого травления кварца в аргоне и среде фтор и хлорсодержащих газов	83
4.4.1. Ионно-лучевое травление в хлорсодержащих газах	83
4.4.2. Реактивное ионно-лучевое травление в среде CF_4	90
4.4.3. Ионно-лучевое травление в среде Ar	94
Глава 5. Влияние ионно-плазменной и ионно-лучевой обработки кварца на его шероховатость	102
5.1. Шероховатость. Методы уменьшения шероховатости	102
5.2. Фрактальные параметры	107
5.3. Влияние ИЛТ кварца на шероховатость его поверхности.	110
5.4. Зависимость шероховатости и фрактальности поверхности кварца от среды проведения ИЛТ	120
Основные научные результаты и выводы	128
Список публикаций по теме диссертации	129
Литература	131

Список сокращений и обозначений

НГП - низкотемпературная газоразрядная плазма

ИТ- ионное травление

ПХТ - Плазмохимическое травление

РТ- радикальное травление

ИХТ - ионно-химическое травление

РИПТ – реактивное ионно-плазменное травление

РИЛТ- реактивное ионно-лучевое травление

ИЛТ- ионно-лучевое травление

ХМИЛТ - химически модифицированное ионно-лучевое травление

ВПТ - вакуумного плазменное травление

$Q_{\text{г}}$ - расход газа

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

В производстве микросхем в настоящее время широко используются процессы, происходящие в низкотемпературной неравновесной плазме. Данные процессы используются для очистки поверхности подложек, травления рабочих слоев, удаления резиста. Применение плазменных технологий позволяет увеличить разрешающую способность, повысить производительность труда, дает возможность автоматизировать производство микросхем и перейти от жидкостных технологий к методам сухой вакуумной литографии [1]. Хотя физические явления, происходящие в плазме и на поверхности подложек, до конца не исследованы, они весьма перспективны для изготовления различных изделий.

Низкотемпературную неравновесную плазму перспективно применять для травления кварца, который широко используется в качестве материала чувствительного элемента твердотельного волнового гироскопа [2], корпусов специализированных микросхем, подложек для ГИС СВЧ и устройств на поверхностных акустических волнах [3]. Плазменное травление кварца можно применять как для удаления «трещиноватого» слоя, возникающего при его механической обработке, так и для его высокоточной размерной обработки, что избавит от необходимости анизотропного травления в плавиковой кислоте, применяемого в настоящее время. Специализированного оборудования для высокоточной размерной обработки кварца промышленностью не выпускается, поэтому необходима модернизация уже имеющихся установок ионно-плазменного травления.

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

В связи с вышеизложенным исследование процессов вакуумно-плазменного травления и обработки кварца является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является разработка экспериментальной установки для исследования обработки кварца в низкотемпературной плазме аргона, кислорода, фтор - и хлорсодержащих газов.

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 плавного 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 ведущих рецензируемых журналах (список ВАК), 1 авторское свидетельство, 7 публикаций в материалах научно-технических конференций.

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.

ГЛАВА I

ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ТРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ КВАРЦА

Для травления и обработки материалов представляют интерес физико-химические процессы, осуществляемые с помощью низкотемпературной неравновесной разряженной плазмы, генерируемой электромагнитными полями в атомарных и молекулярных газах при пониженных давлениях. В дальнейшем будем называть её низкотемпературной газоразрядной плазмой (НГП).

НГП – это слабо ионизированный газ при давлении $13 \cdot 10^{-2} - 13 \cdot 10^2$ Па со степенью ионизации порядка $10^{-6} - 10^{-4}$ (концентрация электронов $10^{15} - 10^{18} \text{ м}^{-3}$), в котором электроны имеют среднюю энергию 1 - 10 эВ (температуру порядка $10^4 - 10^5$ К), а средняя энергия тяжелых газа (ионов, атомов, молекул) на два порядка меньше ($T = (3 - 5) \cdot 10^2$ К).

При реализации процессов в НГП возможно, что:

1. НГП является одновременно средой проведения, источником участвующих в процессе частиц и стимулятором (активатором) процесса;
2. НГП служит только источником участвующих в процессе частиц;
3. НГП используется только для активации участвующих в процессе частиц, поверхностей или для стимуляции самого процесса.

В зависимости от вида плазмообразующего газа и природы поверхности твёрдого тела в каждом из трёх случаев с помощью НГП могут быть проведены различные типы обработки, которые можно объединить в три большие группы:

1. удаление материала с поверхности твёрдого тела (распыление, травление, очистка);
2. нанесение материала на поверхность твёрдого тела (химическое из газовой фазы, физическое из материала мишени, модифицируемое в газовой фазе);
3. модификация поверхности слоя твёрдого тела окисление, анодирование, легирование другими элементами, текстурирование, гетерирование, отжиг.

1.1. Классификация методов травления и обработки материалов с использованием низкотемпературной газоразрядной плазмы

Под процессом травления понимается удаление с поверхности атомов и молекул материала верхнего слоя.

По физико-химическому механизму взаимодействия частиц НГП с поверхностью обрабатываемого материала (образца) процессы травления можно разделить на три группы [4]:

1. Ионное травление (ИТ), при котором поверхностные слои удаляются только в результате физического распыления. Распыление осуществляется энергетическими ионами инертных газов. Под энергетическими ионами и атомами понимаются частицы с энергией 0,1 - 2,0 кэВ. Если поверхность обрабатываемого материала находится в контакте с плазмой, то травление называется ионно-плазменным (ИПТ). Если поверхность образца не контактирует с плазмой, которая используется только как источник ионов, осуществляющих травление, то травление называют ионно-лучевым (ИЛТ).

2. Плазмохимическое травление (ПХТ) – травление при котором поверхностные слои материалов удаляются в результате химических реакций, с образованием летучих продуктов. Если поверхность обрабатываемого материала находится в контакте с плазмой, то травление называют плазменным (ПТ). При ПТ химические реакции стимулируются низкоэнергетическими электронной и ионной бомбардировками, а также воздействием излучения. Если поверхность образца не контактирует с плазмой, которая используется только как источник ХАЧ, то такое травление называют радикальным травлением (РТ). РТ осуществляется спонтанно без стимуляции электронной и ионной бомбардировками, а в ряде случаев и при отсутствии воздействия излучения.

3. При реактивном ионном или ионно-химическом травлении (ИХТ) слои материала удаляются в результате как физического распыления энергетическими ионами, так и химическими реакциями между ХАЧ и атомами материала. Если поверхность обрабатываемого материала находится в контакте

с плазмой, то травление называют реактивным ионно-плазменным (РИПТ), при этом на поверхность образца воздействуют энергетические ионы, свободные атомы и радикалы, электроны и излучение. Процесс физического распыления может, как ускоряться, так и замедляться химическими реакциями. Если поверхность образца не контактирует с плазмой, то такое травление называют реактивным ионно-лучевым травлением (РИЛТ). В процессе РИЛТ поверхность материала подвергается воздействию молекулярных и атомарных ионов, которые кроме физического распыления в результате ударной диссоциации и нейтрализации образуют ХАЧ, вступающие в химические реакции с обрабатываемым материалом. Химические реакции могут, как ускорить, так и замедлять процесс физического распыления.

ПТ и РИПТ происходят в плазме химически активных газов, и в них поверхность обрабатываемого материала подвергается воздействию одинакового набора частиц: ионов, электронов свободных атомов и радикалов, а также излучения. По этому очень важно уметь различать эти процессы. В [6] в качестве условной частицы использовано значение энергии ионов E_u , бомбардирующих поверхность образца. Если $E_g < 100$ эВ, то травление является плазменным, если $E_g > 100$ эВ, то происходит РИПТ. Однако, проведённые в последние годы исследования [8 - 10] позволяют уточнить такое разделение процессов. Действительно, при $E_g < 100$ эВ травление является плазменным, т.к. процесс физического распыления материала не вносит заметного вклада в удаление материала. При $E_g > 100$ эВ основной вклад в удаление материала могут вносить как химические реакции, так и физическое распыление.

В первом случае можно говорить об ионно-стимулированном плазменном травлении (ИСПТ), во втором случае – о химически модифицированном ионно-плазменном травлением (ХМИПТ). Если скорость травления материала выше, чем при ИПТ, то это химически стимулированное ионно-плазменное травление (ХСИПТ), а если ниже – то химически замедленное ионно-плазменное травление (ХЗИПТ). Аналогичные рассуждения можно провести относительно процессов ИЛТ, РИЛТ и РТ.

Если в процессе РИЛТ основной вклад в удаление материала вносит физическое распыление, то можно говорить о химически модифицированном ионно-лучевом травлении (ХМИЛТ). Если скорость травления материала выше, чем при ИЛТ, то это химически стимулированное ионно-лучевое травление. А если ниже – то это химически замедленное ионно-лучевое травление (ХЗИЛТ). Когда основной вклад в удаление материала при РИЛТ вносят химические реакции, процесс следует отнести к ионно-стимулированному радикальному травлению (ИСРТ).

С использованием химически активных и заряженных частиц, образующихся в НПП можно проводить радиационно-стимулированное травление материалов [5-7].

1.2. Вакуумно-технические параметры травления материалов

Процессы травления должны обеспечивать воспроизводимость, скорость, селективность, степень анизотропии, равномерность и высокую производительность.

Указанные характеристики зависят от вакуумно-технических параметров процессов травления, таких как:

1. рабочее давление;
2. состав и расход рабочего газа;
3. скорость откачки;
4. предельное давление.

В системах вакуумного плазменного травления (ВПТ) диапазон давлений рабочего газа определяется условиями существования рабочих разрядов. В указанном диапазоне следует выбирать такое давление $P_{\text{опт}}$, при котором достигаются минимальный потенциал зажигания разряда и максимальная проводимость плазмы. При $P_{\text{опт}}$ в плазме разряда скорости генерации ХАЧ и энергетических частиц максимальны, а следовательно максимальны скорости травления материалов. Значение $P_{\text{опт}}$ для конкретной системы ВПТ определяется видом используемого рабочего газа и не зависит от материала, который подвергается обработке. Давление рабочего газа влияет на равномерность

обработки материалов в системах РИЛТ и ИЛТ, поскольку определяет степень рассеивания пучков. Отклонение рабочего давления от оптимального всего на 20–50 % приводит к значительному (в несколько раз) снижению скорости травления, причём снижение различно для различных материалов, в результате чего изменяется селективность их травления.

Для повышения эффективности травления материалов во всех системах ВПТ необходимо регулировать давление в камере P и расход газа $Q_{\text{рг}}$.

Это достигается установкой на откачных магистралях регуляторов потока рабочего газа и натекателей с измерением расхода рабочего газа в диапазоне от 1 до 100 см³. На зависимостях скорости травления $V_{\text{тр}}$ материалов от расхода рабочих газов $Q_{\text{рг}}$ при постоянных мощности разряда $W_{\text{раз}}$ и давлении P наблюдается максимум [4]. Увеличение $Q_{\text{рг}}$ вначале способствует увеличению ХАЧ и их эффективной доставке к поверхности, и следовательно скорости травления.

Однако, при дальнейшем увеличении $Q_{\text{рг}}$ время нахождения молекул газа в зоне плазмы разряда $\tau_{\text{п}} = pV_{\text{пл}}/Q_{\text{рг}}$, где $V_{\text{пл}}$ – объём плазменной зоны и время нахождения ХАЧ у поверхности обрабатываемого материала $\tau_{\text{обр}} = pV/Q_{\text{рг}}$, где V – объём зоны обработки, становятся настолько малыми, что молекулы газа и ХАЧ откачиваются не успев вступить в реакцию с обрабатываемым материалом.

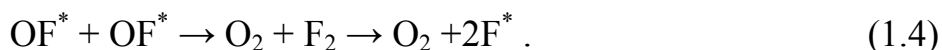
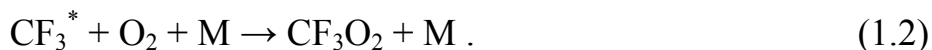
На процесс травления материалов значительное влияние оказывают контролируемые и неконтролируемые газовые добавки, в частности, кислорода.

Контролируемая добавка кислорода к фторуглеродному соединению может быть объяснена на основе изменения отношения F/C в плазме разряда, поскольку при этом увеличивается выход свободных атомов фтора и как следствие возрастает скорость травления [8]. Также кислород удаляет углеродные атомы, адсорбированные на поверхности подвергнутого травлению материала, образуя при взаимодействии газы CO и CO₂, тем самым атомы

фтора не расходуются на реакцию с углеродом, а участвуют в травлении материала, увеличивая его скорость.

Кислород также уменьшает скорости гомогенных реакций атомов фтора с другими частицами, уменьшая число этих частиц посредством окисления. Например, в результате реакции в газовой фазе между кислородом и углеродсодержащими частицами образуются соединения типа COF_2 , CF_3O_2 ; вероятность рекомбинации которых с атомарным фтором значительно меньше, чем у исходных частиц. Таким образом, в плазме разряда увеличивается отношение F/C и, следовательно, повышаются скорости травления материалов.

Кислород реагирует с фторсодержащими частицами, освобождая атомы фтора. Считая, что в плазме помимо реагентов присутствует третья частица M, роль которой выполняет CF_4 , можно предложить следующие реакции с участием кислорода, приводящие к выходу атомов фтора:



Кислород служит катализатором процесса диссоциации молекул рабочего газа



Однако увеличение концентрации кислорода выше 40 % приводит к уменьшению концентрации атомов фтора. Это уменьшение может быть связано со снижением энергии электронов, так как при одинаковых отношениях E/P (напряжённость электрического поля к давлению газа) в плазме CF_4 энергия электронов выше, чем в плазме кислорода [4].

Присутствие кислорода в CCl_4 так же увеличивает скорость травления хрома за счёт удаления образующейся при диссоциации CCl_4 полимерной углеродной плёнки.

Неконтролируемые газовые добавки появляются при изменении давления остаточных газов и примесей в рабочем газе.

Наиболее сильно влияние остаточного давления кислорода и паров воды наблюдается при травлении в химически активных газах. При РИПТ кремния с SiF_4 в присутствии паров воды блокируется травление на 2 часа после каждой разгерметизации камеры, вызывая осаждение SiO_2 на поверхности согласно реакции (1.6).



Тонкий слой естественного окисла на поверхности алюминия и наличие остаточного давления паров воды в реакторе приводят к невоспроизводимости времени начала травления алюминия.

Поскольку наличие кислорода и паров воды составляют не менее половины $P_{\text{ост}}$, очень важно определить до какого вакуума откачивать рабочую камеру в процессах ВПТ.

Пары воды и кислород так же являются основными загрязняющими примесями многих рабочих газов, таких как аргон, хладон 14, гексафторид серы [9]. Поэтому остаточное давление $P_{\text{ост}}$ в камере связано с концентрацией примесей $n_{\text{прим}}$ в рабочем газе при операционном давлении P следующим соотношением:

$$P_{\text{ост}} \approx 2Pn_{\text{прим}} . \quad (1.7)$$

Например, если процесс ВПТ проводится при давлении $P = 3,2$ Па, а рабочий газ содержит 0,02 % примесей ($n_{\text{прим}} = 2 \cdot 10^{-4}$), то камеру необходимо откачивать до остаточного давления $1,5 \cdot 10^{-3}$ Па.

1.3. Сравнительный анализ различных методов травления

1.3.1. Ионно-плазменное травление

Ионно-плазменное травление представляет собой разновидность процесса ионного травления, в основе которого лежит механизм физического распыления материалов.

При ионном травлении удаление поверхностных слоёв материалов осуществляется за счёт физического распыления энергетическими ионами инертных газов или ионов, химически не реагирующих с обрабатываемым

материалом. Проведённые многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, систематизированные в [10] доказывают, что основным механизмом взаимодействия между бомбардирующими ионами и атомами материала является процесс передачи импульса. Распыление осуществляется за счёт упругих столкновений, приводящих к прямому выбиванию атомов из равновесных положений.

Физическое распыление материалов количественно характеризуется коэффициентом распыления (КР), который определяется как среднее число атомов, удаляемых с поверхности материала одной падающей частицей.

$$Y = N_a / N_{и} , \quad (1.8)$$

где N_a – число выбитых (распылённых) атомов материала, $N_{и}$ – число ионов, бомбардирующих материал. Для ионного травления используются ионы с энергией от 100 до 1000 эВ. Травление начинается когда энергия ионов $E_{и}$ превысит некоторое значение $E_{пор}$, получившее название пороговой энергии распыления. Значения $E_{пор}$ лежат в диапазоне 10 – 30 эВ [10 - 11].

Основная доля энергии ионов (70 – 90 %) выделяется в материале в виде теплоты, 10 % расходуется на распыление, на радиационные повреждения материала, внедрение ионов, вторичную ионную эмиссию и электромагнитное излучение в широком диапазоне частот.

Энергетическая эффективность процесса ионного распыления $\eta_{эн}$ определяется массой материала m , распыляемого в единицу времени с единицы площади, которая отнесена к плотности мощности

$$\omega = j_{и} V_{и} , \quad (1.9)$$

где $j_{и}$ – плотность ионного тока, $V_{и}$ – ускоряющее напряжение. Величина $E_{и} = eU_{и}$ – определяет энергию ионов, бомбардирующих материал.

В случае распыления материала однозарядными ионами $m = Y_p(E_{и})A_m$, где A_m – атомная масса распыляемого материала, N_a – число Авогадро. Тогда:

$$\eta_{эн} = Y_p(E_{и})A_m / E_{и} N_a . \quad (1.10)$$

Из формулы (1.10) следует, что энергетическая эффективность распыления зависит от энергии ионов. Значения энергии ионов, при которой обеспечивается максимальная энергетическая эффективность, лежат в диапазоне 300 – 500 эВ. Максимальная энергия ионов расходуется на процесс распыления материалов [10].

Кроме энергии ионов на КР материала влияют следующие характеристики [11 - 13]:

- Масса бомбардирующих ионов $m_{и}$. КР увеличивается с возрастанием $m_{и}$ и атомного номера иона в области энергий, используемых для ИТ;
- Атомный номер распыляемого материала Z_a . Наблюдается сложная периодическая зависимость КР от Z_a , в которой в пределах периода таблицы Менделеева КР возрастает по мере заполнения электронных d-оболочек;
- Угол падения ионов на поверхность материала α . С ростом α от 0 (отсчёт ведётся от нормали к поверхности) до 60 – 70 ° наблюдается увеличение КР материалов. Зависимость КР от α в этой области определяется по формуле:

$$Y_p(\alpha) = Y_p(0) \cos \alpha, \quad (1.11)$$

где $Y_p(0)$ – КР при нормальном падении ионов;

- Чистота обработки поверхности. Шероховатые поверхности имеют меньший КР, чем гладкие. Это связано с частичным улавливанием распылённых атомов соседними микронеровностями;
- Температура распыляемого материала $T_{рм}$. В диапазоне температур от комнатной до 600 К, используемых при ИТ значение КР не зависит от температуры для поликристаллов и аморфных материалов. Для монокристаллов КР не зависит от температуры до 400 К, если не происходит фазового магнитного перехода или изменения кристаллической структуры;

Для реализации ИПТ наиболее распространены ВЧ диодные системы, содержащие два дисковых электрода – заземлённый – анод, и ВЧ электрод, на котором размещаются образцы для травления. Данная система даёт возможность травить любые материалы (металлы, диэлектрики, органические соединения) и обладает простотой конструкции. Большая площадь ВЧ электрода обеспечивает равномерную ионную бомбардировку.

Основные параметры диодной ВЧ системы, обеспечивающей ИПТ:

- Давление рабочего газа $P = 0,66 - 6,6$ Па.
- Радиус ВЧ электрода $R = 10 - 30$ см.
- Мощность ВЧ разряда $W_{ВЧ} = 0,1 - 4$ кВт.
- Частота ВЧ разряда $f = 440$ кГц; $1,76$ МГц; $5,28$ МГц; $13,56$ МГц; $27,12$ МГц.

Характерной особенностью систем с ВЧ разрядом является согласование ВЧ генератора с распылительной камерой. Полное сопротивление (импеданс) системы может меняться в очень широких пределах в зависимости от размеров электродов, давления и состава рабочего газа.

Для повышения характеристик ВЧ диодной системы используют магнетронный разряд, размещая под ВЧ электродом постоянные магниты, форма полюсов которых имеет геометрию замкнутой зоны у поверхности мишени в виде вытянутой буквы “О”. Наличие у мишени замкнутого магнитного поля даёт возможность локализовать плазму непосредственно у обрабатываемых образцов и повысить плотность тока на мишень. Для обеспечения равномерности ИПТ используют сканирование магнитной системы. ИПТ в планарных диодных системах обеспечивает следующие характеристики:

Скорость. Согласно [12] скорость ИТ материала нм/с определяется по формуле:

$$V_{тр} = 6,25 \cdot 10^{25} j_{и} Y_p A_m / N_a \rho, \quad (1.12)$$

где $j_{и}$ – плотность ионного тока А/см²; Y_p – КР материала атом/ион; A_m –

атомная масса распыляемого материала г/моль; N_a – число Авогадро атом/моль; ρ - плотность материала г/см².

Скорость травления линейно возрастает с увеличением мощности разряда, скорости различных материалов составляют 0,5 – 1 нм/с и при одинаковых режимах для материалов отличаются не более чем в два раза. Основное ограничение скорости – перегрев органических масок, используемых для формирования топологии при увеличении мощности. Типичные скорости травления приведены в табл. 1.1 [13-16].

Таблица 1.1

Скорости ИПТ материалов

Материал	$V_{тр}$, нм/с.	ω , Вт/см ² .
Au	0,3 – 1,5	1,6
Cu	0,3 – 0,6	1,6
Ni	0,8	2
Ti	0,08	2,0
SiO ₂	0,2	1,6
Фоторезист AZ-340	0,12 – 0,5	1,6

Селективность травления одного материала относительно второго определяется соотношением:

$$\rho = V_{тр1} / V_{тр2} \quad (1.13)$$

где $V_{тр1}$, $V_{тр2}$ – скорости травления первого и второго материалов при одинаковых условиях.

Учитывая, что скорости ИПТ материалов при одинаковых условиях различаются не более чем в 2–3 раза, поэтому селективность ИПТ обычно не превышает 2–3, что в большинстве случаев недостаточно для проведения размерной обработки материала.

Показатель анизотропии процесса травления A определяется как отношение скоростей травления материала по нормали и по касательной к по-

верхности, или как отношении глубины травления h к боковому подтравливанию δ :

$$A = V_{\text{тр}}(0)/V_{\text{тр}}(90) = h/\delta . \quad (1.14)$$

По своему механизму процесс ИПТ должен обладать высокой анизотропией, однако низкие стойкость масок и селективность травления, сильная зависимость скорости травления от угла падения ионов, затруднённый выход распылённого материала из глубоких канавок, при используемых рабочих давлениях ограничивают показатель анизотропии в диапазоне 5 – 10 [4].

Равномерность ИПТ определяется равномерностью распределения плотности ионного тока по поверхности мишени-катода.

$$\gamma_{\text{тр}} = 2 \frac{V_{\text{трмакс}} - V_{\text{трмин}}}{V_{\text{трмакс}} + V_{\text{трмин}}} \cdot 100 , \quad (1.15)$$

где $V_{\text{трмакс}}$, $V_{\text{трмин}}$ – соответственно максимальная и минимальная скорости травления по поверхности катода. Обычно неравномерность травления не превышает 5 – 10 %, за исключением краевых участков шириной 20 – 30 мм.

Влияние на обрабатываемые структуры. Процессы ИПТ обрабатываемых структур всегда сопровождается образованием радиационных дефектов, которые подразделяются на дефекты смещения, связанные со смещением атомов в решётке материала и образованием вакансий и ионизационные дефекты, обусловленные ионизацией атомов решётки. К числу частиц, способных вызывать радиационные повреждения в обрабатываемых материалах при ИПТ относятся ионы, электроны, нейтральные атомы и фотоны.

1.3.2 Ионно-лучевое травление

Так же как и при ИПТ, удаление поверхностных слоёв при ИЛТ осуществляется в результате физического распыления энергетическими ионами инертных газов, или ионами, которые химически не реагируют с обрабатываемыми материалами. Однако в отличие от ИПТ при ИЛТ поверхность обрабатываемого материала не контактирует с плазмой и последняя используется только в качестве источника ионов, осуществляющих процесс травле-

ния. Основные стадии ИЛТ являются генерация ионов, распространения пучка ионов в вакууме и взаимодействие пучка ионов инертного газа с поверхностью обрабатываемого материала.

ИЛТ обеспечивает следующие характеристики:

Скорость. Помимо коэффициента распыления, зависящего от вида подвергаемого обработке материала, скорость ИЛТ зависит от плотности ионного тока, угла падения ионов на обрабатываемую поверхность, вида и энергии ионов. Если зависимость скорости ИЛТ от плотности ионного тока и энергии имеет линейный характер, то характер зависимости скорости ИЛТ от угла падения ионов более сложный, в общем случае имеет косинусный характер и сильно зависит от типа обрабатываемого материала. В таблице 1.2 приведены значения скорости ИЛТ различных материалов в аргоне (99,999 %-ой чистоты) пересчитанные к плотности мощности ионного тока $\omega = 0,5 \text{ Вт/см}^2$ при вертикальном падении ионов и давлении паров воды и кислорода в камере менее 10^{-4} Па.

Таблица 1.2

Скорости ИЛТ различных материалов

Материал.	$V_{\text{тр}}$, нм/с.
Au	1,5 – 2
Cu	0,9 – 1,1
SiO ₂	0,4 – 0,6
Ti	0,3

Селективность. Разрешение процесса ИЛТ при переносе рисунка с маски в значительной мере определяется селективностью. Учитывая соотношение скоростей различных материалов не превышающее 2–3 селективность также равна этой величине.

Анизотропия. Характерное для ИЛТ направленное движение ионов, падающее на обрабатываемый материал перпендикулярно его поверхности обеспечивает очень высокую анизотропию. При давлении в рабочей камере

$P < 0,1$ Па, когда по существу отсутствует рассеивающее столкновение ионов с нейтральными атомами у поверхности образца, показатель анизотропии $A > 100$. Высокая анизотропия ИЛТ позволяет получать рисунки субмикронных размеров.

Равномерность. Равномерность ИЛТ полностью определяется равномерностью ионного тока. В ионных источниках имеющих трубчатый ионный поток используют системы перемещения обрабатываемых пластин, обеспечивающие требуемую равномерность.

Влияние на обрабатываемые структуры. Автономные ионные источники, используемые для реализации ИЛТ работают в широком диапазоне энергий ионов, от 0,1 до 1 КэВ, что неизбежно вызывает в обрабатываемых структурах радиационные дефекты, аналогичные дефектам, возникающим при ИПТ.

1.3.3. Реактивное ионно-плазменное и реактивное ионно-лучевое травление

Реактивное ионно-плазменное и реактивное ионно-лучевое травление представляют собой разновидности травлений при которых удаление материала происходит как за счёт физического распыления ускоренными ионами химически активных газов, так и в результате химических реакций между ХАЧ и поверхностными атомами подвергаемого травлению материала.

Физический и химический процессы при РИПТ и РИЛТ складываются не аддитивно, т.е. количество материала, удалённого при одновременном протекании обоих процессов, намного больше суммы количеств материалов, удалённых с помощью каждого процесса.

При проведении РИПТ обрабатываемые образцы находятся в контакте с плазмой и размещаются на электроде, подключённом к источнику ВЧ напряжения. ВЧ электрод может быть планарным или ВЧ коаксиальным в виде многогранной призмы или цилиндра. Если электрод выполнен в виде шестигранной призмы, то систему травления называют Нех-системой, а если используется магнитное поле, силовые линии которого скрещиваются с сило-

выми линиями электрического поля, то магнетронной системой [17]. Наиболее распространенные системы РИПТ показаны на рис 1.1

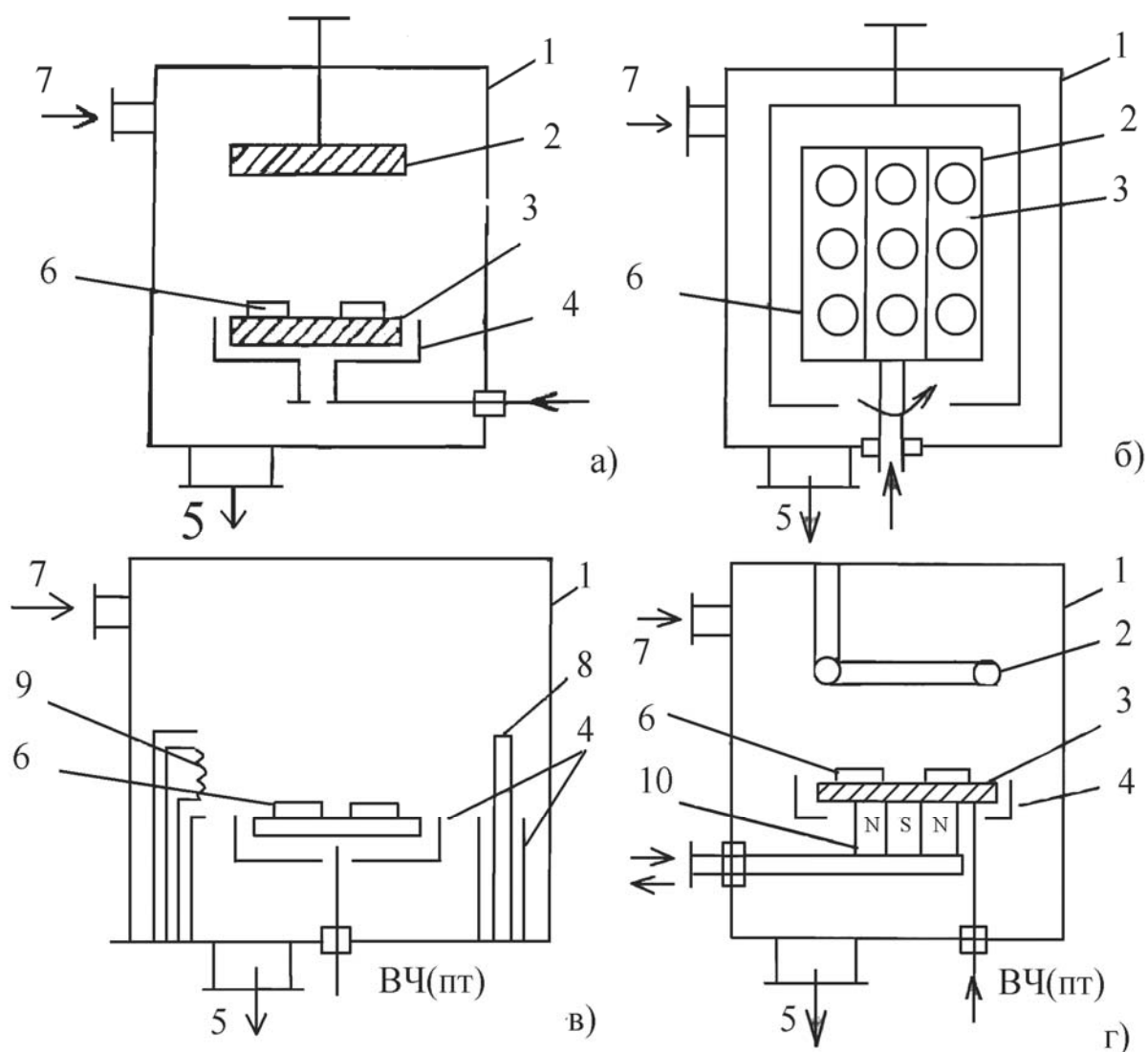
Планарная ВЧ диодная система открытого типа (рис 1.1, а) содержит два электрода – заземленный анод и ВЧ-электрод на который подается напряжение от ВЧ генератора. Для увеличения производительности за счет загрузки большего числа подложек на ВЧ электрод применяют вертикальную ВЧ-систему с многогранным ВЧ - электродом (рис 1.1, б).

Для снижения радиационных повреждений поверхностных слоёв обрабатываемого материала и повышения стойкости органический резистов были разработаны триодные и магнетронные системы.

В триодной системе (рис. 1.1в) вблизи ВЧ - катода помещена электрически изолированная от катода сетка, находящаяся под плавающим потенциалом. При этом образуется полый катод наличие, которого в 3 – 4 раза увеличивает плотность ионов в пространстве между сеткой и катодом и одновременно в 4 – 5 раз снижает напряжение автосмещения на катоде.

Магнетронная система планарного типа (рис. 1.1г) представляет собой диодную систему, в которой взаимодействие электрического и магнитного полей создают магнитную ловушку для электронов [18]. Под ВЧ - катодом размещены постоянные магниты, форма полюсов магнитной системы определяет геометрию замкнутой зоны на поверхности мишени, имеющей форму вытянутой буквы «О». Наличие у мишени замкнутого магнитного поля позволяет локализовать плазму непосредственно у мишени. Электроны оказываются в магнитной ловушке и циркулируют по замкнутым траекториям, увеличивая эффективность ионизации в прикатодной области, в результате резко повышается скорость РИПТ. Для обеспечения равномерности травления используют механическое сканирование магнитного узла.

Системы ИПТ



а – планарная ВЧ (ПТ)-диодная; б – вертикальная ВЧ (ПТ)-диодная с многогранным электродом; в – триодная; г – планарная магнетронная; 1 – камера; 2 – заземлённый электрод; 3 – ВЧ (ПТ)-электрод; 4 – заземлённый экран; 5 – откачка; 6 – обрабатываемые пластины; 7 – напуск газа; 8 – анод; 9 – термокатод; 10 – магнитная система.

Рис. 1.1.

Наличие магнитного поля с индукцией 0,1 - 0,2 Тл в 4 - 5 раз снижает напряжение автосмещения и обеспечивает возможность стабильного горения разряда при давлении 1 Па.

Скорость РИПТ $V_{тр}$ зависит от уровня ВЧ мощности, вида рабочего газа или состава газовой смеси, давления газа в реакторе, конструктивных особенностей реактора, наличия магнитного поля. Скорость РИПТ не зависит от температуры, поэтому всегда используется принудительное водяное охлаждение ВЧ электрода для исключения перегрева изоляции и повышения стойкости органических резистов [19].

Селективность РИПТ S может меняться в широких пределах в зависимости от состава рабочего газа, его давления, плотности ВЧ мощности, напряжения автосмещения, конструкции реактора. Оптимизацией перечисленных параметров достигают $S = 5 - 30$ и более.

Анизотропия РИПТ A в 3 - 5 раз выше, чем у ПХТ. Для планарной ВЧ системы $A = 10 - 20$ и предельное разрешение $L = 0,4$ мкм. У системы РИПТ с магнитным полем при $P = 0,1$ Па, $A = 20 - 100$, $L = 0,2 - 0,1$ мкм.

Равномерность РИПТ зависит от распределения ионов и ХАЧ по поверхности обрабатываемого материала. Подбором рабочих параметров и оптимизацией конструкции реактора достигается равномерности $\pm 5\%$.

Влияние РИПТ на обрабатываемые структуры связано с их бомбардировкой ионами и ХАЧ. Уровень радиационных повреждений снижают, используя триодные и магнетронные системы.

Реактивным ионно-лучевым травлением называется процесс, при котором обрабатываемый материал вынесен из зоны плазмы разряда, находится в вакууме и подвергается воздействию пучка ускоренных ионов химически активного газа, которые могут образовывать ХАЧ и производить травление [19 - 21].

Процессы РИПТ реализуются в системах с автономными ионными источниками (АИИ).

Скорость РИЛТ $V_{\text{тр}}$ лимитируется выделяемой на обрабатываемой структуре мощностью. Она зависит от плотности пучка, угла его падения на подложку, массы и энергии бомбардирующих частиц и степени их химического сродства с обрабатываемым материалом. Скорость травления зависит так же от вида, давления и расхода рабочего газа или газовой смеси. Кроме того, на скорость РИЛТ оказывает влияние давление и состав остаточных газов в рабочей камере. Скорость РИЛТ в 3–15 раз превосходит скорости ИЛТ, но в 2 – 3 раза уступает скорости ПХТ.

Селективность РИЛТ в результате существенного вклада в механизм травления химических реакций в 5 – 12, чем селективность ИЛТ. Но из-за физического взаимодействия селективность РИЛТ в 2–4 раза ниже, чем селективность ПХТ [6]. Селективность РИЛТ зависит от состава активного газа, вида обрабатываемого материала, конструктивных особенностей АИИ, параметров разряда в АИИ и состава остаточных газов в рабочей камере.

Анизотропия РИЛТ A значительно выше, чем для РИПТ и по своему значению близка к показателю анизотропии ИЛТ (10 – 100). Высокая анизотропия РИЛТ обусловлена значительным вкладом физического взаимодействия в процессе травления и направленностью ионов перпендикулярно поверхности образца.

Равномерность травления γ определяется отклонением скорости травления на участке обработки и зависит в основном от равномерности плотности ионного тока пучка. В случае неравномерности ионного пучка используют вращение или сканирование подложкодержателей. Характерная равномерность травления для РИЛТ достигает 97 %, в то время как для ПТ только 80 – 90 % [4].

Влияние на обрабатываемые материалы обусловлено двумя факторами: физическим распылением и химическим взаимодействием с материалом подложки. Поэтому на поверхности подложки обычно наблюдаются два вида нарушений: радиационные нарушения, вызванные взаимодействием высокоэнергетических ионов с поверхностным слоем, и загрязнения, обусловленные

образованием нелетучих продуктов химических реакций, протекающих на поверхности.

1.3.4. Плазменное травление

В основе плазменного травления лежат активируемые излучением плазмы, электронами и ионами гетерогенные химические реакции между ХАЧ и поверхностными атомами обрабатываемого материала.

Процессы ПТ реализуются в цилиндрических реакторах с расположением подложек на кассетах в объёме плазмы, так и в планарных ВЧ диодных реакторах. В реакторах диодного типа ПТ реализуется только при условиях, не позволяющих ионам достичь энергии 100 эВ, в противном случае процесс переходит в РИПТ.

Производительность ПТ зависит от скорости травления, конструкции реактора, а также от длительности подготовительных операций.

Скорость ПТ описывается выражением

$$V_{\text{тр}} = \frac{G_{\text{хач}} k_{\text{тр}} \tau_{\text{хач}}}{1 + bF_{\text{м}} k_{\text{тр}} \tau_{\text{хач}} / V_{\text{пз}}}, \quad (1.16)$$

где $G_{\text{хач}}$ – скорость генерации ХАЧ, $k_{\text{тр}}$ – константа скорости травления, $\tau_{\text{хач}}$ – время жизни ХАЧ, b – постоянная зависящая от обрабатываемого материала, $F_{\text{м}}$ – площадь обрабатываемой поверхности материала, $V_{\text{пз}}$ – объём зоны плазмы.

Когда $F_{\text{м}} \ll V_{\text{пз}}/k_{\text{тр}}\tau_{\text{хач}}b$,

$$V_{\text{тр}} = G_{\text{хач}} k_{\text{тр}} \tau_{\text{хач}} \quad (1.17)$$

и не зависит от площади травления материала. В этом случае снабжение ХАЧ происходит в достаточной степени и ПТ протекает в кинетической области, где скорость травления ограничивается гетерогенной реакцией на поверхности обрабатываемого материала.

Когда $F_{\text{м}} \gg V_{\text{пз}}/k_{\text{тр}}\tau_{\text{хач}}b$,

$$V_{\text{тр}} = G_{\text{хач}} V_{\text{пз}} / bF_{\text{м}}. \quad (1.18)$$

ПТ протекает в диффузионной области и скорость травления изменяется обратно пропорционально площади обрабатываемой поверхности.

Температура материала, подвергаемого ПТ влияет на скорость травления. С увеличением температуры скорость растёт.

Селективность травления в случае отсутствия распыления при ПТ наиболее высока и составляет 5 – 30, и зависит от мощности, давления, состава газовой смеси, конструкции реактора и материала поверхности катода.

Анизотропия ПТ достаточно низкая, так как существует боковое подтравливание, имеющее место одновременно с вертикальным травлением и травления, происходящего с момента достижения нижележащего слоя до остановки процесса.

Равномерность ПТ существенно зависит от типа реактора. В реакторах объёмного типа, где нет возможности применить принудительное охлаждение подложек, равномерность низка из-за разности температур по подложке и от подложки к подложке в партии. Равномерность ПТ в планарных ВЧ системах выше за счёт более равномерной доставки ХАЧ к подложкам и равномерности их температур. Для объёмных реакторов неравномерность травления составляет $\pm 16 \%$, для ВЧ диодных систем достигает $\pm 5 \%$.

Влияние на обрабатываемые структуры возможно благодаря образованию нелетучих продуктов реакции вследствие взаимодействия ХАЧ друг с другом, примесями, остаточным газом. Подобные продукты, осаждаясь на обрабатываемой поверхности, замедляют скорости травления и увеличивают шероховатость поверхности.

1.4. Особенности построения оборудования для реализации процессов вакуумного плазменного травления

1.4.1. Требования к откачным средствам

Получение нужных характеристик процесса травления предъявляет к откачным средствам ряд противоречивых и специфических требований

1. запуск при атмосферном давлении.

2. обеспечение постоянства быстроты действия в широком диапазоне давлений (от 10^{-3} Па для ИЛТ и РИЛТ до 10^3 Па в системах ПХТ).
3. создание остаточной среды свободной от паров воды, кислорода, углеводородов.
4. обеспечение строгого постоянства газовой среды в реакторе при потоках от $1\text{ см}^3/\text{мин}$ для ИЛТ и РИЛТ до $500\text{ см}^3/\text{мин}$ для ПХТ.
5. откачка химически активных, агрессивных, токсичных и взрывоопасных газов и продуктов реакции.
6. обеспечение большого ресурса работы.

Диффузионный и турбомолекулярные насосы способны обеспечить откачку рабочей камеры до высокого давления (10^{-3} Па), но не могут работать в диапазоне давлений характерном для ПХТ (более 1 Па). В то же время двухроторный насос может работать в диапазоне давлений $10^{-1} - 10^{-2}$ Па, но не обеспечивает высоковакуумную откачку [9].

Для реализации ПХТ чаще всего применяется комбинированная откачная система, в которой для предварительной высоковакуумной откачки диффузионный парамасленный насос, а для реализации процесса ПХТ при давлении более 1 Па механический насос с масляным уплотнением или его комбинация с двухроторным насосом (ДРН).

Для снижения степени ухудшения параметров насосов приходится применять фильтры на впускном и выпускном отверстиях насосов, использовать фильтрацию масла, устанавливать азотные ловушки, использовать бочки для слива конденсата и выполнять ряд специфических требований при конструировании и эксплуатации откачной системы.

1.4.2. Особенности построения реакторов для реализации ВПТ

К реакторам установок ВПТ предъявляются следующие требования:

1. обеспечение требуемой равномерности и скорости травления.
2. минимальное внесение загрязнений в подвергаемые травлению пластины ионами тяжёлых металлов (железа, никеля, хрома).
3. минимальное время технического обслуживания.

4. возможность реализации процессов ИПТ, РИПТ и ПТ, изменяя рабочие режимы.
5. обеспечивать напуск 2 – 3 различных газов с контролем их расхода.

Наиболее распространены реакторы с планарной ВЧ диодной системой. Модернизация данных систем направлена на повышение выхода ХАЧ с целью увеличения скорости травления и равномерности, используя изменение конструкции анода и магнитные поля различной конфигурации под катодом.

Использование постоянных магнитных полей для увеличения скорости травления описаны в [22-24]. Повышение концентрации ХАЧ и равномерности их распределения достигается использованием полюсных наконечников магнитопроводов и магнитных систем специальной формы.

Наличие магнитного поля с индукцией 0,10 - 0,12 Тл в 4 - 5 раз снижает напряжение автосмещения на катоде, что позволяет существенно снизить глубину радиационных нарушений [25].

В [26] для увеличения скорости и равномерности травления используется неподвижная магнитная система с постоянными самарий-кобальтовыми магнитами, обеспечивающими напряжённость магнитного поля $1 \cdot 10^5$ А/м. При этом область вне интенсивного плазменного контура облучается потоком электронов с плотность тока 14 - 15 мА/см² и энергией 520 – 500 эВ. Это позволяет увеличить скорость процесса анизотропного травления в 1,5 раза.

В [27] описана установка с восьмигранным ВЧ электродом и магнитной системой на соленоидах. Достоинством установки является шлюзовая загрузка, обеспечивающая высокую воспроизводимость и производительность. Использование магнитного поля увеличивает степень ионизации рабочего газа за счёт большого поглощения ВЧ мощности плазмой в последнем [28]. Увеличение степени ионизации позволяет снизить рабочее давление до 0,1 – 0,3 Па, увеличивая эффект направленного действия и анизотропность. В [29] описан реактор, используемый диодную систему и магнитное поле создаваемое соленоидом. На потенциальный электрод подаются импульсы прямоугольной формы. Амплитуда положительных импульсов равна 100–800 В с

длительностью от 10^{-5} до 10^{-3} с, амплитуда отрицательных импульсов 50 – 150 В с длительностью $0,1 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-5} с. За счёт перезарядки поверхности обеспечивается эффективная доставка ХАЧ к поверхности материала и отвод продуктов реакции. Скрещенное электрическое и магнитное поле обеспечивают высокую эффективность ионизации. Конфигурация магнитного поля обеспечивает равномерность травления 98 – 98 % на пластинах диаметром 100 мм.

1.5. Особенности ВПТ кварца

Плавленный кварц – минерал, одна из кристаллических модификаций кремнезена (SiO_2). Природным кварцем являются горный хрусталь, кварцит, кварцевый песок и др. Плотность $2,65 \text{ г/см}^3$, температура плавления 1700°C , испарения 2100°C . [30] Обладает пьезоэлектрическими свойствами, чистый – прозрачен, с хорошими оптическими свойствами, пропускает ультрафиолетовые лучи. Нерастворим в воде и кислотах, менее устойчив к щелочам. Имеет исключительно низкий коэффициент расширения (нечувствительность к резким сменам температуры).

При работе с кварцевыми заготовками возникает проблема удаления “трещиноватого” слоя, возникающего в процессе его шлифовки и полировки [31] и ухудшающего характеристики приборов, использующих кварцевую основу.

Учитывая, что химическая формула кварца SiO_2 , а плёнки данного состава – основа полупроводниковой технологии микросхем, травление данного материала хорошо изучено [32, 33]. Для травления плёнок SiO_2 , а следовательно и кварца используют фторсодержащие газы CF_4 , SF_6 , CHF_3 . В плазме они разлагаются с образованием радикалов фтора F^* , вступающим в реакцию с кварцем с образованием четырёхфтористого кремния SiF_4 , который при температуре выше 359 К летуч.

Травлению плёнок SiO_2 , а следовательно и кварца а возможно при использовании плазменного, реактивного ионно-плазменного и реактивного ионно-лучевого травления.

Типичные скорости травления [34]:

- Плазменное травление 5 – 10 нм/мин при использовании CHF_3
- РИПТ – 20 – 40 нм/мин
- РИЛТ – 100 – 150 нм/мин
- Магнетронное РИПТ 600 – 1000 нм/мин

В зависимости от типа реактора, ВЧ мощности и состава газовой смеси.

Добавка кислорода до 30 % к фторсодержащим газам приводит к увеличению скорости травления, при дальнейшем увеличении содержания кислорода $V_{\text{тр}}$ уменьшается пропорционально его концентрации в фторсодержащем газе [35].

Увеличение скорости травления кварца достигается введением в хлорсодержащие газы азота [36] за счет устранения накопления углерода на поверхности подложки.

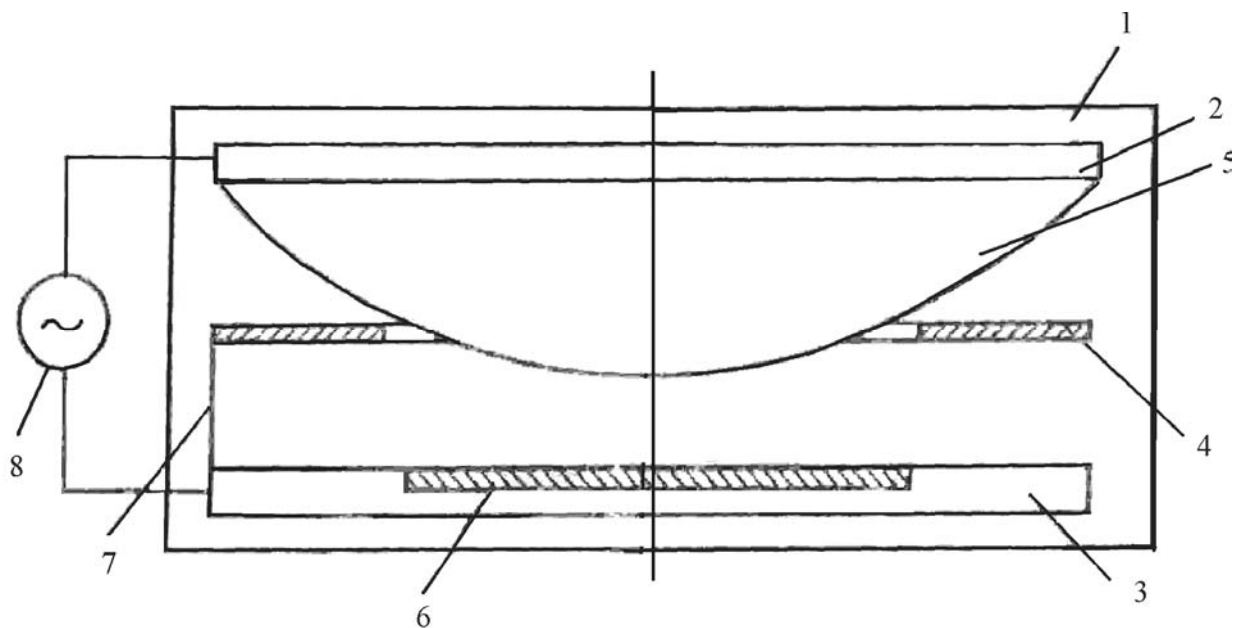
Известен способ плазмохимического травления кварца, использующий в качестве катализатора золото [37].

Перед травлением на кварцевой пластинке формируют структуру Cr-Au с поверхностным сопротивлением адгезионного подслоя хрома $\rho = 300 \text{ Ом}/\square$ и слоя золота толщиной 1 мкм. Методом фотолитографии в металлизации хром-золото формировали топологию. Травление проводили в смеси 90 % CF_4 + 10 % O_2 при общем давлении 133 Па и удельной мощности 10 Вт/см². Скорость травления 10 мкм/мин.

Известен реактор [38] показанный на рис. 1.2. использование кольца 4, гальванически связанного с ВЧ электродом 3 перемычкой 7 и сферической насадкой 5 на верхнем электроде 2 позволяет повысить равномерность травления подложки 6 за счёт увеличения равномерности плазменного столба.

В способе реактивного ионного травления монокристаллического кварца [39] увеличение скорости достигается благодаря использованию без углеродных фтор- и хлорсодержащих газов и аргона при их соотношении 1:1.

Реактор для плазменного травления



1 – камера; 2 – верхний электрод; 3 – нижний электрод; 4 – кольцо; 5 – сферическая насадка; 6 – пластина; 7 – переключатель.

Рис. 1.2

Процесс проводят при удельной мощности разряда 0,15-0,9 Вт/см² и рабочем давлении $8 \cdot 10^{-1}$ - 10 Па. Скорость травления составляет 60-70 нм в минуту.

Повышение скорости травления кварца в устройстве [40] достигается за счет использования устройства, содержащего в два электрода, один из которых является подложкодержателем, а через трубчатый электрод подается рабочий газ. Для обеспечения воспроизводимости процесса травления по заданному диаметру отверстия, которое необходимо протравить выбирают диаметр трубчатого электрода, а затем при постоянном расходе газа и давлении в камере экспериментально определяют межэлектродное расстояние, на котором передача размера внутреннего диаметра трубчатого электрода на подложку. Используемые газы- SF₄ и CHF₃. Для получения топологии на подложке следует установить нижний электрод на координатном столе.

В способе плазмохимического травления тонких пленок [41] используется ВЧ газовый разряд в скрещенных взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях. С целью увеличения равномерности травления используют воздействие по концам зоны обработки постоянного отрицательного напряжения в диапазоне 300-500 В. Травление пленок кварца происходит в плазме смеси состоящей из 90 % C₈F₁₆ и 10% O₂. Скорость травления 0,13 мкм в минуту.

В способе плазмохимического травления тонких пленок [42] возбуждение ВЧ газового разряда происходит путем воздействия на эту зону скрещенных взаимно перпендикулярных ВЧ-электрического и магнитного полей. Напряженность электрического поля E=30-100 В/см, магнитного поля H=100-500 Э. Дополнительно вводится электрическое поле с напряженностью E₂=25 - 125 В/см, сосредоточенное на верхнем торце зоны ВЧ разряда, и электрическое поле с напряженностью E₃=25-75 В/см, сосредоточенное в зоне управления плазмой. Скорость травления кварца при использовании данного способа 0,4 мкм в минуту.

Выводы по первой главе

Методы ВПТ обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными жидкостными методами травления:

1. Наиболее перспективные из ВПТ являются методы ПТ, РИПТ и РИЛТ, обеспечивающие высокие скорости травления, анизотропность при ПТ и селективность при РИПТ и РИЛТ.
2. Диодные реакторы целесообразно использовать для реализации процессов ПТ и РИЛТ. Магнитное поле увеличивает скорость травления и уменьшает напряжение автосмещения.
3. Для повышения воспроизводимости и производительности процессов травления реактор установки должен иметь шлюзовую загрузку.
4. Для обеспечения РИЛТ целесообразно использовать ионные источники с безнакальным катодом.
5. Для увеличения ресурса работы откачных средств нейтрализаторы непрореагирующих откачных газов и продуктов реакции.

Исходя из вышеизложенного, можно **сформулировать задачи**, которые должны быть решены при выполнении данного диссертационного исследования.

1. Разработать оборудование и технологию ионно-лучевого и ионно-плазменного травления и полировки кварца.
2. Разработать устройство утилизации хлорсодержащих газов, используемых в плазмохимических процессах.

ГЛАВА II

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦА

В главе представлена установка ионно-плазменного травления микро-структур со сканируемым ВЧ-магнетроном и описание ее модернизации. Для проведения процессов ионно-плазменного, ионно-лучевого травления и обработки кварца доработана установка УРМ 3.279.029. Приведены описание устройства для утилизации хлорсодержащих газов и методики замера скорости травления кварца и шероховатости его поверхности.

2.1. Установка для высокоскоростного травления кварца

При разработке установки к ней предъявлялись следующие требования:

1. Универсальность, т. е. возможность исследовать следующие процессы:
 - Плазменное травление в диапазоне давлений 10-133 Па.
 - Ионно-плазменное и реактивное ионно-плазменное травление в диапазоне давлений 0,5-5 Па.
 - ВЧ - магнетронное ионно-плазменное и реактивное ионно-плазменное травление в диапазоне давлений 0,1-5 Па.
2. Экологическая безопасность, т.е. утилизация или нейтрализация продуктов реакции и не прореагировавшего реактивного газа.

2.1.1. Базовая установка травления

Наиболее полно перечисленным требованиям отвечает установка реактивного ионно-плазменного травления со сканируемым ВЧ магнетроном [43]. Данная установка – установка периодического действия с поштучной обработкой пластин. Максимальный диаметр пластин с равномерностью травления $\pm 5\%$ составляет 100 мм.

В состав установки входят:

- агрегат вакуумный;
- ВЧ – генератор;

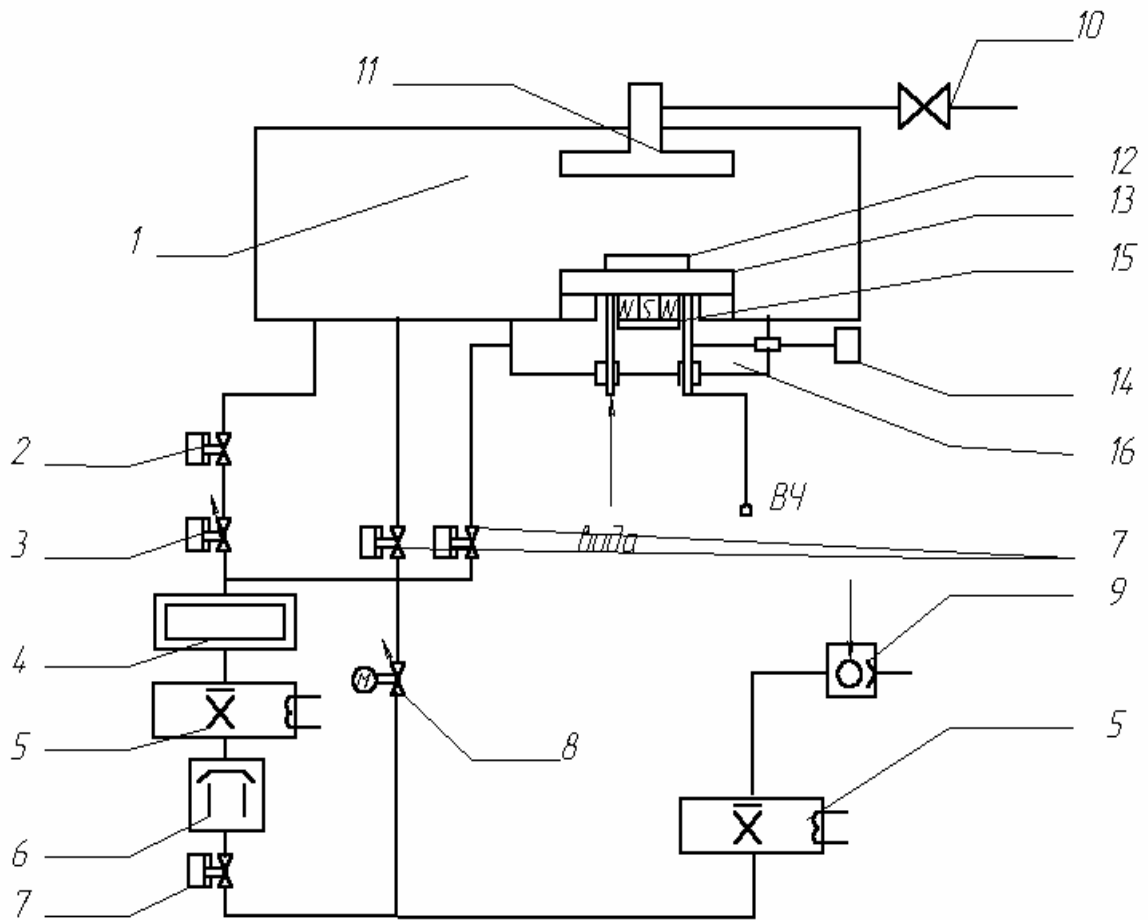
- согласующее устройство;
- устройство подготовки и подачи рабочих газов;
- стойка управления;

Агрегат вакуумный включает реакционную камеру травления, камеру магнетрона, регуляторы потока рабочего газа, азотную и водяную ловушки, клапана и вакуумную арматуру. Структурная схема агрегата приведена на рис. 2.1.

В реакционной камере (1) размещены водоохлаждаемый катод (13), на котором размещена подложка (12), анод (11), совмещенный с системой газонапуска и высоковакуумный затвор (2). Под катодом внизу рабочей камеры расположен вакуумно-плотный корпус камеры магнетрона (16), в котором размещен собственно магнетрон (15) и устройство его сканирования (14). Магнетрон прямоугольной формы собран на ферритбариевых магнитах и обеспечивает индукцию магнитного поля на поверхности катода 0,04 Тл. Привод устройства сканирования крепится с боку корпуса камеры магнетрона. Особенностью установки является введение высоковакуумной магистрали откачки камеры магнетрона через угловой вакуумный клапан проходным сечением $D_y = 63$ (7). Откачка введена для предотвращения деформации тонкого семимиллиметрового водоохлаждаемого катода диаметром 400 мм вследствие перепада давлений с разных сторон катода. Для предотвращения паразитного разряда в камере магнетрона в ней поддерживается вакуум $5 \cdot 10^{-3}$ Па.

Двухступенчатая система откачки на базе диффузионного насоса Н250/2500 (6) и форвакуумного насоса НВПР-16 (9) позволяет получить предельное остаточное давление в рабочей камере $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па без использования азотной ловушки (4) и 10^{-4} Па с использованием жидкого азота. Конструкция ловушки позволяет при отсутствии жидкого азота использовать ее как проточную водяную ловушку, включив ее в контур охлаждения паромасляного насоса. Водяная форвакуумная ловушка (5) снижает загрязнение рабочей

Структурная схема 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 форвакуумной магистрали, 9 - форвакуумный насос, 10 - узел подготовки газов, 11 - анод, 12 - подложка, 13 - катод, 14 - привод сканирования магнетрона, 15 - магнетрон, 16 - камера магнетрона.

Рис.2.1.

камеры парами вакуумного масла при форвакуумной откачке и при использовании установки в режиме плазменного травления.

Узел подготовки газов (10) имеет два канала подачи от баллонов к камере травления. Каждый канал имеет расходомер и натекагель.

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.

Равномерность травления при диаметре подложки 100 мм обеспечивается сканированием магнетрона, собранного из ферритобариевых магнитов и системой газонапуска, выполненной в единой конструкции с анодом. Конструкция анода позволяет изменять расстояние катод-анод от 10 до 70 мм. Оптимизируя данное расстояние и расположение отверстий газонапуска в аноде можно управлять равномерностью травления.

Для измерения форвакуумного давления служат датчики ПМТ-6-3, расположенные в магистралях паромасляного насоса и в рабочей камере. Для ремонтных и профилактических работ предусмотрена возможность установки датчика ПМТ-6-3 в магистраль форвакуумного насоса. Высокий вакуум измеряется датчиками ПММ-32-1 расположенными в рабочей камере и камере магнетрона.

Загрузка – выгрузка пластин происходит через крышку камеры, которая имеет устройство ее подъема.

Рабочая камера, камера магнетрона, катод, клапана, затвор и вакуумная арматура выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Электрическая изоляция катода от рабочей камеры производится фторопластом Ф-4.

Использование магнетронного разряда позволяет на два порядка повысить эффективность ионизации рабочего газа, что приводит к увеличению скорости травления. Снижение минимального рабочего давления с 1 Па при использовании ВЧ - разряда до 0,1 Па при ВЧ - магнетронном разряде увеличивает анизотропность травления за счет значительно меньшего рассеивания ионов при столкновении с атомами рабочего газа. Низкое автоматическое смещение (около 100 В), характерное для магнетронного разряда, снижает вероятность радиационных повреждений пластин при ионной бомбардировке.

В стойке управления установкой расположены:

- блок управления агрегатом вакуумным;
- блок управления согласующим устройством;
- два вакуумметра 13ВТ-003;
- два вакуумметра ВМБ-8;
- блоки управления РРГ-3;

Блок управления вакуумным агрегатом обеспечивает его работу в ручном и автоматическом режимах. Мнемосхема, расположенная на передней панели блока, информирует о его работе.

Блок управления согласующим устройством регулирует переменную емкость и индуктивность, обеспечивая согласование генератора с нагрузкой.

Вакуумметры 13ВТ-003 и ВМБ-8 обеспечивают измерение вакуума в рабочей камере, камере магнетрона и паромасляном насосе.

Блоки управления РРГ-3 обеспечивают регулировку расхода газа в диапазоне 0-100 л/с.

2.1.2. Модернизация установки травления

Для выполнения требований, изложенных в п. 2.1, установка, описанная выше была модернизирована.

Была доработана крышка вакуумной камеры. Доработанная крышка позволяет, в зависимости от решаемых задач, устанавливать:

- а) аноды различной конструкции.
- б) систему оптического контроля.

Возможность устанавливать аноды различной конструкции позволяет оптимизировать систему газонапуска, обеспечивать локальное увеличение скорости травления либо задать требуемую равномерность травления.

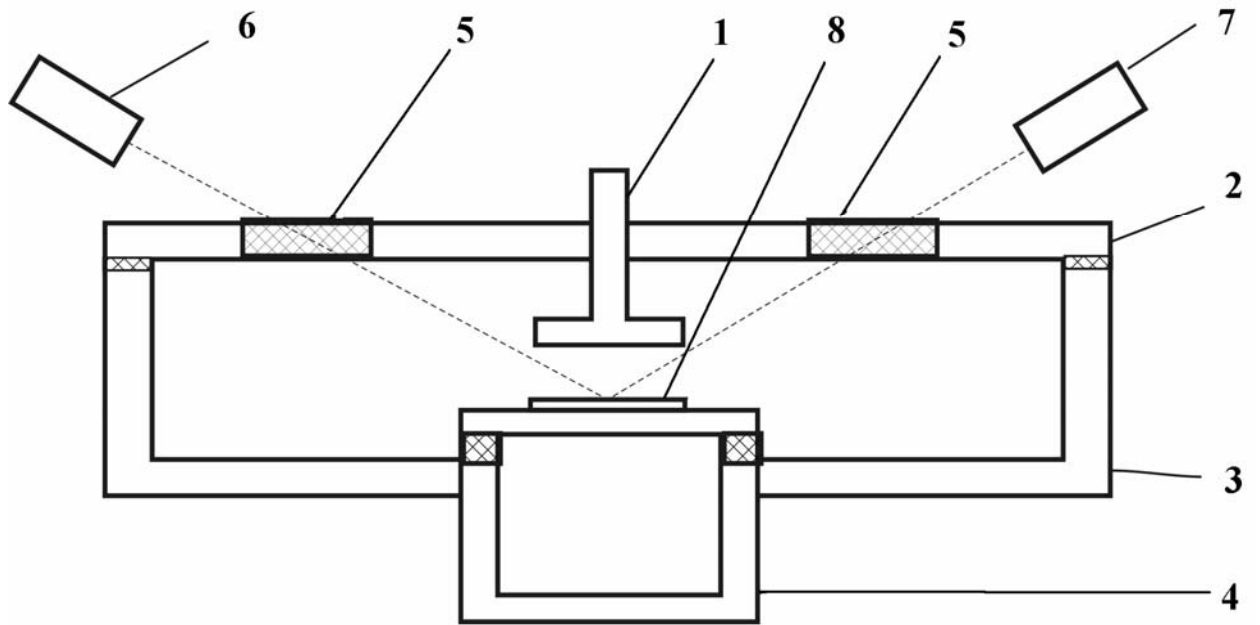
Система оптического контроля окончания процесса травления установлена на рабочей камере (3) рядом с камерой магнетрона (4). В крышке камеры (2) размещены анод (1) и два оптических окна (5). Через первое к подложке (8) направляется луч лазера (6), отражается от нее и выходит через второе окно. Над вторым окном расположен регистрирующий фотоприемник (7) сигнал с которого поступает на самописец.

Схема системы контроля представлена на рис. 2.2.

Была проведена доработка агрегата вакуумного, новая схема которого изображена на рис. 2.3.

Дополнительный двухроторный насос АВР-50 был установлен между паромасляным и форвакуумным насосами. 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 - 133Па.

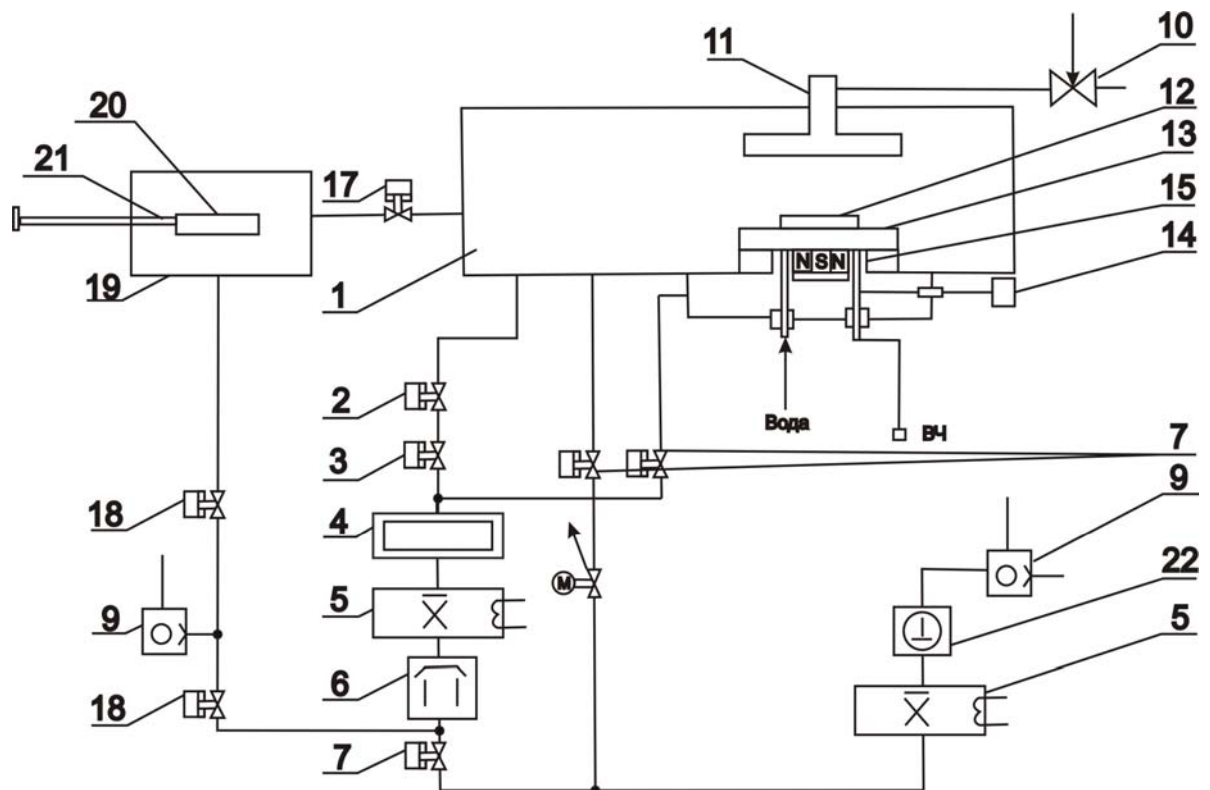
Система оптического контроля.



1 - анод, 2 - крышка камеры, 3 - камера, 4 - камера магнетрона, 5 - кварцевые окна, 6 - лазер, 7 - фотоприемник, 8 - подложка.

Рис. 2.2.

Структурная схема модернизированного 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.

Рис 2.3.

Для обеспечения шлюзовой загрузки пластин в рабочую камеру был подобран и приобретен затвор, а также спроектирована и изготовлена шлюзовая камера. Загрузка осуществлялась ручным манипулятором. Откачка шлюзовой камеры до давления 1 Па проводилась форвакуумным насосом 2НВР-5ДМ через пневматический клапан сечением $D_y = 50$ мм .

Для более полного использования форвакуумного насоса была установлена дополнительная магистраль с пневматическим клапаном сечением $D_y = 50$ мм между насосом 2НВР-5ДМ и паромасляным насосом. Это позволяет длительное время эксплуатировать установку, в режиме форвакуумной откачки рабочей камеры химостойким насосом и агрегатом АВР-50, не переключая их на подкачку паромасляного насоса.

2.2. Установка для проведения процессов ионно-плазменного и ионно-лучевого травления и обработки кварца.

Для проведения работ была модернизирована вакуумная камера установки УРМ 3.279.029 [44].

Вакуумная камера модернизированной установки изображена на рис. 2.4.

Внутри вакуумной камеры (1) горизонтально расположены пять подложкодержателей (2), которые с помощью двигателя и планетарного механизма (карусели) (5) могут подводиться к источнику ионов и магнетрону. На этих подложкодержателях, имеющих приспособление для прижима четырех образцов, размещались подготовленные образцы на расстоянии 60 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 смеси с кислородом, и до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па, перед травлением в чистых газах.

Источники должны иметь нейтрализацию поверхностного заряда. Наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяют источники ионов с

холодным катодом, формирующие пучки ионов в скрещенных электрическом (E) и магнитном (B) полях.

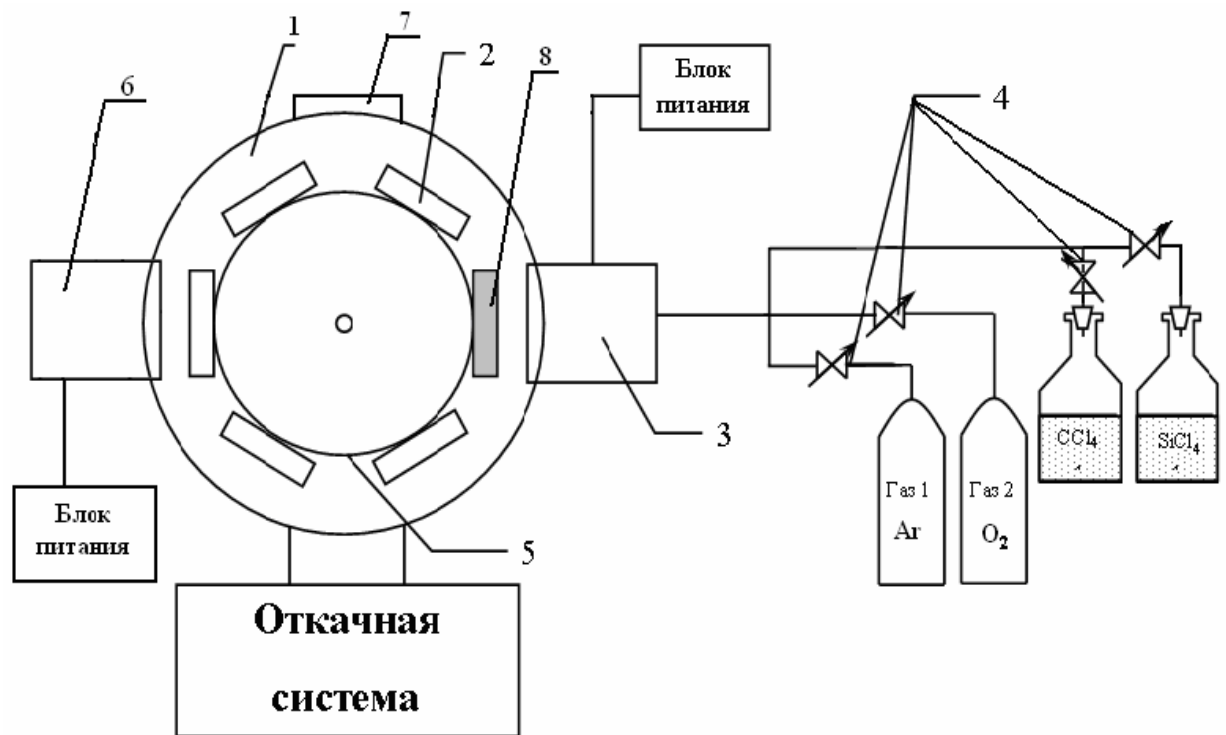
Для проведения процесса травления был выбран пучковый источник ионов «Радикал М-100» [45], показанный на рис. 2.5. В источнике удалось реализовать одинаковые электрофизические и геометрические параметры каждой ячейке, что позволяет создать источники ионов, формирующие пучки практически любых конфигураций.

В ячейках данного источника реализован замкнутый дрейф электронов в скрещенных (E) и (B) полях в промежутке катод-анод, размером порядка ларморовского радиуса электронов.

Ионизация рабочего газа обеспечивается высокоэнергетическими электронами, ускоряемыми в специально созданной потенциальной яме в локализованных скрещенных (E) и (B) полях, обеспечивающих максимальное изменение энергии электронов в промежутке катод-анод. Удержание электронов в промежутке анод-катод осуществляется скрещенными (E) и (B) полями, потенциальной ямой и линзообразным магнитным полем пробочной конфигурации. Каждая ячейка ионного источника работает самостоятельно, формируя свой пучок ионов.

Взаимно перекрещиваясь, пучки образуют поток ионов с хорошей равномерностью. Так, для используемого источника «Радикал М-100» неравномерность травления составляет $\pm 5\%$ в зоне обработки диаметром 90 мм. При напряжении разряда 1 - 3 кВ, средняя энергия ионов составляет 300 - 500 эВ, что обеспечивает обработку большинства материалов без радиационных повреждений и аморфизации поверхности. Электрическое поле обеспечивается подачей на анод высокого напряжения, магнитное поле – катушкой соленоида.

Схема экспериментальной установки



- 1 - рабочая камера, 2 - подложкодержатель, 3 - ионный источник,
4 - натекатели, 5 - карусель, 6 - магнетрон, 7 - смотровое окно,
8 - технологический подложкодержатель

Рис 2.4.

Ионный источник «Радикал М-100»



1 - ионный источник, 2 - натекатель

Рис 2.5.

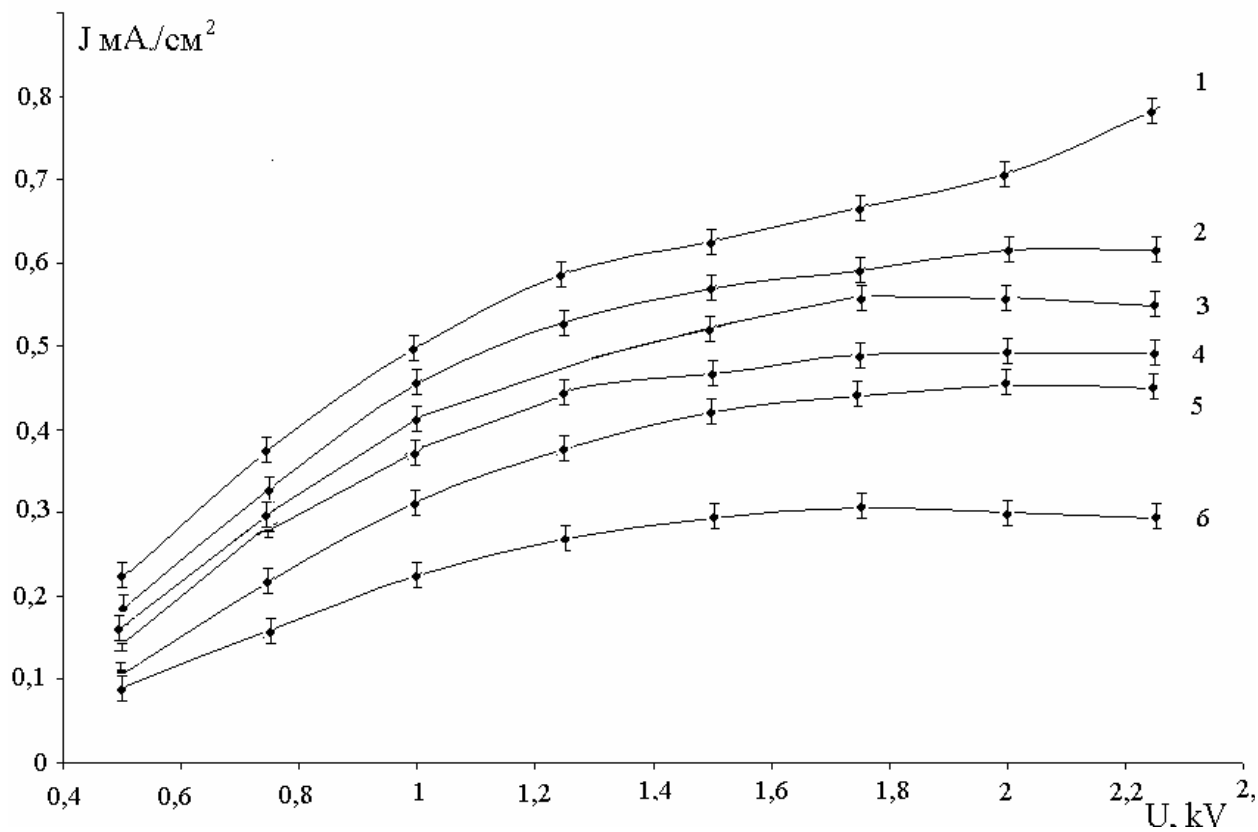
Питание источника ионов «Радикал М-100» осуществлялось блоком питания, обеспечивающим плавную регулировку и замер ускоряющего напряжения от 0,1 до 3 кВ, замер тока разряда от 0 до 300 мА, защиту высоковольтного источника, срабатывающую при токе 320 мА, и установку тока магнита в диапазоне 0 - 3 А.

Перед началом работ по травлению образцов с помощью тестовой металлической пластины известной площади и электрически соединенной с амперметром второй контакт, которой был соединен с заземлением установки, определялась плотность тока, соответствующая рабочим режимам источника ионов. Данная плотность тока не является в чистом виде плотностью ионного тока, т.к. в этот ток вносят вклад электроны, компенсирующие заряд на поверхности травления, однако, полученные результаты по плотности тока пропорциональны ионному току.

На рис. 2.6 - 2.9 приведены зависимости тока разряда источника и плотности тока от ускоряющих напряжений и давления в рабочей камере в различных газовых средах при откачке высоковакуумным насосом производительностью 2500 л/с. Зависимости сняты при токе магнита 3 А. Учитывая, что ток разряда и плотность ионного тока незначительно зависят от тока магнита в диапазоне 2 – 3 А, было выбрано одно значение тока магнита в 3 А, при котором проводились все циклы травления.

Так как при давлении в рабочей камере ниже $4 \cdot 10^{-2}$ Па ток разряда и плотность тока на обрабатываемой поверхности малы, что приводит к низкой скорости травления, а при давлении более $2 \cdot 10^{-1}$ Па ионный источник вследствие роста потока газа через него переходит в сильноточный режим, на который не рассчитан блок питания, травление проводили при давлении от $4 \cdot 10^{-2}$ Па до $2 \cdot 10^{-1}$ Па. Ускоряющее напряжение при этом изменяли от 0,25 до 2,25 кВ.

Зависимость плотности тока от ускоряющего напряжения при различных давлениях в Ar



Кривые плотности тока при давлениях :

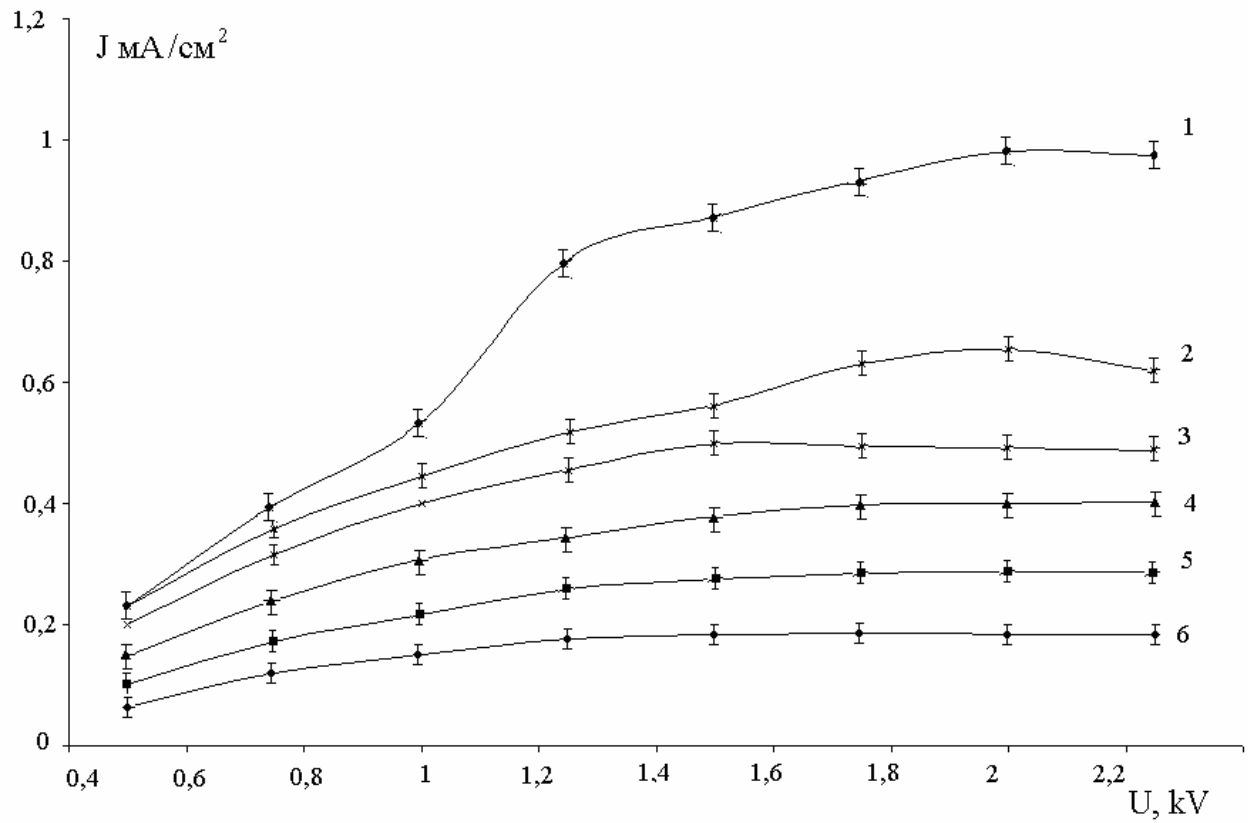
1 - $1,6 \times 10^{-1}$ Па, 2 - $1,4 \times 10^{-1}$ Па,

3 - $1,21 \times 10^{-1}$ Па, 4 - 1×10^{-1} Па,

5 - $0,8 \times 10^{-1}$ Па, 6 - $0,6 \times 10^{-1}$ Па

Рис 2.6.

Зависимость тока разряда и плотности тока от ускоряющего напряжения при различных давлениях в SiCl_4 .



Кривые плотности тока при давлениях:

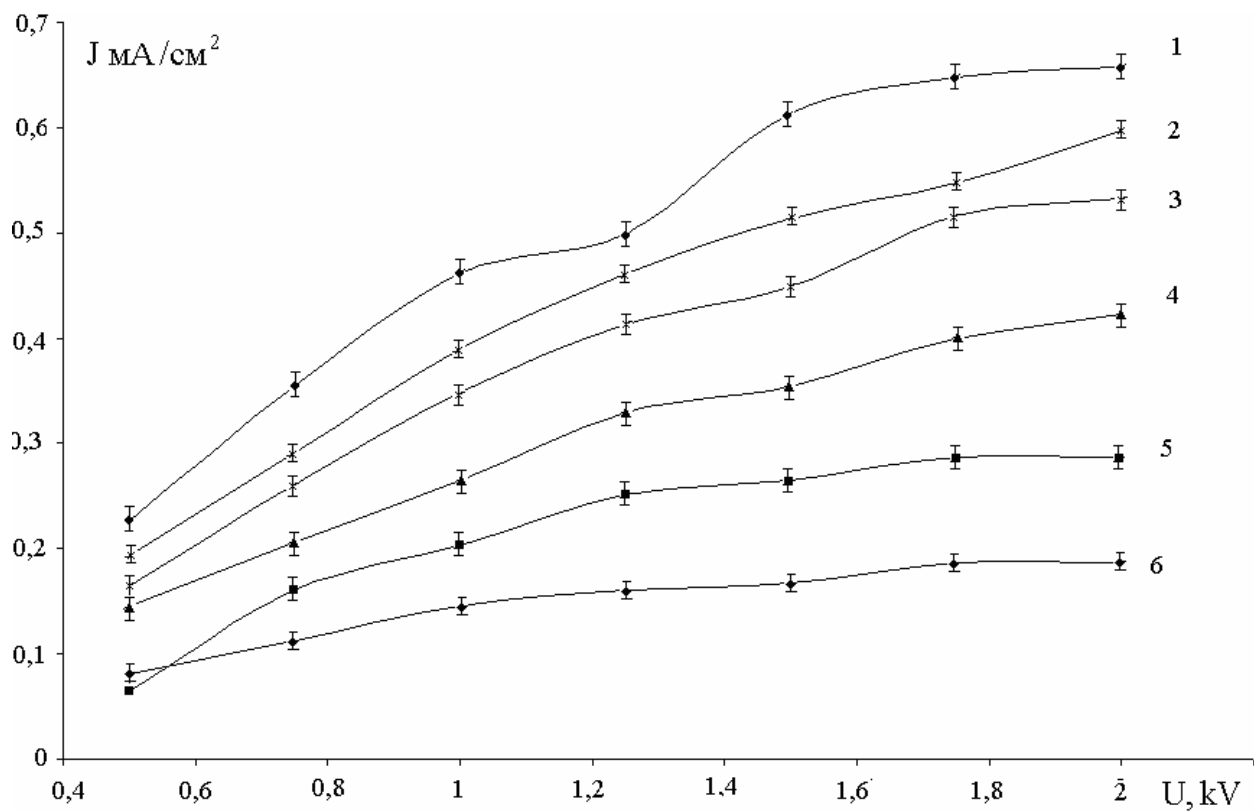
1 - $1,6 \times 10^{-1}$ Па, 2 - $1,4 \times 10^{-1}$ Па,

3 - $1,21 \times 10^{-1}$ Па, 4 - 1×10^{-1} Па,

5 - $0,8 \times 10^{-1}$ Па, 6 - $0,6 \times 10^{-1}$ Па

Рис 2.7.

Зависимость тока разряда и плотности тока от ускоряющего напряжения при различных давлениях в CCl_4 .



Кривые плотности тока при давлениях:

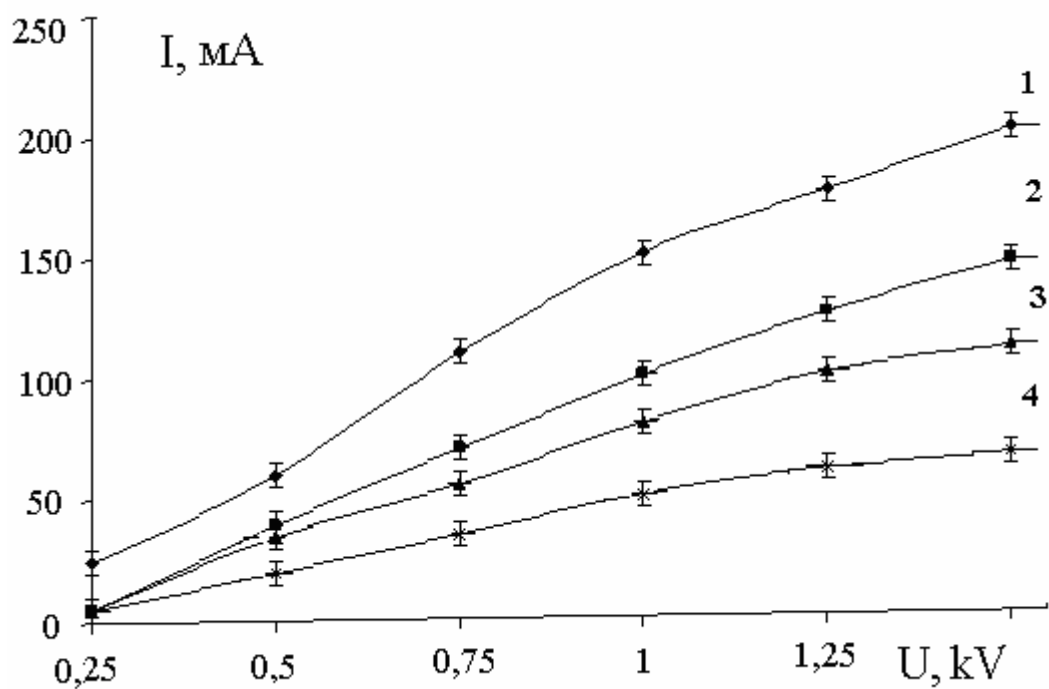
1 - $1,6 \times 10^{-1}$ Па, 2 - $1,4 \times 10^{-1}$ Па,

3 - $1,21 \times 10^{-1}$ Па, 4 - 1×10^{-1} Па,

5 - $0,8 \times 10^{-1}$ Па, 6 - $0,6 \times 10^{-1}$ Па

Рис 2.8.

Зависимость тока разряда и плотности тока от ускоряющего напряжения при различных давлениях CF_4



Кривые плотности тока при давлениях:

1 - 1×10^{-1} Па; 2 - 8×10^{-2} Па;

3 - 6×10^{-2} Па; 4 - 4×10^{-2} Па

Рис 2.9.

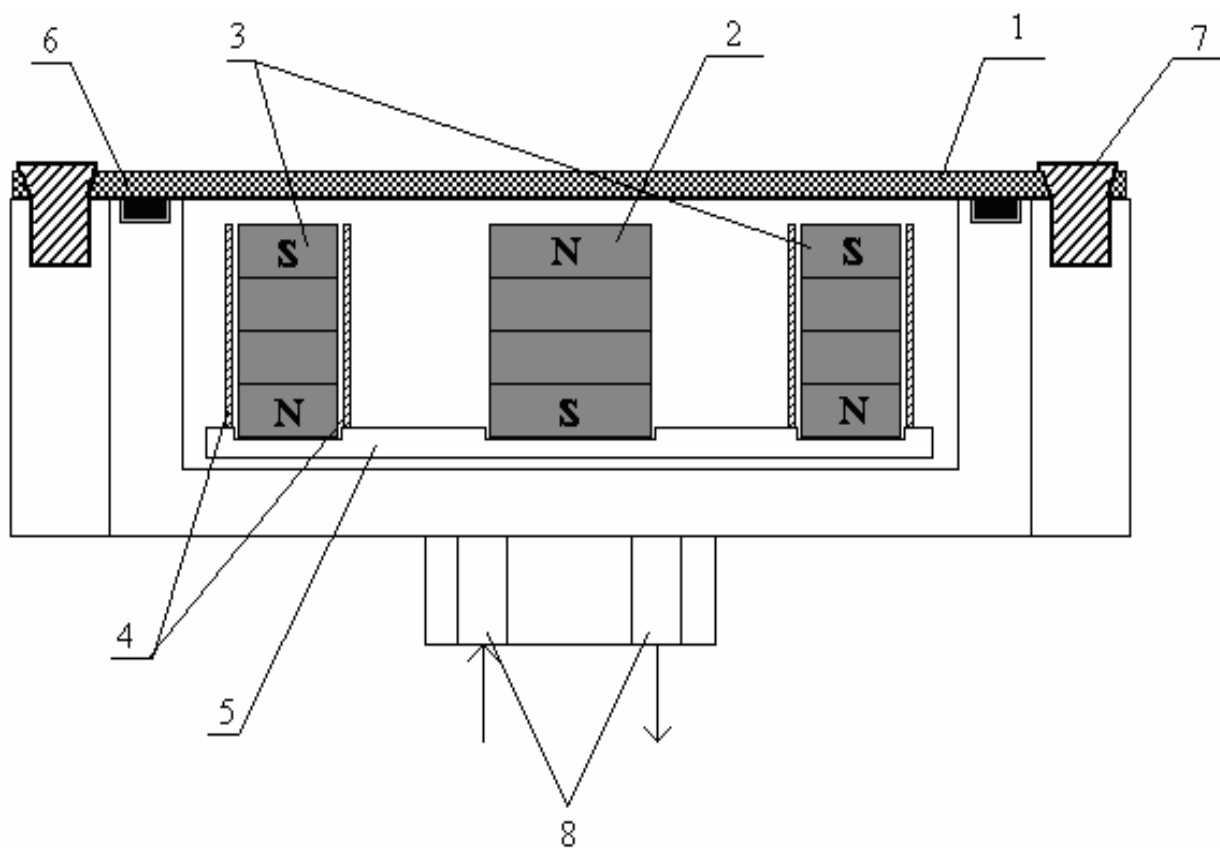
Как видно из данных, приведенных на рис.2.6 - 2.9, плотность тока источника пропорциональна рабочему давлению, однако, из-за низкой точности установки рабочего давления (т.к. допустимая относительная погрешность измерения давления ионизационной частью вакуумметра ВИТ - 2 составляет $\pm 30\%$, а при этом ток источника выставляется с основной относительной погрешностью измерения тока в нормальных условиях в используемом диапазоне составляет 5-10 %) в разных циклах травления одному и тому же давлению может соответствовать различный ток разряда. В свою очередь, значение тока разряда при фиксированных значениях ускоряющего напряжения тока магнита может служить индикатором величины рабочего давления, более точным, чем показания вакуумметра ВИТ - 2. Поэтому предварительное давление устанавливалось по прибору ВИТ - 2, а затем корректировалось в соответствии с таблицами 2.1 - 2.3, датчик ПМИ - 2 выключался. Это позволило повысить воспроизводимость результатов и увеличить ресурс датчика, который при давлении 10^{-1} Па составляет 7,5 часов.

В процессе травления фиксировались ток магнита, ускоряющее напряжение, рабочее давление и, соответствующий данным режимам, ток разряда. Предельное и рабочее давление в камере измерялось вакуумметром ВИТ-2 с датчиком ПМИ-2, время травления измерялось секундомером, остальные характеристики задавались и контролировались блоком питания источника ионов.

Для получения образцов с маскирующими покрытиями, был разработан и изготовлен магнетрон. Магнетрон был установлен в одно из двух смотровых окон камеры. Вид магнетрона схематично представлен на рис. 2.10.

Вместо магнетрона возможна установка ВЧ-электрода рис. 2.11. Данный ВЧ электрод использовался при ионноплазменной обработке кварца.

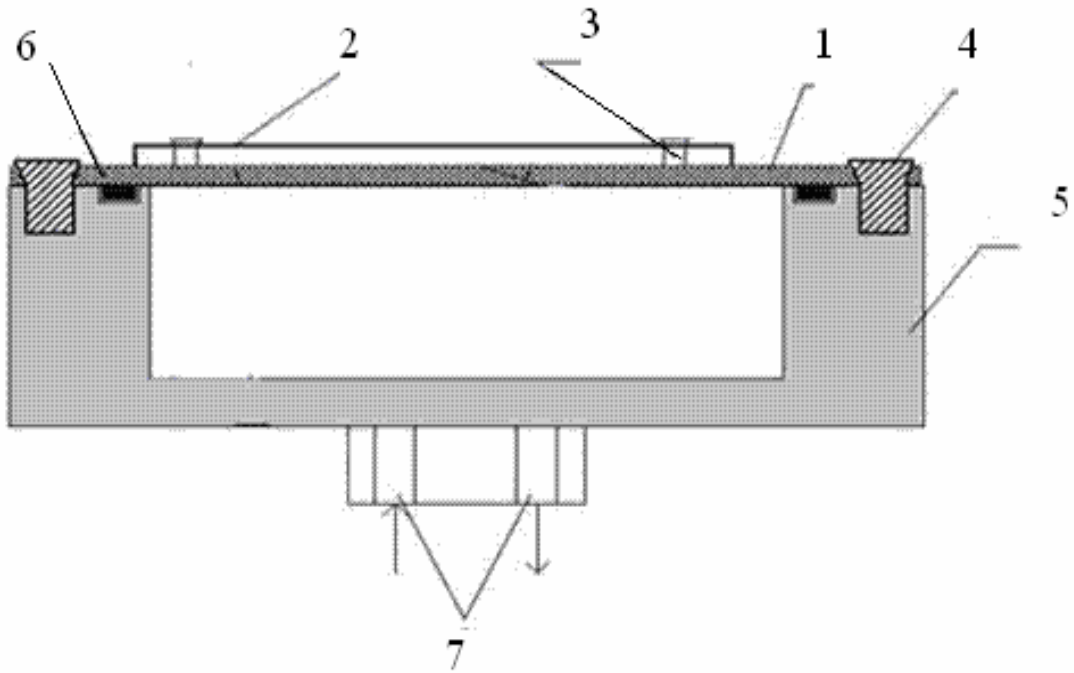
Магнетрон



1 - мишень, 2 - система магнитов из самария-кобальта, 3 - система магнитов из ниодия-железо-бор, 4 - фиксирующие кольца, 5 - магнитопровод, 6 - резиновая прокладка, 7 - прижимные болты, 8 - входное и выходное отверстия для охлаждения

Рис. 2.10.

ВЧ-электрод



1 - мишень, 2 - подложкодержатель, 3 - прижимные болты подложкодержателя, 4 - прижимные болты мишени, 5 - корпус, 6 – резиновое уплотнение, 7 - вход и выход воды.

Рис. 2.11.

ГЛАВА III

Приборы и методы контроля газовой среды и имения ее состава, методика измерения скорости травления кварца и измерения шероховатости его поверхности при ВПТ.

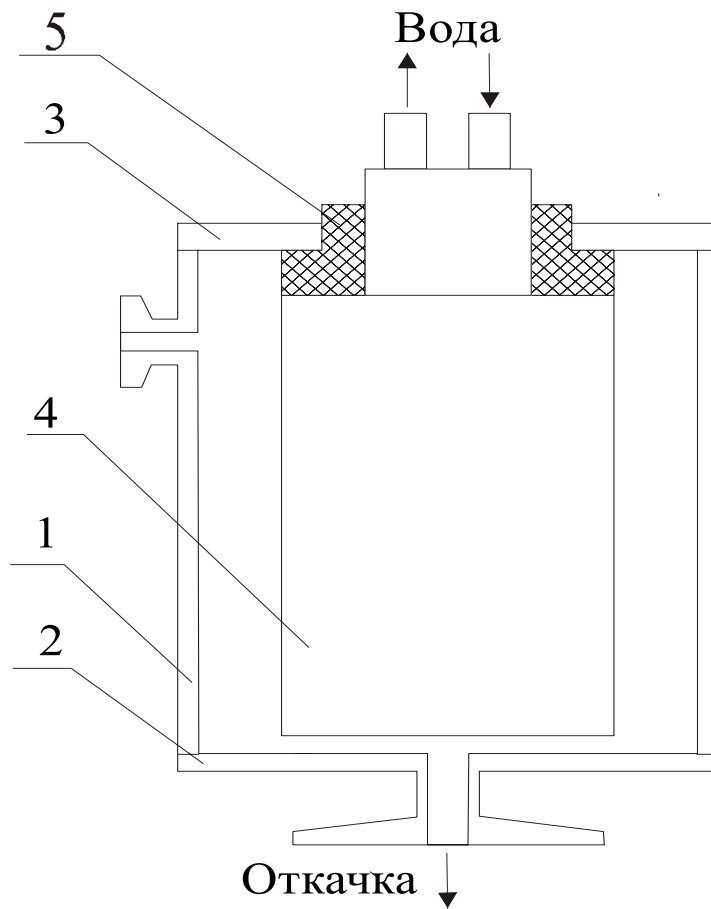
3.1. Устройство для утилизации хлорсодержащих газов

Наибольшую опасность при травлении представляют хлорсодержащие газы, поэтому было разработано устройство для их утилизации на базе магнетрона, предназначенного для очистки аргона магнетронным разрядом [46, 47].

Устройство для очистки аргона магнетронным разрядом показанное на рис. 3.1. представляет собой цилиндрическую водоохлаждаемую камеру 1 диаметром 160 мм и высотой 200 мм. Входной фланец (2) имеет стандартное быстросъемное соединение на $D_y 50$. На фланце (3) устанавливается магнитный узел (4) через фторопластовый изолятор (5). Напуск газов осуществляется через боковой фланец $D_y 10$. Магнитный узел (рис. 3.2), состоит из корпуса (1), титановой мишени (2), кольцевых ферритобариевых магнитов (3), полюсных наконечников (4).

Требуемую конфигурацию магнитного поля обеспечивают полюсные наконечники. Охлаждается магнитный узел проточной водой. Данный магнетрон обеспечивает на поверхности мишени индукцию магнитного поля 0,036 - 0,041 Тл. Диапазон рабочих давлений, обеспечиваемых данным узлом, 0,5 - 10 Па. Для проверки работоспособности устройства в него напускалась аргоно-кислородная смесь с концентрацией кислорода 20% до давления 0,5 Па. При подаче на магнетрон от блока питания тока 3 А величина пиков кислорода массой 16 и 32 у.е. уменьшалась в 40 раз и становилась ниже фоновой величины данных масс контрольного спектра, создаваемого откачной системой масс-спектрометра.

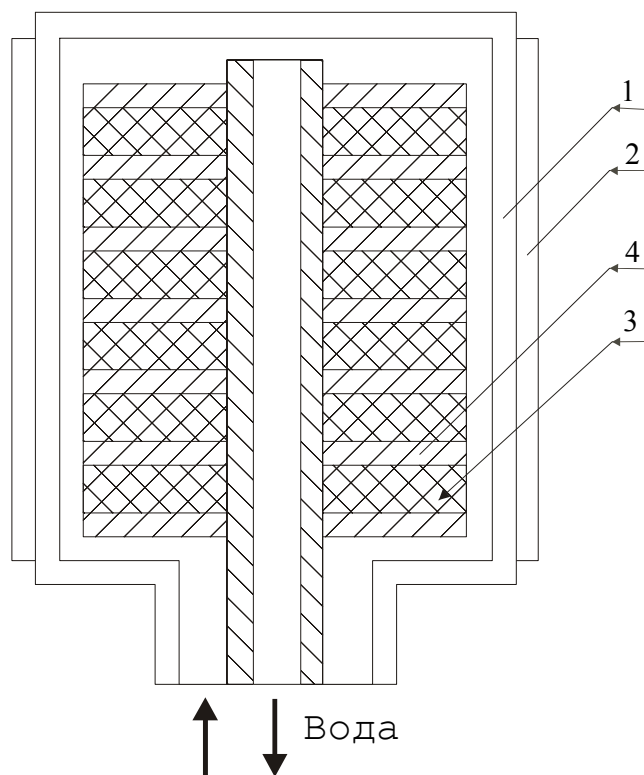
Устройство утилизации



1 - камера, 2 - входной фланец, 3 - фланец, 4 - магнитный узел, 5 - изолятор

Рис.3.1

Магнитный узел



1 - корпус, 2 - мишень, 3 - магниты, 4 - полюсные наконечники

Рис 3.2

Контроль масс осуществлялся масспектрометром МХ 7304 [48].

Технические данные масспектрометра МХ 7304

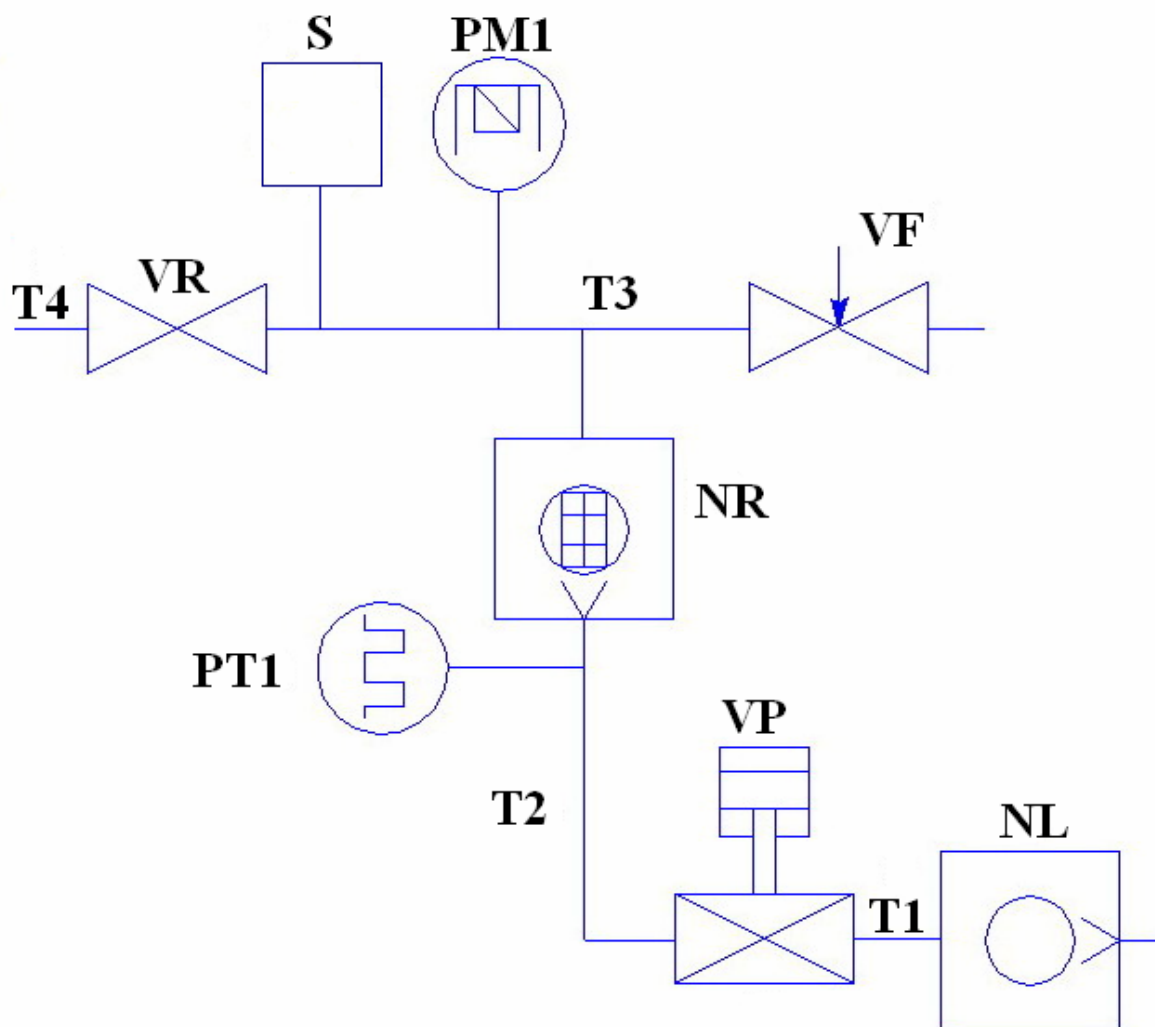
Разрешающая способность не менее	2М
Порог чувствительности по аргону 10^{-9} Па не более	2
Диапазон массовых, не менее	2-200
Максимальное рабочее давление	10^{-3} Па

Учитывая, что максимальное рабочее давление масспектрометра МХ 7304 составляет 10^{-3} Па а диапазон рабочих давлений устройства очистки аргона 0,5 – 10 Па был разработан вакуумный пост в который напускался газ из исследуемого устройства.

Вакуумный пост (рис3.3) имеет две ступени откачки и предназначен для получения безмаслянного вакуума 10^{-5} Па. Первая ступень откачки состоит из форвакуумного насоса 5НВР-ДМ, вторая ступень откачки - из турбомолекулярного насоса ТМН-500. Между первой и второй ступенями откачки расположены пневматический вакуумный клапан и форвакуумный датчик ПМТ-6-3 регистрирующий давление на входе турбомолекулярного насоса. Высокий вакуум на выходе турбомолекулярного насоса турбомолекулярного насоса измеряется магниторазрядным датчиком ПММ-32-1. На турбомолекулярном насосе расположены следующие фланцы : фланец для подсоединения магниторазрядного датчика ПММ-32-1, фланец для подсоединения анализатора масс-спектрометра. Форвакуумный насос позволяет получить предварительный вакуум 1 Па. После чего включается турбомолекулярный насос который создает безмаслянный вакуум в камере 10^{-5} Па.

На постоянном токе магнетрон при подаче четыреххлористого углерода CCl_4 работал неустойчиво из-за частых пробоев. Поэтому было использовано питание магнетрона от ВЧ источника. Подача ВЧ мощности осуществлялась с ВЧ генератора УВ-1 с регулируемой выходной мощностью от 0.1 до 1 кВт,

Схема вакуумного поста



T1,T2,T3,T4 – трубопроводы, магистрали; VF – натекатель; VR – клапан; S – масс-спектрометр MX -7304; PM1 – преобразователь манометрический магнитный ПММ-32-1; NR – турбомолекулярный насос ТМН-500; PT1 – преобразователь манометрический тепловой ПМТ-6-3; VP – клапан пневматический; NL – форвакуумный насос 5НВР-ДМ.

Рис 3.3

частотой 13.56 МГц. Согласование генератора проводилось П - образным LC - контуром с отдельной регулировкой индуктивности и емкости. Спектры снимались без подачи ВЧ-мощности, при мощности 500 Вт и 900 Вт. При использовании мишени из стали 12Х18Н10Т и титана происходило увеличение регистрируемых масс атомарного и молекулярного хлора и уменьшение радикалов CCl^* , CCl_2 и CCl_3 .

Изменение величины регистрируемых масс при подаче ВЧ мощности приведено в табл. 3.1.

Таким образом, данную конструкцию магнетрона целесообразно использовать для генерации атомарного и молекулярного хлора из CCl_4 .

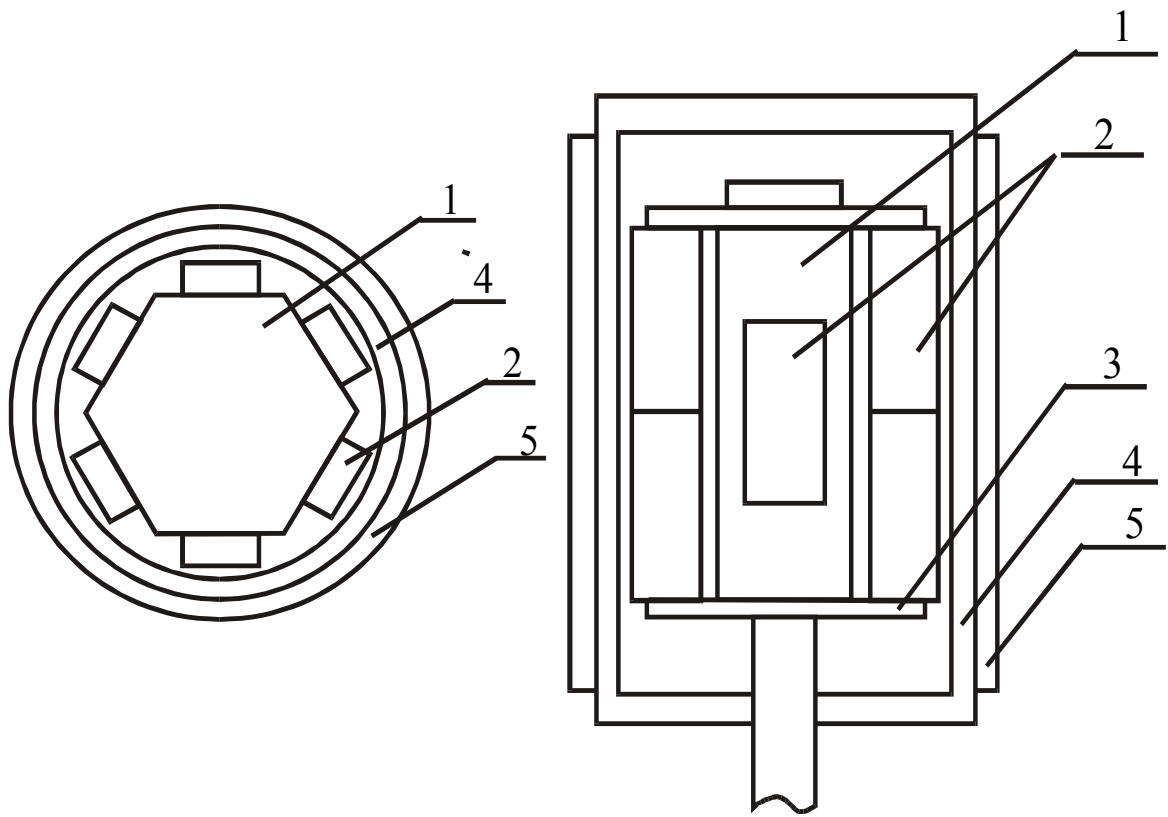
Для более эффективной утилизации атомарного и молекулярного хлора был спроектирован и изготовлен новый магнитный узел (рис.3.4).

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 (ниодим-железо-бор) размерами 12·8·40 (12мм - высота, 8мм - ширина, 40мм - длина).

На остальных гранях расположены, симметрично относительно середины, 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.

Диапазон рабочих давлений, обеспечиваемых данным узлом, 0,1-10 Па. Исследовались следующие материалы мишеней: медь толщиной 1 мм, молибден - 0,5 мм, титан – 2 мм, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т - 2 мм, алюминий – 2 мм.

Магнитный узел



1 - магнитопровод, 2 - магниты, 3 - магнитопровод, 4 - корпус, 5 - мишень

Рис.3.4.

Таблица 3.1

Изменение величины регистрируемых масс при подаче ВЧ мощности

Регистрируемые массы	Радикалы	Мощность разряда, кВт	Относительная величина пиков	
			Титан	Сталь
35	Cl	0	12	12
		0.5	24	18
		0.9	30	27
47	CCl	0	19	19
		0.5	5	1
		0.9	3	4
70	Cl ₂	0	0	0
		0.5	57	48
		0.9	65	59
82	CCl ₂	0	12	12
		0.5	0.8	0.9
		0.9	0.5	0.6
118	CCl ₃	0	19	19
		0.5	2	2
		0.9	1	1

Эффективность утилизации при использовании различных материалов мишени приведена в таблице 3.2.

Эффективность утилизации рассчитывалась по формуле

$$K = A_0 / A_{\text{вч}} \cdot 100 \%,$$

где A_0 – интенсивность регистрируемой массы без подачи ВЧ мощности, $A_{\text{вч}}$ – интенсивность регистрируемой массы при работе магнетрона.

Эффективность утилизации

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

Как видно из табл.3.2, эффективность утилизации зависит от уровня ВЧ-мощности и материала мишени.

Наиболее эффективно (95 - 98 %) утилизации происходит при использовании мишени из молибдена. При этом, учитывая что рабочее давление утилизатора, основной узел которого ВЧ-магнетрон, составляет 0,2 - 10 Па, его возможно располагать между реактором и высоковакуумным насосом. Это обеспечит не только утилизацию, но и защиту откаченных средств.

При использовании мишени из ниобия предлагаемое устройство может работать как генератор хлора. При мощности 500 Вт эффективность утилизации хлора составляет 20 %, при эффективности утилизации остальных радикалов: CCl - 90 %, CCl₂ - 95 %, CCl₃ - 96 %, при этом устройство рекомендуется располагать на реакторе рабочей камеры и напуск газа производить через устройство при включенном магнетроне.

3.2 Методы контроля с результатов травления и обработки кварца.

3.2.1 Контроль скорости травления.

Интерференционные методы широко применяются для исследования поверхностей тонких пленок. Одним из широко распространенных методов является микроинтерферометр МИИ-4 [49]. Он предназначается для визуальной оценки, измерения и фотографирования высоты неровностей тонкообработанных поверхностей.

Технические данные микроинтерферометра:

- а) пределы измерения высоты неровности, от 0,1 до 0,8 мкм.
- б) увеличение при визуальном наблюдении 534, при фотографировании 290,
- в) поле зрения: при визуальном наблюдении 0,32·0,37 мм
при фотографировании 0,08·0,12 мм,
- г) объектив: фокусное расстояние, 6,16 мм,
апертура 0,65 мм, увеличение с дополнительной линзой 33,4 мм.

Принцип действия микроинтерферометра [50] основан на явлении интерференции света. На практике для получения двух систем волн, способных интерферировать, пользуются разделением пучка лучей, исходящих из одной точки источника света, на два пучка.

В микроинтерферометре МИИ-4 в качестве разделяющей системы используется наклонная плоскопараллельная пластинка, имеющая полупрозрачное светоделительное покрытие. Половину падающего на нее света пластинка отражает, половину пропускает, вследствие чего образуются две системы волн, способных интерферировать. В результате интерференции двух систем волн в фокальной плоскости окуляра наблюдаются интерференционные полосы. Если на исследуемой поверхности имеется бугор или впадина, то в этом случае меняется разность хода, и, следовательно, полосы смещаются. Так, например, высота неровности на поверхности 0,275 мкм вызовет искривление полосы в поле зрения микроинтерферометра на величину всего интервала между полосами (на одну полосу). При измерении величину искривления выражают в долях интервала между интерференционными поло-

сами. Зная длину волны света, можно получить высоту неровности в микрометрах.

3.2.2. Методика замера скорости травления кварца

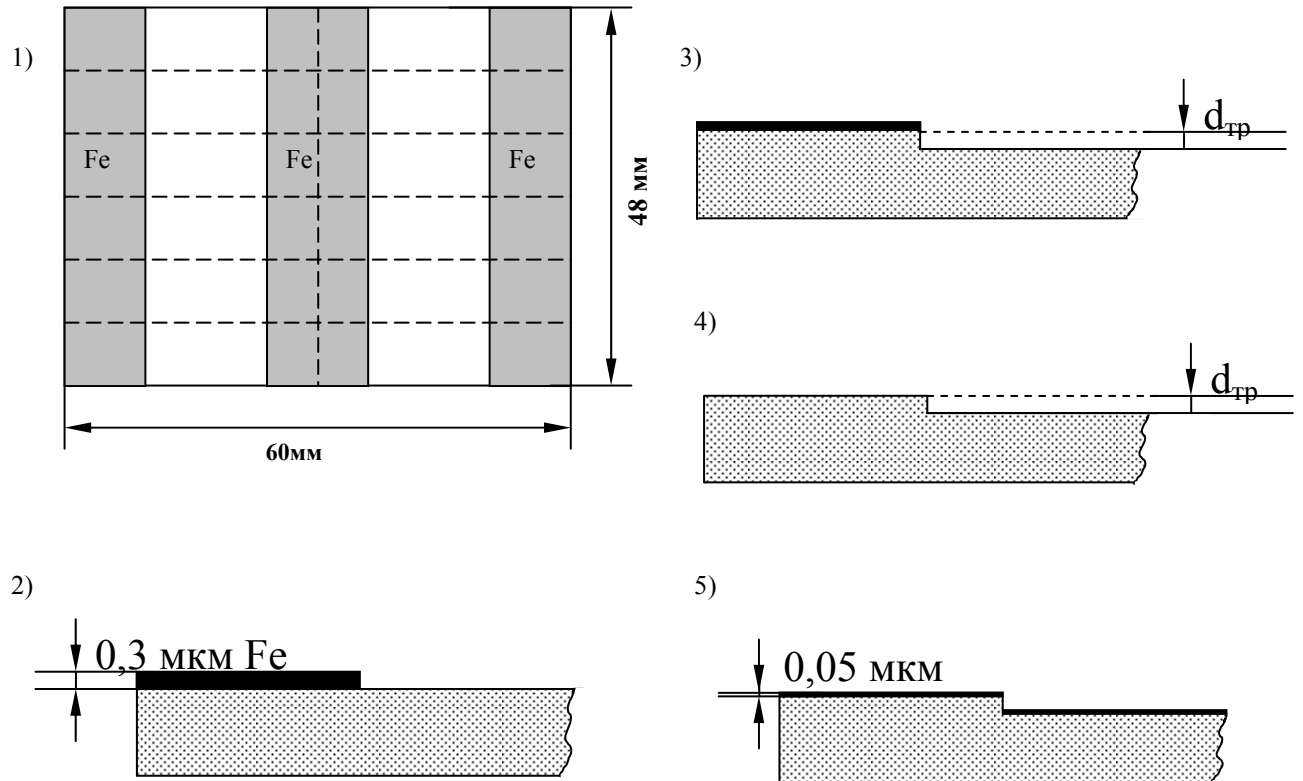
Технологические этапы подготовки образцов приведены на рис 3.5.

Для проведения травления брались пластины плавленого кварца (1), размерами $48 \times 60 \times 1$ мм. Пластины промывались в концентрированной щёлочи, дистиллированной воде, медицинском спирте. На каждую из них наносился слой железа толщиной порядка $0,3$ мкм методом магнетронного напыления на установке «Катод-1М». После этого наносилась маска из фоторезиста ФП-383 по стандартной фотолитографической технологии [51]. Участки плёнки из железа, непокрытые фоторезистом, стравливалась в соляной кислоте. Затем слой фоторезиста смывался в щёлочи. В дальнейшем пластины нарезались на 12 частей. В итоге получались образцы вида (2). При исследовании проводилось ионно-лучевого или реактивно-лучевого травление получались образцы вида (3). После травления оставшееся железо стравливалось в соляной кислоте, и получались образцы вида (4).

Для повышения точности измерения на образцы наносился тонкий отражающий слой железа порядка $0,05$ мкм, получались образцы вида (5). Нанесение слоя железа давало выигрыш в контрастности интерференционных полос, это, в свою очередь, способствовало более точному различению полос в фокальной плоскости окуляра глазом экспериментатора.

Дальнейшее увеличение точности измерения осуществлялось за счет изменения схемы работы микроинтерферометра МИИ – 4. Схема устройства для измерения толщины стравленного слоя показана на рис 3.6. Источник света микроинтерферометра МИИ – 4 (1) снимался. Вместо его использовался источник света (3) на кварцевой галогенной лампе КГСМ-2 мощностью 200 Ватт. Для питания лампы использовался блок (4). Свет лампы проходил через монохроматор МУМ (2). Подбирая длину волны монохроматора добивались нулевого смещения интерференционных полос. Таким образом толщина пленки равна либо кратна длине волны монохроматора. Для обеспече-

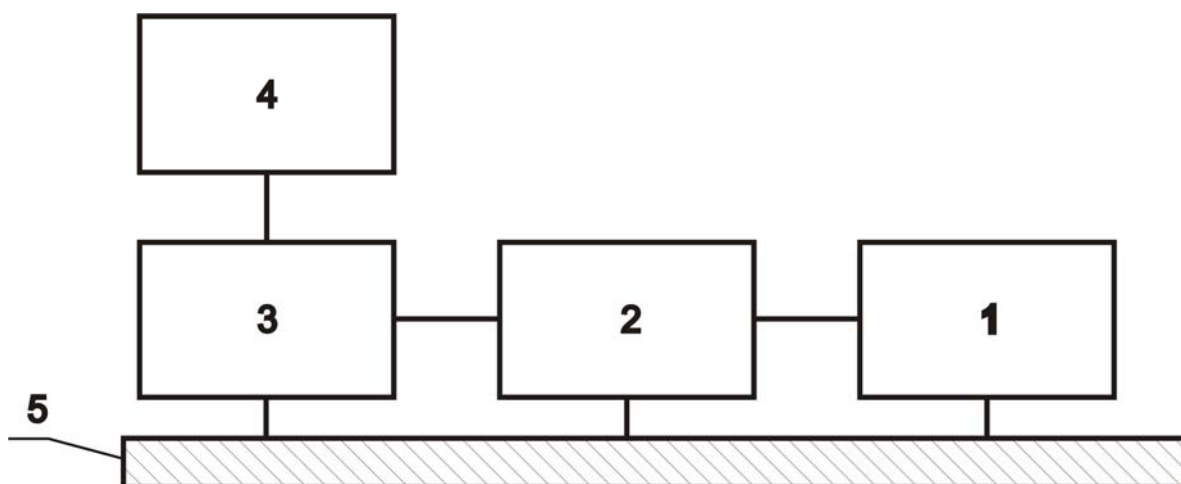
Технологические этапы подготовки образцов



- 1- пластины плавленного кварца
- 2- образец, подготовленный для травления,
- 3 - протравленный образец,
- 4 – образец, после травления железа,
- 5- образец, подготовленный для замера глубины травления.

Рис.3.5.

Устройство замера толщины пленок.



1. Микроинтерферометр МИИ-4.
2. Монохроматор МУМ.
3. Источник света.
4. Блок питания.
5. Основание.

Рис.3.6

ния соосности источник света, монохроматор и микроинтерометр устанавливались на основании (5)

3.2.3. Контроль результатов обработки кварца.

В работе использовался сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) Solver P 47-PRO ЗАО НТ-МДТ [52].

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) – универсальный прибор, предназначенный для измерений с разрешением вплоть до атомного уровня приповерхностных характеристик различных объектов [53].

В основе работы атомно-силового микроскопа (АСМ) лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

Функциональные характеристики АСМ P 47-PRO:

- 1) конструкция АСМ обеспечивает ручной подвод образца к зонду (до 1-0,5 мм), позиционирование образца в диапазоне 5×5 мм с точностью до 5 мкм,
- 2) использование 22-х разрядных АЦП позволяет достигать атомного разрешения,
- 3) размер области сканирования - 60×60 мкм,
- 4) Ограничение по размерам образцов составляет 15×20 мм, по высоте – 2,5 см.

3.2.4. Методика измерения шероховатости кварца

Для проведения процессов обработки были взяты подложки плавленого кварца размерами 48×60×1 мм. Подложки нарезались на пластины 30×10мм. Перед травлением пластины промывались в дистиллированной воде, затем подвергались обработке в ультразвуковой ванне с этиловым спиртом в течение 5 минут. В очищенной пластинке одна половина закрывалась алюминиевой фольгой, а вторая оставалась открытой с тем, чтобы явно проследить ре-

зультат ионной обработки. Проводилось ионно-лучевое или ионно-плазменное травление в режимах, приведенных ниже.

В таблицах, построенных по результатам исследования поверхностей, на АСМ, введены обозначения: «1 цикл» и «2 цикл». «1 цикл» представляет собой изначальное сканирование поверхности образца по площади 50×50 мкм, включающее в себя все поверхностные дефекты и следы пыли. «2 цикл» - это избирательное сканирование по площади 20×20 мкм. Такая площадка уменьшенного размера выбирается наглядно с минимальным количеством дефектов и повреждений с тем, что бы получить оптимальные результаты в статистических параметрах.

ГЛАВА IV

ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНОГО ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ КВАРЦА

4.1. Необходимость разработки методов ВПТ кварца

Плавленый и кристаллический кварц широко используется в микроэлектронике в качестве подложек интегральных схем СВЧ диапазона, устройств на поверхностных акустических волнах. Плавленый кварц является основой лазерных и твердотельных волновых гироскопов.

При изготовлении приборов, использующих в качестве основы кварц, практически во всех случаях возникает необходимость в точной обработке его поверхности. Известные методы ультразвуковой обработки, обработки алмазным инструментом приводят к образованию на поверхности «трещиноватого слоя» и часто не обеспечивают необходимой точности. При дальнейшей работе с кварцевыми заготовками возникает проблема удаления «трещиноватого» слоя, возникающего в процессе его шлифовки и полировки и ухудшающего характеристики приборов, использующих кварцевую основу [31].

При химическом травлении ввиду изотропности процесса наблюдается значительное боковое подтравливание, что снижает точность воспроизведения размеров.

Все эти проблемы полностью либо частично решаются при использовании ВПТ.

Особенности ВПТ кварца приведены в разделе 1.5

Методы ВПТ кварца обладают рядом существенных преимуществ и особенностей по сравнению с традиционными жидкостными методами травления:

- Возможность автоматизации процесса травления.
- Для реализации процессов ПТ и РИЛТ наиболее целесообразно использовать диодные реакторы. Для увеличения скорости травления и умень-

шения напряжения автосмещения на ВЧ электроде целесообразно использовать магнитные поля, получаемые постоянными магнитами либо соленоидом.

- Для увеличения скорости травления конкретных материалов целесообразно проводить не только подбор газов и оптимизацию режимов, но и поиск катализаторов
- Для увеличения воспроизводимости процессов травления и повышения производительности реактор установки травления должен иметь шлюзовую загрузку.
- Для обеспечения РИЛТ целесообразно использовать ионные источники с безнаканальным катодом и высокой равномерностью травления неподвижных пластин.
- Для обеспечения ресурса работы откачных средств нейтрализаторы не прореагировавших откачных газов и продуктов реакции целесообразно располагать между реактором установки и откачными средствами.
- Необходимо производить ВПТ кварца как с высокими скоростями для его размерной обработки, так и травление с умеренными скоростями для удаления с него «трещиноватого» слоя.

4.2. Моделирование процессов травления кварца

В основу алгоритма многоцелевого программного комплекса «Астра.4/рс» положен универсальный термодинамический метод определения характеристик равновесия произвольных гетерогенных систем, основанный на фундаментальном принципе максимума энтропии. Этот метод предоставляет уникальную возможность обобщенного описания любого высокотемпературного состояния с помощью одних только фундаментальных законов термодинамики, независимо от условий и способов достижения равновесия. Метод условия равновесия изучаемой системы с окружающей средой. Этими условиями могут быть либо численные значения термодинамических характеристик равновесия, либо функциональные соотношения между параметрами

этого состояния. Для описания самой требует минимальной информации о самой системе и о ее окружении [54].

Формулировка задачи термодинамического моделирования требует назначить два условия равновесия изучаемой системы с окружающей средой. Этими условиями могут быть либо численные значения термодинамических характеристик равновесия, либо функциональные соотношения между параметрами этого состояния. Для описания самой системы, как материального объекта, необходимо знать лишь содержание образующих ее химических элементов. Внутренние и межфазные взаимодействия описываются модельными термодинамическими соотношениями, для замыкания которых используются свойства только индивидуальных веществ - компонентов равновесия.

Благодаря простоте постановки задачи моделирования программный комплекс «Астра.4/pc» позволяет использовать термодинамический метод для изучения большого числа самых разнообразных высокотемпературных состояний и процессов. Среди них можно назвать:

- определение области допустимых условий проведения технологических процессов: нанесения покрытий, получения материалов со специальными свойствами, ультрадисперсных порошков, синтеза сверхтвердых и жаростойких соединений и др.;
- расчетно-теоретическое изучение режимов металлургических процессов выделения из руд редких и легирующих элементов и сплавов;
- исследование процессов нагрева, изменения химического состава и термического разрушения изолирующих покрытий при взаимодействии с химически активными средами;
- анализ энергетических возможностей и экологических проблем высокотемпературной комплексной переработки минерального сырья и природных ресурсов;
- определение состава и свойств плазмы в импульсных и непрерывных газоразрядных источниках излучения, плазмогенераторах, в аэрокосмической технике;

- анализ рабочего процесса в тепловых машинах и энергетических установках различного назначения;
- расчет характеристик и состава газообразных и гетерогенных сред за фронтом ударной волны.

Этот перечень может быть продолжен, поскольку область применения программного комплекса «Астра.4/рс» ограничена лишь допущениями математической модели, положенной в основу вычислительного алгоритма.

Исходные допущения могут быть сформулированы следующим образом:

- рассматриваются системы в состоянии внешнего и внутреннего термодинамического равновесия (полного или локального);
- рассматриваются замкнутые системы, т.е. не обменивающиеся веществом с окружающей средой;
- присутствие газовой фазы обязательно; газовая фаза описывается уравнением состояния идеального газа;
- поверхностные эффекты на границе раздела фаз не учитываются, растворимость газов в жидких и твердых фазах отсутствует;
- конденсированные вещества образуют однокомпонентные несмешивающиеся фазы либо включаются в состав идеальных конденсированных растворов.

В программном комплексе Астра.4/рс предусмотрена возможность учета некоторых неидеальностей.

К ним относятся:

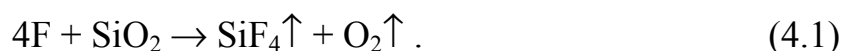
- исключение из числа учитываемых компонентов равновесия любых индивидуальных веществ;
- возможность назначать (фиксировать) концентрации одного или нескольких веществ с последующим расчетом равновесия по оставшейся части системы;
- рассмотрение неидеальных конденсированных растворов путем задания избыточной энергии Гиббса;

- учет собственного объема, занимаемого конденсированными веществами;
- Расчеты состава фаз и характеристик равновесия проводятся с использованием справочной базы данных по свойствам индивидуальных веществ. База данных является составной частью программного комплекса «Астра.4/pc»;

4.3. Локальное ВЧ магнетронное реактивно-ионное травление кварца

Для травления кварца использовалась установка, описанная в разделе 2.1.1 и показанная на рис. 2.2 [55].

Для травления кварца используют фторсодержащие газы – CF_4 , SF_6 , CHF_3 . В плазме данные газы разлагаются с образованием радикалов фтора F, вступающих в реакцию с кварцем с образованием четырехфтористого кремния SiF_4 , который при температурах выше 359 К летуч.



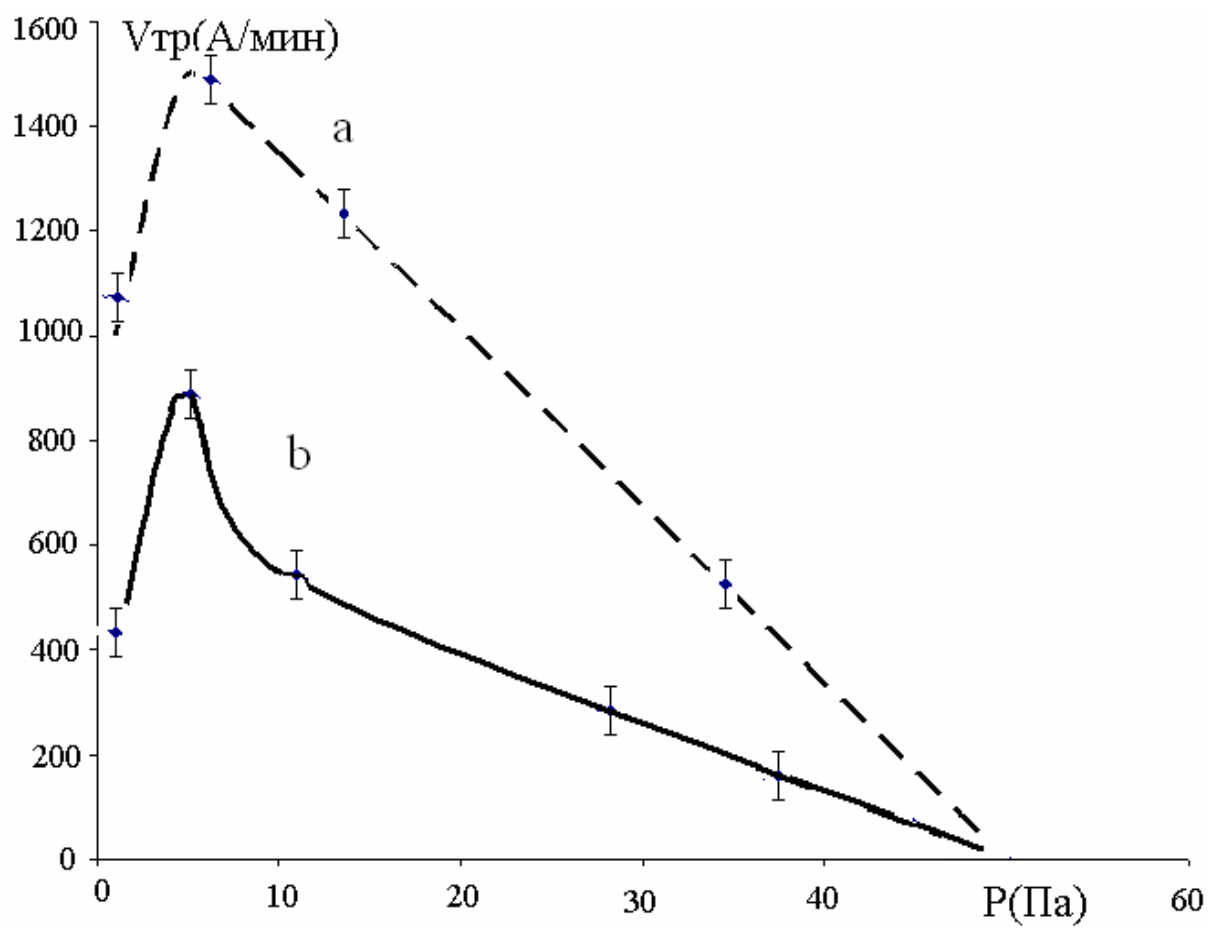
Измерение глубины травления проводилось в зависимости от толщины на микроинтерферометре МИИ-4, либо микатором с ценой деления 0.5 мкм; 1 мкм и 10 мкм. В качестве защитной маски использовались кварцевые пластины с отверстиями \varnothing 1, 3 и 5 мм.

Использование магнетронного разряда позволяет резко (на два порядка) повысить эффективность ионизации рабочего газа и на порядок понизить потенциал автосмещения на катоде, что приводит к снижению физической составляющей процесса травления и увеличению реакционной.

Для травления использовалось кварцевое стекло С5-1.

На рис.4.1 приведены зависимости скорости травления кварца в плазме SF_6 и CF_4 при мощности 200 Вт от рабочего давления.

Зависимость скорости травления кварцевого стекла от давления



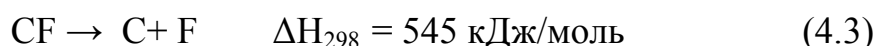
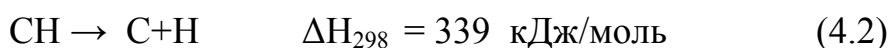
а) SF_6
 б) CF_4 при $N=200Вт$

Рис. 4.1.

Травление в SF₆ сопровождается образованием полимерной пленки на стенках камеры и на катоде вне зоны сканирования, поэтому скорость травления ниже. При травлении в CF₄ образование полимерной пленки не наблюдалось.

Более высокую скорость травления можно получить при использовании фреона - 23 CHF₃. В этом газе один атом фтора замещен водородом. Связь С - Н гораздо слабее, чем связь С - F, поэтому образование активного радикала CF₃ достигается при меньшей энергии, а при определенной мощности и давлении повышается вероятность их образования. Радикалы водорода связывают фтор в газовой фазе до фтористого водорода [56].

В (4.2,4.3) приведены энергии разрыва химических связей в радикалах С-Н и С-F. Энергия ΔH₂₉₈ (кДж/моль) дана радикалов находящихся в состоянии идеального газа.

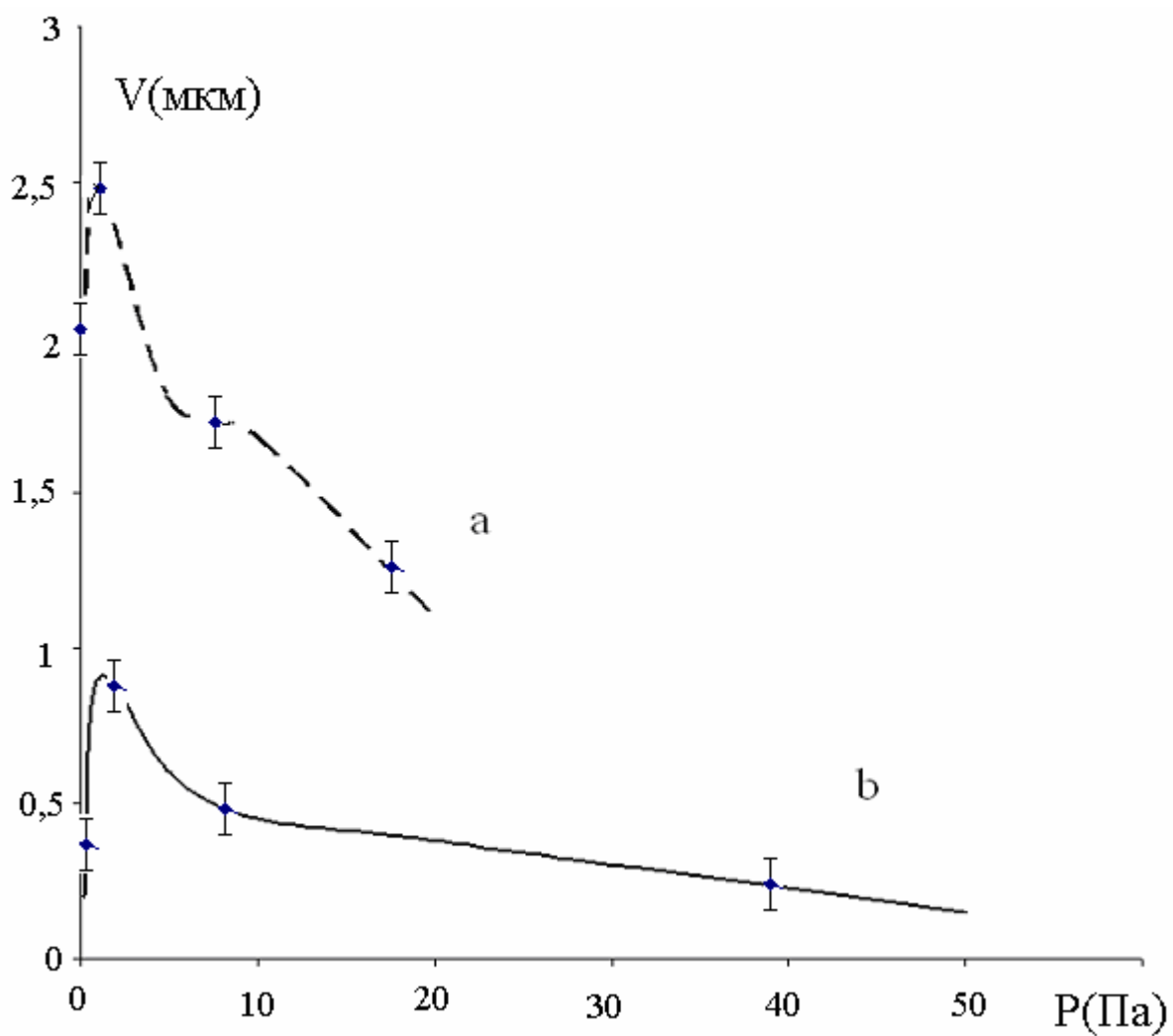


На рис.4.2 приведены зависимости скорости травления и потенциала автосмещения от давления при мощности разряда 500 Вт при сканирующем магнетроне и при установке подложки в неподвижную зону эрозии магнетрона. На рис.4.3 приведена зависимость скорости травления от мощности разряда при расположении подложки в зоне эрозии при неподвижной магнитной системе.

Режим травления без сканирования характеризуется высокими термическими нагрузками из-за интенсивной бомбардировки ионами в локальной зоне, образованной скрещенными электрическими полями и неравномерностью травления при большой площади травления.

Учитывая, что кварц обладает высокой термостойкостью, данный режим представляет интерес при глубинном травлении кварца с целью формирования углублений малой площади.

Зависимость скорости травления кварцевого стекла от давления в CHF_3



- а) режим сканирования,
- б) подложка в зоне эрозии.

Рис.4.2.

Зависимость скорости травления кварцевого стекла от мощности ВЧ-разряда при постоянном давлении 1 Па без сканирования магнетрона в CHF_3 .

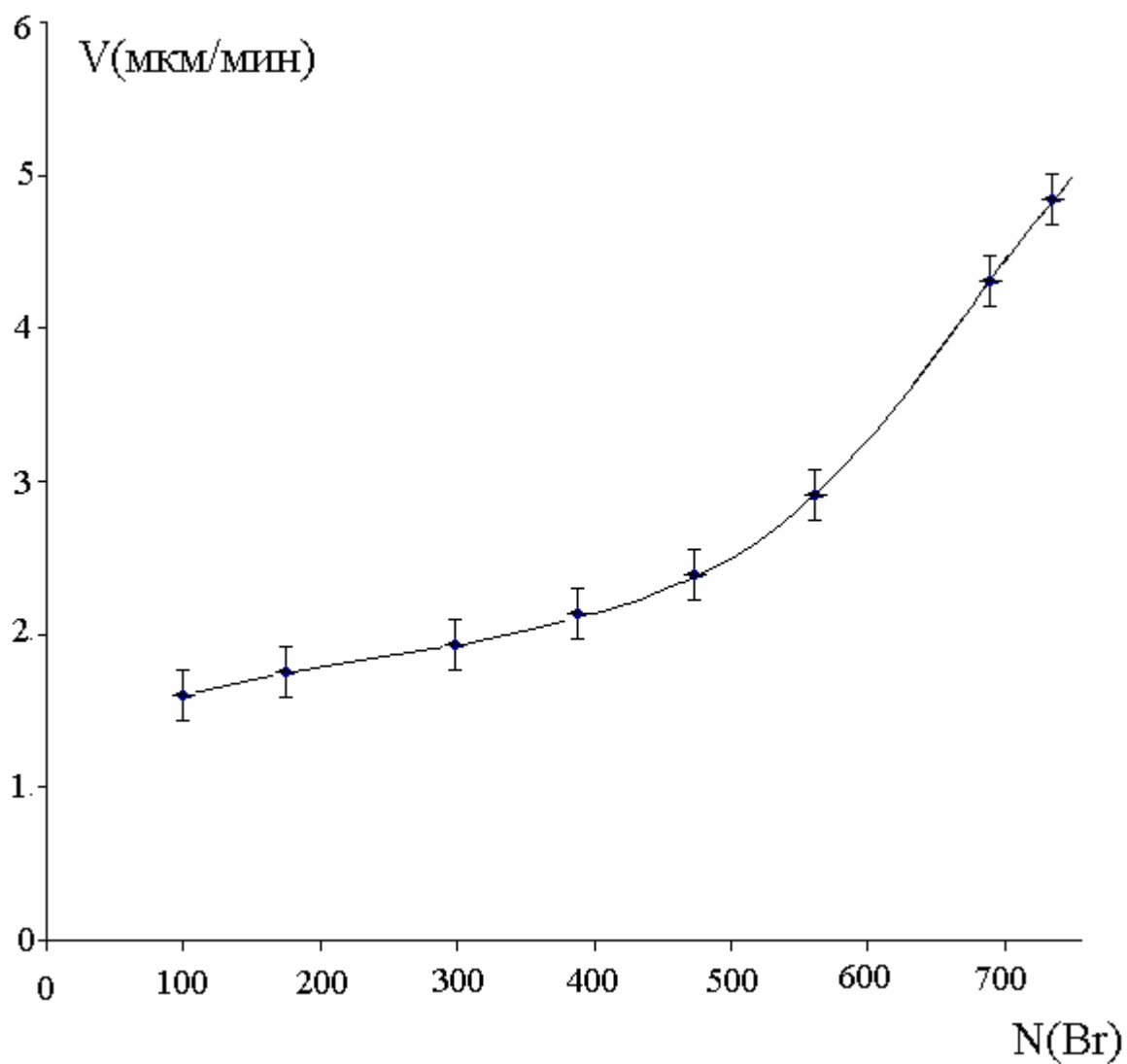


Рис. 4.3.

Оптимальное давление CHF_3 снижается до величины 1 Па, что напрямую связано с зависимостью потенциала автосмещения от давления.

Увеличение мощности до 700 Вт при данном давлении позволило получить скорости травления при сканировании магнетрона 1.6 мкм/мин и 4.2 мкм/мин без сканирования магнетрона. Дальнейшее увеличение мощности приводило к снижению скорости травления из-за образования белого налета на поверхности блокирующего травление кварца.

Дальнейшее увеличение скорости травления производилось за счет модернизации системы газонапуска. В базовой модели установки используется анод в виде диска, газораспределительные отверстия, в котором обеспечивали равномерность травления $\pm 5\%$ по подложке диаметром 100 мм.

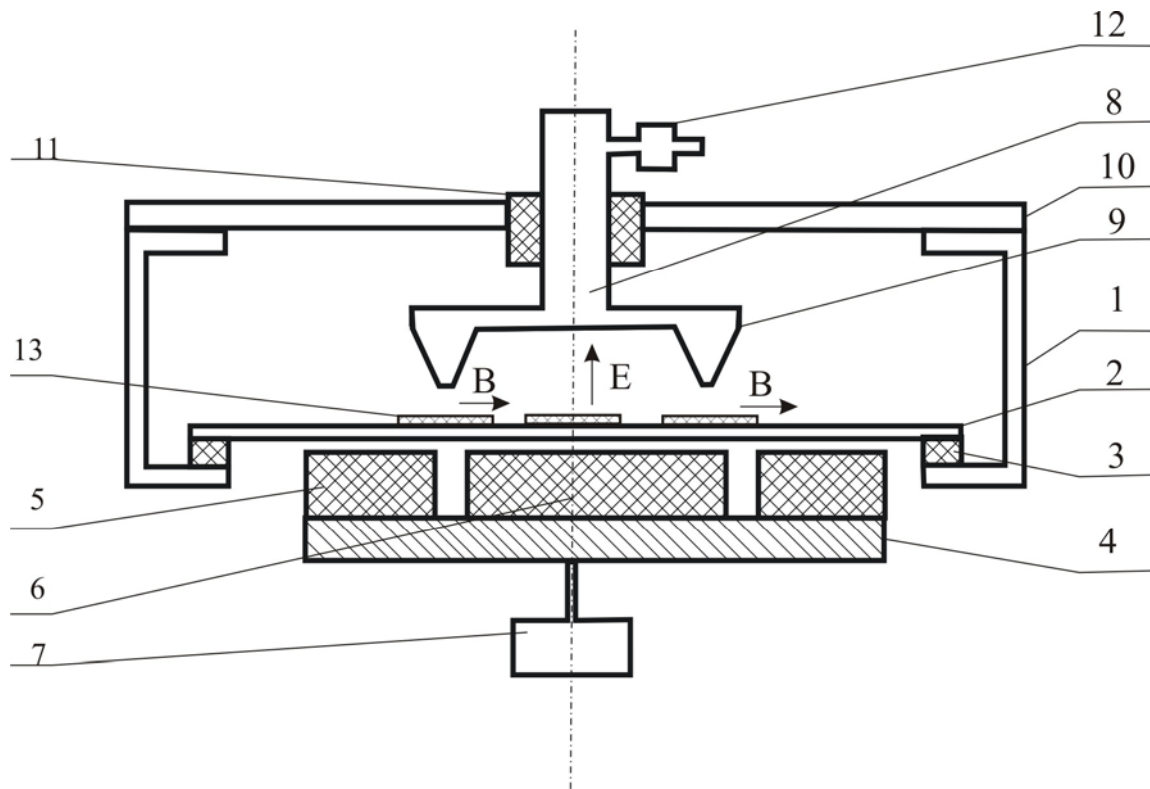
Изменение расстояния анод-катод от 20 до 60 мм на скорость и равномерность травления влияние не оказывает.

Для увеличения скорости травления без сканирования магнетрона была изготовлена система газонапуска в виде овальной трубки $\varnothing 5$ мм, повторяющей зону эрозии магнетрона с отверстиями диаметром 1 мм с интервалом 3 мм, направленными вниз к катоду.

При расположении магнетрона под системой газонапуска и расстоянии катод-анод 10 мм скорость травления увеличивалась на 20% при использовании CF_4 и на 30% при использовании CHF_3 по сравнению с плоским анодом. При расстоянии катод-анод более 25 мм увеличения скорости травления не происходило. Использование системы травления с синхронным сканированием овальной системы газонапуска с магнитным блоком, обеспечивающим расположение системы газонапуска над зоной эрозии, обеспечивает увеличение скорости травления на 30% в CHF_3 с сохранением равномерности травления в пределах $\pm 5\%$.

На основании полученных данных разработано устройство для обработки подложек в вакууме [57]. Устройство показано на рис 4.4.

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.

Рис. 4.4

В камере 1 расположен электрод подложкодержатель 2 установленный на изоляторе 3. Под электродом 2 расположена магнитная система 4, содержащая наружный 5 и внутренний 6 магниты. Система вращается валом 7. Заземленный электрод 8 с кольцевым выступом 9 установлен в крышке камеры 10, с возможностью перемещения по вертикали и фиксируется гайкой 11. Нагреватель 12 соединен с полостью электрода 8 на вершине выступа 9 имеется кольцевая щель. Подложки 13 устанавливаются под кольцевым выступом.

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

В работе [58] отмечалось значительное влияние величины индукции магнитного поля на поверхности подложки. Используемая магнитная система, из феррит-бариевых магнитов, обеспечивает магнитное поле на поверхности подложки 0.02 Тл. Для исследования влияния индукции магнитного поля был изготовлен магнитный узел из самарий-кобальтовых магнитов, обеспечивающих индукцию магнитного поля на поверхности подложки 0.06 Тл. Использование магнитного узла из самарий-кобальтовых магнитов при травлении в CF_4 в оптимальных режимах в сравнении с предыдущей магнитной системой привело к появлению на образцах барьерного слоя из фторуглеродных полимеров и снижению скорости травления в среднем на 30%. Во всех рассмотренных случаях образование барьерного слоя необходимо рассматривать в динамике как результат образования радикалов CF_3 с SiO_2 с осаждением углерода и кремния и удалением этих продуктов в виде SiF_4 и CO_2 . Повышение величины индукции магнитного поля обеспечило повышение концентрации радикалов в газовой фазе и увеличение осадков на поверхности подложки.

Интенсивность образования промежуточных продуктов возросла, но их удаление имитируется физическим распылением.

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

обладает высокой анизотропностью. Отклонение стенок от вертикали не обнаружено.

При получении углублений от 100 до 150 мкм наблюдалось снижение скорости травления с 4.2 до 2.5 мкм/мин, что можно связать с частичным блокированием продуктами реакции доступа реактивного газа ко дну углубления.

Максимальное увеличение скорости травления на 60% в CHF_3 было получено при системе газоподачи в виде трубки \varnothing 5 мм, расположенной на расстоянии $2 \div 3$ мм над подложкой, лежащей в зоне эрозии магнетрона. Однако данная система характеризуется низкой производительностью.

4.4. Особенности ионно-лучевого травления кварца в аргоне и среде фтор и хлорсодержащих газов

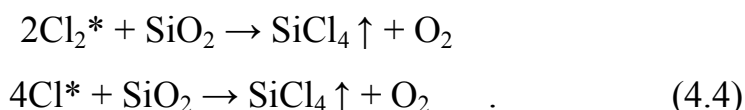
4.4.1. Ионно-лучевое травление в хлорсодержащих газах.

Традиционно для травления кварца используются фторсодержащие газы. Представляет интерес использование для процессов ионно-лучевого травления кварца жидких хлорсодержащих газов, которое менее исследовано. В работе использовались CCl_4 и SiCl_4 . Данные газы легко получить из аналогичных жидких реактивов путем подбора нужного сосуда с удовлетворяющей нас зеркальной поверхностью испарения для поддержания нужного давления ($1.6 \cdot 10^{-1}$ - $6 \cdot 10^{-2}$ Па.), что намного дешевле и безопаснее, т.к. на рабочем месте нужно держать не стандартный газовый баллон, а емкость со 100 - 200 г жидкости. Сами же процессы, происходящие в хлор и фтор содержащих газах, аналогичны.

Для проведения работ использовалась модернизированная вакуумная камера установки УРМ 3.279.029 описанная в разделе 2.2. Вакуумная камера модернизированной установки изображена на рис. 2.4. Для проведения процесса травления был выбран пучковый источник ионов «Радикал М-100», показанный на рис. 2.5.

В качестве рабочих газов использовались аргон, пары CCl_4 , SiCl_4 и смеси последних двух газов с кислородом.

В источнике ионов молекулы CCl_4 , SiCl_4 разлагаются с образованием радикалов хлора Cl_2^* и Cl^* , вступающих в реакцию с кварцем с образованием четырёххлористого кремния SiCl_4 , который при температуре выше 330°K летуч:



Предварительно было проведено моделирование процессов разложения CCl_4 , SiCl_4 , основанное на определении термодинамических характеристик реакций между материалом, подвергаемым травлению, и газовой средой. Описание возможностей моделирования приведено в главе 3.2.

1. Моделировалось состояние газов CCl_4 и SiCl_4 при высоких температурах от $500 - 5500 \text{ K}$, при давлении $0.06 - 0.16 \text{ Па}$. Это делалось для того, чтобы судить о процессе образования плазмы этих газов и изменении её компонентного состава при их ионизации. Величина температуры давала представление об энергии, затрачиваемой на ионизацию. Интервал температур $500 - 5500 \text{ K}$ соответствует энергиям частиц порядка $0.05 - 0.5 \text{ эВ}$. Выбор такого интервала температур объясняется тем, что энергия является средней энергией тяжелых частиц газа (ионов, атомов, молекул) в низкотемпературной газовой плазме. Выбранный диапазон давлений является рабочим для ионного источника. Моделирование процессов разложения показало, что концентрация радикалов хлора Cl_2^* и Cl^* пропорциональна температуре и имеет оптимум при определенном давлении, зависящий от температуры. Эффективность генерации радикалов хлора Cl_2^* и Cl^* при разложении CCl_4 в 2-3 раза выше, чем при разложении SiCl_4 .

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

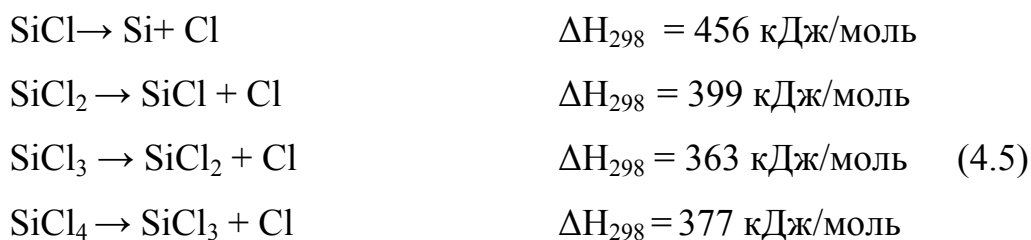
Замеры глубины травления проводились на микроинтерферометре МИИ-4. Для повышения точности измерения на образцы наносился тонкий отражающий слой нихрома порядка 0,05 мкм, что давало выигрыш в контрастности интерференционных полос, это в свою очередь способствовало более точному различению полос в фокальной плоскости окуляра глазом экспериментатора. Предварительно проведены циклы травления в аргоне. Полученные результаты приводятся в сравнение с травлением в реактивной среде.

Результаты по реактивному ионно-лучевому травлению в среде CCl_4 и SiCl_4 представлены на рис. 3.5 в виде зависимостей скорости травления от ускоряющего напряжения при постоянном рабочем давлении $P=0.1$ Па. Для сравнения, там же приведены скорости травления в аргоне. Видно, что скорости РИЛТ в CCl_4 и SiCl_4 выше скоростей ИЛТ в аргоне в среднем в 5 - 6 раз. Это объясняется тем, что при травлении в CCl_4 и SiCl_4 кроме ионной составляющей присутствует реактивная составляющая процесса.

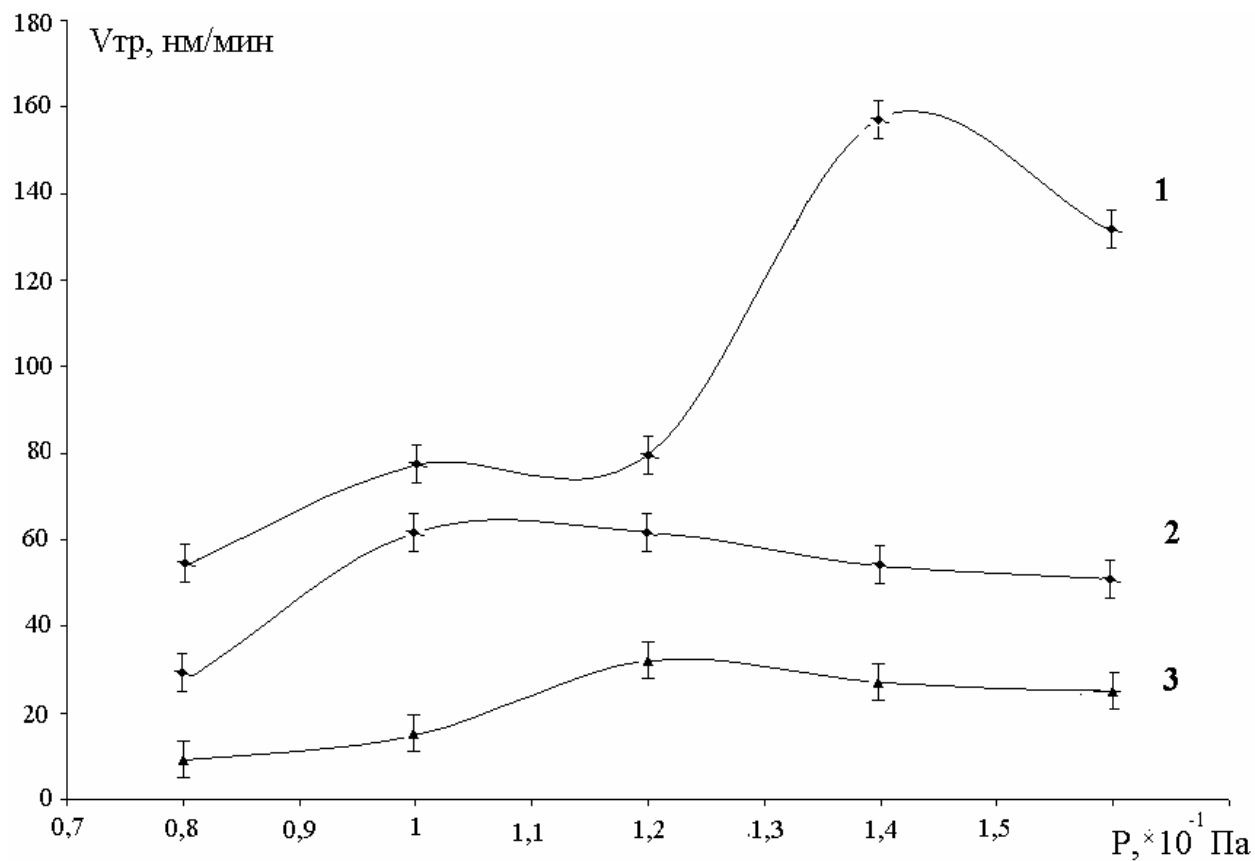
Скорость травления кварца в зависимости от рабочих режимов носит сложный характер, определяемый концентрацией радикалов хлора Cl_2^* и Cl^* и их энергией. Концентрация радикалов пропорциональна рабочему давлению и ускоряющему напряжению, определяющему эффективность ионизации. Энергия ионов пропорциональна ускоряющему напряжению ионного источника.

Эффективность ионизации CCl_4 и SiCl_4 различна [56].

В формулах 4.5, 4,6 приведены энергии разрыва химических связей в молекулах и радикалах в CCl_4 и SiCl_4 . Энергия ΔH_{298} (кДж/моль) дана для молекул и радикалов находящихся в состоянии идеального газа.

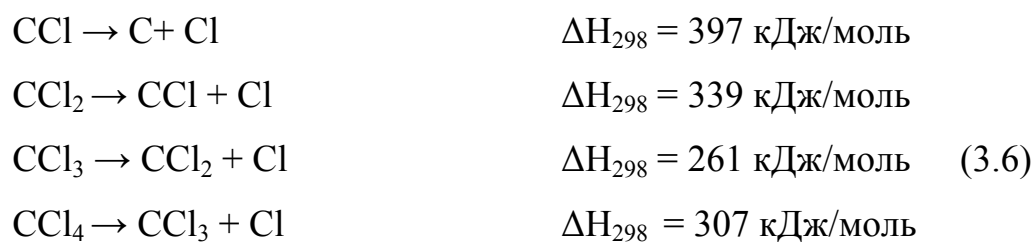


Зависимость скорости травления кварца от рабочего давления в камере при
постоянном $U=1.5\text{кВ}$



1 - кварц в CCl_4 , 2 - кварц в SiCl_4 , 3 - кварц в аргоне

Рис. 4.5.



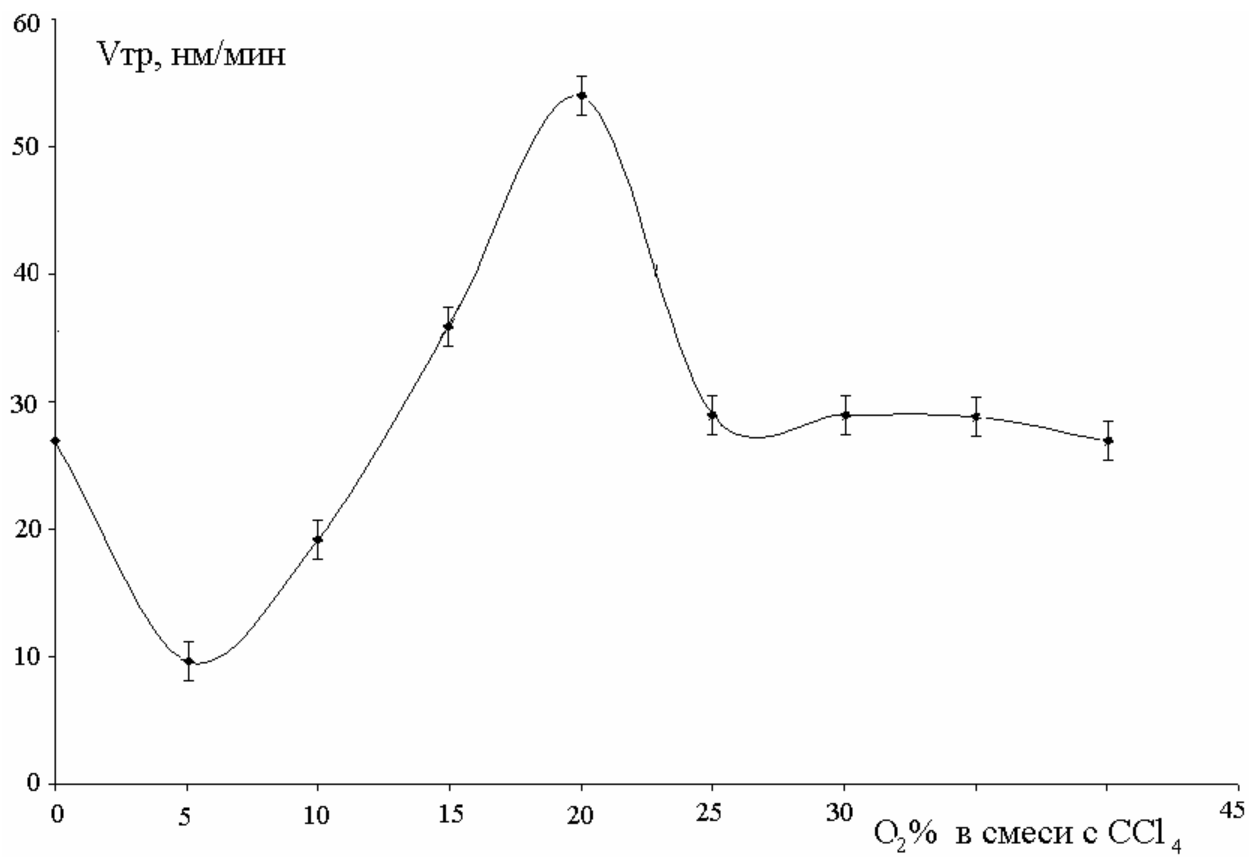
(3.6)

Энергии связи кремний-хлор выше, чем у соединения углерод – хлор. Это приводит к более эффективной генерации хлора при использовании CCl_4 и увеличению скорости травления. Осажденный углерод удаляется только ионной составляющей травления, что замедляет скорость травления. Осажденный кремний вступает в реакцию с хлором, удаляясь реактивной составляющей травления, не замедляя скорости травления.

Результаты по реактивному ионно-лучевому травлению в смесях $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$, $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2$ представлены на рис. 4.6, 4.7 в виде зависимости скорости травления от концентрации кислорода в соответствующих смесях при постоянном напряжении и постоянном давлении.

Как видно из рисунков скорость травления кварца в зависимости от концентрации кислорода в смеси $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$ имеет максимум. Это определяется удалением конденсированной фазы углерода, образующейся при разложении CCl_4 . При разложении SiCl_4 кремний не осаждается, поэтому добавка кислорода приводит к снижению концентрации радикалов и уменьшению скорости травления.

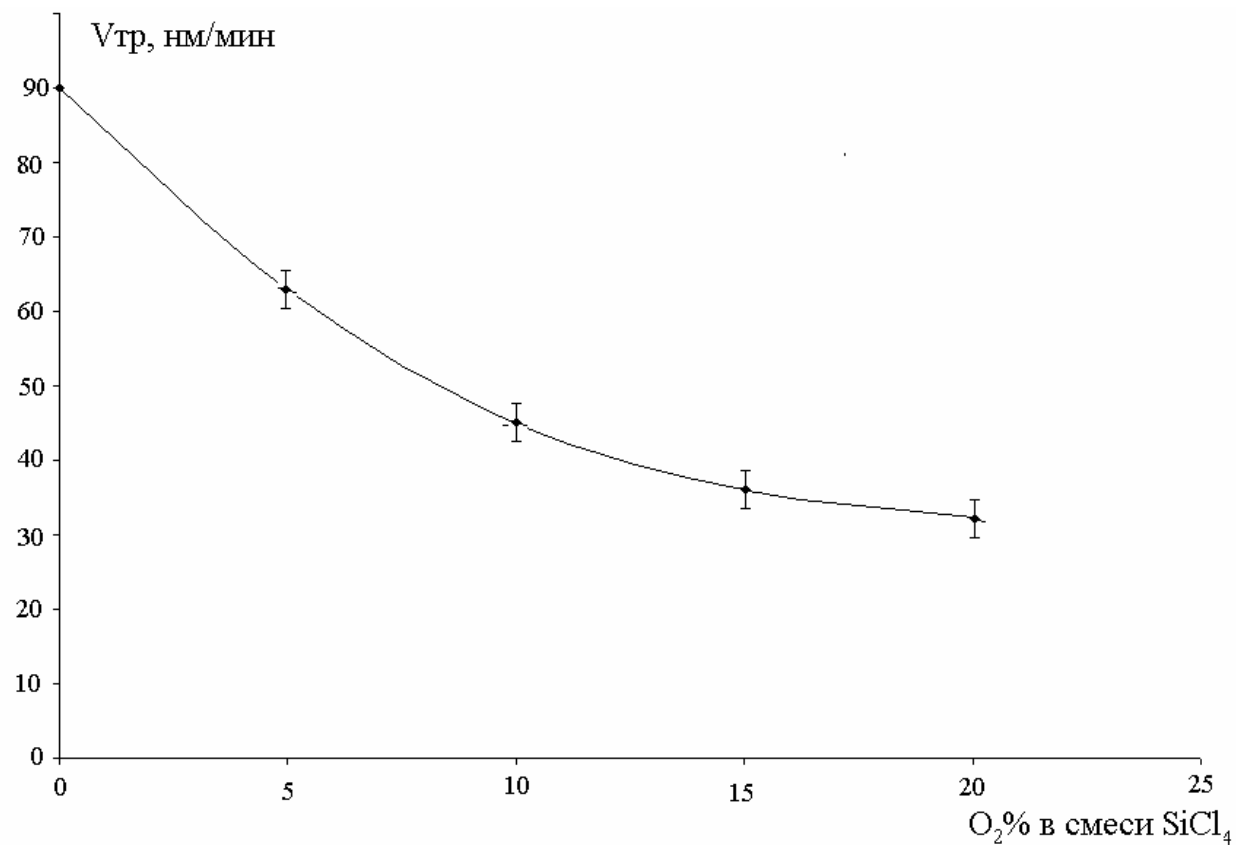
Зависимость скорости травления кварца в смеси $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$ от концентрации кислорода.



$U=1.0$ кВ и $P=1.0 \cdot 10^{-1}$ Па

Рис.4.6.

Зависимость скорости травления кварца в смеси $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2$ от концентрации кислорода.



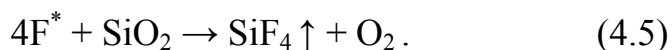
$U=1.5$ кВ и $P=1.2 \cdot 10^{-1}$ Па.

Рис. 4.7.

4.4.2. Реактивное ионно-лучевое травление в среде CF₄.

Результаты по реактивному ионно-лучевому травлению в среде CF₄ представлены на рис. 4.7 и 4.8 в виде зависимости скорости травления от давления при постоянном напряжении и от напряжения при постоянном давлении [61, 62].

Механизм реактивного ионно-лучевого травления кварца в CF₄ подобен механизму травления в CCl₄: в нём присутствуют ионная и реактивная составляющая. Ионная составляющая растёт с ростом давления, так как с его ростом при фиксированном напряжении увеличивается плотность ионного тока на поверхности обработки. Реактивная составляющая присутствует за счёт того, что газ CF₄ в плазме разлагается с образованием радикалов фтора F^{*}, вступающим в реакцию с кварцем с образованием четырёхфтористого кремния SiF₄, который при температуре выше 359 К летуч:



При постоянном напряжении (рис. 3.8.) с увеличением давления скорость растёт и выходит на насыщение, так как при этом выходит на насыщение ионная составляющая за счёт насыщения тока источника с увеличением давления.

При постоянном давлении (рис. 4.9.) с увеличением напряжения скорость также растёт и выходит на насыщение, так как при этом выходит на насыщение ионная составляющая за счёт насыщения тока источника с увеличением напряжения.

Результаты по реактивному ионно-лучевому травлению в CF₄ + O₂ представлены на (рис. 4.10) в виде зависимости скорости травления от концентрации кислорода в соответствующих смесях при постоянном напряжении и постоянном суммарном давлении.

Зависимость скорости травления SiO₂ в CF₄ от давления при U=1.25 кВ

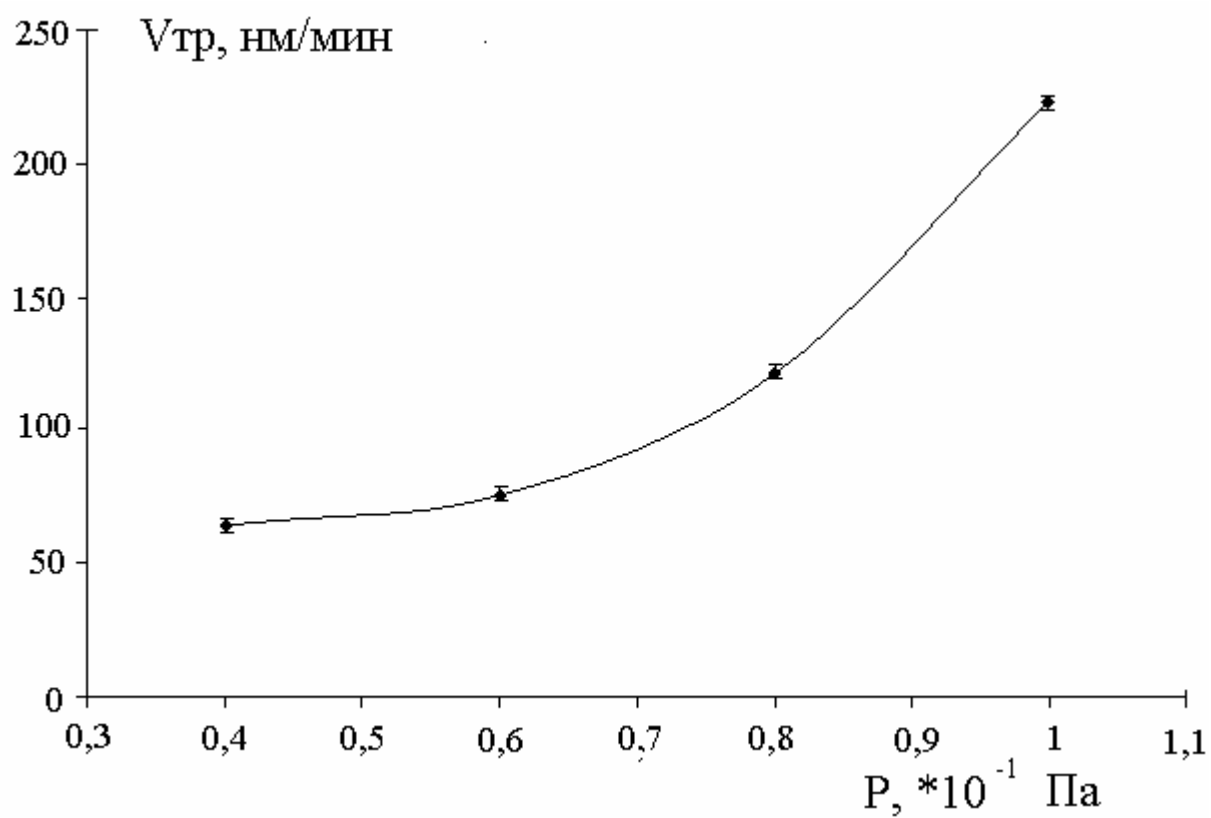


Рис.4.8.

Зависимость скорости травления SiO_2 в CF_4 от напряжения при $P=8 \cdot 10^{-2}$ Па

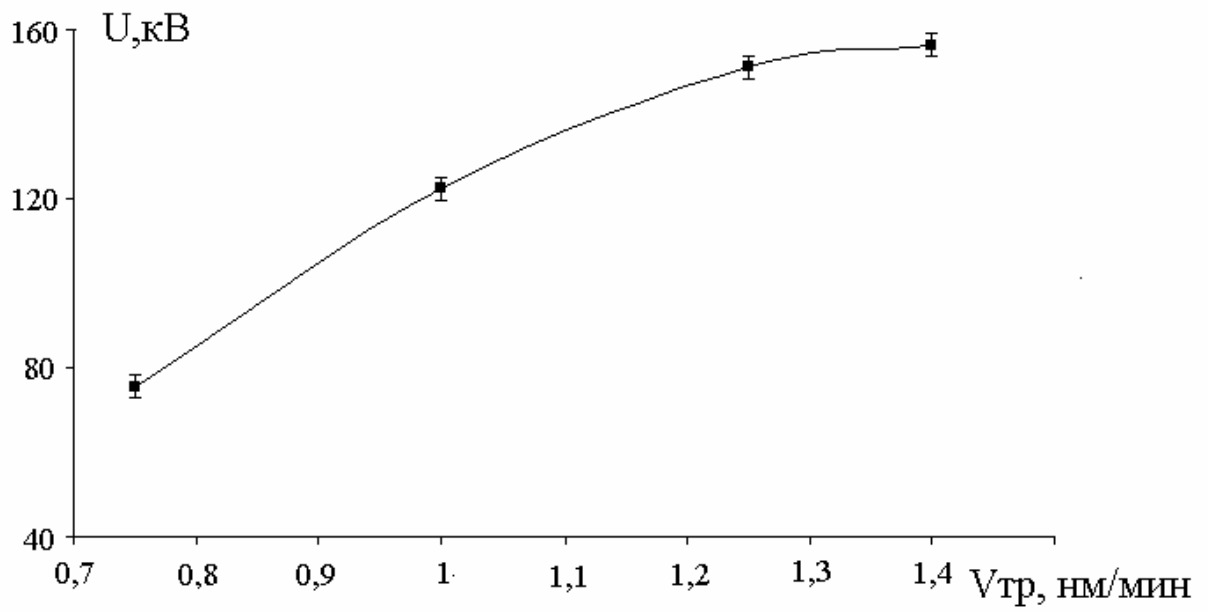
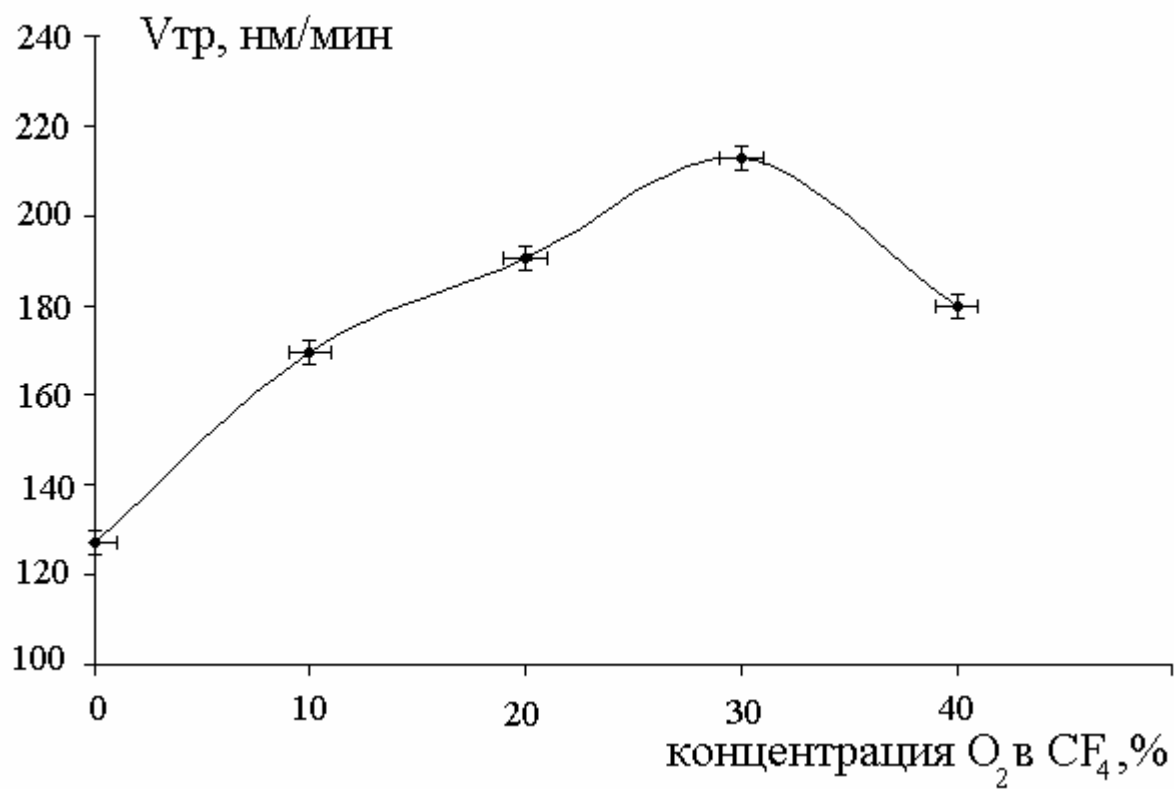


Рис. 4.9.

Зависимость скорости травления в смеси CF_4 от концентрации кислорода.



$U=1.25$ кВ, $P=8 \cdot 10^{-2}$ Па

Рис.4.10

При добавлении в рабочий газ кислорода скорость травления SiO_2 резко возрастает (рис. 3.10). Оптимальная концентрация O_2 при травлении SiO_2 в CF_4 даёт повышение скорости в 1.7 раза и составляет 30 % O_2 . При повышении концентрации O_2 выше 30 % скорость травления понижается. Эти явления можно объяснить, если рассмотреть химические реакции на поверхности твёрдого тела и в плазме. Атомы фтора F образуются за счёт диссоциации молекул CF_4 , вызванной соударениями с электронами, при этом они могут рекомбинировать путём присоединения к радикалам CF_3 . Скорость этих процессов в чистой (без добавок) плазме CF_4 такова, что равновесная концентрация атомов F низка, а поскольку эти атомы обеспечивают протекание реакции травления, скорость травления также относительно низка. Добавление кислорода приводит к уменьшению количества радикалов CF_3 , за счёт образования COF_2 , CO , CO_2 , что уменьшает скорость рекомбинации атомов F , в результате этого резко возрастает концентрация атомов F , вызывая соответственно повышение скорости травления. При дальнейшем добавлении кислорода выше некоторого оптимального значения концентрация атомов F уменьшается пропорционально уменьшению концентрации CF_4 в газовой смеси, что вызывает спад скорости травления.

Скорости травления в CF_4 оказались выше, чем скорости травления в CCl_4 в 2 - 2,5 раза, а по сравнению ионно-лучевым травлением в аргоне в 12 - 15 раз. Скорость травления SiO_2 радикалами хлора ниже, чем радикалами фтора из-за более низкой химической активности хлора.

4.4.3. Ионно-лучевое травление в среде Ar

Результаты по ионно-лучевому травлению в инертной среде аргона представлены на (рис. 2.7) в виде зависимостей скорости травления от давления при постоянном напряжении и от напряжения при постоянном давлении.

Было рассмотрено авторское свидетельство [63], в котором описывается возможность травления в смеси аргона и кислорода с содержанием в рабочей камере твердотельного полимерного источника ХАЧ. Авторы использовали в качестве источника травящего компонента фторопласт-4, помещённый в объём

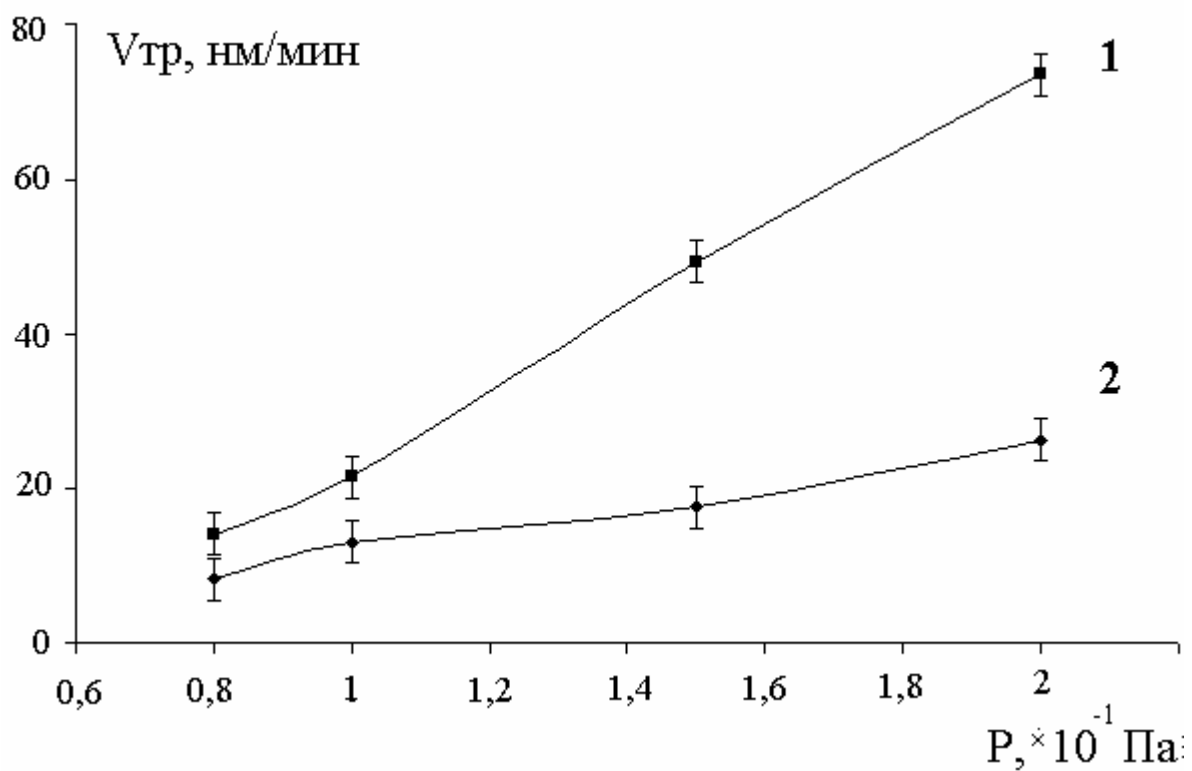
ёмный цилиндрический реактор, плазма в котором возбуждается подачей на индуктор высокочастотной мощности. В качестве рабочего газа использовали смесь $\text{Ar} + \text{O}_2$. Энергия электронов в такой плазме ~ 10 эВ. При такой энергии частиц физического распыления материала в реакторе не происходит. В этом случае решающее значение имеют гетерогенные химические реакции, активируемые излучением плазмы, между атомами и радикалами рабочего газа или газовых смесей с поверхностными атомами обрабатываемого материала. Выделение травящего компонента происходит за счёт взаимодействия полимера с плазмой.

На основании [63] была исследована возможность ионно-лучевого травления с фторопластом в аргоне и в смеси аргона и кислорода. Для этого были изготовлены три подложкодержателя из фторопласта-4. Для выявления влияния фторопласта на скорости травления кварца в аргоне три образца помещались на алюминиевые подложкодержатели, и три образца на фторопластовые. Чтобы можно было сравнить скорость травления образца на фторопласте со скоростью травления образца на алюминии каждая пара «образец на алюминии – образец на фторопласте» травилась в своём собственном режиме.

Из зависимости скорости травления SiO_2 в Ar от давления при $U=1$ кВ (рис. 4.11) виден общий рост скорости травления с ростом рабочего давления. Это связано с тем, что при фиксированном напряжении источника с ростом давления увеличивается ионный ток источника, а в месте с ним и плотность тока бомбардирующих ионов на поверхности травления.

На рис.4.12 представлена зависимость скорости травления от напряжения источника при постоянном давлении. Скорость травления образца на алюминии стремится к насыщению, это связано с тем, что при фиксированном давлении с ростом напряжения стремится к насыщению и ток источника который и определяет в основном скорость травления при ионно-лучевом травлении в отличие от реактивного ионно-лучевого травления, реализовавшегося при травлении образца на фторопласте. Здесь даже при

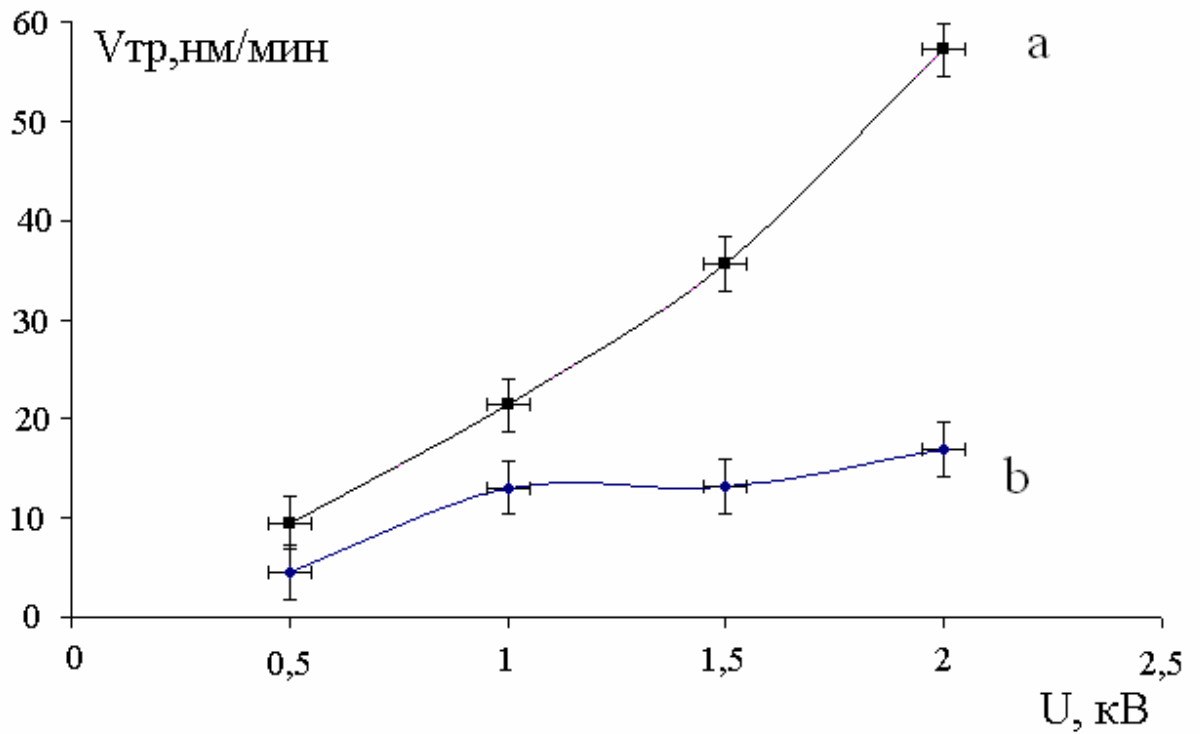
Зависимости скорости травления SiO_2 в Ar от давления при $U=1$ кВ



1 - образец на фторопласте, 2 - образец на алюминии

Рис. 4.11

Зависимость скорости травления SiO₂ в Ar
от напряжения.



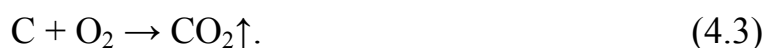
$P=1 \cdot 10^{-1}$ Па

а) образец на алюминии, б) образец на фторопласте

Рис.4.12

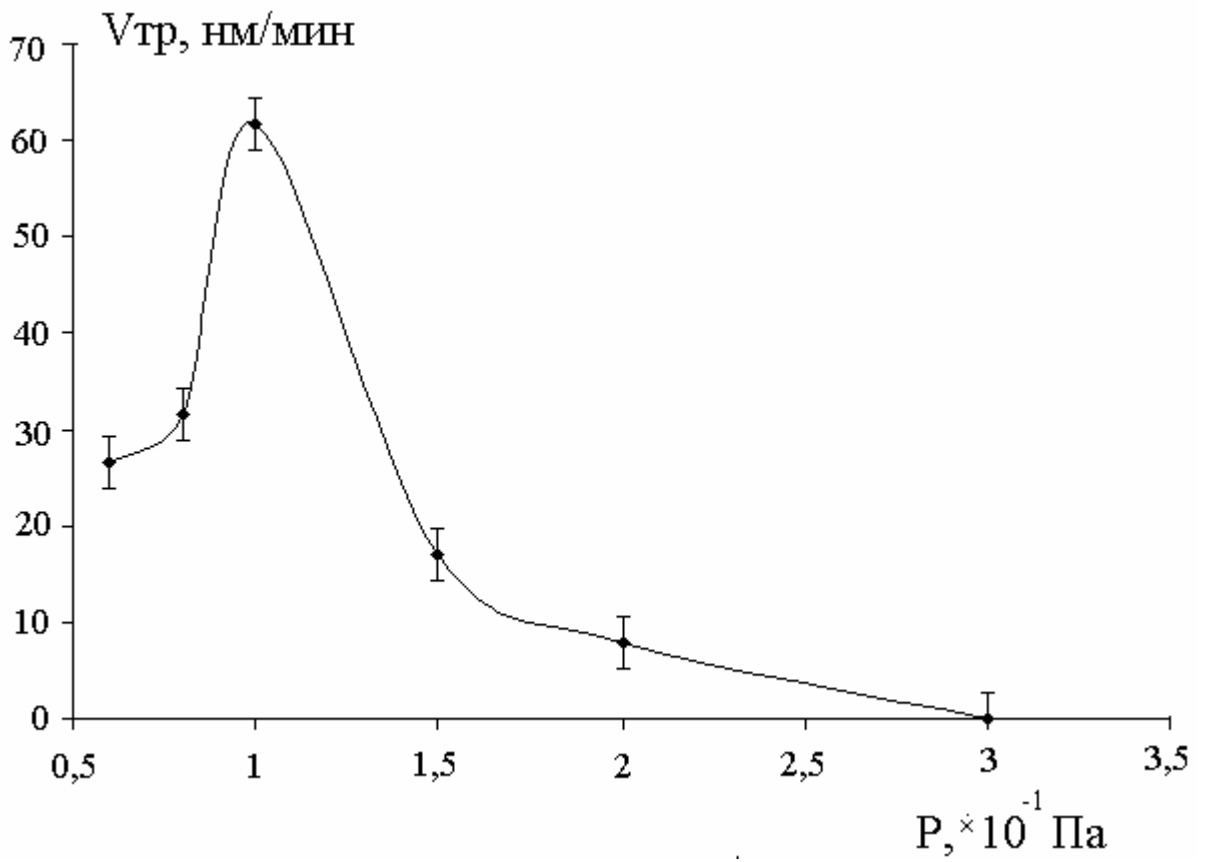
насыщении тока источника скорость травления продолжает увеличиваться за счёт увеличения напряжения источника, вместе с которым увеличивается энергия бомбардирующих фторопласт частиц, а следовательно и увеличивается эффективность образования ХАЧ из фторопласта.

При травлении в аргоне образцов на фторопласте явление возрастания скорости травления при добавлении кислорода в рабочую камеру также наблюдалось (рис. 4.13) как и при травлении в CF_4 . Объяснения этому явлению аналогичны как и для CF_4 , но с той только разницей, что источником химически активных частиц в этом случае уже служил фторопласт, на котором укреплялись образцы. По мере выхода химически активного фтора из фторопласта в нём оставался углерод, блокирующий дальнейшее распыление фторопласта. При введении кислорода, углерод более эффективно удалялся с поверхности фторопласта по реакции:



Оптимальная концентрация O_2 в этом случае даёт повышение скорости в 2.75 раза и составляет 10%.

Зависимость скорости травления SiO_2 в смеси $\text{Ar}+\text{O}_2$ от давления при 10%-ой концентрации O_2 при токе источника $I=70\text{mA}$



образец на фторопласте

Рис. 4.13

Выводы по четвертой главе

1. Используя режим травления без сканирования в кварце, 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. При получении углубления от 150 до 250 мкм наблюдалось снижение скорости травления с 4.2 до 2.5 мкм/мин, что можно связать с частичным блокированием продуктами реакции доступа реактивного газа ко дну углубления.

2. Моделирование процессов разложения показало, что концентрация радикалов хлора Cl_2^* и Cl^* пропорциональна температуре и имеет оптимум при определенном давлении, зависящий от температуры. 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 также выявило образование конденсированной фазы углерода, концентрация которого растет пропорционально росту температуры.

3. Оптимальные режимы, обеспечивающие высокие скорости травления кварца, ионным источником "Радикал М-100" следующие:

- 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.
- 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 %.

4. Оптимальные режимы, обеспечивающие высокие скорости травления кварца в CF_4 ионным источником «Радикал М-100» следующие:

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 %.

5. Оптимальные режимы, обеспечивающие высокие скорости травления кварца в аргоне присутствии твердотельного источника химически-активных частиц (фторопласта-4) ионным источником «Радикал М-100» следующие:
рабочее давление $2 \cdot 10^{-1}$ Па, ускоряющее напряжение 1 кV, ток разряда 170 mA, скорость травления 73 нм/мин, оптимальная концентрация O₂ в CF₄ 10 %.

ГЛАВА V

ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ И ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ КВАРЦА НА ЕГО ШЕРОХОВАТОСТЬ

5.1. Шероховатость. Методы уменьшения шероховатости

В настоящее время особое внимание уделяется нанотехнологиям. В последнее время наноразмерные плёнки находят всё большую область применения. Использование тонкопленочных материалов в разных областях промышленности определяет для них ряд требований, которые возрастают по мере усиления ограничений, накладываемых на материал, размеры пленок и технологию их получения. В соответствии с этими требованиями тонкие пленки при жестких условиях эксплуатации должны обладать стабильными свойствами. Особое внимание уделяется исследованию влияния шероховатостей границы плёнка-подложка. В идеальном случае поверхность подложки и граница раздела слоя плёнки должна быть атомарно гладкой, а степень их шероховатости определяются амплитудой тепловых колебаний атомов. Однако в реальной ситуации гладкость подложек зависит от особенностей технологии их изготовления и полирования. При выращивании пленок на шероховатых поверхностях, полученные образцы характеризуются, как правило, неравномерной толщиной, сильно различающимися размерами зерен, случайной ориентацией кристаллитов и большими межзеренными напряжениями. Шероховатая поверхность и неравномерная толщина пленок ограничивают их применение. Для преодоления этих ограничений требуется уменьшить шероховатость подложек и внести при этом минимальные повреждения в приповерхностный слой. Одним из успешных методов уменьшения шероховатостей являются методы ионно-плазменного (ИПТ) и ионно-лучевого (ИЛТ) травления, т.к. позволяют избежать различных микроцарапин, и серьезных нарушений в поверхностном слое [64 - 66].

Шероховатость поверхности оценивается средним арифметическим отклонением профиля R_a , высотой микронеровностей R_z и наибольшей высотой неровностей R_{max} . [67].

1) Среднее арифметическое отклонение профиля R_a - среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (5.1)$$

где l – базовая длина; n – число выбранных точек профиля на базовой длине.

2) Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших высот профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5}, \quad (5.2)$$

где y_{pmi} – высота i -го наибольшего выступа профиля; y_{vmi} – глубина i -й наибольшей впадины профиля

3) Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} - расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Базовой длиной называют минимальную длину участка поверхности, используемого для выделения неровностей, характеризующих ее шероховатость.

В настоящее время стандартизацией параметров, применяемых для описания геометрии поверхности, занимаются несколько независимых организации. Наиболее часто в литературе можно увидеть ссылки на стандарты следующих организаций:

1. International Organization for Standardization (ISO)-Международная Организация по Стандартизации.
2. The American Society of Mechanical Engineers (ASME)-Американское Общество Инженерной Механики.
3. Deutsches Institut für Normung (DIN)- Германский Институт Стандартов.

4. American National Standards Institute (ANSI) – Американский Национальный Институт Стандартов.

Производители программного обеспечения для СЗМ при расчёте поверхностных параметров стараются придерживаться стандартов ISO, в которых описаны параметры для количественной оценки геометрии поверхности. ISO 4287:1997 (Geometrical Product Specification (GPS)-Surface texture: Profile method-Terms, definitions and surface texture parameters) и ISO 4288:1996 (Geometrical Product Specification (GPS)-Surface texture: Profile method-Rules and procedures for the assessment of surface texture). В этих двух спецификациях приведены все обозначения и даны формулы для вычисления поверхностных параметров. В табл. 5.1 приведён список параметров для характеристики поверхностной геометрии.

1) S_y - размах высот (peak to peak, ISO 4287/1), нм или R_t (maximum height of profile, ASME B46.1-1995), нм.

$$S_y = Z_{\max} - Z_{\min} . \quad (5.3)$$

Параметр S_y нужен, если использовать язык топографов, для общей оценки степени пересечённости рельефа местности.

2) S_a - средняя арифметическая шероховатость (average roughness, ISO 4287/1), нм или R_a (ASME B46.1-1995), нм.

$$S_a = \left(\frac{1}{N^2} \right) \sum_{i,j=1}^N |Z_{i,j} - \bar{Z}| \quad \left(\frac{1}{N^2} \right) \sum_{i,j=1}^N |Z_{i,j}| , \quad (5.4)$$

где \bar{Z} - средняя высота поверхности:

$$\bar{Z} = \left(\frac{1}{N^2} \right) \sum_{i,j=1}^N |Z_{i,j}| . \quad (5.5)$$

Здесь $Z_{i,j}$ означает высоту поверхности в каждой точке скана.

Таблица 5.1.

Список параметров для характеристики поверхностной геометрии

Параметр	Описание	Стандарт	Возможное обозначение
Амплитудные параметры			
Ra	Средняя шероховатость	1,2,3,4	Pa, Wa
Rq	Среднеквадратичная шероховатость	1,3,4	Pq, Wq
Rt	Размах высот профиля	1,3	Pt, Wt
Rv, Rm	Максимальная глубина долины	1,3,4	Pv, Wv
Rp	Максимальная высота вершины	1,3,4	Pp, Wp
Rpm	Средняя максимальная высота вершины	1	
Rz	Средняя максимальная высота профиля	1,3	Pz, Wz, Rtm
Rmax	Максимальная глубина шероховатости	1	Ry, Rymax, Rz
Rc	Средняя высота нерегулярностей профиля	3,4	Pc, Wc
Rz	Высота по 10 точкам	4	
Ry	Максимальная высота профиля	4	
Wt, W	Высота волнистости	1,2,3	Rt, Pt
Пространственные параметры			
S	Среднее расстояние между пиками	4	
Sm, RSm	Среднее расстояние между нерегулярностями профиля	1,3,4	Psm
D	Плотность пиков профиля	4	Sm
Pe	Количество пиков(плотность)	1	
λ_a	Средняя длина волны профиля	4	
λ_q	Среднеквадратичная длина волны профиля	4	
Гибридные параметры			
Δ_a	Средний абсолютный наклон	1,3	P Δ_a , W Δ_a
Δ_q	Среднеквадратичный наклон	1,3	P Δ_q , W Δ_q
Lo	Развитая длина профиля	4	Ir
Ir	Коэффициент длины профиля	4	Lo

Стандарты: 1 - ASME B46.1-1995; 2 - ASME B46.1-1985; 3 - ISO 4287-1997; 4 - ISO 4287/1-1984; 5 - ISO13565-1996

Параметр Sa определяет шероховатость поверхности в виде двумерного среднего арифметического значения (т.е. первого начального момента μ_1 μ_1) и центр распределения. При симметричном рельефе одной из возможных оценок центра распределения может служить абсцисса моды распределения высот рельефа. Однако встречаются распределения профилей, у которых не существует моды (равномерное распределение, распределение Коши). В этих случаях определение центра моды распределения лишено смысла.

3) Sq - среднеквадратичная шероховатость (root mean square roughness, ISO 4287/1-1995), нм.

$$Sq = \left[\left(\frac{1}{N^2} \right) \sum_{i,j=1}^N |Z_{i,j} - \bar{Z}|^2 \right]^{1/2}, \quad (4.6)$$

параметр Sq (второй центральный момент μ_2) является определяющей характеристикой шероховатости.

4) Sz – десять точек по высоте (ten point height, ISO 4287/1), или Rz (ASME B46.1-1995), нм.

Параметр Sz выражает шероховатость поверхности (по аналогии с методом max-min) по выбранным пяти координатам максимальных высот и впадин по формуле:

$$Sz = 1/5 [Z_{\max 1} + Z_{\max 2} + Z_{\max 3} + Z_{\max 4} + Z_{\max 5} - (Z_{\min 1} + Z_{\min 2} + Z_{\min 3} + Z_{\min 4} + Z_{\min 5})]. \quad (5.7)$$

5) Пиковые параметры характеризуют размах высот от среднего уровня на определённой высоте:

$$Rp = \max |h(x) - \bar{h}|, 0 < x < L. \quad (5.8)$$

$$Rv = \min |h(x) - \bar{h}|, 0 < x < L. \quad (5.9)$$

$$Rt = Rp + Rv. \quad (5.10)$$

Состояние поверхности, подверженной как макро-, так и микроискажениям, оказывает заметное влияние на многие различные физические свойства. 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. Развитию методов исследования шероховатостей и неоднородностей в приповерхностных слоях уделяют большое внимание. Среди этих методов необходимо отметить профилографические, электронно-микроскопические, интерференционные, рентгеновские и атомно-силовые [68 - 70].

5.2. Фрактальные параметры

Поверхность необходимо охарактеризовать небольшим числом параметров, дающих наиболее полную информацию о структуре рельефа. Перспективным в данном случае является применение фрактальных параметров характеристики поверхности [71, 72].

Шероховатость и различные пиковые параметры являются мерой неровности поверхности, и исследователи очень часто ограничиваются только рассмотрением этих параметров при анализе СЗМ данных. В некоторых случаях это оправданно, но следует учесть, что шероховатость не полностью отражает особенности рельефа и свойства поверхностей.

Она больше используется в материаловедении для характеристики качества полировки поверхностей, но мало пригодна для отражения физики процессов, происходящей на поверхности.

Кроме того, значение шероховатости зависит от масштаба, на котором производится исследование поверхности [73-77]. И этот факт тоже необходимо учитывать, при использовании шероховатости в качестве характеристики для поверхностной геометрии.

В настоящее время в мировой литературе большое внимание уделяется такому геометрическому параметру поверхности, как фрактальная размер-

ность, которая имеет ряд бесспорных преимуществ перед амплитудными параметрами, в частности перед шероховатостью. Шероховатость поверхности является скорее техническим параметром, характеризующим её гладкость (ровность), т.е. качество обработки. Есть множество экспериментальных фактов, свидетельствующих в пользу фрактальных параметров, нежели шероховатости в отношении характеристики свойств материалов. Но фрактальная размерность требует дополнительного изучения в вопросе выявления её связи с физическими свойствами объектов.

Рассмотрим некоторые известные на данный момент данные о связи фрактальной размерности и физических свойств различных объектов. Мандельбротом была установлена связь фрактальной размерности поверхности разлома мартенситной стали и энергии, вложенной в образец для его разрушения [78]. Прайфером и др. была изучена адсорбция спиртов и показано, что количество адсорбированных молекул газа разного размера зависит от фрактальной размерности поверхности [79]. Также моделированием было показано, что фрактальная размерность и условия осаждения плёнки взаимосвязаны. Причём именно фрактальная размерность, а не шероховатость наиболее полно отражает условия осаждения, а значит и свойства материалов. Установлена также связь между параметрами поверхности и такими свойствами материалов как поверхностная проводимость [80] и ток утечки конденсатора [81]. Также существует связь между фрактальной размерностью и прочностью материала [82]. Эти факты указывают на перспективность использования фрактального числа для характеристики микрогеометрии поверхности.

При помощи СЗМ можно исследовать поверхностную геометрию с разрешением вплоть до атомарного, то есть определять положение каждого отдельного атома на поверхности. И даже на атомных масштабах неизбежно появляются объекты фрактального типа.

Евклидова геометрия, утверждает, что пространство ровное и плоское. Свойства такого пространства задают точки, линии, углы, треугольники, ку-

бы, сферы, тетраэдры и т.д. Идеальная линия имеет размерность 1, плоскость 2, шар 3. Но в реальном мире трудно найти такие объекты, поэтому евклидова геометрия - это слишком грубая идеализация. Интуитивно понятно, что размерность прерывистой линии заключена между 0 и 1, а ломаная кривая имеет размерность от 1 и 2. Отсюда неизбежно следует необходимость введения дробных размерностей и понятия фрактал.

Термин фрактал был введен Бенуа Мандельбротом более 30 лет назад, но до сих пор однозначного определения не существует [83]. Гораздо легче описать фракталы, чем определить их. Название «фрактал» происходит от латинского *fractus*, что означает дробный, ломаный.

Поэтому понятие фрактала связывают с шероховатой поверхностью рассматриваемых физических объектов или с изломанными формами их атомной структуры, обладающими свойством самоподобия. Фрактал - самоподобная структура, чье изображение не зависит от масштаба.

Вырезав небольшую часть из структуры, имеющей свойства фрактальности, мы можем рассмотреть её в некотором увеличении и обнаружить, что она подобна всей структуре в целом. Вырезав ещё более мелкую часть из уже вырезанной части и увеличив её, мы опять обнаружим, что и она подобна первоначальной структуре.

Если рассматривать идеальную фрактальную структуру, то такую операцию можно проделывать до бесконечности и даже самые микроскопические частички будут подобны структуре в целом.

В качестве примеров естественных (природных) фракталов можно привести деревья, облака, реку и разветвленную сеть ее притоков, систему кровообращения человека, морозные узоры на стекле [84].

Фрактальная размерность является характеристикой формы объектов системы и может быть измерена различными экспериментальными методами. Процесс вычисления ФР условно можно разбить на два этапа, этап получения экспериментальных данных и этап математической обработки экспериментальных данных.

Для анализа фрактальности поверхности подложек использовался сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ), а расчёт фрактальной размерности проводился по озёрному алгоритму.

Суть метода в следующем: поверхность рассекается плоскостью и на сечении поверхности находятся односвязанные области (“островки”). Затем откладывается зависимость их периметра от площади в двойном логарифмическом масштабе. И из наклона этой кривой определяется фрактальная размерность поверхности.

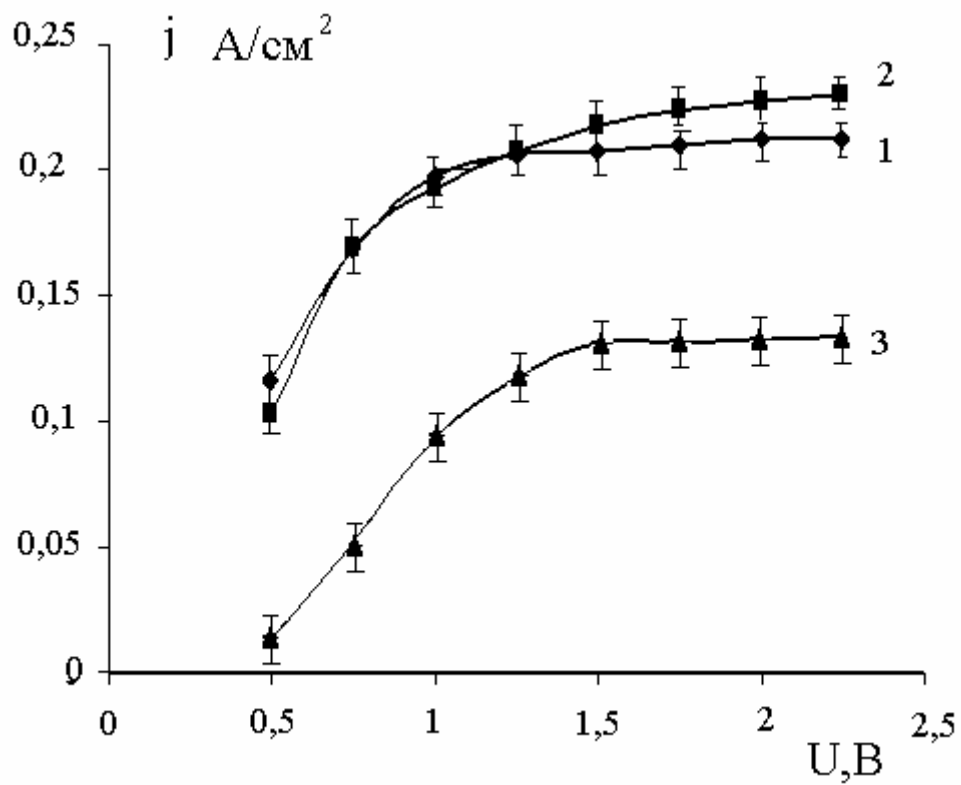
5.3. Влияние ИЛТ кварца на шероховатость его поверхности.

Для проведения работ использовалась модернизированная вакуумная камера установки УРМ 3.279.029 (рис. 2.4) и пучковый источник ионов «Радикал М-100», показанный на рис. 2.5.

В качестве газов для ионного травления использовались аргон и пары CCl_4 и SiCl_4 . Аргон находился под высоким давлением в баллоне. CCl_4 и SiCl_4 содержались в отдельных стеклянных резервуарах, поскольку при комнатной температуре они существуют в жидком состоянии. Напуск рабочего газа непосредственно в ионный источник (3) осуществлялся ручными натекателями (4). В случае CCl_4 или SiCl_4 для удаления атмосферных газов ёмкости, содержащие жидкость прокачивалась в течение 30 мин. в первом цикле после заливки и 5 мин. в последующих циклах. В процессе травления фиксировались ток магнита, ускоряющее напряжение, рабочее давление и соответствующий данным режимам ток разряда. Предельное и рабочее давление в камере измерялось вакуумметром ВИТ-2 с датчиком ПМИ-2, время травления измерялось секундомером, остальные характеристики задавались и контролировались блоком питания источника ионов.

На рис. 5.1 - 5.5 приведены зависимости плотности тока от ускоряющего напряжения при различных давлениях в Аг в некотором диапазоне расстояний S в миллиметрах от источника до подложки.

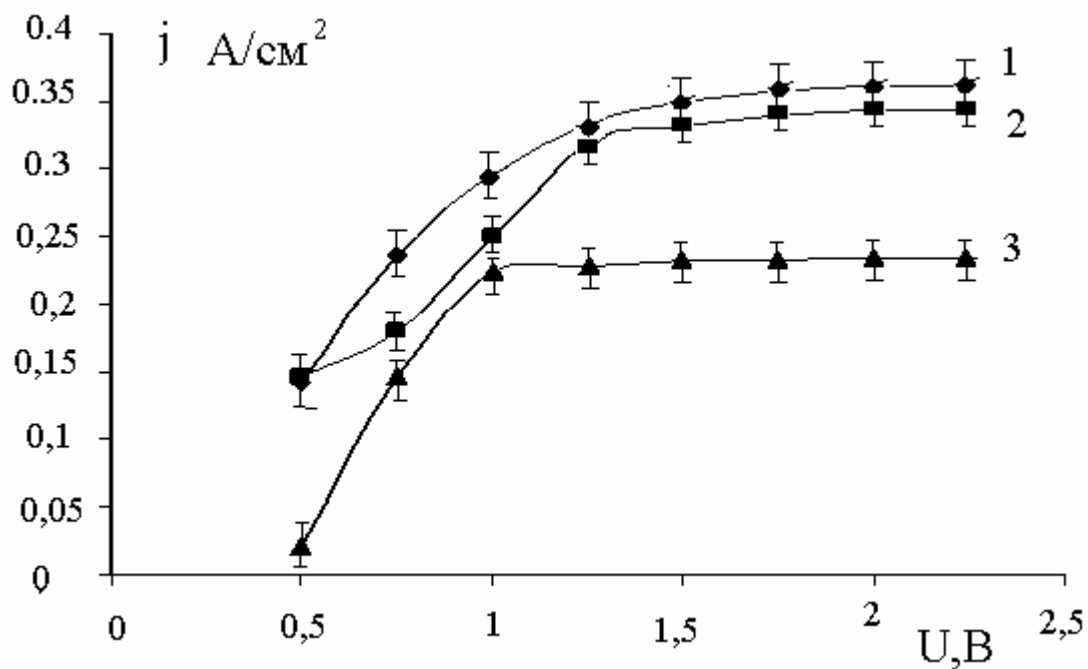
Зависимость плотности тока от напряжения при давлении $8 \cdot 10^{-2}$ Па



1 - S = 40, 2 - S = 80, 3 - S = 130

Рис. 5.1.

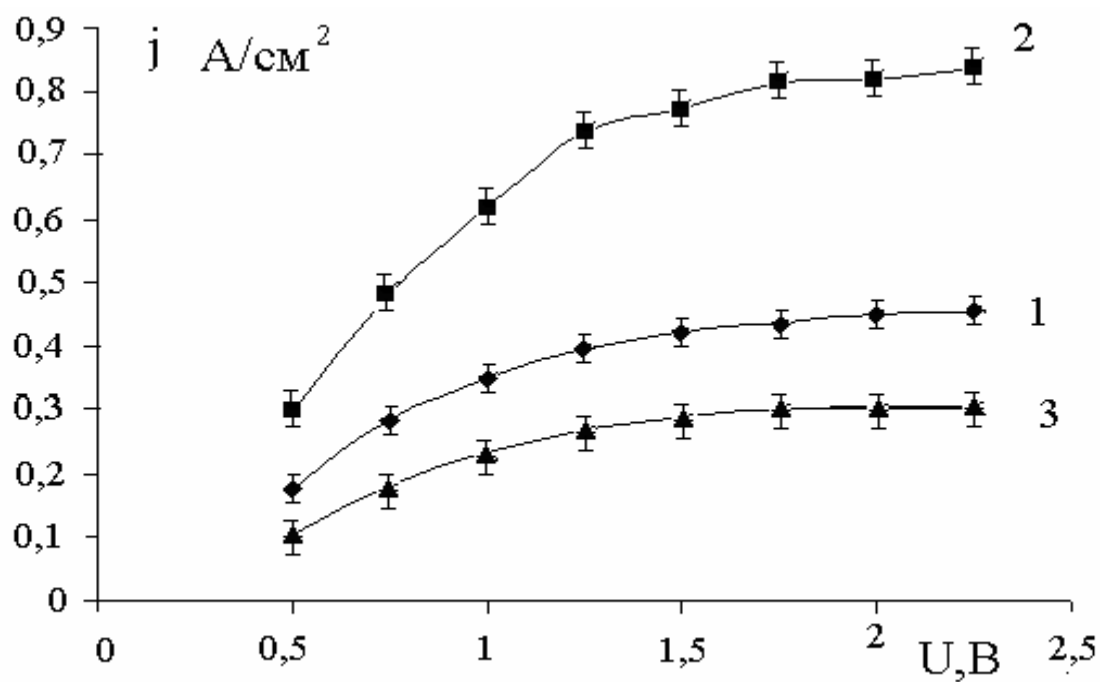
Зависимость плотности тока от напряжения при давлении $1 \cdot 10^{-1}$ Па



1 - S = 40, 2 - S = 80, 3 - S = 130

Рис. 5.2.

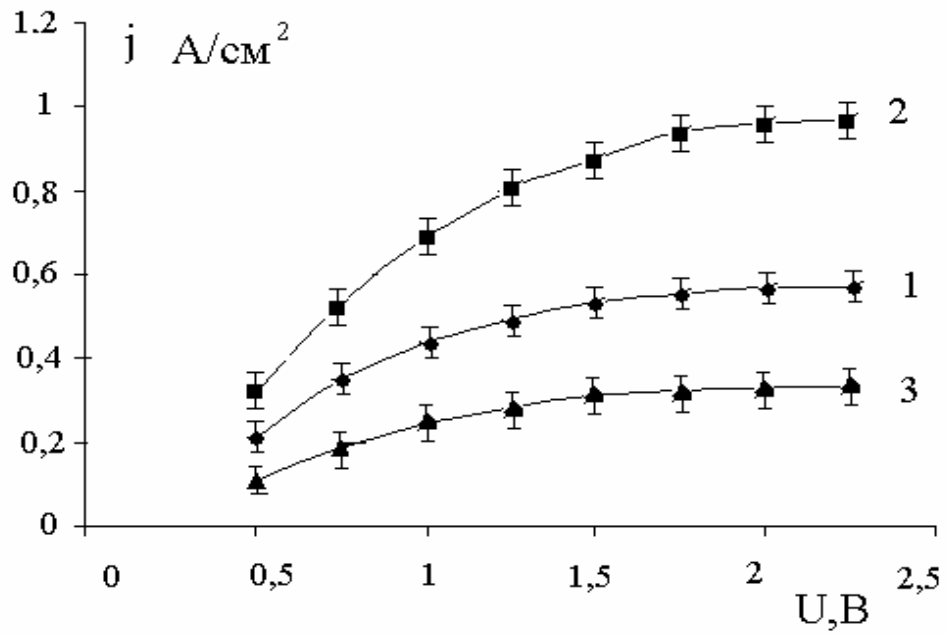
Зависимость плотности тока от напряжения при давлении $1,4 \cdot 10^{-1}$ Па



1 - $S=80$, 2 - $S=40$, 3 - $S=130$

Рис. 5.3.

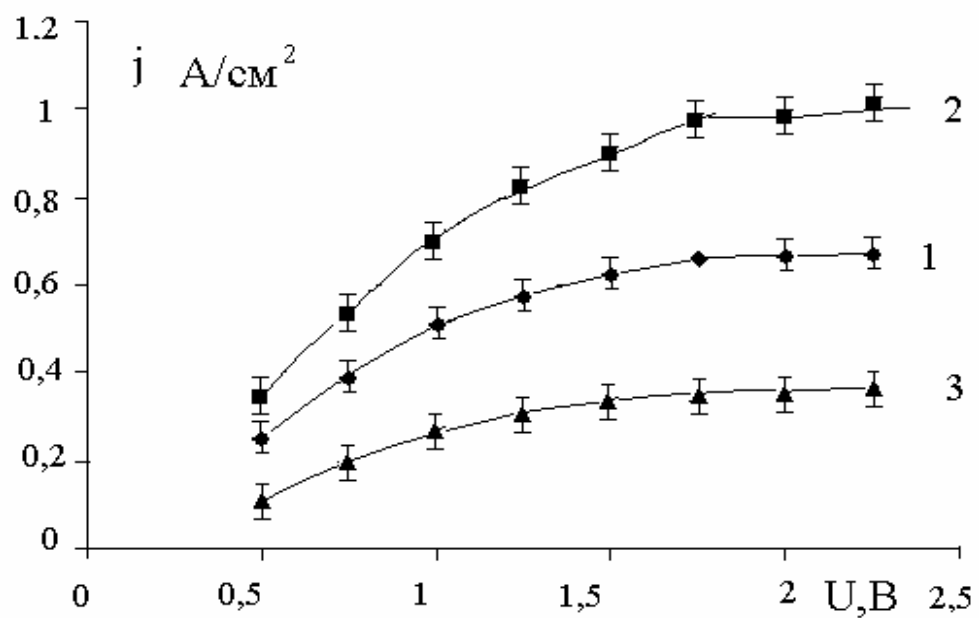
Зависимость плотности тока от напряжения при давлении $1.6 \cdot 10^{-1}$ Па



1 - S = 80, 2 - S = 40, 3 - S = 130

Рис. 5.4.

Зависимость плотности тока от напряжения при давлении $1.8 \cdot 10^{-1}$ Па



1 - S = 80, 2 - S = 40, 3 - S = 130

Рис. 5.5.

Как видно из данных приведенных на рис. 5.1 - 5.5 плотность тока источника пропорциональна рабочему давлению. Точность используемого прибора ВИТ-2 составляет $\pm 30\%$, поэтому для повышения воспроизводимости результатов выставлялось рабочее давление, фиксировался ток разряда ионного источника. Дальнейшие циклы при том же давлении проводились с контролем тока разряда, это повышало воспроизводимость экспериментов.

Для анализа шероховатости поверхности использовался сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) SOLVER-R47 [51]. Методика замера шероховатости изложена в главе 3.2.4.

Проводилось ионно-лучевое или реактивно-лучевое травление в двух режимах: при давлении 10^{-1} Па («мягкий» режим) и при давлении $1.4 \cdot 10^{-1}$ Па («жесткий» режим).

Травление в аргоне проводилось при токе разряда $J_{раз} = 100$ мА, $U = 1,5$ кВ и $J_{раз} = 160$ мА, $U = 1.5$ кВ для «мягкого» и «жесткого» режимов.

Результаты по ионно-лучевому травлению кварца в аргоне представлены в таблице 5.2

Таблица 5.2

Статистические данные ИЛТ в аргоне

Параметры	Необработанная поверхность	обработанная поверхность	
		1 цикл, %	2 цикл, %
Высота неровностей по 10 точкам Rz	26 нм	-20%	-76%
Среднее значение высоты	31 нм	-47%	-80%
Среднее арифметическое отклонение профиля (средняя шероховатость) Ra	6 нм	-62%	-60%
Наибольшая высота неровностей профиля Rmax	53 нм	-20%	-76%

Улучшение параметров поверхности материала в первом цикле (мягкий режим) составляет, в среднем, около 40 %. Второй цикл обработки (жесткий режим) дает улучшение около 75 %.

Было проведено исследование влияния угла падения ионов аргона на шероховатость поверхности кварца. Результаты приведены на рис. 5.6.

Вывод: При ионно-лучевом травлении кварца в среде Ar улучшение наблюдается при углах 75° , 60° , 45° , в остальных случаях идет ухудшение статистических параметров. Рекомендуется травление при 60° .

Травление в SiCl_4 проводилось при токе разряда $J_{\text{раз}} = 80$ мА, $U = 1$ кВ и $J_{\text{раз}} = 110$ мА, $U = 1$ кВ для «мягкого» и «жесткого» режимов.

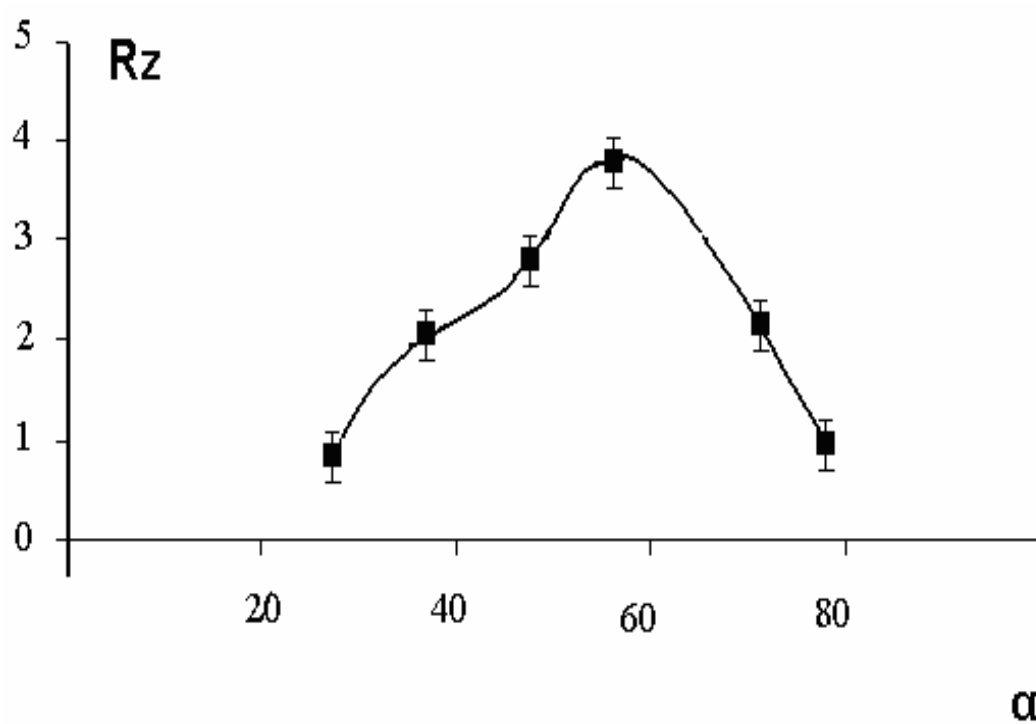
Травление в CCl_4 проводилось при $J_{\text{раз}} = 100$ мА, $U = 1.5$ кВ и $J_{\text{раз}} = 120$ мА, $U = 1.5$ кВ для «мягкого» и «жесткого» режимов соответственно.

В результатах, полученных при РИЛТ в SiCl_4 и CCl_4 , наблюдается увеличение параметров шероховатости по сравнению с исходными образцами. Данные приведены в таблицах 5.3 и 5.4.

В первом цикле (мягкий режим) статистические параметры обработанной поверхности ухудшились, в целом, на 40%. Во втором цикле параметры обработанной поверхности ухудшились, во втором цикле (жесткий режим) на 80%. При реактивном ионно-лучевом травлении в SiCl_4 и CCl_4 наблюдается увеличение параметров шероховатости по сравнению с исходными образцами. В ионном источнике SiCl_4 и CCl_4 разлагаются с образованием радикалов: $\text{SiCl}_4 - \text{SiCl}_3, \text{SiCl}_2, \text{SiCl}, \text{Cl}_2, \text{Cl}$ с атомными массами 134.5, 99, 63.5, 70.9, 35.5 а.е.м.; $\text{CCl}_4 - \text{CCl}_3, \text{CCl}_2, \text{CCl}, \text{Cl}_2, \text{Cl}$ с атомными массами 118.5, 83, 47.5, 35.5 а.е.м. соответственно.

Образовавшийся пучок ионизированных радикалов мультиинтенсивный, у каждого радикала различный коэффициент распыления. В результате получаем, что пучок ионов «разъедает» поверхность неоднородно и ее параметры после обработки ухудшаются. При обработке кварца добавляется реактивная составляющая травления, что приводит к увеличению шероховатости с ростом плотности тока разряда.

Зависимость шероховатости поверхности от угла падения ионов



Rz - улучшение параметров шероховатости в относительных единицах,
α - угол падения ионов.

Рис.5.6

Таблица 5.3.

Ионное травление в SiCl_4

Параметры	необработанная поверхность	обработанная поверхность	
		1 цикл, %	2 цикл, %
Высота неровностей по 10 точкам Rz	40. нм	80%	6%
Среднее значение высоты	20, нм	90%	50%
Среднее арифметическое отклонение профиля (средняя шероховатость) Ra	2, нм	60%	20%
Наибольшая высота неровностей профиля Rmax	86 нм	80%	-10%

Таблица 4.4

Ионное травление в CCl_4

Параметры	необработанная поверхность	обработанная поверхность	
		1 цикл, %	2 цикл, %
Высота неровностей по 10 точкам Rz	24 3 нм	40%	90%
Среднее значение высоты	16 нм	10%	90%
Среднее арифметическое отклонение профиля (средняя шероховатость) Ra	5, нм	-35%	35%
Наибольшая высота неровностей профиля Rmax	48 нм	40%	80%

5.4. Зависимость шероховатости и фрактальности поверхности кварца от среды проведения ИПТ

Для проведения работ использовалась модернизированная вакуумная камера установки УРМ 3.279.029 (рис 2.4) с ВЧ-электродом (рис.2.7).

Травление (обработка) кварца проводилось в среде кислорода и аргона. ИПТ проводилось при постоянном времени травления $t = 300\text{с}$, рабочем давлении среды - $P_{\text{раб}} = 1\text{Па}$, менялась лишь рабочая мощность - 100 Вт, 200Вт, 300Вт, 400Вт.

Полученные образцы исследовались на АСМ. Первоначально сканировалась область размерами $60 \times 60\text{мкм}$, затем выбиралась лучшая размерами $20 \times 20\text{мкм}$.

Анализ полученных данных затруднён тем обстоятельством, что изначально подложки сами имеют разную шероховатость. Разброс значений начальных шероховатостей велик, что затрудняет интерпретацию полученных результатов.

В таблице 5.5 приведены данные по влиянию мощности ВЧ разряда в среде кислорода на шероховатость и фрактальную размерность D поверхности кварца.

На рис. 5.8 и 5.9 приведены зависимости изменения фрактальной размерности D и зависимости изменения шероховатости от рабочей мощности $P_{\text{раб}}$, Вт (среда - O_2). Изменение параметров шероховатости дано по параметру R_z в относительных единицах.

Таблица 4.5

Влияние мощности ВЧ разряда в среде кислорода на шероховатость поверхности кварца

Параметр	100 Вт				200 Вт			
	необработанная		обработанная		Необработанная		обработанная	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Ry(nm)	10	24	9	9	204	211	56	44
Rz(nm)	4	10	4	5	98	101	21	18
Ra(nm)	0,6	0,8	0,5	0,5	9	9	2	1
Rq(nm)	0,8	1,4	0,7	0,7	18	19	3	2
D	2,88		2,8		2,87		2,75	

Параметр	300 Вт				400 Вт			
	необработанная		обработанная		Необработанная		обработанная	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Ry(nm)	49	45	37	45	50	41	41	34
Rz(nm)	19	12	18	7	19	17	18	12
Ra(nm)	2	3	2	3	2	2	2	2
Rq(nm)	3	4	3	3	3	3	3	3
D	2,85		2,69		2,89		2,66	

Зависимость изменения фрактальной размерности D от рабочей мощности
 $P_{\text{раб}}$, Вт (среда- O_2)

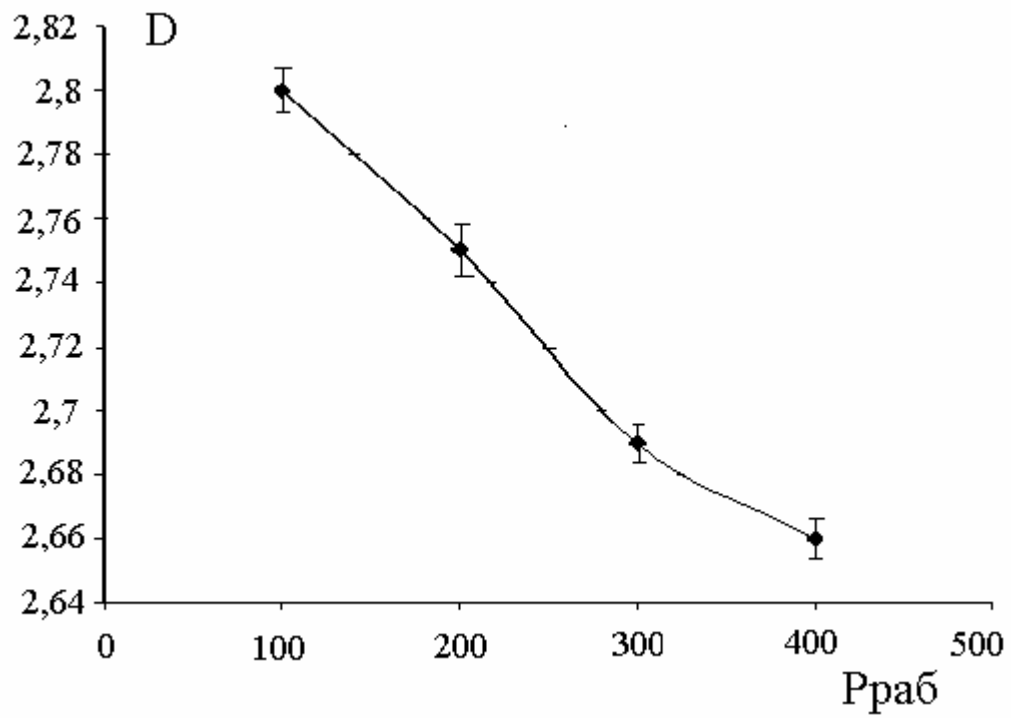
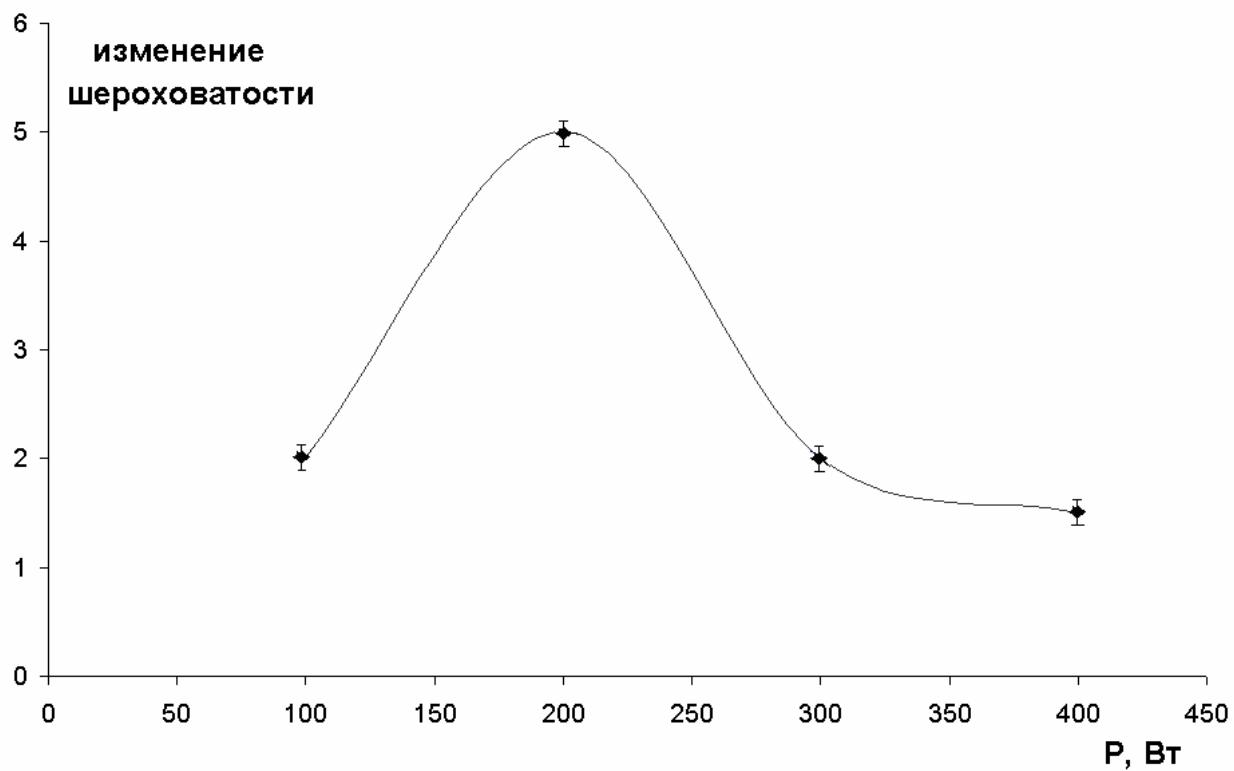


Рис 4.7

Зависимость изменения шероховатости от рабочей мощности



Среда - O₂ , P_{раб} = 1 Па, t = 300с

Рис. 4.8.

В таблице 5.6 приведены данные по влиянию мощности ВЧ разряда в среде аргона на шероховатость поверхности кварца.

Таблица 5.6

Параметр	100 Вт				200 Вт.			
	необработанная		обработанная		необработанная		обработанная	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Ry(nm)	70	50	63	44	60	30	30	7
Rz(nm)	91	60	45	23	55	40	40	13
Ra(nm)	4	2	2	1	2	1	2	1
Rq(nm)	5	3	3	2	3	1	2	1
D	2,76		2,75		2,77		2,73	

Параметр	300 Вт.				400 Вт.			
	необработанная		обработанная		необработанная		обработанная	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Ry(nm)	23	21	18	15	40	20	21	20
Rz(nm)	19	14	17	10	50	25	40	20
Ra(nm)	2	1	2	1	2	1	2	1
Rq(nm)	3	1	2	1	3	1	2	1
D	2,75		2,68		2,76		2,66	

На рис. 5.10 и 5.11 приведены зависимости изменения фрактальной размерности D и зависимости изменения шероховатости от рабочей мощности P_{раб}, Вт (среда - O₂). Изменение параметров шероховатости дано по параметру Rz в относительных единицах.

Зависимость изменения фрактальной размерности D от рабочей мощности $P_{\text{раб}}$, Вт (среда-Ar)

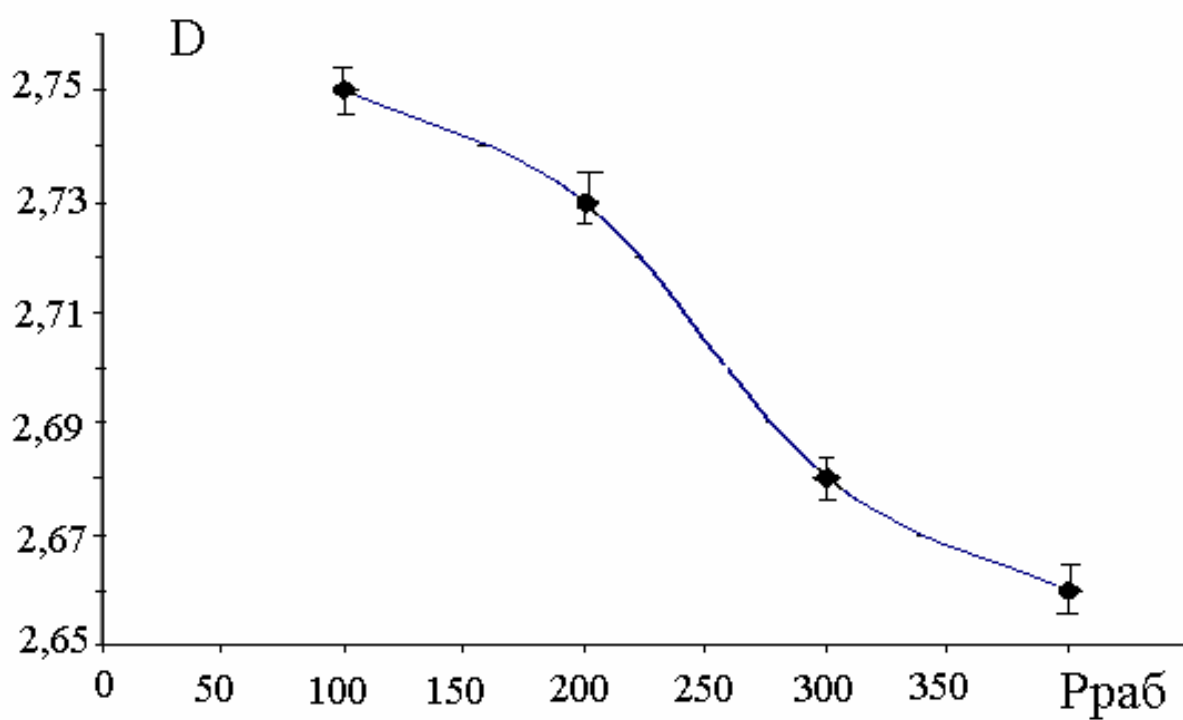


Рис 5.9

Зависимость изменения шероховатости от рабочей мощности

Аргон $P_{\text{раб}}=1 \text{ Па}$, $t=300\text{с}$

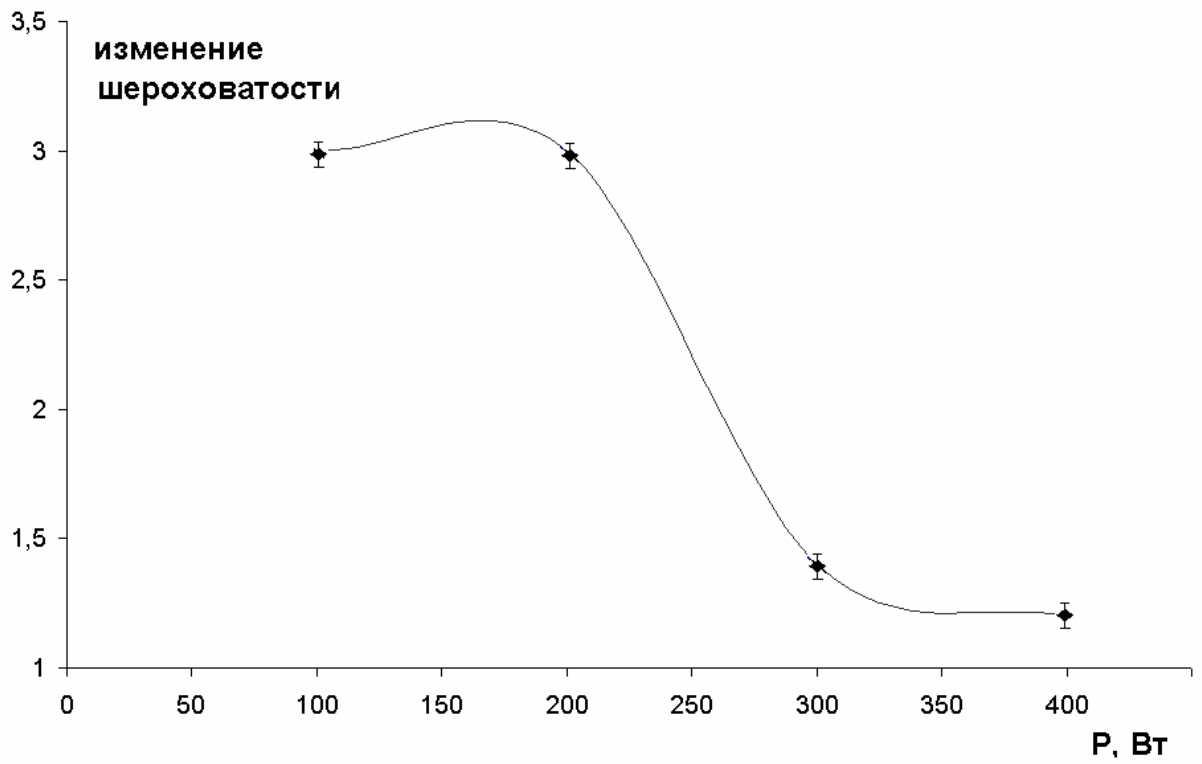


Рис. 5.10.

Различие зависимостей изменения шероховатости поверхности подложек от мощности в аргоне и кислороде можно объяснить их разной атомарной массой: 40 и 16 а.е.м. соответственно. Вследствие этого ВЧ - обработка ионами аргона требует меньшей мощности. Однако при обработке в кислороде присутствует реактивная составляющая, что делает обработку более эффективной. Фрактальная размерность с ростом мощности ВЧ - разряда уменьшается, что доказывает улучшение параметров поверхности.

Выводы по пятой главе.

1. При ИЛТ в аргоне улучшение параметров поверхности материала в первом цикле (мягкий режим) составляет, в среднем, около 40 %. Второй цикл обработки (жесткий режим) дает улучшение около 75 %.
2. Исследовано влияния угла падения ионов аргона на шероховатость поверхности кварца. При ионно-лучевом травлении кварца в среде Ar улучшение наблюдается при углах 75° , 60° , 45° , в остальных случаях идет ухудшение статистических параметров. Рекомендуется травление при 60° .
3. В результатах, полученных при РИЛТ в SiCl_4 и CCl_4 , наблюдается увеличение параметров шероховатости по сравнению с исходными образцами. В первом цикле (мягкий режим) статистические параметры обработанной поверхности ухудшились, в целом, на 40 %. Во втором цикле (жесткий режим) параметры обработанной поверхности ухудшились на 80 %.
4. Оптимальные режимы обработки ИПТ:
 $A_{\text{раз}} = 200 \text{ Вт}$, $P = 1 \text{ Па}$, уменьшение шероховатости в 5 раз (Среда - O_2).
 $A_{\text{раз}} = 100 - 200 \text{ Вт}$, $P = 1 \text{ Па}$, уменьшение шероховатости в 3 раза (Среда - Ar).

Основные научные результаты и выводы

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. Исследовано реактивное ионно-лучевое травление кварца в хлорсодержащих газах. Определены режимы травления кварца, 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. Исследовано ионно-лучевое травление кварца с использованием твердотельного источника фтора. Использование твердотельного источника фтора при ионно-лучевом травлении кварца дает увеличение скорости травления в 1,7 – 2,8 раза и составляет 60 нм/мин.
5. Исследованы ионно-лучевые и ионно-плазменные процессы полировки кварца. Определены режимы ионно-плазменной обработки, обеспечивающие уменьшение шероховатости кварца в 5 раз: мощность разряда - 300 Вт, давление - 1 Па, среда - O_2 .

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи

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.

Материалы конференций

1. 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.
2. 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.
3. 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. ????
4. 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.
5. 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.
6. Ветошкин В.М., Крылов П.Н. Влияние обработки низкоэнергетическими ионами на шероховатость подложек из ситалла, поликора кварца. //Труды восемнадцатой международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью». М., 2007, Т.1. С. 127-129.
7. Ветошкин В.М., Крылов П.Н. Особенности ионно-лучевого травления кварца в среде хлорсодержащих газов. //Труды восемнадцатой международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью». М., 2007, Т.1. С. 130-132.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменная технология в производстве СБИС: Перевод с англ. С сокращениями./ Под редакцией Н. Айнспрука, Д. Брауна. – М.: Мир, 1987.
2. В. А. Матвеев. В. И. Липатников. Проектирование волновых твердотельных гироскопов. Издательство МГТУ им. Н, Э. Баумана.
3. А. А. Голубский, Н. Г. Казанцева, А. А. Лавренов, А. В. Лушников, Ю. Г. Жукова. Пав-резонаторы с отражательными решетками в виде канавок.// Материалы Международной научно-практической конференции, 2003, с.
4. Киреев В. Ю., Данилин Б. С., Кузнецов В. И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур. –М.: Радио и связь, 1983.
5. Harper J. M. E., Cuomo J. J., Kaufman H. R. Material Processing with Broad-Beam Ion Sources // Ann. Rev. Mater. Sci. 1983, Vol. 15, № 1, p. 413-439.
6. Chuang T. J. Laser-Enhanced Gas-Surface Chemistry: Basic Processes and Applications //J. Vac. Sci. Technol. 1982. Vol. 21, № 3. P. 798-806.
7. Mcbrath T. Applications Of Excimer Lasers in Microelectronics // Solid State Technol. 1983. Vol. 26, № 12. P.165-169.
8. Coburn J. W., Winters H. F. Plasma-Assisted Etching in Microfabrication // Ann. Rev. Mater. Sci. 1983, № 13, p. 91-116.
9. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Вакуумно-технические проблемы ионного, ионно-химического и плазмохимического травления: Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. 1985, вып. 5(1050) (ЦНИИ “Электроника”).
10. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Сырчин В. К. Энергетическая эффективность процесса ионного распыления материалов и систем для его реализации //Физика и химия обработки материалов. 1979. № 2. С. 52-56.
11. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бериша: перевод с англ. –М.: Мир, 1984.
12. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Ионное травление микроструктур. –М.: Советское радио, 1979.

13. Плешивцев Н. В. Физические проблемы катодного распыления. –М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1979.
14. Westwood W. D. Calculation of Deposition Rates in Diode Sputtered Systems // J. Vac. Sci. Technol. 1978, Vol. 15, № 1, P. 1-9.
15. Meyer K., Shuller I. K., Falco C. M. Thermalization of Sputtered Atoms // J. Appl. Phys. 1981, Vol. 52, № 9, p. 5803-5805.
16. Mase H., Tanabe T., Miyamoto G. Direct Measurement of Diffusion Coefficients of Sputtered Atoms in Ar//J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50, № 5, p. 3684-3686.
17. Bollinger D., Lida S., Matsumoto O. Reactive Ion Etching: It's Basis and Future // Solid State Technology. 1984, Vol. 27, № 5-6, p. 111-117, 167-173.
18. Данилин Б. С. Магнетронные распылительные системы – универсальный метод получения тонкоплёночных структур // Электронная техника. Сер. 6. Материалы 1983. Вып. 6 (179), с. 65-73.
19. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Назаров Д. А. Реактивное ионное травление. //Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. 1984. Вып. 1 (1010) (ЦНИИ Электроника). 71 с.
20. Rewell P. J., Goldspink G. F. A Review of Reactive Ion Beam Etching for Production // Vacuum. 1984. Vol. 34, № 3-4. p. 455-462.
21. Ким В., Киреев В. Ю., Назаров Д. А. Ионно-лучевое и реактивное ионно-лучевое травление материалов ионами низких энергий. // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1983. Вып. 3 с. 69-72.
22. Марипов О. И., Гусев В. В., Васильков А. К., Кузнецов В. И., Сологуб В. А., Любимов О. И. Устройство травления изделий в вакууме. Авторское свидетельство 1505340 от 06.04.87.
23. Готлиб С. О., Гурский Л. И., Дударчик А. И., Зеленин В. А., Паничев М. И., Рудцевич И. И. Устройство для вакуумно-плазменного травления платин из немагнитных материалов. Авторское свидетельство 1289308 от 18.06.85.

24. Заренкин Н. М., Буравцев А. Т., Красанов В. Г., Логунов В. И., Митин Ю. А., Нагурский В. Б. Устройство ионного травления. Авторское свидетельство 1036076 от 01.06.81.
25. Etching Characteristics of n^+ Poly-S and Al Employing a Magnetron Plasma/H. Okano, Y. Horiike, T. Yamazaki e. a. //Jap. J. Appl. Phys. 1984. vol. 23, , № 4. p. 482-486.
26. Кизиитов К. М. Способ реактивного ионного травления тонких плёнок в ВЧ магнетронном разряде. Авторское свидетельство 1602283 от 04.10.88.
27. Заренкин Н. М., Красанов В. Г., Логунов В. И., Сатаров Г. Х. Агрегат ионного и ионно-химического травления “Трион” с высокочастотной магнетронной системой // Электронная промышленность. 1980, № 5, с. 49-50
28. Наумовец В. Г., Пасечник Л. Л., Ягола В. В. Влияние магнитного поля на высокочастотный разряд // Физика плазмы. 1979, т.5, Вып. 1, с. 179-183.
29. Малинов А. Ю., Сыргин В. К., Кремеров М. А., Ванин А. А., Кузнецов В. И. Способ плазмохимического травления диэлектрических и полупроводниковых материалов. Авторское свидетельство 1308109 от 08.07.85.
30. В. М. Раскатов., В. С. Чуенков., Н. Ф. Бессонова. Машиностроительные материалы. Краткий справочник. М. Машиностроение. 1980
31. А. В. Сулим Производство оптических деталей. Высшая школа Москва 1969
32. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Кузнецов В. И. Вакуумно-плазменные методы травления микроструктур ч.1. Классификация и сопоставление процессов травления. //Электронная техника. Сер.6. Материалы 1982. Вып. 2 (163), с. 3-9.

33. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Кузнецов В. И. Вакуумно-плазменные процессы травления микроструктур ч.2. Рабочие газы. //Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1982. Вып. 4(165), с.3-8.
34. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов.- М.: Энергоатомиздат, 1987.
35. Врублевский Э. М., Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Механизм генерации химически активных частиц (ХАЧ) в плазме бинарных газовых смесей.// Тезисы докладов 7-й всесоюзной конференции “Взаимодействие атомных частиц с твёрдым телом”. Минский радиотехнический институт. 1984 ч. 2, с.301-302.
36. Sato M., Nakamura H. The Effects of Mining N₂ in CCl₄ an Aluminium Reactive Ion Etching// J. Electrochem. Soc. 1982. vol. 129, № 11. p. 2522-2527.
37. Филатов М. Ю., Мышенков С. К., Тянгинский А. Ю., Борисов Ю. В., Густов А. Е., Кубрин В. И. Способ плазмохимического травления кварцевых пластин. Авторское свидетельство 1288640.
38. Евмененко В. А., Михайлов Л. Л., Степанов А. А. Устройство плазменного травления. Авторское свидетельство 1561756 от 12.04.88.
39. Л. Н. Раппо, С. В. Редкин и В. А. Юнкин Способ реактивного ионного травления монокристаллического кварца. Авторское свидетельство 1436776.
40. Киреев В. Ю., Лаврищев В. П., Махов В. И., Ястребов В. П. Устройство плазмохимического травления. Авторское свидетельство 1010881 от 25.02.80.
41. Медведев Н.Г.,Иванов В. И., Онсин В. И. Способ плазмохимического травления тонких пленок. Авторское свидетельство 1210616 от 08. 12. 82.
42. Шелыманов Е. Ф., Медведев Н. Г.,Гущин О. П. Способ реактивно-ионного травления пленок двуокиси кремния нитрида кремния на кремниевой подложке. Авторское свидетельство 1625273 от 26. 05. 89.

43. Установка реактивного ионно-плазменного травления со сканируемым ВЧ магнетроном. //Специальная техника связи. Серия «Технология производства и оборудование». 1987 Выпуск 1 стр. 97-100
44. Установка ионного травления УРМЗ.279.029. Техническое описание
45. Майшев Ю.П., «Источники ионов для реактивного ионно-лучевого травления и нанесения пленок». //Электронная промышленность, 1990, №5, стр.15-18.
46. Крылов П.Г Ветошкин В.М., Данилов А..А. Использование высокочастотного магнетронного разряда для утилизации хлорсодержащих газов. //Приборы и техника эксперимента, 2003,№ 4, стр. 134-137.
47. Найдин О. П. Мандрыгин В. П. Габдулхаков Р. Г. Ветошкин В.М. Исследование возможности применения магнетрона с титановой мишенью для откачки газов в установках магнетронного распыления. //Тезисы докладов Всесоюзной научно-технологической конференции Конструктивно-технологическое обеспечение качества микро-и радиэлектронной аппаратуры при проектировании. Ижевск. 1988 г с 90-91.
48. Масс-спектрометр типа МХ-7304 ЦФ1.560. 014 ТО
49. МИИ -4 Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЛОМО, 1981.
50. Коломийцов . Ю. В. Интерферометры. Основы инженерной теории. Применение. // Машиностроение, Ленинградское отделение, 1976
51. Пресс Ф. П. Фотолитографические методы в технологии поупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Советское радио, 1978
52. Сканирующий зондовый микроскоп Solver P 47-PRO.
53. В. Миронов Основы сканирующей зондовой микроскопии. Техносфера. М. 2004
54. Синяев Г.В., Ватолин Н.А., Трусков В.Г., Моисеев Г.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. М. Наука, 1982.

55. В. М. Ветошкин, О. К. Васюта, П. Н. Крылов, С. С.Алалыкин Локальное высокочастотное магнетронное реактивно-ионное травление кварца. //Приборы и техника эксперимента, 2002, №6, С. 123-126
56. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. Издательство «Химия». Ленинградское отделение. 1977.
57. А. С. Акашкин., В. М. Ветошкин., и Н. Е. Печенкин Устройство для обработки подложек в вакууме. Авторское свидетельство 1665858 от 22.08.89
58. Е. В. Берлин., С. А. Данилин., Сейдман Л. А. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. Москва. Техносфера. 2007
59. В. М. Ветошкин, П. Н. Крылов, М. В.Шинкевич Особенности ионно-лучевого травления кварца и кремния в среде хлорсодержащих газов. //Вестник УдГУ, сер. "Физика", 2007, №4, с.67-76.
60. В. М. Ветошкин, П. Н. Крылов Травление кварца и кремния в среде $\text{SiCl}_4, \text{CCl}_4$. //Международная научная конференция «75лет высшему образованию в Удмуртии», Ижевск, 2006, с.47-48.
61. 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.
62. В. М. Ветошкин, П. Н. Крылов, А. С. Алалыкин Исследование процессов ионно-лучевого и реактивного ионно-лучевого травления плавленого кварца //Вакуумная техника и технология, 2005, том 15, вып.3, с.239-246
63. Ахметов В. Ю., Чернышов А. И., Манукян А. А. Способ плазмохимического травления тонких пленок. Авторское свидетельство 1574115 от 06. 10. 87.
64. Стогний А. И., Новицкий Н. Н., Стукалов О. М. Ионно-лучевое полирование наноразмерного рельефа поверхности оптических материалов. //Письма в ЖТФ-2002. Т.28.вып. 1. С. 39-48.

65. В. М. Ветошкин, П. Н. Крылов, М. В. Шинкевич Влияние ионно-лучевой обработки на шероховатость поверхности подложек. //Международная научная конференция «75 лет высшему образованию в Удмуртии»,Ижевск, 2006, с.47
66. В. М. Ветошкин, П. Н. Крылов, Романов. 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.
67. Гжиров Р. И. Краткий справочник конструктора Л. Машиностроение. 1983
68. Ломов А. А., Бушуев В. А., Караванский В. А. .Исследование шероховатостей поверхности и границ раздела пористого кремния высокоразрешающими рентгеновскими методами. //Кристаллография том 54 № 5 2000 стр. 915-920
69. Востоков Н. В. Гапонов С. В.,Миронов В. Л. Определение эффективной шероховатости подложек из стекла в рентгеновском диапазоне волн поданным атомно-силовой микроскопии. //Поверхность.-2001.-Т 1 С.38 - 42.
70. Афанасев А. М., Александров П. А., Имамов Р. М. Ренгенодифракционная диагностика субмикронных слоев. М. Наука, 1989.
71. Chester S., Wong H.G., Kasper G. A fractal-based method for describing surface roughness and texture // Proc. Of Institute of Environmental Sciences., 1990- p. 316.
72. Proved T., Kunz B. Application of profilometry and fractal analysis to the characterization of coating surface roughness // Progress in Organic Coatings.- 1996.-V.27.-N.1-4.-P.219-226.
73. Tong W.M., Williams R.S. Kinetics of Surface Growth: Phenomenology, Scaling, and Mechanisms of Smoothing and Roughening / Annu. Rev. Phys. Chem.-1994.-V.45.-P.401-438.

74. Collins G.W., Letts S.A., Fearon E.M., McEachern R.L., Bernat T.P. Surface Roughness Scaling of Plasma Polymer Films. // *Phys. Rev Lett.*-1994.-V.73.-№5.-P708-711.
75. Krim J., Palasantzas G. Experimental observations of self-affine scaling and kinetic roughening at sub-micron lengthscales.// *Int. J. Modern Physics B.*-1995.-V.9.-№6.-P.599-632.
76. Iwasaki H. Iwamoto A., Yoshinohu T. // *Mem. Inst. Sci. Res., Osaka Univ.*, 1994-V.51.-P.35-43.
77. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.П. Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* -19990.-.т.65.-№9.-с.27-37.
78. Mandellbrot B.B., Passoja D.E., Paullay A.J. Fractal character of fracture surfaces of metals. // *Nature.*-1984.-V.308.-P.721-722.
79. Pfeifer P., Avnir D., Farin D. Scaling behavior of surface irregularity in the molecular domain: From absorption studies to fractal catalyst. // *J. Stat. Phys.*-1984.-V.36.-P.399-716.
80. Palasantzas G. et al. Electrical conductivity and thin-film growth dynamics // *Phys. Rev. B.*-2000.-V.61.-N.16.-P.1109-1117.
81. Zhao Y.-P., Wang G.-C., Lu T.-M., Palasantzas G., Hosson J. Th. M. De Surface-roughness effect on capacitance and leakage current of an insulating film. // *Phys. Rev. B.*-1999.-V.60.-N.12.-P.9157-9164.
82. Hilders O.A., Pilo D. On the development of a relation between fractal dimension and impact toughness. // *Materials characterization.*-1997.-V.38.-N.3.-P.121-127.
83. B. B. Mandelbrot. *The fractal geometry of nature.* N. Y. Freevfy, 1983
84. Б. Мандельброт. *Фрактальная геометрия природы.* Москва. Институт компьютерных исследований, 2002