

На правах рукописи

МИНКИН Александр Михайлович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА  
МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ  
ТЕКСТУРИРОВАННОЕ МОЛИБДЕНОВОЕ ПОКРЫТИЕ**

05.17.01 – Технология неорганических веществ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Пермь – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Научный руководитель:** **Кетов Александр Анатольевич**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Яценко Елена Альфредовна**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный  
политехнический университет (НПИ) имени  
М.И. Платова», заведующий кафедрой «Общая  
химия и технология силикатов»

**Кондрашова Наталья Борисовна**  
кандидат химических наук,  
«Институт технической химии Уральского  
отделения Российской академии наук» - филиал  
ФГБУН Пермского федерального  
исследовательского центра Уральского отделения  
Российской академии наук, научный сотрудник  
лаборатории многофазных дисперсных систем

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет» (г. Томск)

Защита состоится «10» сентября 2020 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.02, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» ([www.pstu.ru](http://www.pstu.ru)).

Автореферат разослан «19» июня 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.02,  
кандидат технических наук, доцент

  
Калинина Е.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Кварцевые акселерометры являются перспективными приборами современной микросистемой техники, которые позволяют измерять линейное ускорение подвижных объектов. Акселерометры находят широкое применение в авиации и ракетно-космической технике, а также в системах управления автомобилями и в системах навигации и ориентации судов, благодаря высоким точностным характеристикам. На сегодняшний день определены основные принципы конструирования акселерометров, однако, на первое место выходит проблема реализации технологических процессов изготовления чувствительного элемента датчика из кварцевого стекла.

В России для получения кварцевого чувствительного элемента акселерометра используют технологию индивидуальной обработки заготовок с применением пицеиновой маски. В данной технологии используется большое количество трудоемких ручных операций, что ведет к низкому качеству деталей и невысокому проценту выхода годных изделий.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблеме, затрагивающей формообразование микроструктур на поверхности подложки кварцевого стекла, посвящены многочисленные работы как отечественных, так и зарубежных ученых. Существенный вклад в изучении этого вопроса внесли работы зарубежных ученых С. Piescu, D. C. S. Bien, J.Y. Jin, S. Yoo, I. Steingoetter, H. Fouckhardt. В Российской Федерации разработкой и совершенствованием технологий микрообработки стекла занимаются научные коллективы ОАО «Научно исследовательский институт физических измерений» (г. Пенза), АО «Российские космические системы» (г. Москва), Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» - «НИИ Прикладной механики имени В.И. Кузнецова» (г. Москва).

Таким образом, разработка современной технологии, обеспечивающей технические требования, предъявляемые к деталям из кварцевого стекла сложной пространственной формы, является **актуальной задачей** и имеет **научную и практическую ценность**.

Тема диссертации соответствует паспорту специальности 05.17.01 – Технология неорганических веществ: пункт 2 «Технологические процессы (химические, физические и механические) изменения состава, состояния, свойств, формы сырья, материала в производстве неорганических продуктов».

**Целью диссертационной работы является** разработка технологических основ получения кварцевого чувствительного элемента акселерометра методом химического травления во фтороводородной кислоте через текстурированное защитное молибденовое покрытие.

Для достижения этой цели в диссертационном исследовании были сформулированы следующие **задачи**:

- разработка технологических основ формообразования структур кварцевого чувствительного элемента методом химического травления через текстурированное защитное молибденовое покрытие;
- оценка влияния кристаллографической текстуры и микроструктуры пленок молибдена на появление в процессе химического травления точечных дефектов на поверхности подложки из кварцевого стекла;
- исследование особенности зарождения ориентированных кристаллитов молибдена на аморфной подложке;
- установление зависимости структуры и текстуры от технологических параметров процесса магнетронного распыления на постоянном токе.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

1. Впервые установлено, что независимо от уровня пересыщения в системе значительное количество кристаллитов молибдена, сформированных на начальной стадии осаждения, будут иметь ориентацию (110).

2. Выявлено, что снижение количества точечных дефектов (пинголов) на поверхности стекла после химического травления наблюдается у защитных молибденовых покрытий, характеризующихся не только низким уровнем микродеформаций, но и текстурой роста (211), которая формируется в результате перестройки текстуры зарождения (110) в процессе роста пленки.

3. Установлено, что повышение давления рабочего газа при магнетронном распылении в диапазоне от 0,39 Па до 0,74 Па снижает на 30-40 % толщину пленки молибдена, при которой происходит смена начальной текстуры (110) на текстуру роста (211).

**Теоретическая значимость работы.** Полученные в диссертационной работе данные позволили установить некоторые закономерности формирования ориентированных пленок молибдена в процессе магнетронного распыления.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработана и практически реализована оригинальная технология изготовления чувствительного элемента акселерометра, отличающаяся применением процессов фотолитографии и химического травления с использованием текстурированного защитного молибденового покрытия, а также наличием алмазно-абразивной обработки кромки деталей в сочетании с химическим травлением.

2. Определены технологические режимы осаждения текстурированной защитной молибденовой маски. Маска, обладающая достаточной пластичностью, низким уровнем микродеформаций решетки, текстурой роста (211) позволяет выполнять бездефектное глубокое травление кварцевого стекла.

3. Разработана методика оценки уровня пересыщения  $\Delta\mu$  для процесса магнетронного распыления. Проведен анализ влияния технологических параметров, таких как мощность разряда, давление рабочего газа, на величину  $\Delta\mu$ .

4. Выполнены расчеты энергии адсорбции молибдена на отрелаксированной и гидроксильной модельной поверхности (001)  $\alpha$ -кварца, которые могут быть использованы для предсказания тенденции зародышеобразования молибдена на поверхности диоксида кремния.

**Методология и методы исследования.** При выполнении работы проводились расчеты в рамках теории функционала плотности и атомистической теории нуклеации, а также экспериментальные исследования структуры и свойств осажденных пленок молибдена.

**Положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Основы технологии формообразования многоуровневых объемных деталей кварцевого акселерометра методом химического травления через текстурированную защитную молибденовую маску.

2. Совокупность результатов, раскрывающих закономерности влияния текстуры, микроструктуры и микродеформаций на появление в процессе травления точечных дефектов на поверхности стекла.

3. Методика и результаты оценки уровня пересыщения при магнетронном распылении и работы образования на аморфной подложке трехмерных зародышей с ориентацией (*hkl*).

4. Результаты исследований зависимости морфологии, кристаллографической текстуры, размеров кристаллитов и микродеформаций от технологических параметров магнетронного распыления.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается применением современного оборудования и апробированных методов исследования, а также воспроизводимостью экспериментальных результатов.

**Внедрение результатов.** Результаты работы использованы в разработке и внедрении технологии изготовления кварцевого чувствительного элемента акселерометра на предприятии ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь и подтверждены актом внедрения №66/61-30-а от 17.02.2020. По результатам внедрения технологии созданы опытные образцы акселерометров. Работа выполнялась при поддержке программы «УМНИК» АО «ПНППК» дог. №36/0-70-Д от 30.08.2017 г. «Технология прецизионного травления стекла».

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы были представлены на: VI Международной конференции «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к Наноиндустрии», г. Ижевск, (2017 г.); II Международной научно-практической конференции «Технические науки: научные приоритеты учёных», г. Пермь (2017 г.); VI Всероссийской конференции с международным участием «Техническая химия. От теории к практике»,

г. Пермь, (2019 г.); XXI Менделеевском съезде по общей и прикладной химии, г. Санкт-Петербург, (2019 г.); LI Международной научной конференции «Актуальные научные исследования в современном мире», г. Переяславль-Хмельницкий, (2019 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, из которых 2 работы опубликованы в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных изданий и 2 работы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах: Scopus, Web of Science, Chemical Abstracts и GeoRef.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач исследования, обработке и анализе результатов, определении толщины пленок методом оптической профилометрии, разработке методики оценки защитных свойств пленки, написании тезисов докладов и статей по теме диссертации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 104 наименований, 1 приложения. Объем диссертации 116 страниц, включая 51 рисунок и 15 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и основные задачи исследования.

**В первой главе** дается общая характеристика конструкции акселерометра, наиболее значимым элементом которой является маятниковый узел. Представлена блок-схема изготовления данного элемента при помощи пицеиновой маски. Рассматриваются современные технологии микрообработки стекла, среди которых перспективной является химическое травление через тонкопленочную маску во фторсодержащих средах. Доказано, что именно молибден является наиболее подходящим материалом для использования в качестве маски при формировании структур на поверхности кварцевой подложки.

**Во второй главе** описываются методики исследований.

Для напыления покрытий использовалась вакуумная установка НИКА-2012ТН. Режимы напыления представлены в таблице 1. В качестве

подложек использовались пластины из кварцевого стекла марки КУ-1, которые подвергались очистке непосредственно перед осаждением пленки.

Таблица 1 – Технологические режимы осаждения

Параметр	Диапазон давлений аргона, Па	Диапазон мощности разряда, Вт	Диапазон напряжений разряда, В	Расстояние мишень-подложка, см	Скорость осаждения, нм/с
Значение	0,39÷0,74	100÷600	277÷316	8	0,28÷1,95

Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре Bruker D8 AdvanceEco в  $\text{Co-K}\alpha_{1,2}$  излучении (фильтр-Fe). Измерение толщины пленок проводилось на оптическом профилометре Zygo NewView 7300. Морфологию поверхности и состав пленок исследовали сканирующим электронным микроскопом Carl Zeiss FE-SEM Sigma HD со встроенным EDX-анализатором. Механические свойства пленок исследовали на приборе NanoTest-600.

Моделирование адсорбции атомов молибдена выполнено методом теории функционала плотности в программе Quantum Espresso v.6.3. В качестве модельной поверхности были рассмотрены гидроксидированная и отрелаксированная поверхности (001)  $\alpha$ -кварца.

Расчет работы образования ориентированных зародышей молибдена, выполнялся по формуле:

$$A_{(hkl)} = \Delta G_{(hkl)} = -i\Delta\mu + \left[ i\varepsilon_{1/2} - E(i) - i_s\varepsilon_s \right] \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{1/2}$  - работа отделения атома от положения полукристалла, Дж/атом;  $E(i)$  - энергия связи атомов в зародыше;  $\varepsilon_s$  - энергия связи атома зародыша с подложкой, Дж/атом;  $i_s$  - число атомов зародыша, контактирующих с подложкой;  $\Delta\mu$  - изменение химического потенциала, которое определялось по формуле:

$$\Delta\mu = \frac{\Delta H_{vap}}{N_a} \left( 1 - \frac{T_{sub}}{T_{eql}} \right) \quad (2)$$

где  $\Delta H_{vap}$  - разность энтальпий между газовой и конденсированной фазами материала мишени, Дж/моль;  $N_a$  - постоянная Авогадро, 1/моль;  $T_{sub}$  - температура подложки, К;  $T_{eql}$  - равновесная температура газовой фазы, К.



В качестве  $T_{eq1}$  предложено использовать максимальную температуру газовой фазы вблизи поверхности мишени, которая определялась при расчёте распределения температуры газовой фазы между мишенью и подложкой:

$$T(x) = T_{target} + \langle E_A \rangle \Phi_0 \frac{p_0 d_0}{\kappa p} \left( 1 - e^{-\frac{px}{p_0 d_0}} \right) + \frac{x}{d_{sub}} \left( T_{sub} - T_{target} - \langle E_A \rangle \Phi_0 \frac{p_0 d_0}{\kappa p} \left( 1 - e^{-\frac{pd_{sub}}{p_0 d_0}} \right) \right) \quad (3)$$

где  $T_{target}$  - температура поверхности мишени, К;  $d_{sub}$  - расстояние между мишенью и подложкой, см;  $\kappa$  - коэффициент теплопроводности аргона, Дж/К·см·с;  $\Phi_0$  - поток распыленных атомов мишени при нулевом аргоне, атом/см<sup>2</sup>·с;  $p_0 d_0$  - длина зоны термализации распыленных атомов, Па·см;  $\langle E_A \rangle$  - средняя кинетическая энергия распыленных атомов, Дж.

В третьей главе приведены результаты исследований пленок молибдена и их обсуждение. Анализ величин текстурных коэффициентов (рис. 1, а) показывает, что у пленок толщиной  $(1,0 \pm 0,2)$  мкм, полученных при мощности разряда 350 Вт и 600 Вт, с увеличением давления рабочего газа текстура (110) сменяется на текстуру (211). У пленок, осажденных при мощности 100 Вт, такого изменения текстуры не наблюдается. Сопоставление пленок по степени текстурированности (рис. 1, б) показывает, что параметр  $\sigma$  увеличивается с ростом давления рабочего газа и при снижении мощности разряда.

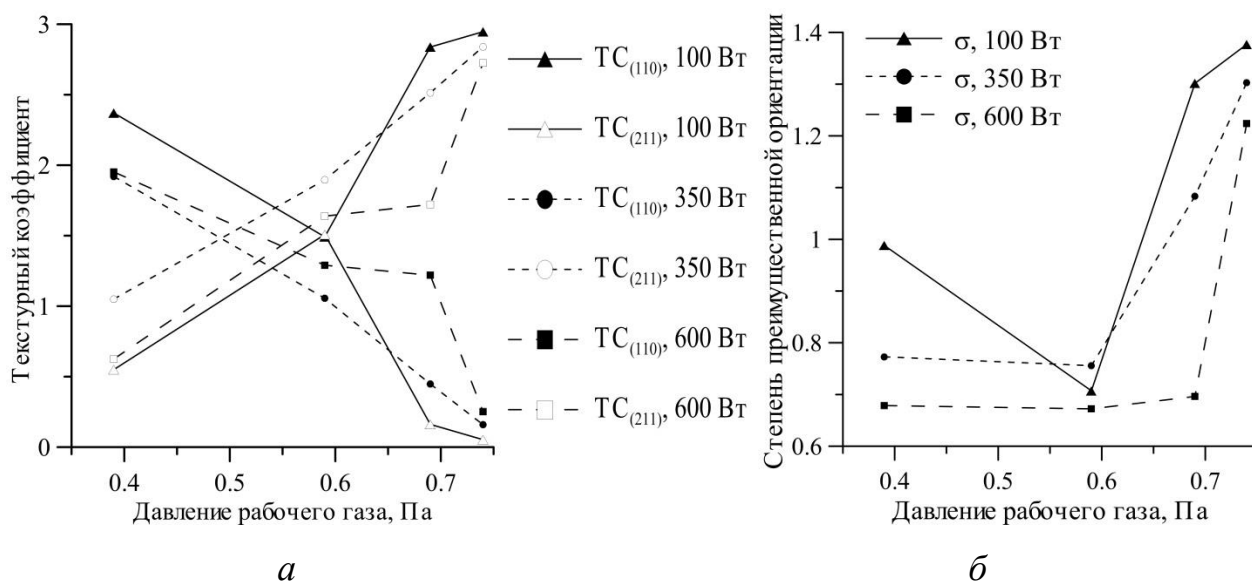


Рисунок 1 - Зависимость текстурных коэффициентов  $TC_{(110)}$  и  $TC_{(211)}$  (а) и степени преимущественной ориентации  $\sigma$  (б) от давления рабочего газа

Также было обнаружено, что у пленок, осажденных при мощности 350 Вт и 600 Вт и давлении 0,74 Па, происходит перестройка текстуры зарождения (110) на текстуру роста (211) при толщине около 0,3 мкм, а при давлении 0,59 – при толщине более 2,0 мкм.

Использование модели минимизации общей энергии позволило объяснить причины формирования новой текстуры роста. Образование текстуры роста (211) наблюдалось при достижении критического значения толщины пленки и было направлено на снижение энергии пленки, за счет уменьшения микродеформации, что подтверждают результаты определения микродеформаций в зависимости от давления газа (рис. 2).

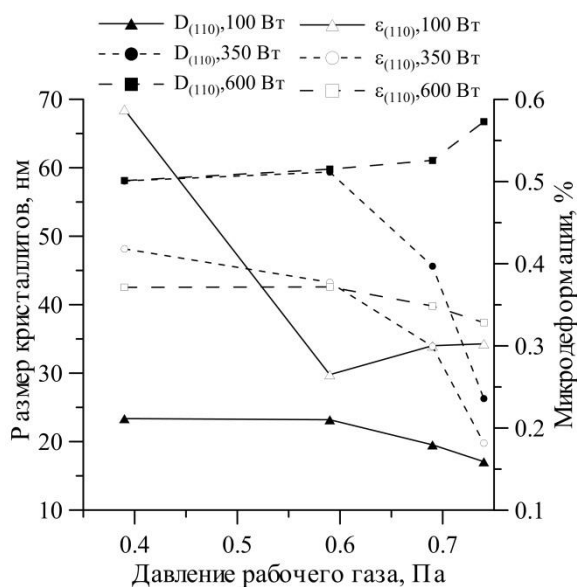


Рисунок 2 - Зависимость размера кристаллитов и величины микродеформаций от давления рабочего газа

образования зародышей с ориентацией (110) должна быть наименьшей по сравнению с работой возникновения зародышей всех других ориентаций. Для определения работы образования зародыша  $A_{(hkl)}$  использовалось уравнение:

$$\Delta G_{(hkl)} = -i \cdot \Delta \mu + [5.263 \cdot i \cdot \epsilon_1 - (N_1 + 0,421 \cdot N_2) \cdot \epsilon_1 - i_s \cdot \epsilon_s] \quad (4)$$

Результаты квантово-химического моделирования процессов адсорбции атомов молибдена на поверхности (001)  $\alpha$ -кварца явно указывают на образование

Отметим, что смена текстуры выполняется лишь в условиях осаждения, характерных для структурной зоны Т, т.е. для пленок, напыленных при мощности 350 Вт и 600 Вт. Кроме того, исходя из полученных экспериментальных данных, можно сделать предположение, что независимо от условий напыления большая часть зародышей молибдена, образующихся на стеклянной подложке, характеризуется текстурой зарождения (110). Следовательно, работа  $A_{(hkl)}$

сильной связи в результате образования комплекса  $\equiv\text{Si-O-Mo}$ . Поэтому величину  $\varepsilon_s$  приняли равной двукратному значению  $\varepsilon_l$ .

В таблице 2 приведена энергия адсорбции атомов молибдена на отрелаксированной и гидроксильированной поверхности (001)  $\alpha$ -кварца. Расчёт показал, что на гидроксильированной поверхности также возможно протекание реакции вытеснения атомарного водорода атомами молибдена. В этом случае, с энергией адсорбции атома молибдена составляет -548,3 кДж/моль.

Таблица 2 - Энергия адсорбции атома молибдена на поверхность (001)  $\alpha$ -кварца

Число слоёв атомов Si-O-O	После релаксации		После гидроксильирования	
	кДж/моль	эВ	кДж/моль	эВ
18	-317,7	-3,29	-241,4	-2,50
18 ( <i>реакция</i> )	-	-	-548,3	-5,68
27	-309,1	-3,20	-225,8	-2,34

Значение пересыщения в системе  $\Delta\mu$  было вычислено при различных условиях магнетронного осаждения. На рисунке 3 показано влияние давления рабочего газа и мощности разряда на  $\Delta\mu$  при  $T_{\text{target}}=375$  К и  $T_{\text{sub}}=355$  К. Таким образом, уменьшение пересыщения  $\Delta\mu$  достигается в результате снижения концентрации расплывленных атомов молибдена над поверхностью подложки, за счет повышения давления рабочего газа и снижения мощности разряда.

Также была получена зависимость  $A_{(hkl)}$  от  $\Delta\mu$  (рис. 4), согласно которой с ростом значения  $\Delta\mu$  работа образования зародыша  $A_{(hkl)}$  с преимущественной ориентацией (110) остается минимальной при любых значениях пересыщения в системе. Отмечено, что с ростом  $\Delta\mu$  разница в значениях работы образования зародышей разных ориентаций постепенно уменьшается, что указывает на уменьшение степени текстурированности ( $\sigma$ ) пленки.

На основании полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований текстуры и структуры пленок молибдена были выявлены технологические факторы, влияющие на получение требуемых структур на подложке из кварцевого стекла.

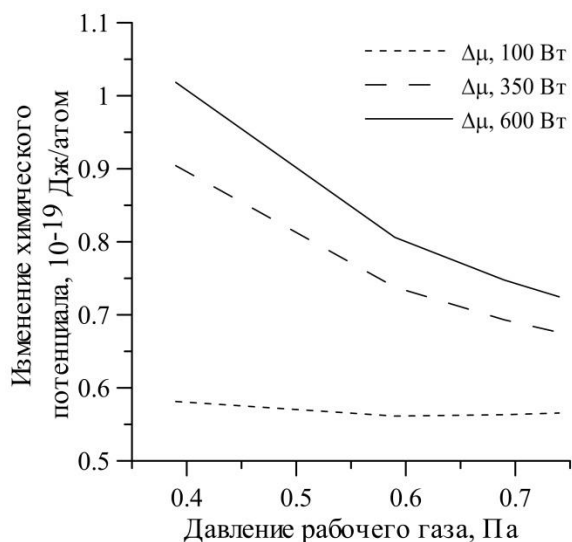


Рисунок 3 - Влияние параметров напыления на пересыщение в системе

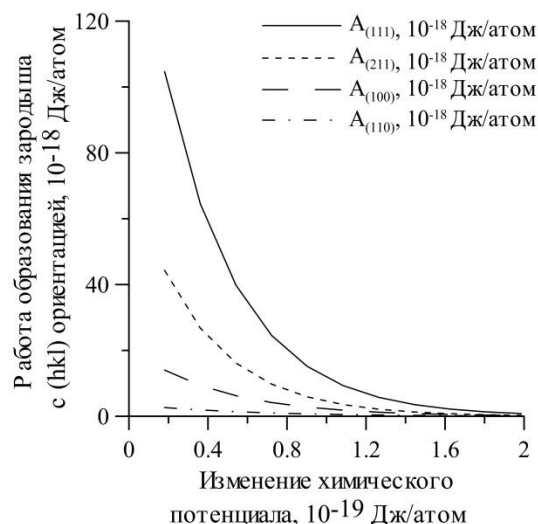


Рисунок 4 - Влияние пересыщения в системе на работу образования ориентированных зародышей

Результаты исследований морфологических и структурных особенностей покрытия позволили установить, что снижение количества точечных дефектов, образующихся на поверхности стекла при длительном травлении, наблюдается у пленок молибдена с текстурой роста (211), которая формируется в результате перестройки текстуры зарождения (110) с увеличением толщины пленки (рис. 5). Так как в пленках молибдена с текстурой (211) происходит сокращение межзеренных границ на их поверхности, что значительно повышает защитные свойства маски.

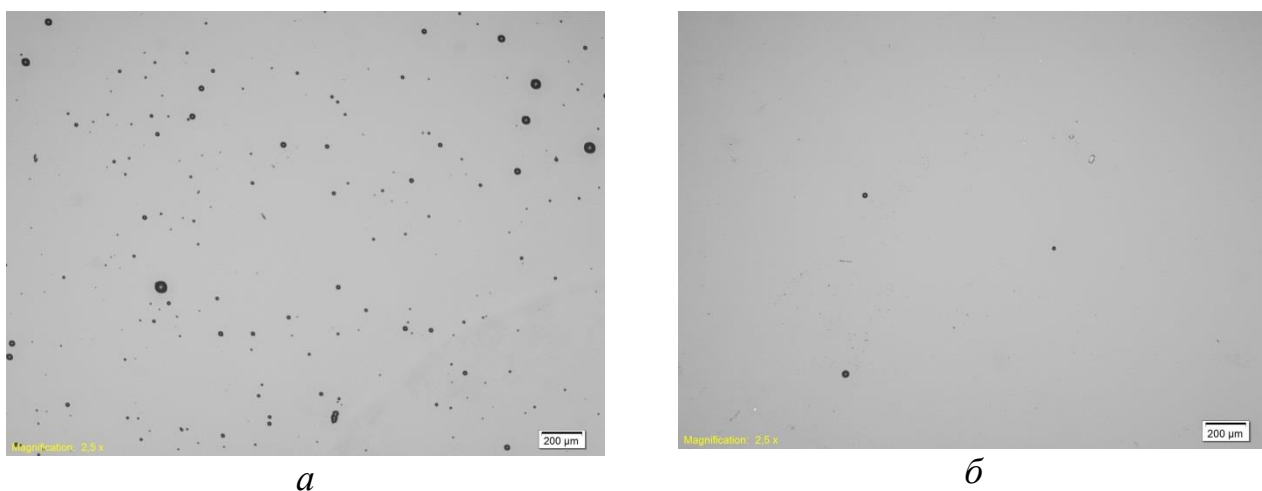


Рисунок 5 - Поверхность стекла после воздействия фтороводородной кислоты на пленки молибдена толщиной  $(1,0 \pm 0,2)$  мкм с текстурой роста (110)-а и (211)-б. Кратность увеличения 2,5х.

Дополнительно были исследованы физико-механические свойства полученных пленок, которые оказывают влияние на появление дефектов на краях сформированных на подложке структур. Из полученных экспериментальных данных следует, что твердость пленок падает от 12,2 ГПа до 8,5 ГПа по мере уменьшения размера кристаллитов от 70 нм до 20 нм, т.е. наблюдается нарушение закона Холла-Петча.

**В четвертой главе** представлена технология формообразования структур кварцевого чувствительного элемента акселерометра. Несмотря на использование стандартных технологических процессов: напыление слоев, фотолитография, травление материала, была разработана уникальная технологическая схема, ввиду конструктивных особенностей чувствительного элемента. Технология отличается применением процессов химического травления через защитную пленку молибдена с текстурой (211), а также наличием алмазно-абразивной обработки боковой поверхности детали.

В качестве исходной заготовки использовалась пластина диаметром 100 мм, на поверхности которой последовательно формировались структуры чувствительного элемента: установочные платики, контуры, упругие перемычки (рис. 6). Для получения данных элементов был разработан и изготовлен комплект фотошаблонов. Операции фотолитографии выполнялись на установках EVG150 и EVG620. В качестве защитной маски для химического травления стеклянной подложки использовалась текстурированная пленка молибдена толщиной 1 мкм, полученная при мощности разряда 350 Вт и давлении рабочего газа 0,69 Па, и обладающая комплексом оптимальных физико-механических свойств.

В процессе двухстороннего изотропного травления формируется V-образный профиль боковой поверхности детали, который затрудняет процесс сборки и использование деталей в акселерометрах. В связи с этим выполняется алмазно-абразивная обработка кромки стекла в сочетании с химическим травлением для удаления нарушенного слоя. Таким образом, удастся обеспечить высокую точность латеральных размеров кварцевого чувствительного элемента.

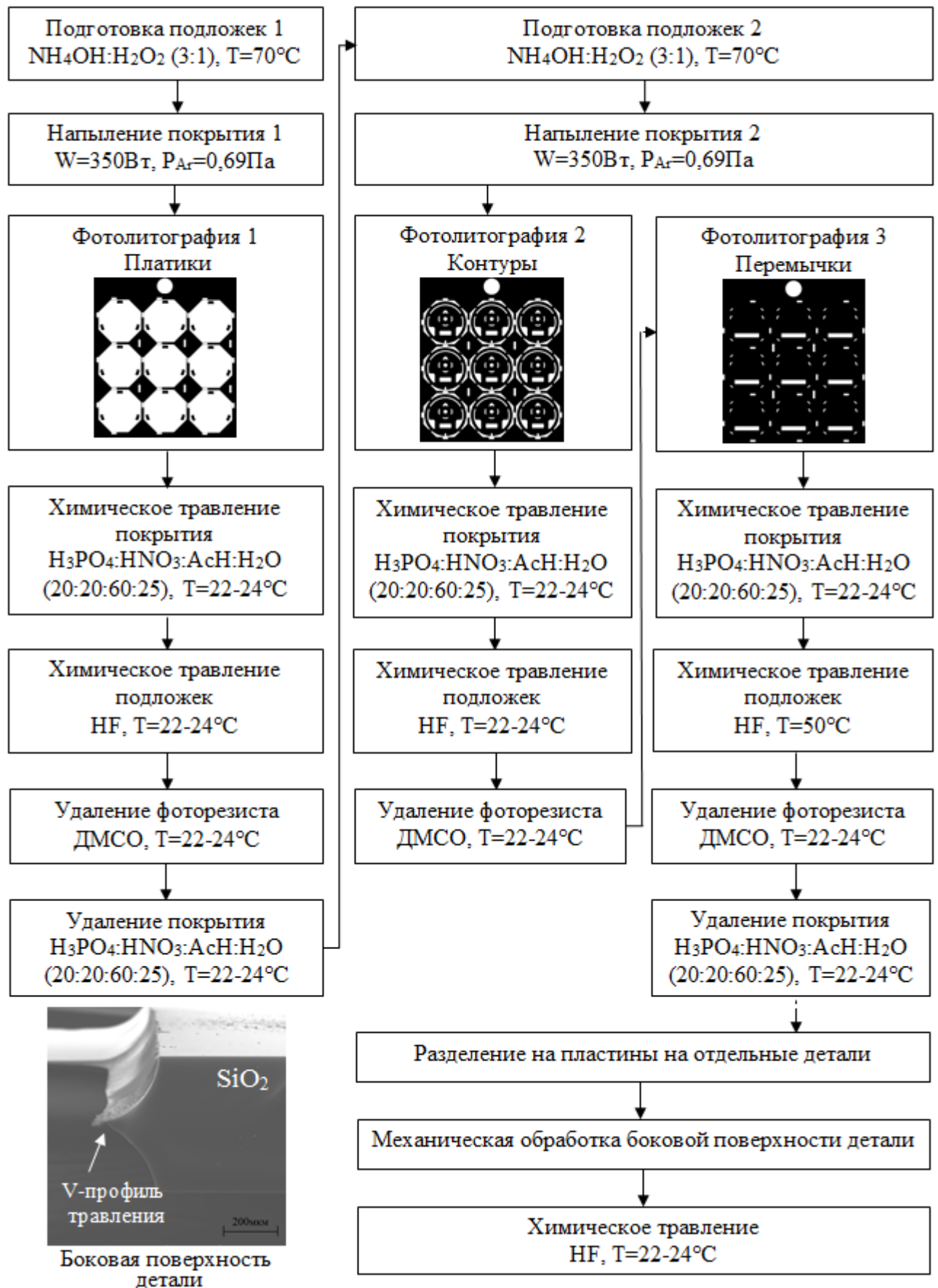


Рисунок 6 – Принципиальная блок-схема процесса изготовления чувствительного элемента

## Заключение

1. Разработаны основы технологии формообразования элементов в производстве кварцевых изделий сложного пространственного строения. Создана технология, обладающая рядом преимуществ, таких как повышение качества изготавливаемых деталей, увеличение экономической эффективности, сокращение уровня негативного воздействия на окружающую среду.

2. Установлено, что применение молибдена в качестве материала защитной маски позволяет сохранить исходное качество поверхности стекла после выполнения глубокого травления. Кроме того, молибденовая защитная маска для микрообработки стекла должна иметь не только микроструктуру, соответствующую переходной структурной зоне Т и минимальный уровень микродеформаций, но и текстуру роста (211), которая формируется в результате перестройки текстуры зарождения (110) с увеличением толщины пленки.

3. Исследованы особенности образования зародышей молибдена на стеклянной подложке, рассчитаны энергии адсорбции атомов молибдена, отрелаксированной и гидроксिलированной модельной поверхности (001)  $\alpha$ -кварца и работы образования трехмерных зародышей с учетом их кристаллографической ориентации. Показано, что независимо от условий магнетронного распыления (мощности разряда и давления газа) бóльшая часть кристаллитов, сформированных на начальной стадии осаждения, будут иметь преимущественную ориентацию (110).

4. Проведено исследование влияния технологических параметров распыления на текстуру, размеры кристаллитов и величину микродеформаций. Выявлены закономерности образования текстуры роста (211) в пленках молибдена со структурой, характерной для переходной структурной зоны Т. Установлено, что повышение давления рабочего газа снижает толщину пленки, при которой происходит смена текстуры роста.

5. Выполнена промышленная апробация технологии на предприятии ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ**

**Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, и в изданиях, приравненных к ним:**

1. Shaburova, N.A. Physical-Chemical Properties of Molybdenum Films Prepared with Magnetron Sputtering / N.A. Shaburova, T.D. Ratmanov, A.M. Minkin // *Solid State Phenomena*. – 2017. – Vol. 265. – P. 3-8 (**Scopus**).

2. Влияние профиля выработки мишени на свойства пленок молибдена / А. М. Минкин, Н. А. Медведева, Д. Д. Ларионов, А. А. Кетов, Я. И. Вайсман // *Журнал прикладной химии*. – 2019. – Т.92, №10. – С. 37-44. [Effect of Target Erosion on Properties of Molybdenum Films / A. M. Minkin, N. A. Medvedeva, D. D. Larionov, A. A. Ketov, Ya. I. Vaisman // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2019. – Vol. 92, №. 10. - P. 1359-1365] (**Chemical Abstracts, GeoRef, Scopus, Web of Science**).

3. Механизмы образования точечных дефектов на поверхности кварцевого стекла при воздействии плавиковой кислоты на защитное молибденовое покрытие / А. М. Минкин, Д.Д. Ларионов, Т.Д. Ратманов, А.А. Кетов, Я.И. Вайсман // *Перспективные материалы*. – 2017. – №6. – С. 41-49.

4. Минкин, А.М. Квантово-химическое моделирование адсорбции атомов молибдена на поверхности оксида кремния / А. М. Минкин // *Вестник технологического университета*. – 2019. – Т. 22, № 11. – С. 74-79.

**Прочие работы по теме диссертации:**

5. Козлов, В.М. Атомистический подход к определению работы образования зародыша при осаждении ОЦК металлов на индифферентную подложку / В. М. Козлов, А.М. Минкин // *Актуальные научные исследования в современном мире*. – 2019. - №7(51) (ч.1). – С.100-105.

6. Минкин А.М. Технология изготовления чувствительного элемента кварцевого акселерометра методом объемной микрообработки / А. М. Минкин // *Прикладная фотоника*. – 2019. – Т. 6, № 3-4. – С. 147-159.