

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОТЗЫВ
РУКОВОДИТЕЛЯ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Бакалаврская работа на тему «Исследование пленок полупроводниковых оксидов методом атомно-силовой микроскопии»

Выполнена студентом Хабибовым А.К.
(инициалы, фамилия)

Факультет информационных технологий и электроники

Кафедра Нано- и микроэлектроника Группа 19ПД1

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»,

Профиль подготовки «Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Квалификация (степень) бакалавр

Руководитель Пронин И.А.
(фамилия, имя, отчество)

Заведующий кафедры НнМЭ ПГУ
(должность и место работы)

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения бакалаврской работы

В ходе выполнения ВКР студент Хабибов А.К. продемонстрировал высокий уровень освоения профессиональных компетенций, связанных с основными областями профессиональной деятельности: проектно-конструкторской и производственно-технологической. При решении задач технического задания ВКР Хабибов А.К. показал хороший уровень теоретической и практической подготовки по основным базовым дисциплинам образовательной программы, а также способности выполнять задачи по получению и исследованию экспериментальных образцов элементов будущих компонентов электронной техники. В ходе выполнения работы были продемонстрированы хорошие навыки работы с ПК, знание компьютерных технологий и умения использовать прикладное программное обеспечение для инженерных расчетов, разработки чертежей, оформления технической и текстовой документации. В период выполнения ВКР Хабибов А.К. продемонстрировал достаточную степень самостоятельности, проявленную при решении конкретных задач представленной ВКР.

Заключение

Выполненная выпускником ВКР полностью соответствует техническому заданию. Степень соответствия подготовленности выпускника соответствует требованиям к результатам освоения программы бакалавриата ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника». На основании вышеизложенного считаю, что ВКР заслуживает оценки «хорошо», а ее автор, Хабибов А.К., присвоения квалификации «бакалавр» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

«19» июня 2023 г.

Руководитель

Пронин И.А.

(инициалы, фамилия)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных технологий
и электроники
наименование факультета

Кафедра
Нано – и микроэлектроника
наименование кафедры

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и нанoeлектроника»
код и наименование

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
наименование профиля

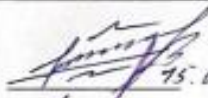
БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПензГУ 02. 11.03.04. 020 ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

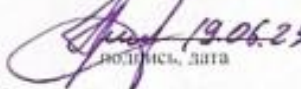
на тему

Исследование пленок полупроводниковых оксидов методом атомно-
силовой микроскопии
тема бакалаврской работы

Студент группы 19ПД1
номер группы

 15.06.23 Хабибов А.К.
подпись, дата фамилия, иници.

Руководитель зав. кафедрой
должность

 19.06.23 Пронин И.А.
подпись, дата фамилия, иници.

ПГУ
наименование организации

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность

 19.06.23 Рыжова Т.Н.
подпись, дата фамилия, иници.

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 15.06.23 № 4)
Заведующий кафедрой  19.06.23 Пронин И.А.
подпись, дата фамилия, иници.

Работа защищена с оценкой хор. (протокол ГЭК от 26.06.23)
Секретарь ГЭК  26.06.23 Вольсков А.А.
подпись, дата фамилия, иници.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка состоит из 46 страниц, 16 рисунков, 5 таблиц, списка использованных источников из 20 наименований и 3-х приложений.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, золь-гель технология, диоксид лова, оксид цинка, тонкие наноструктурированные плёнки, диоксид кремния, подложка.

Цель: Исследовать полупроводниковые плёнки методом атомно-силовой микроскопии.

Задачи:

1. Проанализировать режимы работы атомно-силового микроскопа.
2. Исследовать особенности анализа поверхности плёнок методами атомно-силовой микроскопии .
3. Проанализировать физико-химические и электрофизические свойства диоксида олова.
4. Проанализировать особенности исследования плёнок полупроводниковых оксидов методом атомно-силовой микроскопии.

Актуальность данной темы заключается в том, что в настоящее время существует целое семейство методов, объединенных названием «сканирующая зондовая микроскопия» (СЗМ). Сканирующими зондовыми микроскопами называют приборы, предназначенные для изучения свойств поверхности при помощи твердотельных заостренных зондов (игл) в процессе их взаимного перемещения по заданным алгоритмам. Любой СЗМ-микроскоп состоит из твердотельного зонда, сканера, обеспечивающего относительное перемещение зонда и образца по трем координатам, системы подвода зонда и образца, системы регистрации аналитических сигналов, электронной системы управления и считывания данных, системы записи-обработки информации, системы виброзащиты. Одним из основных приборов СЗМ является атомно-силовой микроскоп (АСМ). Таким образом, атомно-силовая микроскопия является одним из самых информативных методов исследования поверхности плёнок различного состава.

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						2
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Объект исследования: наноструктурированные покрытия на основе оксидов металлов.

Предмет исследования: структурные свойства поверхности тонких плёнок полупроводниковых оксидов.

Полученные результаты: исследования структуры поверхности полупроводниковых плёнок, полученных золь-гель методом.

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						3
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Анализ режимов работы атомно-силового микроскопа	6
1.1 Общие представления работы атомно-силового микроскопа	6
1.2 Особенности анализа поверхности плёнок методами атомно-силовой микроскопии	12
2 Обзор свойств полупроводниковых оксидов	20
2.1 Физико-химические свойства диоксида олова	20
2.2 Электрические свойства диоксида олова	23
3 Особенности исследования плёнок полупроводниковых оксидов методом атомно-силовой микроскопии	27
4 Безопасность жизнедеятельности в химической лаборатории	37
4.1 Микроклимат	37
4.2. Шум	38
4.3 Освещенность	38
4.4. Работа с химическими веществами	38
4.5 Электробезопасность при работе с установками и ПЭВМ	39
4.6. Анализ вредных факторов, сопровождающих работу человека оператора ПЭВМ	40
4.7. Пожарная профилактика	42
Заключение	44
Список использованных источников	45
Приложение А. Техническое задание на ВКР	47
Приложение Б Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ»	51
Приложение В. Презентация ВКР	54

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует целое семейство методов, объединенных названием «сканирующая зондовая микроскопия» (СЗМ). Сканирующими зондовыми микроскопами называют приборы, предназначенные для изучения свойств поверхности при помощи твердотельных заостренных зондов (игл) в процессе их взаимного перемещения по заданным алгоритмам. Любой СЗМ-микроскоп состоит из твердотельного зонда, сканера, обеспечивающего относительное перемещение зонда и образца по трем координатам, системы подвода зонда и образца, системы регистрации аналитических сигналов, электронной системы управления и считывания данных, системы записи-обработки информации, системы виброзащиты. Одним из основных приборов СЗМ является атомно-силовой микроскоп (АСМ).

Достоинством атомно-силовой микроскопии является возможность неразрушающего контроля структуры поверхности тонких плёнок в трёх измерениях. Настоящая работа посвящена исследованию тонких полупроводниковых плёнок на основе оксидных материалов (SnO_2 , $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$) методом АСМ.

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ВВЕДЕНИЕ		
Разраб.	Хабибов А.К.						
Пров.	Пронин И.А.			19.06			
Н. контр.	Рыжова Т.Н.			15.06			
Утв.							
					Лит.	Лист	Листов
						5	47
					гр. 19ГД1		

1 Анализ режимов работы атомно-силового микроскопа

1.1 Общие представления работы атомно-силового микроскопа

Корни появления атомно-силовой микроскопии уходят в 1981 год, когда физиками швейцарского отделения компании IBM в ходе работ в области микропрофилометров сверхвысокого разрешения был изобретен сканирующий туннельный микроскоп [1]. При исследовании поверхности кристаллических образцов впервые было достигнуто атомарное разрешение. Физической основой метода туннельной микроскопии является квантово-механический эффект туннелирования электронов. В основе этого эффекта лежит вероятность прохождения частицей (туннелирование) сквозь энергетический барьер. Рассмотрим систему металл-диэлектрик-металл (рисунок 1). Здесь нанесенный на металл тонкий слой диэлектрика стабилизирует ширину потенциального барьера, высота и форма которого определяется величинами работы выхода Φ_1 и Φ_2 и разностью потенциалов между металлами. В туннельной микроскопии один из металлов заменяется металлическим острием. Острие подводится к образцу до получения туннельного тока. Это происходит, когда волновые функции электронов ближайших друг к другу атомов острия и образца перекрываются. Таким образом, туннельный ток I зависит от величины и ширины энергетического барьера, от природы электронных состояний, участвующих в процессе туннелирования. При разности потенциалов $V \ll \Phi$ плотность туннельного тока определяется:

$$j \approx \frac{k_0 V}{4\pi^2 S} \cdot e^{-2k_0 S},$$

где S – эффективное туннельное расстояние (расстояние, порядка $10 \text{ \AA}$, на котором начинают перекрываться волновые функции и появляется туннельный ток); k_0 – константа затухания плотности волновых функций в туннельном зазоре:

$$k_0 = \sqrt{\frac{2m\Phi}{\hbar^2}}, \text{ где } \Phi - \text{ величина эффективного барьера: } \Phi = (\Phi_1 + \Phi_2)/2.$$

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ		
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Анализ режимов работы атомно-силового микроскопа		
Разраб	Хабибов А.К.						
Пров	Пронин И.А.			09.06			
Н.контр.	Рыжова Т.Н.			19.06			
Утв							
					Лит.	Лист	Листов
						6	47
					гр. 19ПД1		

Характерная величина туннельного тока при $U \sim 0,01$ и расстоянии около $S=10^0 \text{ \AA}$ составляет 10^{-9} A .

Исследования на СТМ проводят, сканируя пьезокерамическую иглу относительно образца (или, наоборот) с помощью пьезокерамического двигателя. Отслеживая зависимость тока в цепи «игла-проводящая поверхность образца» от местоположения иглы при приложении постоянного напряжения, можно восстановить рельеф и характеристики поверхности. Если на поверхности нет проводящего адсорбционного слоя, ток носит туннельный характер и экспоненциально уменьшается с увеличением расстояния. Это позволяет получать атомарное разрешение на плоских поверхностях при радиусе кривизны иглы порядка нескольких нанометров, поскольку вклад в ток соседних участков поверхности иглы экспоненциально затухает с расстоянием до поверхности – эффект «физической заточки» иглы. Ток измеряется в диапазоне от 10^{-12} до 10^{-6} A . В этом режиме возможно получать СТМ изображение поверхности быстро – в течение нескольких секунд. Быстрое сканирование позволяет практически исключить влияние тепловых дрейфов размеров конструкции СТМ, которые даже при принятых мерах по термостабилизации микроскопа могут приводить к некоторым искажениям изображений поверхности – особенно при атомарном разрешении. Как правило, этот режим работы используется при изучении гладких поверхностей (главным образом – при снятии изображений малых участков исследуемой поверхности с атомарным или близком к нему пространственным разрешением).

При снятии СТМ изображений топографии поверхности со сложным рельефом и большой площади величину тока удерживают постоянной, изменяя положение иглы, хотя возможны и прямые измерения тока при фиксации расстояния от иглы до образца. Для этого следящая система с отрицательной обратной связью стабилизирует туннельный ток между иглой СТМ и поверхностью образца. Расстояние поддерживается постоянным следящей системой с очень высокой степенью точности. Например, при стабилизации туннельного тока с точностью 1% расстояние S может изменяться на величину не более нескольких сотых долей ангстрема.

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Следует заметить, что применение СТМ в большинстве случаев имеет чисто научное значение, ограничиваясь исследованиями проводящих поверхностей. Кроме того интерпретация данных СТМ неоднозначна – ток зависит не только от расстояния, но и от плотности электронных состояний, энергии связи электронов, присутствия адсорбционных слоев.

В 1986 году были изобретены атомно-силовые микроскопы, построенные подобно патефону – острая игла на пружинке скользит вдоль поверхности, отклонение пружинки измеряется.

Первоначально пружинки изготавливались из тонкой платиновой фольги. К ним приклеивалась острая маленькая иголочка, выбранная, например, из разбитого монокристалла сапфира [1]. Изменение положения кантиливера в процессе сканирования измеряют по-разному: иглой СТМ, интерферометрически, оптико-позиционной схемой, тензодатчиком. Наиболее широко распространена оптико-позиционная схема регистрации (рисунок 1). Небольшие образцы (линейные размеры – до 40-50 мм, толщина – до 10 мм) устанавливаются на пьезоэлектрический трехкоординатный сканер, а кантиливер закрепляется в неподвижном держателе. Более крупные образцы удобнее сканировать кантиливером, хотя это и требует применения дополнительных средств слежения за позиционированием в системе «лазер – движущийся на сканере кантиливер – регистрирующий фотодиод».

Метод АСМ основан на использовании молекулярных сил (сил Ван-дер-Ваальса), возникающих между исследуемой поверхностью и подносимым к ней острием.

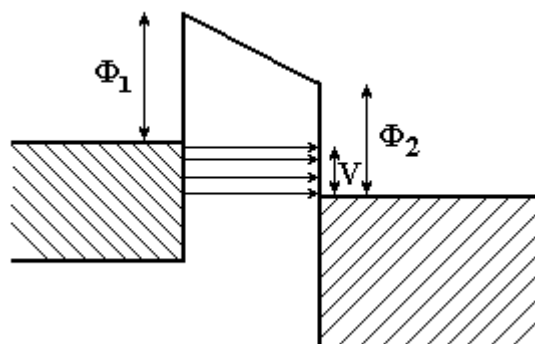


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма туннельного перехода металл-диэлектрик-металл

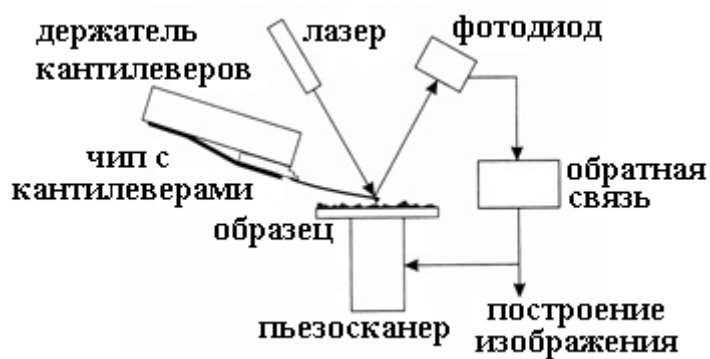


Рисунок 2 – Схема работы атомно-силового микроскопа с оптико-позиционной системой регистрации положения кантилевера при сканировании образцом

На рисунке 3 изображена зависимость силы взаимодействия от расстояния между образцом и поверхностью иглы на воздухе в приближении действия сил Ван-дер-Ваальса.

При подходе иглы к образцу между ними возникает обменное взаимодействие, приводящее к взаимному притяжению. Потенциал этого взаимодействия между единичными атомами пропорционален $1/R^6$. Притяжение начинает чувствоваться кантилевером на расстоянии порядка десятков ангстрем. Сканируя поверхность с поддержанием силы притяжения постоянной, можно получить информацию о рельефе поверхности – бесконтактная мода. К сожалению, такой режим сканирования неустойчив и часто приводит к сбоям. Это связано с тем, что для силы притяжения на воздухе или в вакууме есть два устойчивых положения равновесия, различающихся знаком производной. В результате при сканировании малые флуктуации могут привести к «залипанию» кантилевера. Следовательно, чтобы устойчиво работать в бесконтактной моде, необходимо учитывать знак производной. Для этого пьезогенератором индуцируются вынужденные колебания кантилевера. При приближении к поверхности амплитуда колебаний из-за взаимодействия с поверхностью уменьшается. Сканирование осуществляется при фиксировании амплитуды колебаний посредством обратной связи, которая отслеживает изменения фазовых соотношений, что и делает устойчивым бесконтактный режим.

На расстоянии порядка единиц ангстрем электронные оболочки поверхностных атомов иглы и образца начинают перекрываться. Знак производной в зависимости силы от расстояния изменяется, в итоге происходит отталкивание – контактный режим работы АСМ. При сканировании в контактной моде кантилевер из-за трения изгибается. Если подложка не однородна, то изгиб кантилевера меняется, его можно измерять и таким образом определять латеральные силы. Следует отметить также, что применение контактного режима имеет существенные ограничения. При проведении на воздухе в зазор между кантилевером и поверхностью стекает адсорбат (как правило, это вода), тонкий слой которого практически всегда имеется на поверхностях (рисунок 4) – так называемый капиллярный эффект.



Рисунок 3 – Зависимость сил Ван-дер-Ваальса между иглой и образцом от расстояния между ними в вакууме или газе



Рисунок 4 – Капиллярный эффект в контактной моде СЗМ

С одной стороны, этот эффект ограничивает разрешение, так как приводит к возрастанию трения покоя. В результате при сканировании с малым шагом кантилевер закручивается и движется неравномерно, рывками. С другой стороны, вследствие капиллярного эффекта к кантилеверу приходится прикладывать достаточно большую силу, что нередко приводит к разрушению или деформации объекта. Устойчиво в контактной моде можно работать при силах поджима кантилевера к образцу не менее 1 нН. При радиусе кривизны иглы 20 нм возникает давление на образец порядка $3 \cdot 10^6$ Па, квадратично возрастающее с уменьшением радиуса кривизны.

В 1993 году эта проблема была решена изобретением резонансной моды. Ее еще называют полуконтактной или теппинг-модой. Суть метода в том, что измерения проводят не неподвижным, а вибрирующим кантилевером. Колебания кантилевера на одной из его резонансных частот возбуждают внешним пьезогенератором (небольшой пьезокерамический элемент, закрепленный с хорошим механическим контактом вблизи кантилевера). С помощью селективного усилителя и фазового детектора регистрируется амплитуда и фаза возбуждаемого колебания. При приближении к поверхности амплитуда начинает уменьшаться. В зависимости от соотношения резонансной частоты кантилевера и частоты возбуждаемого колебания наблюдаются изменения знака, крутизны изменения и фазы колебания кантилевера. Изменения амплитуды в основном зависят от рельефа поверхности, а фазы – от его физических особенностей (эластичности, вязкости слоя адсорбата). Амплитуда колебания задается в пределах нескольких сот ангстрем. При сканировании выбирают такие условия, чтобы, с одной стороны, пробивался слой

адсорбата, с другой, не начиналось «залипание» кантилевера и разрушение образца. Следует заметить, что в резонансной моде давление на образец удается снизить на два-три порядка, что позволяет продуктивно использовать сверхострые кантилеверы.

Кантилеверы со специальными покрытиями позволяют исследовать не только геометрические профили, но и другие характеристики объектов. Большое практическое значение имеют исследования магнитных свойств материалов, в частности пленочных покрытий для магнитной записи информации. Кроме того, используя СТМ, можно создавать новые структуры с нанометровым разрешением. С помощью проводящих кантилеверов можно электрически модифицировать поверхностные слои и исследовать полученные наноструктуры.

Измерения проводились на растровом силовом микроскопе типа *PSI-CP* фирмы *Park Scientific Instruments*. Применялись кремниевые иглы модели *NAPUL 06-A4* со следующими характерными параметрами: радиус $200-300 \text{ \AA}$, постоянная упругости $0,6 \text{ Н/м}$. Регистрация информационного сигнала осуществлялась посредством отражения луча лазерного диода на координационно-чувствительный фотоприемник. При анализе результатов использовалось программное обеспечение фирмы *PSI*, обеспечивающее возможность снятия и обработку данных, проведения фильтрации и сглаживания, а также Фурье-анализ и статистический анализ получаемых картин. В процессе исследований использовался режим *ex situ AFM*. Изображения поверхности, снятые в различных участках разных образцов из каждой из серий, имели воспроизводимые характерные особенности. Эти обстоятельства свидетельствуют о достаточно хорошей воспроизводимости и повторяемости результатов.

1.2 Особенности анализа поверхности плёнок методами атомно-силовой микроскопии

В настоящее время наиболее развитыми методами оценки шероховатости и локальной структуры поверхности являются методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ).

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В учебно-методической литературе существует пробел в изложении вопросов сертификации гладкости поверхности на современном уровне. Это приводит к тому, что зачастую студенты (и аспиранты) затрудняются количественно оценить шероховатость проанализированной поверхности или неправильно трактуют литературные данные.

Широкой научной общественности недостаточно известны новые аналитические возможности методов СЗМ для аттестации поверхности (особенно для определения ее фрактальных параметров). Несомненно, вычисления фрактальных параметров поверхности в сочетании с трехмерной евклидовой метрикой переводят исследования на более высокий уровень. Исходя из сказанного выше, в этой части учебного пособия мы приведем системы метрических и фрактальных параметров, используемые передовыми фирмами для сертификации поверхности с указанием соответствующих международных стандартов, единиц измерения и правописания терминов в англоязычной научно-технической литературе. Следует отметить, что вычисление параметров в современных приборах осуществляется с помощью программного обеспечения, поставляемого фирмой NT-МДТ.

Метрические параметры можно разделить на три группы: амплитудные, функциональные и пространственные. Перечислим эти параметры и укажем соответствующие международные стандарты и единицы измерения.

Амплитудные параметры:

1. S_y – размах высот (*peak to peak value*, ISO 4287/1), нм.

Параметр S_y нужен, если использовать язык топографов, для общей оценки степени «пересеченности рельефа местности».

2. S_a – средняя арифметическая шероховатость (*average roughness*, ISO 4287/1), нм.

Параметр S_a определяет шероховатость поверхности в виде двумерного среднего арифметического значения (т. е. первого начального момента μ_1) и центр распределения. При симметричном рельефе одной из возможных оценок центра распределения может служить абсцисса моды распределения высот релье-

фа. Однако встречаются распределения профилей, у которых не существует моды (равномерное распределение, распределение Коши). В этих случаях определение центра как моды распределения лишено смысла.

3. S_q – средняя квадратическая шероховатость (*room mean square roughness*, ISO 4287/1), нм.

Параметр S_q (второй центральный момент μ_2) является определяющей характеристикой шероховатости.

4. S_z – десять точек по высоте (*ten point height*, ISO 4287/1), нм.

Параметр S_z выражает шероховатость поверхности по выбранным координатам пяти максимальных высот и пяти впадин по формуле:

$$S_z = 1/5(z_{max1} + z_{max2} + z_{max3} + z_{max4} + z_{max5} - z_{min1} - z_{min2} - z_{min3} - z_{min4} - z_{min5}).$$

5. S_{sk} – асимметрия (*surface skewness*, ISO 4287/1), нм.

Параметр S_{sk} (третий центральный момент μ_3) характеризует скошенность распределения профиля, когда один спад крутой, а другой – пологий. Для симметричных (относительно центра) распределений профиля $S_{sk} = 0$. Этот параметр имеет размерность куба случайной величины, поэтому для относительной характеристики асимметрии используют безразмерный коэффициент асимметрии, равный третьему моменту, деленному на куб среднеквадратического отклонения.

6. S_{ku} – эксцесс (*surface kurtosis*, ANSI B.46.1), нм.

Параметр S_{ku} (четвертый центральный момент μ_4) характеризует протяженность распределения профиля, а отнюдь не остроту его вершины, как это часто ошибочно указывается. Его относительное значение μ_4/σ^4 называют эксцессом распределения.

7. S_{kku} – контрэксцесс (*afuntion of kurtosis*), 1/нм.

Величину эксцесса удобнее нормировать, введя другую функцию от эксцесса, а именно $S_{kku} = 1/\sqrt{S_{ku}}$, изменяющуюся для любых распределений профиля лишь в пределах от 0 до 1. Эту величину называют контрэксцессом.

8. $PSD(f)$ связан с $ACF(r)$ (автокорреляционная функция) теоремой Винера–Хинчина. В этом преобразовании информация о фазе дискретной компоненты $z(r)$ теряется, когда мы рассматриваем $PSD(f) = |Z(f)|^2$. Традиционное название “спектр мощности” в нашем случае оправдывает себя, поскольку формула Парсеваля–Планшереля позволяет заменить среднее значение на длине средним по размерной частоте. $PSD(f)$ можно получить двумя путями: $z(r) \leftrightarrow Z(f) \rightarrow PSD(f)$ или $z(r) \rightarrow ACF(r) \leftrightarrow PSD(f)$. Двойные стрелки в схемах указывают на взаимно обратные преобразования.

В первой схеме на первом этапе используется двумерное преобразование Фурье, которое дает сумму «гармонических колебаний» различных частот (так называемых «гармоник») – спектр распределения амплитуд (в координатах $z(r)$) по различным частотам; во второй схеме используется корреляционная операция двумерной свертки. В обеих схемах на втором этапе вычисляется новая дискретная функция $|Z(f)|^2$ на N точках. При этом абсцисса, обозначаемая символом f , имеет размерность обратную длине

Интерпретация оси ординат зависит от природы измеряемого сигнала. Взяв двумерное преобразование Винера–Хинчина от $ACF(r)$, получим для Гауссова распределения:

$$PSD(f) = \pi^{1/2} \Delta^2 L_c \exp(-\pi^2 L_c^2 f^2),$$

где L_c – длина корреляции, и для экспоненциального распределения:

$$PSD(f) = 2\Delta^2 L_c \{1/(\pi f L_c)^2 - 1\}.$$

Таким образом, рассматривая $PSD(f)$ как дисперсию от случайных амплитуд $z(r)$, можно построить распределение дисперсий по различным частотам. Параметр $PSD(f)$ означает, что энергия любого сигнала (в нашем случае координата $z(r)$) может быть представлена как результат суммирования вкладов от различных интервалов частотной оси. В этом случае мы имеем дело только с вещественными числами. Однако эта характеристика не является самостоятельной – она полностью определяется корреляционной функцией.

9. $ACF(r)$ – автокорреляционная функция (*autocorrelation function*), нм.

Функция используется для определения размеров зерен материалов.

10. S_{CS} – функция спектральной когерентности (*spectral coherent function*).
Функция спектральной когерентности имеет определенные преимущества перед корреляцией в возможности распознавания сходных координат в исследуемых сигналах, даже если общее сходство является очень слабым.

11. $RCF(r)$ – функция корреляционной шероховатости (*roughness correlate function*), нм.

12. $RKF(r)$ – функция кинетической шероховатости (*roughness kinetic function*), нм.

13. $RHF(r)$ – функция иерархической шероховатости (*roughness hierarchy function*), нм.

Функциональные параметры, в отличие от метрических, характеризуют рельеф в локальной области и степень гладкости поверхности. К ним относятся:

1. S_{SC} – средняя кривизна вершины (*mean summit curvature*), 1/нм.
2. S_{dq} – среднеквадратическое отклонение (СКО) угла наклона вершины (room mean square slope, ISO 4287/1), 1/нм.
3. S_{ar} – выделенный участок поверхности (*surface area ratio*), %.
4. S_{bi} – индекс основной поверхности (*surface bearing index*).
5. S_{ci} – индекс сохранения гладкости поверхности (*core fluid retention index*).
6. S_{vi} – индекс сохранения гладкости впадины (*valley fluid retention index*).
7. S_{pk} – приведенная высота вершины (*reduced peak height*, DIN 4776), нм.
8. S_k – шероховатость глубины впадины (*core roughness depth*, DIN 4776), нм.
9. S_{vk} – приведенная высота впадины (*reduced valley height*, DIN 4776), нм.
10. S_{ds} – плотность вершин (*density of summits*), 1/мм².

Пространственные параметры. Эта группа параметров ориентирована на использование массива цифровых данных изображения поверхности, подвергнутых дискретному преобразованию Фурье. Они позволяют определить анизотропию поверхности и периодичность структуры. К ним относятся:

1. S_{rwi} – индекс направления радиальной длины волны (*radial wavelength index*).
2. S_{td} – направление текстуры (*texture direction*), град.
3. S_{tdi} – индекс направления текстуры (*texture direction index*).
4. S_{rw} – радиальная длина волны (параметр периодичности структуры) (*radial wavelength*), нм.

Фрактальные параметры. Измерение фрактальной размерности реальных веществ путем прямого применения математических определений на практике является чрезвычайно трудоемким процессом, что в свою очередь, приводит к результатам, надежность которых не всегда удовлетворительна. Поэтому на практике очень часто фрактальные размерности (фрактальный размер) измеряют по физическим свойствам в виде определенных физических параметров.

В общем случае целесообразно использовать термин «фрактальный параметр», который выступает в качестве интегральной количественной меры структурности объектов и совместно с функциональными параметрами дает полное представление о структуре поверхности.

В настоящее время наиболее эффективными являются три метода фрактального анализа изображений в СЗМ: область-периметр, вариационный и структурной функции.

В методе область-периметр оценка фрактального размера связана с использованием свойства самоаффинности и с наличием корреляционной связи между периметром L и фрактальной областью $L \propto A^{(D_F-1)/2}$. Этот метод проверялся рядом исследований для различных поверхностей. В каждом исследовании используется порядка 100 "уровней" в интервале параметра S_y . Для каждой плоскости горизонтального сечения рельефа подсчитывается число точек, образующих периметр, и область островков. При этом островки, касающиеся краев изображения,

и островки с областью меньшей, чем 30 точек, не принимаются во внимание. Фрактальный размер D_F рассчитывается по среднеквадратической линии регрессии в масштабе $\log - \log$ периметра к области.

Вариационный метод также основан на свойстве самоафинности и на самоподобии фракталов. В вариационном методе для последовательности самоподобных расширяющихся ячеек площадью $2k \times 2k$ с центром в точке $p(i, j)$ вычисляется средняя по N^2 точкам вариация максимальных и минимальных высот:

$$V_k = (1/N^2) \cdot \sum [z_{i,j \max}(k) - z_{i,j \min}(k)].$$

После этого строится график зависимости $\ln[(N/k)^3 V_k]$ от $\ln(N/k)$ для $k = 1, 2, \dots, k_{\max}$. Угловой коэффициент линии регрессии к оси $\ln(N/k)$ дает величину D_F . Важно подчеркнуть, что концентрация масштабной инвариантности значительно упрощает описание поверхности, так как параметр D_F не зависит от длины в фрактальном пространстве в диапазоне примерно до пяти порядков величины.

В третьем методе двумерная структурная функция определяется выражением:

$$S(k, m) = S(\tau) = 1/(N-k)(N-m) \sum_{i,j=1}^{N-k, N-m} [z(i, j) - z(i+k, j+m)]^2$$

при $k, m = 0, 1, 2, \dots, N-1$, где N – число точек в каждом направлении; $\tau = |\tau|$ – расстояние между точками (i, j) и $(i+k, j+m)$. Формула позволяет построить карту структурной функции для исследуемой поверхности. На этой карте обнаруживаются любые анизотропии поверхности.

При проведении расчетов $S(\tau)$ усредняется для всех τ в различных направлениях. С возрастанием величины τ в расчете используется все большее количество углов. Так, при заданном $|\tau|$ для двухсот точек используется около 400 различных углов в интервале $0 \dots 180^\circ$. Структурная функция допускает аппроксимацию на языке фрактальной геометрии в виде масштабного соотношения:

$$S(\tau) \propto |\tau|^{2(3-D_F)}.$$

Фрактальный размер $D_F = D$ рассчитывается над линией регрессии в $\log - \log$ зависимости $S(\tau)$ от τ .

В заключение этого раздела напомним, что чем ближе значение D_F к числу 2, тем поверхность более гладкая.

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 Обзор свойств полупроводниковых оксидов

2.1 Физико-химические свойства диоксида олова

Изучен только один термодинамически стабильный в широком интервале температур и давлений оксид – SnO_2 . Этот оксид имеет тетрагональную решетку с параметрами: $a = 0,4737$ нм, $c = 0,3185$ нм, пространственная группа $D_{4h}^{14} - P4_2/mnm$ [2]. Остальные оксиды либо нестабильны (несколько модификаций SnO , Sn_5O_6 , Sn_3O_4 , Sn_2O_3), либо условия их стабильного существования точно не установлены [3]. SnO устойчиво в газе, возможно и в жидком состоянии, но при затвердевании диссоциирует на Sn и Sn_3O_4 . Ниже 400°C SnO метастабильно в твердой фазе и при нагревании диссоциирует: $4\text{SnO} \rightarrow \text{Sn}_3\text{O}_4 + \text{Sn}$. Диоксид олова обладает высокой механической и химической стойкостью [4]. Основные свойства SnO_2 приведены в таблице 1.

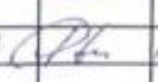
					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Обзор свойств полупроводниковых оксидов	Лит.		Лист	Листов
Разраб.		Хабиров А.К.						20	47
Пров.		Пронин И.А.		19.06					
Н.контр.		Рыжова Т.Н.		18.06		гр. 19ГД1			
Утв.									

Таблица 1 – Основные свойства SnO₂

№	Параметр	Значение
1	Молекулярная масса, г/моль	150,6888
2	Плотность, кг/м ³	6950
3	ΔH°_{298} , кДж/моль	581,17±3,35
4	S°_{298} , Дж/(моль К)	52,34±1,26
5	$T_{пл}$, °С	2300
6	$T_{кип}$, °С	2500
7	$\Delta H_{пл}$, кДж/моль	47,69
8	$\Delta H_{кип}(2000^{\circ}\text{C})$, кДж/моль	314,01
9	Энергия атомизации, Дж/моль	1371,219
10	Теплота разложения, кДж	580,7
11	Теплоемкость $C_p^{\circ}_{,298}$, Дж/(моль К)	52,75±2,93
12	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	30,7 (328К)
13	Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	5,28
14	Микротвердость, МПа	14318
15	Энергия активации, эВ	0,7
16	Анизотропия $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	
	с	5,6
	⊥ с	4,3
№	Параметр	Значение
17	Давление паров p , Па	$\lg p = 18,6 - 28800/T$
18	Подвижность электронов, м ² /(В·с)	0,002 (298К) 0,003 (1023К)
19	Показатель преломления	2,0

В [5] отмечается стойкость пленок SnO₂ к кислотам, воде, органическим соединениям. Разрушение пленок SnO₂ наблюдалось авторами только при воздействии HF и при длительной обработке в щелочи. Химические свойства SnO₂ сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Химические свойства SnO₂

Реагент	Реакция	Примечание
Al, Zn, Mg	————	при $T > 300^{\circ}\text{C}$ восстанавливается до металлического олова
H ₂	$\text{SnO}_2 + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{Sn} + 2\text{H}_2\text{O}$	
Гидроксиды и оксиды щелочных металлов	$\text{SnO}_2 + \text{Me}_2\text{O} \rightarrow \text{Me}_2\text{SnO}_3$ $\text{SnO}_2 + 2\text{MeOH} \rightarrow \text{Me}_2\text{SnO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Взаимодействие при сплавлении Взаимодействие при нагревании
H ₂ SO ₄ конц.	$\text{SnO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Sn}(\text{SO}_4)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Взаимодействие при нагревании
CO	$\text{SnO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{SnO} + \text{CO}_2$	при 450°C восстанавливается до SnO, при 750°C до Sn
C ₂ H ₅ OH	$\text{SnO}_2 + 4\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow \text{Sn} + 2\text{CH}_3\text{CHO} + 2\text{C}_2\text{H}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$	При 650°C

Оптические свойства SnO₂ в ультрафиолетовой и видимой области спектра определяются тем, что на этом участке спектра располагается край полосы их собственного поглощения. За пределами этой полосы диоксид олова оптически прозрачен и имеет низкие потери на поглощение и рассеяние света. В ультрафиолетовой и видимой областях спектра кристаллический SnO₂ обладает заметной фотопроводимостью [6]. Наиболее интересными с точки зрения оптических свойств являются тонкие слои SnO₂, прозрачные в видимой части спектра. Основные потери в светопропускании пленок SnO₂ на стекле авторы связывают с эффектом интерференции и усилением интенсивности отраженного света вследствие сравнительно высокого показателя преломления.

Оптические свойства SnO_2 в ИК-области обусловлены влиянием свободных носителей [7]. При $N > 10^{20} \text{ см}^{-3}$ поглощение и отражение, обусловленные свободными носителями, проявляются уже в ближней ИК области. Отражение приобретает характер, близкий к металлическому, и может достигать до 80 – 90%, что позволяет применять пленки SnO_2 в качестве отражающих ИК фильтров, прозрачных для видимого света. Это может быть использовано для изготовления покрытий лобовых стекол в автомобилях.

2.2 Электрические свойства диоксида олова

Современные представления о природе проводимости окисных полупроводников основаны на зонной теории. Преимущественно ионный характер химических связей определяет большую ширину запрещенной зоны ΔE и сравнительно низкую подвижность носителей заряда. Донорные и акцепторные уровни могут создаваться не только посторонними примесями, но и отклонениями от стехиометрического состава – анионными и катионными вакансиями, которые рассматриваются как особые химические центры, принимающие участие в реакциях. Анионные вакансии играют роль доноров, а катионные – акцепторов. Их энергии ионизации определяются соответственно типом аниона и катиона данного соединения.

В диоксиде олова наблюдается только электронная проводимость. Доноры образуют самые различные уровни. В SnO_2 наблюдались уровни с энергиями активации 0,21, 0,33, 0,52, 0,6, 0,72 эВ [3]. У пленочных образцов SnO_2 донорные уровни, как правило, неглубоки. Значения их энергий активации находятся в пределах до 0,15 эВ и тем меньше, чем выше N . При $N \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ уровни смыкаются в примесную зону, которая, при увеличении N до $N \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$ сливается с зоной проводимости [3].

Авторами [8] были обнаружены энергетические уровни в SnO_2 , которые приведены на схеме энергетических уровней монокристаллов SnO_2 , (рисунок 5).

Были обнаружены следующие уровни:

- стабильный полностью скомпенсированный уровень электронных ловушек, лежащий на 0.21 эВ ниже дна зоны проводимости;

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- стабильный уровень дырочных ловушек, лежащий на 0,33 эВ над потолком валентной зоны, который при низкой температуре может выступать как центр сенсibilизации;

-два важных уровня электронных ловушек: более мелкий полностью скомпенсирован и обычно находится на расстоянии 0,52 эВ под зоной проводимости, более глубокий (частично скомпенсирован и лежит на расстоянии 0,6 эВ под зоной проводимости);

-другие дискретные уровни лежат на расстоянии 1; 1,3; 1,8 эВ от дна зоны проводимости.

Для полупроводниковых окислов характерным является обратимость отклонений от стехиометрии и соответственно физических свойств при взаимодействии с газовой средой. Теоретический анализ этих процессов основан на законе действующих масс [9]. Для проводимости окислов n-типа имеет место зависимость:

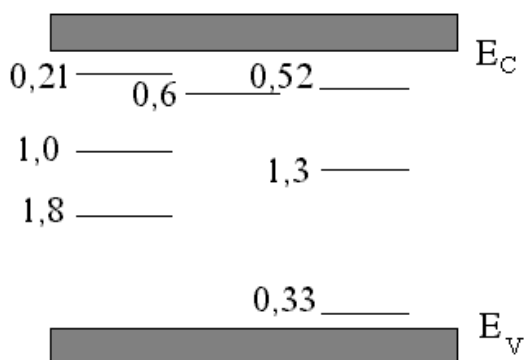


Рисунок 5 – Схема энергетических уровней в монокристаллах SnO₂ [8]

$$\sigma \sim P_{O_2}^{\pm 1/x} \cdot \exp\left(-\frac{E_0 + W}{3kT}\right), k < 1$$

где P_{O_2} - парциальное давление кислорода; E_0 – энергия ионизации дефектов (вакансий); W – энергия образования дефектов.

Величина x определяется стехиометрическим составом соединения, а также типом анионных вакансий. Кроме того, следует отметить, что проводимость в по-

ликристаллических образцах существенно зависит от структуры слоев. Размер зерен (соизмеримость его с длиной экранирования Дебая), туннельно-прозрачные барьеры или двойные энергетические барьеры Шоттки на границе зерен, наконец “открытые” и “закрытые” мостики [9] – эти факторы сильно усложняют картину токопротекания. Проводимость также зависит от адсорбции газов на поверхности зерен. Неучет любого из этих факторов затрудняет обсуждение результатов экспериментов.

В ряде работ исследуется влияние различных примесей на проводимость SnO_2 . Донорные примеси повышают проводимость, а большинство акцепторных снижают. Таблица 3 раскрывает влияние конкретных примесей на электропроводность SnO_2 .

Сопротивление легированных разными примесями пленок SnO_2 лежит в диапазоне от 10 до 10^7 Ом. Наибольшую электрическую активность имеют примеси, чьи ионы имеют конфигурацию внешних электронных оболочек тождественную или подобную замещаемым ионам (Sn^{4+} , $\text{Cd}^{2+} - 4d^{10}$; Zn^{2+} , $\text{Ga}^{3+} - 3d^{10}$) [10]. Заметная активность наблюдается, если электрические конфигурации отличаются для примеси от замещаемого иона на $1\bar{e}$ с нескомпенсированным спином, слабая – если эти условия не выполняются. Так наименьшая проводимость была получена для пленок, легированных F , а наибольшая – для легированных Zn . При больших количествах Sb возможны пленки с типично металлической проводимостью.

В [5] примеси вводили в виде хлоридов или оксидов. Низший окисел, диссоциирующий затем на высший оксид и металл, использовался для создания избытка металла. Активное внедрение некоторых добавок может наступать лишь в присутствии других примесей. Так, Sb и Bi могут легко внедряться лишь в присутствии ZnCl_2 [5].

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 3 – Влияние примесей на проводимость SnO_2

Примеси, повышающие проводимость	Примеси, понижающие проводимость	Примеси, не изменяющие проводимость
B^{3+} [11]	F^{1-}	Cu [14]
Al^{3+}	Mg^{2+}	Ag
V^{4+}	P^{5+}	Cd [15]
Fe^{3+}	Cl^{1-}	Pb
Zn^{2+}	Ti^{3+}	
Ga^{3+}	Cu [12]	
Zr	As^{5+}	
Nb^{4+}	Br^{1-}	
Cd	Cd	
In^{3+}	Sb^{5+}	
Sm^{3+}	I^{1-}	
Te	Er^{3+}	
Bi^{5+}	B [13]	

3 Особенности исследования плёнок полупроводниковых оксидов методом атомно-силовой микроскопии

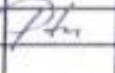
Заключительным этапом формирования плёнок полупроводниковых оксидов является их отжиг. На этой стадии полимерные плёнки превращаются в силикатные, гидроксиды и соли металлов-допантов переходят в оксиды. Именно на этой стадии возможно сформировать структуру, наиболее подходящую для дальнейшего использования плёнок. При создании газочувствительных элементов наносенсоров необходимо получить разветвлённую мезо- и микропористую структуру с максимальным значением процентной пористости композита. В настоящем разделе

Согласно кинетическому уравнению Смолуховского для коагуляции и теорией фракталов, получим зависимость размера пор от условий получения пленок [15]:

$$a(\tau, T) = \alpha \cdot 3^{\frac{\ln(1 + \frac{4kTC_0\tau}{3\eta})}{\ln(3)}}, \quad (1)$$

где τ – время отжига; T – температура отжига; α – размер молекулы ортокремниевой кислоты; C_0 – начальная концентрация кластеров в золе; η – вязкость золя.

Очевидно, что размер кластера будет расти с увеличением времени и температуры обработки плёнки. Однако для достижения оптимальной пористости плёнки 30–50 % отжиг необходим, поскольку она зависит от температуры (рисунок 6):

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Особенности исследования плёнок полупроводниковых оксидов методом атомно-силовой микроскопии	Лит		Лист	Листов
Разраб.		Хабиров А.К.						27	47
Пров.		Пронин И.А.		19.06					
Н.контр.		Рыжова Т.Н.		19.06					
Утв.									
						гр. 19ПД1			

$$P(\tau, T) = \left(1 - \frac{5 \cdot \frac{\ln\left(\frac{r(\tau, T)}{\alpha}\right)}{\ln(3)}}{\left(\frac{r(\tau, T)}{\alpha^2}\right)^2} \right) \cdot 100\% . \quad (2)$$

На основе разработанной модели определены условия синтеза нанопленок соответствующие заданным параметрам морфоструктуры. Им отвечают отжиг плёнок в течение 10–15 минут при температуре 250–400 °С. Рассчитанные в рамках модели результаты согласуется с экспериментальными данными (рисунок 7).

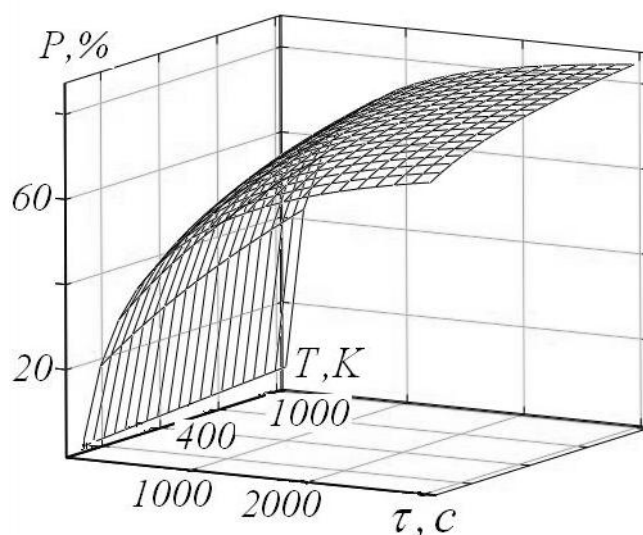


Рисунок 6 – Зависимость пористости структуры от условий получения плёнок

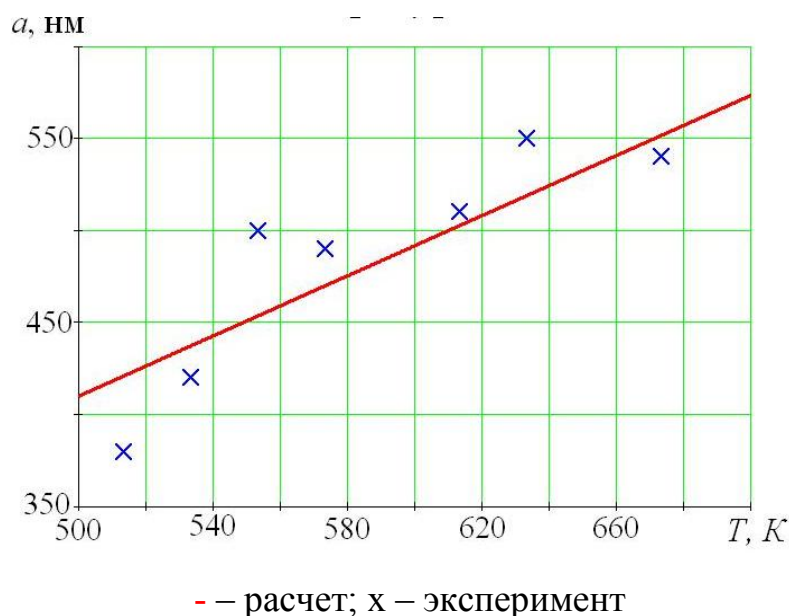


Рисунок 7 – Зависимость диаметра пор от температуры отжига пленок

Для аттестации поверхности плёнок используются метрические и фрактальные параметры. К метрическим относятся амплитудные, функциональные и пространственные. К фрактальным прежде всего – фрактальная размерность [1].

Рассмотрим влияние параметров отжига на амплитудные параметры. Для оценки влияния рассмотрим среднюю арифметическую шероховатость, среднюю квадратическую шероховатость и эксцесс.

Средняя арифметическая шероховатость (S_a) определяет шероховатость поверхности в виде двумерного среднеарифметического значения:

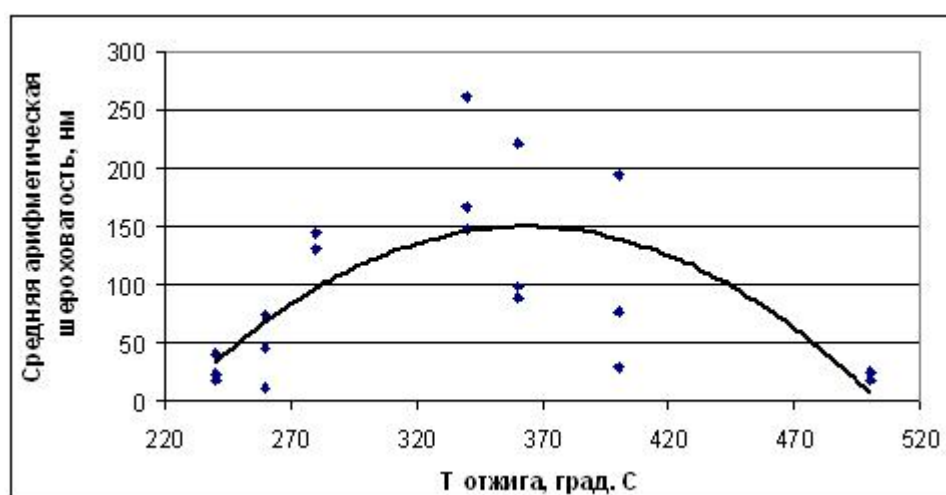
$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l) - \mu|, \quad (3)$$

где μ определяется как

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l), \quad (4)$$

где M – число вершин по горизонтали, N – число вершин по вертикали, z – высота вершины.

На рисунке 8 представлены экспериментальные данные величины средней арифметической шероховатости, полученные статистической обработкой морфоструктуры поверхности, полученной на атомно-силовом микроскопе.



♦ – экспериментальные данные, — — линия регрессии

Рисунок 8 – Средняя арифметическая шероховатость тонких стекловидных плёнок в зависимости от температуры отжига

Полученный результат можно интерпретировать следующим образом: до температур порядка 350 – 370 °С параметр среднеарифметической шероховатости увеличивается, что связано с перколяционными процессами, описываемые зависимостью:

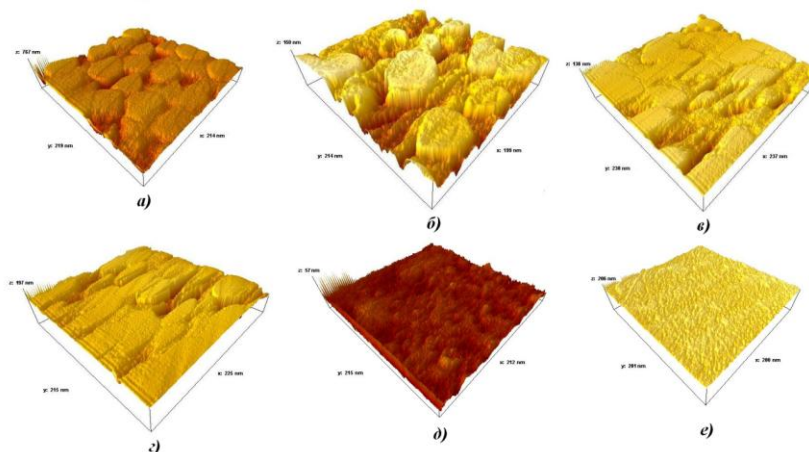
$$a(\tau, T) = \alpha \cdot 3^{\frac{\ln(1 + \frac{4kTC_0\tau}{3\eta})}{\ln(3)}}, \quad (5)$$

где a – радиус кластера ортокремниевой кислоты; T – температура отжига; C_0 – начальная концентрация ортокремниевой кислоты в золе; τ – время отжига, η – вязкость золя. Таким образом, размер кластера увеличивается, растёт его пористость и, соответственно, толщина рабочего слоя поверхности плёнки. Однако начиная с 350 – 400 °С в системе начинают преобладать другие процессы. Это прежде всего спекание кластеров ортокремниевой кислоты. Их температура плавления будет зависеть от размера по закону

$$\frac{\delta T}{T_0} \approx -\frac{3\Delta\alpha}{pwr}, \quad (6)$$

где δT – изменение температуры плавления кластера; T_0 – температура плавления монолитного материала; $\Delta\alpha$ – изменение поверхностной энергии при фазовом переходе; p – давление; w – теплота фазового перехода; r – радиус кластера.

Таким образом, с дальнейшим ростом температуры средняя арифметическая шероховатость начнёт уменьшаться по степенному закону. Полученные результаты иллюстрирует рисунок 9.



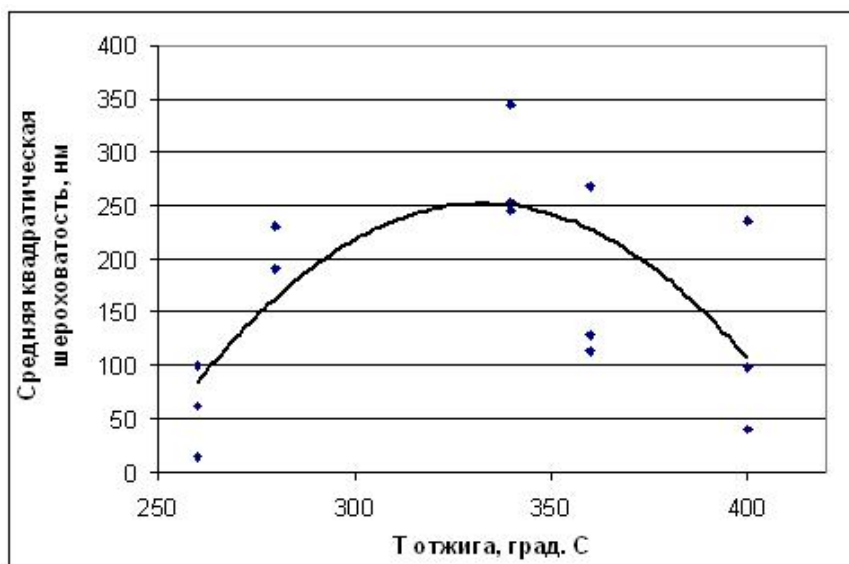
а) – $T_{\text{отжига}} - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) – $T_{\text{отжига}} - 350\text{ }^{\circ}\text{C}$; в) – $T_{\text{отжига}} - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 г) – $T_{\text{отжига}} - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$; д) – $T_{\text{отжига}} - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$; е) – $T_{\text{отжига}} - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$;

Рисунок 9 – Морфоструктура поверхности плёнок в зависимости от температуры отжига

Другим амплитудным параметром, являющимся одним из определяющих характеристик шероховатости, является средняя квадратическая шероховатость (S_q), равная:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l) - \mu|^2}. \quad (7)$$

Её экспериментальные значения представлены на рисунке 10.



♦ – экспериментальные данные, — — линия регрессии

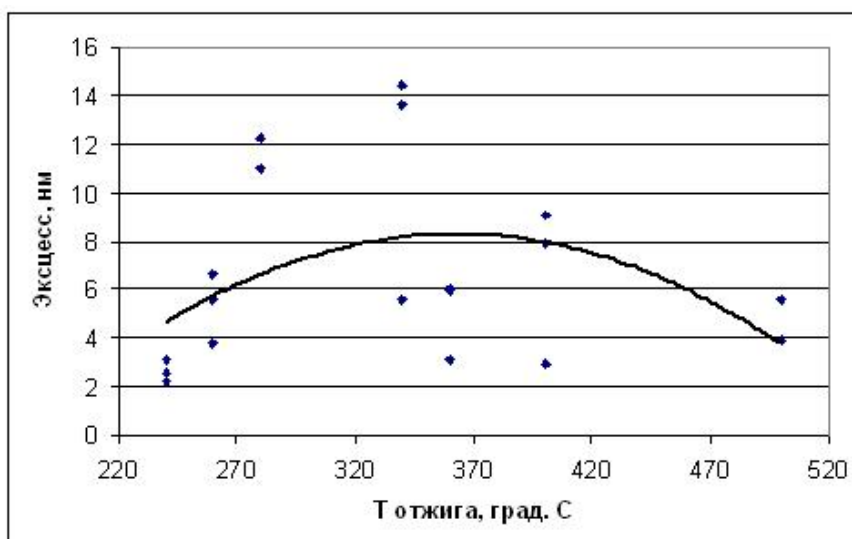
Рисунок 10 – Зависимость средней квадратической шероховатости от температуры отжига

Поведение функции определяется теми же факторами, что и среднеарифметической шероховатости – на низком интервале температур - перколяционными процессами, на высоком – спеканием кластеров материнского вещества [17].

Ещё одним важным амплитудным параметром является эксцесс (S_{ku}), характеризующий протяжённость распределения профиля. Он является четвёртым центральным моментом и вычисляется посредством формулы:

$$S_{ku} = \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l) - \mu]^4. \quad (8)$$

Наибольшая пористость плёнки будет при том максимальном значении эксцесса поверхности. Условия, её определяющие, будут наиболее оптимальными при синтезе тонких пористых плёнок. Экспериментальная кривая зависимости эксцесса от температуры отжига представлена на рисунке 11.



◆ – экспериментальные данные, — — линия регрессии

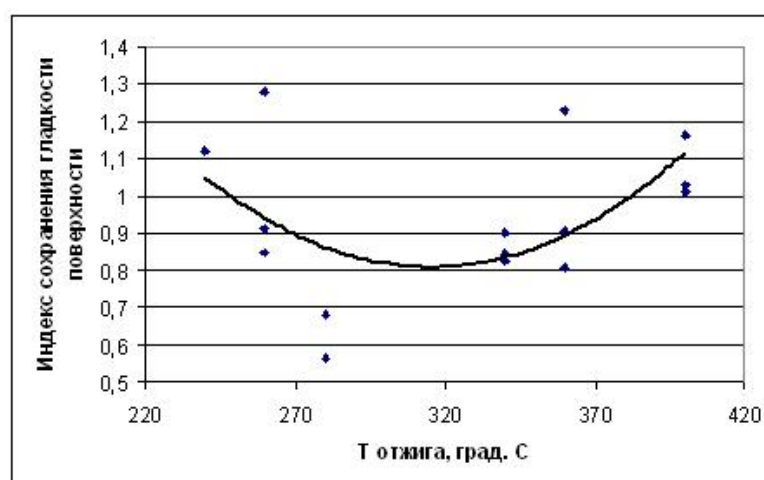
Рисунок 11 – Зависимость эксцесса от температуры отжига плёнки

Таким образом, исследуя амплитудные параметры тонких стекловидных плёнок, можно сделать вывод: существует два интервала температур отжига, на которых преобладают различные факторы. На интервале низких температур отжига (200 – 350 °С) преобладают перколяционные процессы роста кластеров, плёнки становятся более пористыми и их площадь поверхности растёт. При более высоких температурах отжига (350 – 550 °С) преобладает спекание кластеров ма-

териала, что приводит к уменьшению удельной пористости, снижает разветвлённость структуры. Оптимальные температуры отжига плёнок составляют $\sim 300 - 400$ °С.

Следующей группой параметров поверхности являются функциональные параметры, характеризующие рельеф в локальной области и степень гладкости поверхности. Важнейшие из них – это индекс сохранения гладкости поверхности (S_{ci}) и плотность вершин (S_{ds}).

Индекс сохранения гладкости [18] поверхности характеризует рельеф поверхности. Чем его значение меньше, тем поверхность менее гладкая. Его экспериментальные значения представлены на рисунке 12.



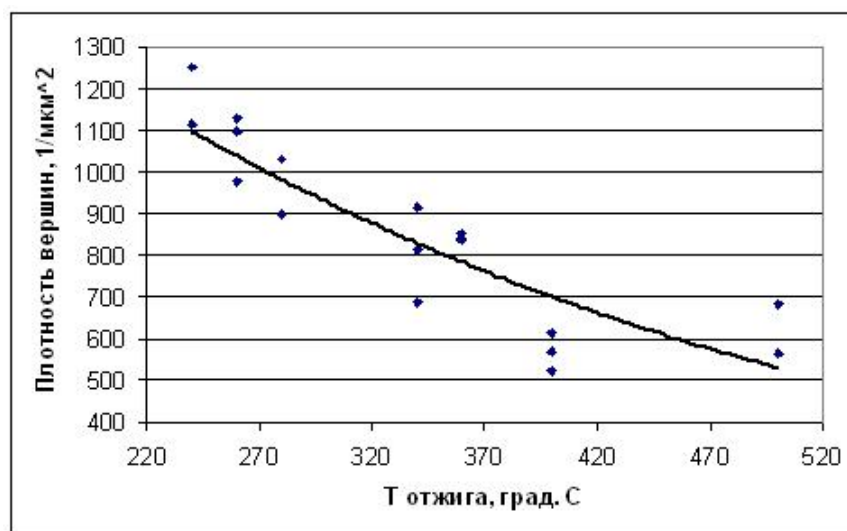
◆ – экспериментальные данные, — — линия регрессии

Рисунок 12 – Зависимость индекса сохранения гладкости поверхности от температуры отжига плёнки

Как видно, полученный результат полностью соответствует значениям экстремумов амплитудных параметров поверхности, рассмотренных ранее.

Плотность вершин характеризует число кластеров ортокремниевой кислоты на единицу поверхности плёнки. Согласно предложенным моделям, эта зависимость будет убывающей функцией температуры отжига, причём её скорость будет складываться как из скорости перколяционного процесса, так и из скорости спекания, так как оба эти процесса приводят к росту кластеров материала, и, как следствие, уменьшению их поверхностной плотности. Экспериментальная зависимость плотности вершин от условий получения представлена на рисунке 13.

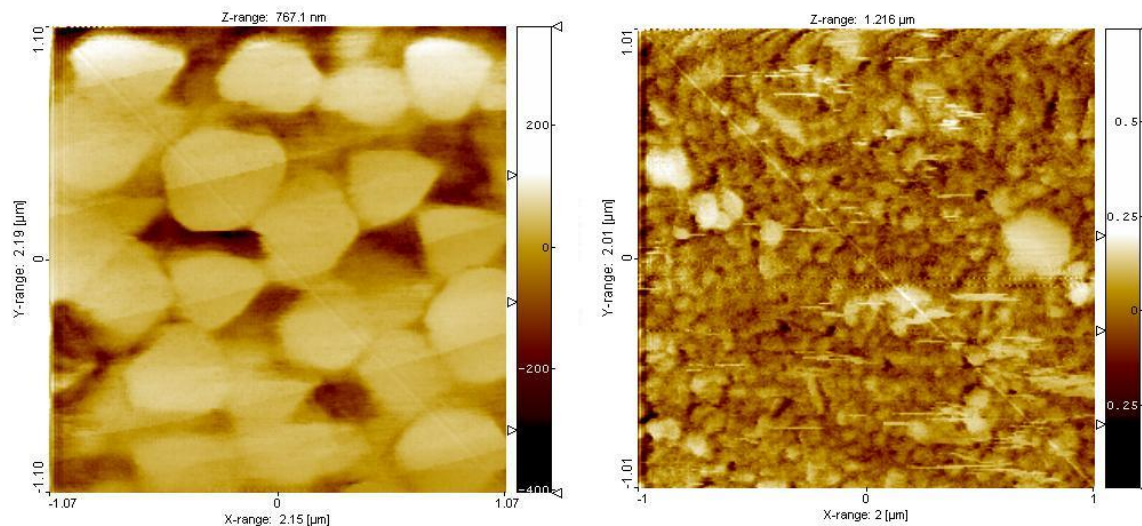
Данная зависимость подтверждает теоретические представления о физикохимии процессов, происходящих в золе при его отжиге.



◆ – экспериментальные данные, — — линия регрессии

Рисунок 13 – Зависимость плотности вершин от температуры отжига плёнки

Таким образом, при длительном отжиге происходит интенсивный рост кластеров ортокремниевой кислоты – рисунок 14.



а)

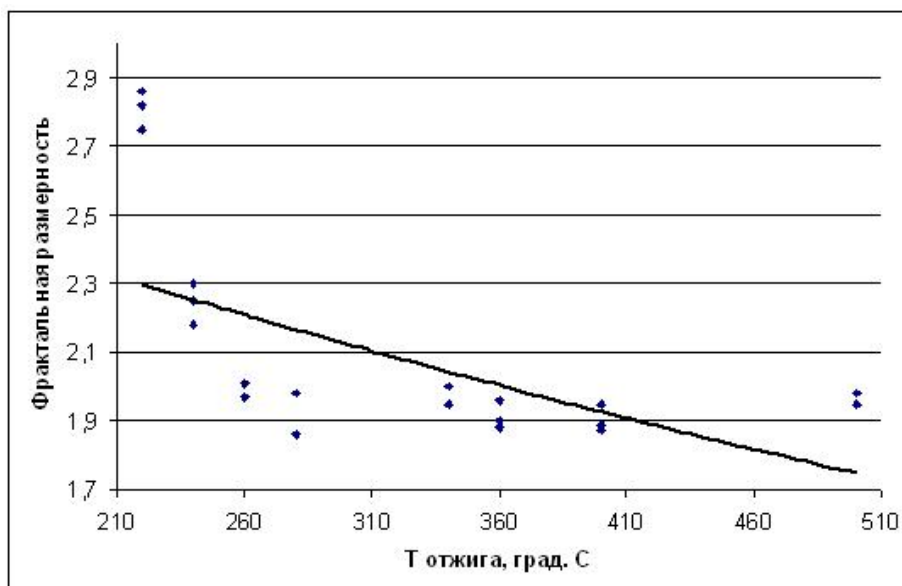
б)

а) – $T_{\text{отжига}} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) – $T_{\text{отжига}} - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 14 – Морфоструктура поверхности плёнки при низкой и высокой температурах отжига

В целом, функциональные параметры, с точки зрения оптимальной морфоструктуры плёнки, имеют приемлемые значения в тех же точках, что и амплитудные [19].

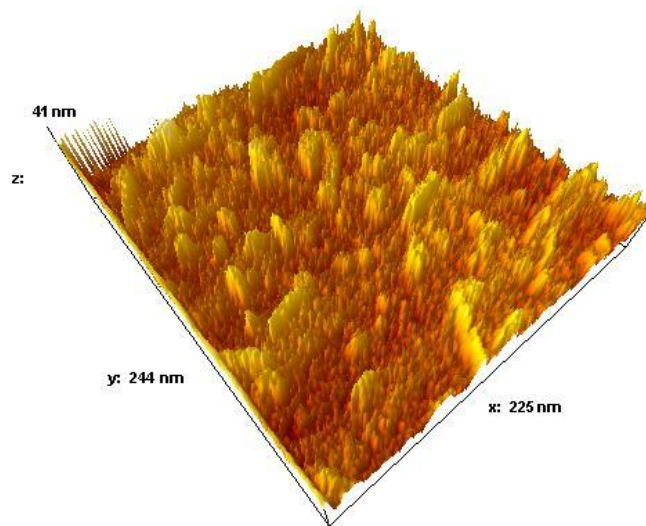
Существуют также фрактальные параметры структуры [20]. До недавнего времени их определение было весьма затруднительно. На сегодняшний день, применяя атомно-силовую микроскопию и современное программное обеспечение, вычисление этих параметров значительно упрощается. Несомненно, расчёт фрактальных параметров поверхности в сочетании с трёхмерной евклидовой метрикой переводит исследования на более высокий уровень. Определяющим параметром здесь является фрактальная размерность поверхности плёнки. С ростом температуры отжига будет происходить всё большее спекание кластеров материала, что приведёт к уменьшению фрактальной размерности – рисунок 15.



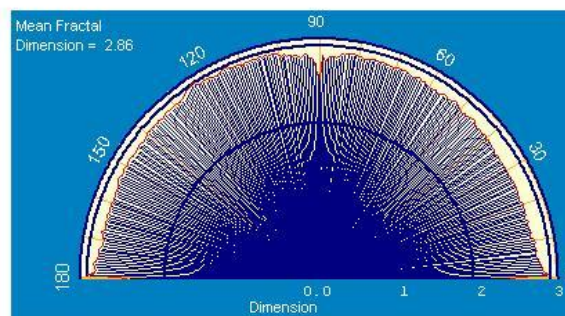
◆ – экспериментальные данные, — — линия регрессии

Рисунок 15 – Зависимость фрактальной размерности плёнки от температуры отжига

Следует отметить, чем ближе значение фрактальной размерности плёнки к трём, тем ближе её структура к монокристаллу. Плёнка с максимальной фрактальностью, достигнутая при помощи золь-гель-технологии, показана на рисунке 16.



a)



б)

a) – морфоструктура поверхности плёнки; ***б)*** – фрактальная размерность

Рисунок 16 – Морфоструктура и фрактальность плёнки

4 Безопасность жизнедеятельности в химической лаборатории

Мероприятия по охране труда связаны с обеспечением требований производственной санитарии и гигиены труда. Гигиена труда влияет на деятельность человека и на его организм. Необходимо соблюдать гигиенические нормативы и профилактические мероприятия по созданию благоприятных условий труда. На санитарно-гигиенические условия влияют:

- микроклимат;
- шум;
- освещенность.

Рассмотрим отдельные факторы, их влияние на человеческий организм, а также их предельно допустимые значения.

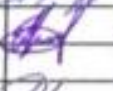
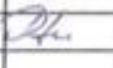
4.1 Микроклимат

Микроклимат определяется метеорологическими условиями помещения – температурой, влажностью воздуха. Человек может выполнять различную работу при определенном изменении этих условий, причем температура его тела остается постоянной. Это возможно, благодаря способности организма к терморегуляции, которая обеспечивает равновесие между процессами теплообразования и отдачи тепла.

По ГОСТ 12.1.005-88 существует граница терморегуляции: верхней границей является температура воздуха $T = 30 \div 31^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности воздуха около 85% или $T = 40^{\circ}\text{C}$ при влажности воздуха 40%.

Помещение, в котором проводились работы, отвечает следующим нормам:

- температура воздуха от 18 до 25°C;
- относительная влажность воздуха не превышает 60%;
- скорость ветра 0,1 м/с при оптимальном значении не более 0,2 м/с

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ			
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Безопасность жизнедеятельно- сти в химической лаборатории	Лит.	Лист	Листов
Разраб		Хабиров А.К.						
Пров		Пронин И.А.		19.06			37	47
И контр		Рыжова Т.Н.		15.08				
Утв.								
						гр. 19ПД1		

4.2. Шум

Это понятие включает в себя все акустические явления, которые ухудшают человеческое самочувствие, вызывают психические и функциональные отклонения. Уровень шума на рабочем месте в лаборатории для теоретических работ и обработки не превышает 60 дБА и составляет 45 дБА, что не превышает предельно-допустимые нормы и соответствует ГОСТ 12.1.012-90.

4.3 Освещенность

Большое влияние на нормативную деятельность человека оказывает освещение. Рекомендуется применять комбинацию естественного и искусственного освещения.

В лаборатории предусмотрено комбинированное (общее и местное) освещение, согласно СНиП 23-05-95. Общее освещение с равномерным распределением люминесцентных ламп накаливания обеспечивает на рабочем месте освещение не менее 300 лк, что является допустимым. Освещенность рабочего места организована таким образом, чтобы свет не попадал в глаза, т.е. был установлен прямой луч от светильников, пульсации светового потока от лампы были бы не более 10%.

4.4. Работа с химическими веществами

ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны:

Вещества, концентрации которых при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 дней или при другой продолжительности, но не более 41 часа в неделю, в течение всего рабочего стажа, не могут вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, которые могут быть обнаружены современными методами исследований в процессе работы или отдельное время жизни настоящего и

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

последующего поколения. ПДК веществ и их влияние на организм человека по ГОСТ 12. 1. 005-88 используемых в процессе работы приведены в табл 4

Таблица 4 – ПДК веществ и их влияние на организм человека

Вещества	Токсические свойства		
	Характер действия на организм человека	Класс опасности	ПДК _{р.з.} , мг/м ³
Si(OC ₂ H ₅) ₄	Вызывает раздражение слизистых оболочек носа, глаз; частично действует наркотически	4	20
C ₂ H ₅ OH	Оказывает наркотическое действие, вызывает паралич ЦНС	4	1000
HCl	Поражение наступает в результате непосредственного воздействия на кожу (чаще серозное воспаление с пузырями) и слизистые оболочки, а также ингаляционно-раздражающее действие на верхние дыхательные пути, отек гортани, развитие через 3-4 часа токсического отека легких	2	0,2
H ₃ PO ₄	Вызывает раздражение глаз и кожных покровов.	3	1

Работа с выше названными потенциально опасными веществами происходит под вытяжкой, поэтому отравление опасными веществами исключено.

4.5 Электробезопасность при работе с установками и ПЭВМ

Помещение, в котором проводились работы, относится к группе помещений без повышенной опасности с точки зрения поражения электрическим током, так как отсутствует возможность одновременного прикосновения человека к металлоконструкциям, имеющим соединение с землей и металлическим корпусам элек-

трооборудования, токопроводящая пыль отсутствует, тип пола - токонепроводящий согласно ПУЭ 1.1.13.

Электропитание приборов осуществляется от сети переменного тока промышленной частоты 50 Гц, напряжением 220 В с глухозаземленной нейтралью. Такие установки, согласно ПУЭ 1.1.13, относятся к электроустановкам с напряжением до 1000 В. Все приборы находятся в корпусах, поэтому относятся к закрытым приборам. Для предотвращения несчастных случаев при прикосновении к корпусу прибора в случае замыкания на него токоведущих частей, предусмотрено защитное зануление, согласно ПУЭ 1.7.55.

ЭВМ подключены к сети 220 вольт переменного тока с помощью трехконтактных вилок, третий контакт которых заземляется согласно ГОСТ 12.1.030-91.

При эксплуатации ЭВМ, проведении ремонтных и профилактических работ соблюдаются следующие правила:

- разъемы на электрооборудовании, включенном в сеть, не коммутируются;
- включенное оборудование не остается без наблюдения;
- пайка производится только при выключенном питании.

Во избежание поражения электрическим током не допускается:

- ремонт оборудования и вскрытие корпусов при включенном напряжении питания;
- работа на неизвестном электрооборудовании;
- работа при отсутствии надежного заземления приборов.

4.6 Анализ вредных факторов сопровождающих работу человека оператора ПЭВМ

Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений от монитора компьютера в соответствии с СНиП 2.2.2/2.4-1340-03 представлены в таблице 5.

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для снижения воздействия этих видов излучения рекомендуется применять мониторы с пониженным уровнем излучения, устанавливать защитные экраны, а также соблюдать регламентированные режимы труда и отдыха.

Дисплей *Samsung*, электроннолучевой 15-ти дюймовый. 75 Гц, разрешением 1264x768, используемый в лаборатории, удовлетворяет требованиям стандарта ТСО-99, т.е. обладает пониженным уровнем неионизирующего электромагнитного излучения. Также в лаборатории соблюдается требуемый режим труда и отдыха.

Таблица 5 – Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений

Наименование параметра	Допустимые значения
Напряженность электрической составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора	10 В/м
Напряженность магнитной составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора	0,3 А/м
Напряженность электростатического поля не должна превышать: - для взрослых пользователей - для детей дошкольных учреждений и учащихся средних специальных и высших учебных заведений	20 кВ/м 15 кВ/м

Поверхность дисплея приобретает электростатический заряд из-за воздействия электронного пучка на слой люминофора. Сильное электростатическое поле оказывает вредное воздействие на человеческий организм.

Влияние электростатического поля уменьшается до безопасного для человека уровня на расстоянии 50 см. Кроме того, при работе дисплея электризуется окружающий воздух, приобретая положительный заряд.

Положительно заряженные молекулы кислорода не воспринимаются организмом, что приводит к работе легких вхолостую, и приносят микроскопические частицы пыли, для защиты от электростатического поля используется:

- внешний экран, с металлическим напылением, заземленный на общую шину;
- экран монитора, имеющий антистатическую поверхность, что исключает притягивание пыли;
- использование системы общего увлажнения воздуха в холодный период года.

4.7 Пожарная профилактика

Основными причинами возникновения пожара являются:

- неисправность электрооборудования;
- неисправность электрической сети;
- нарушение правил эксплуатации оборудования;
- нарушение правил пожарной безопасности;

Для предотвращения пожара в случае его возникновения необходимо провести пожарно-профилактические мероприятия: оборудование системы электропитания защитой, прокладка осветительных сетей; сетей противопожарной системы и сигнализации отдельно от общих силовых сетей.

Желательно оснащение помещения системой пожарной сигнализации и автоматической установкой объемного газового пожаротушения. Персонал должен пройти инструктаж по технике безопасности не ниже группы 11 (ПТЭ) и быть ознакомлен с правилами эксплуатации системы. В качестве средств тушения пожара в помещении должны находиться огнетушители типа ОУ-2, ОУ-5, один на 40-45 м, которые проверяются не реже двух раз год.

К первичным средствам тушения пожаров, предназначенных для локализации небольших загораний, относятся: пожарные стволы, внутренние пожарные водопроводы, огнетушители, сухой песок, асбестовые одеяла. Пожаробезопасность регламентируется ГОСТ 12.1.004-91. также ПУЭ 7.3.2 и ПУЭ 7.4.2 В целях предотвращения возгорания токоведущих частей установки предусматриваются меры:

- рубильники прямого доступа для быстрого отключения установки от сети;

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- огнетушители ОХП-10 и ОХПВ-10;
- легковоспламеняющиеся материалы находятся в хорошо вентилируемом месте;
- запасные выходы для быстрой эвакуации в случае пожара.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что микроклимат, шум и освещенность удовлетворяют необходимым требованиям нормативных документов для помещений данного типа (ГОСТ 12.1.003-83 и СНиП 23-05-95).

Помещение, в котором проводились работы, относится к группе помещений без повышенной опасности с точки зрения поражения электрическим током и все приборы питаются от сети переменного тока промышленной частоты 50 Гц, напряжением 220 В с глухозаземленной нейтралью.

Также в соответствии с ПУЭ 7.3.2, ПУЭ 7.4.2 и ГОСТ 12.1.004-91 приняты меры противопожарной безопасности: рубильники прямого доступа для быстрого отключения установки от сети; огнетушители ОХП-10 и ОХПВ-10; легковоспламеняющиеся материалы находятся в хорошо вентилируемом месте; оборудованы запасные выходы для быстрой эвакуации в случае пожара.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сканирующая туннельная микроскопия возникла чуть более 20 лет, но за это время стала одним из мощных методов анализа полупроводниковых материалов и структур и обусловила появление многочисленных методов сканирующей зондовой микроскопии.

В настоящее время нельзя представить современного инженера, незнающего принципов СЗМ. Без знания принципов действия этих приборов и их возможностей при решении задач микро- и наноэлектроники.

В настоящей работе проведено исследование структуры поверхности тонких полупроводниковых плёнок на основе диоксида олова, полученных золь-гель методом. Установлено влияние времени и температуры отжига на все виды параметров поверхности материала.

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СПИСОК ИСПОЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Быков В., Лазарев М., Саунин С. Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности.// Электроника: НТБ. 1997, N5, с.5-14;
2. Вайнштейн В.М., Фистуль В.И. Широкозонные окисные полупроводники.//Итоги науки и техники. Серия: Электроника и ее применение. –1973. –Т.4, – С.108-152;
3. Вайнштейн В.М., Фистуль В.И. Широкозонные окисные полупроводники.//Итоги науки и техники. Серия: Электроника и ее применение. –1973. –Т.4, – С.108-15;
4. Хансен М., Андерко Р. Структуры двойных сплавов.// М.: Металлургия, 1962;
5. Бурбулевичус Л.И., Вайнштейн В.М. Исследование структурных, электрических и оптических свойств пленок SnO_2 и In_2O_3 . // Известия АН СССР. Неорганические материалы. –1969. -Т.5 – № 3. – С.551-554;
6. Кузнецов А. Я. Полупроводниковая двуокись олова // ФТТ. –1960. –Т.П. – N.1. - С.35-40;
7. *Houston J.E., Kohnke E.E. Optical Quenching of Photoconductivity in Single Crystal of Stannic Oxide // J. Appl. Phys.* –1966. –V.37. – P.3083-3088;
8. *Koch H. Zum optischen Verhalten halbleitender Zinndioxydschichten im nahen ultrarot bei Zimmertemperatur.// Phys. Stat. Sol.* – 1963. – N 3. – P.1619-1622;
9. Крёгер Ф. Химия несовершенных кристаллов.// М.: Иностран. лит-ра., - 1969, - 654с.;
10. *Houston J.E., Kohnke E.E. Photoelectronic Analysis of Imperfections in Brown Stannic Oxide Crystals.// J. of Applied Physics.*-1965.-V. 36. – N 12. – P.3931-3935;
11. Давыдов С.Ю., Мошников В.А., Томаев В.В. Адсорбционные явления в поликристаллических полупроводниковых сенсорах. СПб – 1998;
12. Астафьева Л.В., Скорняков Г.П. Электрическая активность примесей в диоксиде олова// Н.М. – 1981.- т.17, N 9.- С.1637-1643;

13. Шварц Н., Берри Р. Тонкопленочные элементы и окислы.// Сб. Физика тонких пленок, вып. 2, М.: Мир, 1967, С.320;

14. Рябов В.А. Получение прозрачных полупроводниковых покрытий на поверхности стекла методом аэрозолей.// Стекло (Информац. Бюро Ин-та стекла), 1957, N 1, С. 23;

15. Czyzyk S. et al. Processing effects on the kinetics morphology and properties of hybrid sol-gel superhydrophobic coatings // Progress in Organic Coatings. – 2020. – Т. 140. – С. 105501;

16. Paradowska-Stolarz A. et al. Mechanical Properties, Fractal Dimension, and texture analysis of selected 3D-Printed resins used in Dentistry that underwent the Compression Test //Polymers. – 2023. – Т. 15. – №. 7. – С. 1772;

17. Li N. et al. CeO²-stabilised ZrO₂ nanoparticles with excellent sintering performances synthesized by sol-gel-flux method //Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – Т. 42. – №. 4. – С. 1645-1655;

18. Xiao C. et al. Evaluating fabric smoothness appearance by a mechanical test system for fabric shape retention // The Journal of The Textile Institute. – 2023. – Т. 114. – №. 5. – С. 726-736;

19. Saito A. et al. Novel optical applications inspired by the Morpho butterfly's coloration: technology transfer from reflection to transmission // Japanese Journal of Applied Physics. – 2022. – Т. 61. – №. SD. – С. SD0801;

20. Wang G. et al. Quantitative analysis of microscopic structure and gas seepage characteristics of low-rank coal based on CT three-dimensional reconstruction of CT images and fractal theory // Fuel. – 2019. – Т. 256. – С. 115900.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Задание на выпускную квалификационную работу

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

«Утверждаю»
Зав. кафедрой НиМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
«09» июня 2023 г.

З А Д А Н И Е на бакалаврскую работу

1. Студента гр. 19ПД1 факультета информационных технологий и электроники

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и нанoeлектроника»

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника

Хабибов Анушервон Курбоналиевич

(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Пронин Игорь Александрович

(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы: Исследование пленок полупроводниковых оксидов методом атомно-силовой микроскопии

Тема утверждена приказом ПГУ № 352 а/о от «09» июня 2023 г.

4. Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)

Исследовать поверхностную структуру плёнок полупроводниковых оксидных материалов методом атомно-силовой микроскопии в полуконтактном режиме. Обеспечить возможность исследования следующих типов оксидов: ZnO, SnO₂, SnO₂-SiO₂. Основные характеристики образцов:

- метод получения: золь-гель технология;
- материал подложки: ситалл, кремний;
- материал плёнки: ZnO, SnO₂, SnO₂-SiO₂;
- размер образца: 5 × 5 мм².

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1. Анализ режимов работы атомно-силового микроскопа

1.1 Общие представления работы атомно-силового микроскопа

1.2 Особенности анализа поверхности плёнок методами атомно-силовой микроскопии

2. Обзор свойств полупроводниковых оксидов

2.1 Физико-химические свойства диоксида олова

2.2 Электрические свойства диоксида олова

3. Особенности исследования плёнок полупроводниковых оксидов методом атомно-силовой микроскопии

4. Безопасность жизнедеятельности в химической лаборатории

4.1 Микроклимат

4.2 Шум

4.3 Освещенность

4.4 Работа с химическими веществами

4.5 Электробезопасность при работе с установками и ПЭВМ

4.6 Анализ вредных факторов, сопровождающих работу человека оператора ПЭВМ

4.7 Пожарная профилактика

5.2 Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)

1. Атомно-силовой микроскоп (1 слайд)

2. Золь-гель синтез плёнок ZnO (1 слайд)

3. Золь-гель синтез плёнок на основе SnO₂ (1 слайд)

4. Структура поверхности плёнок ZnO, исследованная в полуконтактном режиме АСМ (1 слайд)

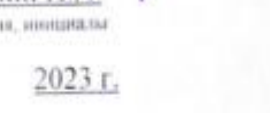
5. Структура поверхности плёнок SnO₂, полученных при различных температурах отжига (1 слайд)

6. Структура поверхности плёнок SnO₂, полученных при различных временах отжига (1 слайд)

7. Полупроводниковые плёнки SnO₂-SiO₂ с лабиринтной структурой (1 слайд)

8. Анализ влияния режимов синтеза на структуру полупроводниковых плёнок (1 слайд)

9. Календарный график по выполнению бакалаврской работы

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
1. Анализ режимов работы атомно-силового микроскопа	25%	10.06.2023	
2. Обзор свойств полупроводниковых оксидов	20%	11.06.2023	
3. Особенности исследования плёнок полупроводниковых оксидов методом атомно-силовой микроскопии	15%	12.06.2023	
4. Безопасность жизнедеятельности	20%	13.06.2023	
Графическая часть	10%	13.06.2023	
Оформление пояснительной записки	10%	14.06.2023	

Руководитель бакалаврской работы


подпись

Пронин И.А.

фамилия, инициалы

Дата выдачи задания

«09» июня 2023 г.

Задание к исполнению принял


подпись

Хабибов А.К.

фамилия, инициалы

«09» июня 2023 г.

Бакалаврскую работу к защите допустить

Декан факультета


подпись

Кревчик В.Д.

фамилия, инициалы

« 19 » 06 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе

«Антиплагиат.ВУЗ»

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Ректору Пензенского государственного
университета Гулякову А.Д.
студента 4 курса ФИТЭ очной формы
обучения
Хабибова Анушервона Курбоналиевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Хабибов Анушервон Курбоналиевич, студента 4 курса очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, Микроэлектроника и твердотельная электроника, прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат.ВУЗ» бакалаврской выпускной квалификационной работы на тему «Исследование плёнок полупроводниковых оксидов методом атомно-силовой микроскопии», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.

ВКР представлена на проверку «16.06.23»

Руководитель ВКР


Пронин И.А.

СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Хабибов Анушеровон Курбоналиевич
Самоцитирование
рассчитано для: Хабибов Анушеровон Курбоналиевич
Название работы: Исследование плёнок полупроводниковых оксидов методом атомно-силовой микроскопии
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ		58.6%	СОВПАДЕНИЯ		40.97%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		32.5%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		50.13%
ЦИТИРОВАНИЯ		8.9%	ЦИТИРОВАНИЯ		8.9%
САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 16.06.2023

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 19.06.2023 10:59

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с 1, 4-46, титульный лист с 2, содержание с 3, приложение с 46-54
Модули поиска: ИПС Адилет, Библиография, Сводная коллекция ЭБС, Интернет Плюс*, Сводная коллекция РГБ, Цитирование, Переводные заимствования (RuEn), Переводные заимствования по eLIBRARY RU (EnRu), Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика, Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте, Переводные заимствования по Интернету (EnRu), Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте, Переводные заимствования издательства Wiley, eLIBRARY RU, СПС ГАРАНТ: аналитика, СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация, IEEE, Медицина, Диссертации НББ, Коллекция НБУ, Перефразирования по eLIBRARY RU, Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика, Перефразирования по Интернету, Перефразирования по Интернету (EN), Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте, Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте, Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Головашкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 19.06.23



Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR код,
который содержит ссылку на отчет

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Презентация ВКР

					ПГУ 2. 11.03.04. 020 ПЗ	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Пензенский государственный университет (ПГУ)
Кафедра nano- и микроэлектроники

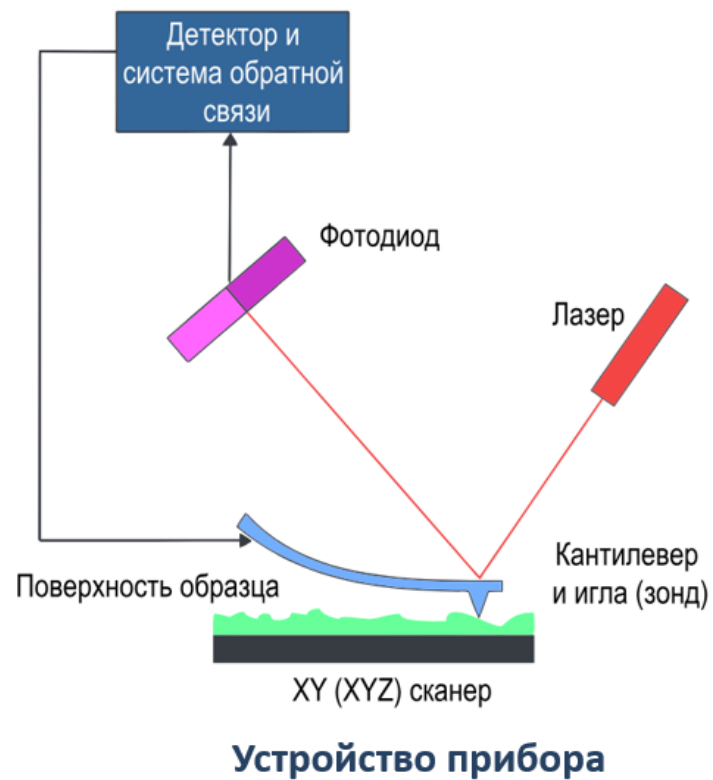


Хабибов Анушервон Курбоналиевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОКСИДОВ МЕТОДОМ
АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

**Научный руководитель – д.т.н., заведующий кафедрой
nano- и микроэлектроники Пронин И.А.**

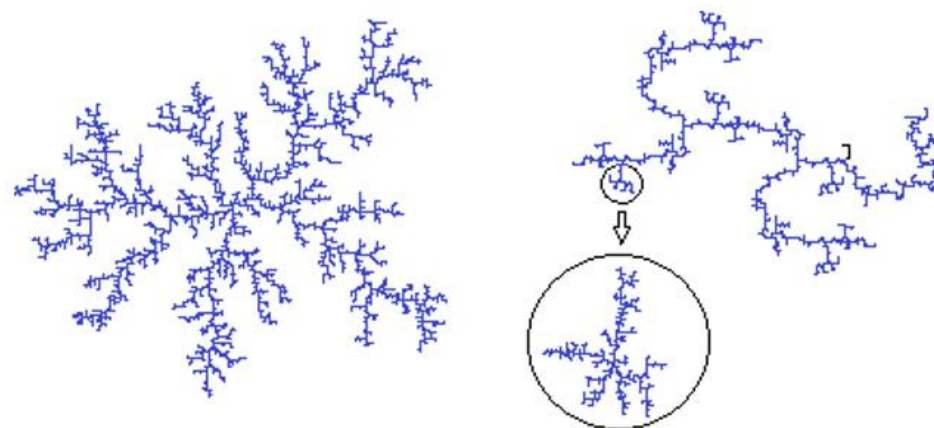
АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОП



ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗ ПЛЁНОК ZnO

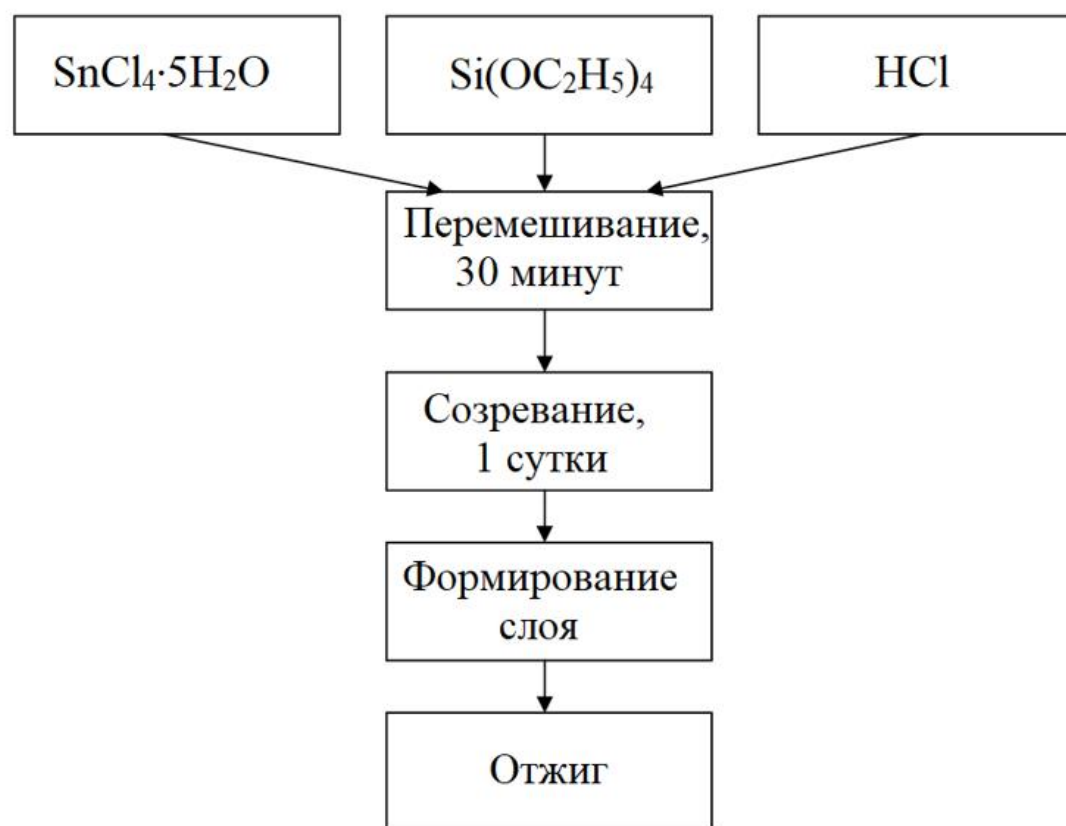


Схема синтеза

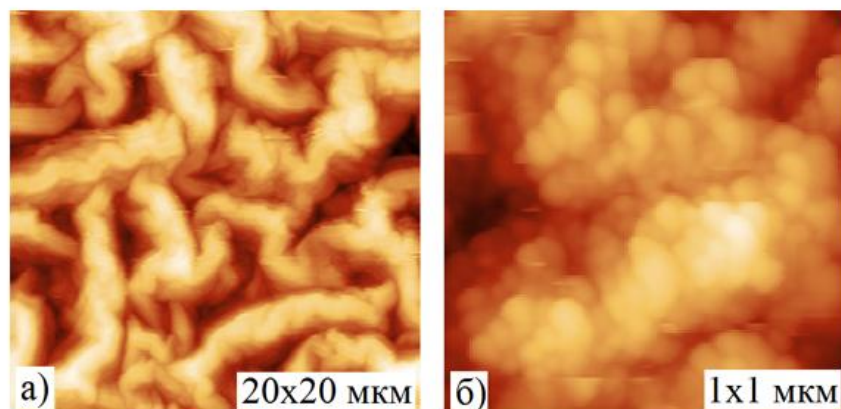


Модель роста частиц

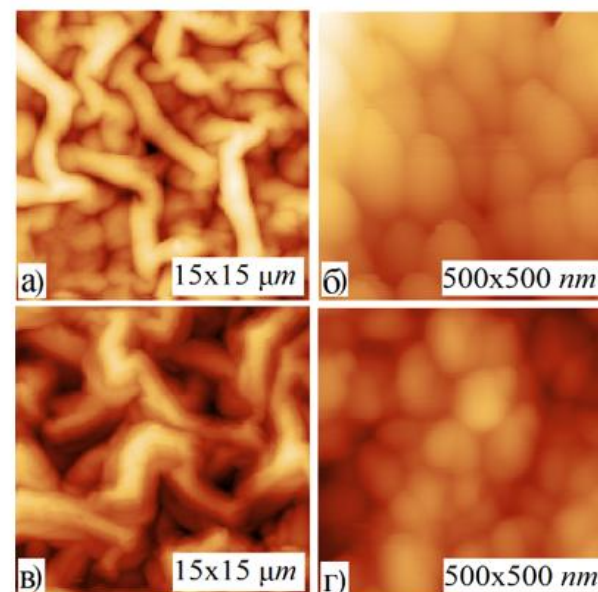
ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗ ПЛЁНОК НА ОСНОВЕ SnO_2



СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНОК ZnO , ИССЛЕДОВАННАЯ В ПОЛУКОНТАКТНОМ РЕЖИМЕ АСМ

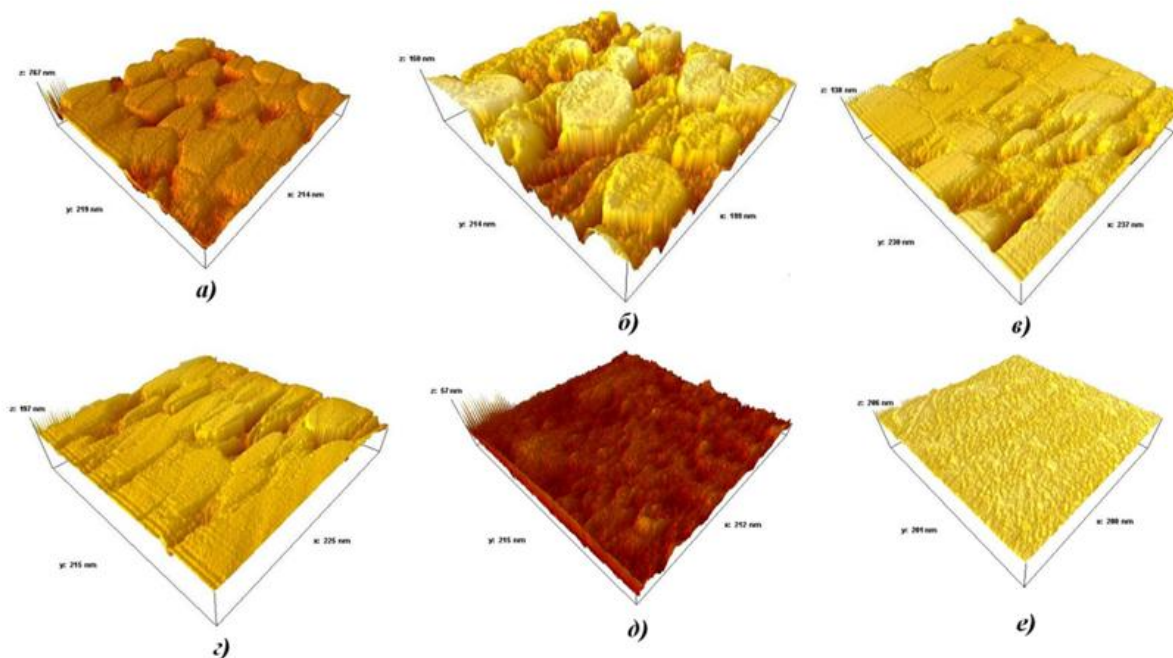


Морфология поверхности пленок ZnO



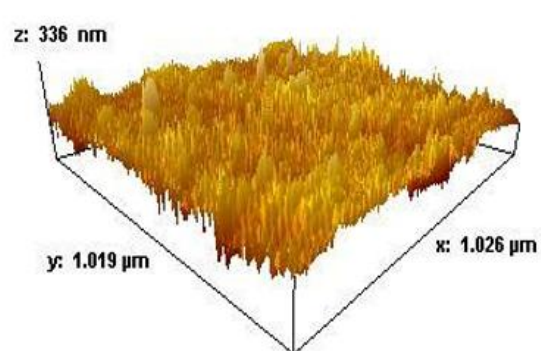
Морфология поверхности пленок ZnO-Cu (а, б), ZnO-Fe (в, г), отражающая два уровня иерархии

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНОК SnO_2 , ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОТЖИГА

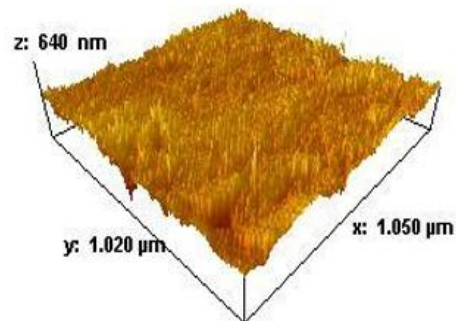


а) – $T_{\text{отжига}} = 250^\circ\text{C}$; б) – $T_{\text{отжига}} = 350^\circ\text{C}$; в) – $T_{\text{отжига}} = 400^\circ\text{C}$;
г) – $T_{\text{отжига}} = 450^\circ\text{C}$; д) – $T_{\text{отжига}} = 500^\circ\text{C}$; е) – $T_{\text{отжига}} = 550^\circ\text{C}$;

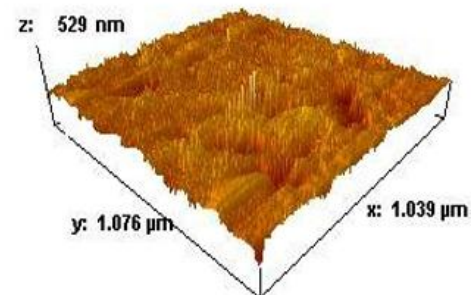
СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНОК SnO_2 , ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕНАХ ОТЖИГА



a)



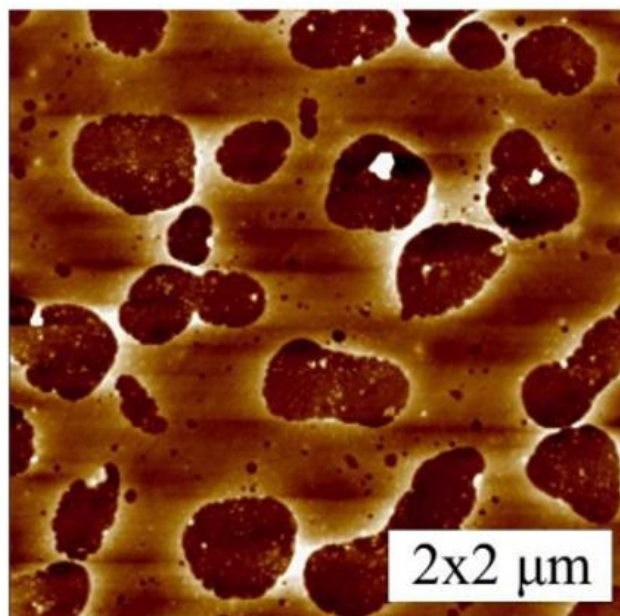
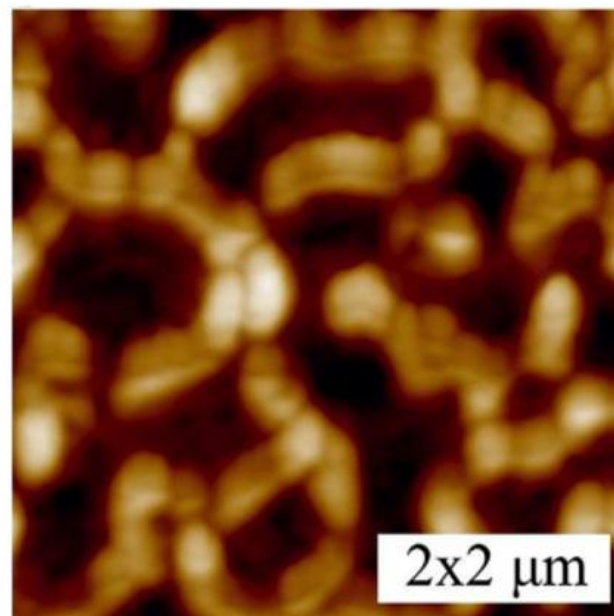
б)



в)

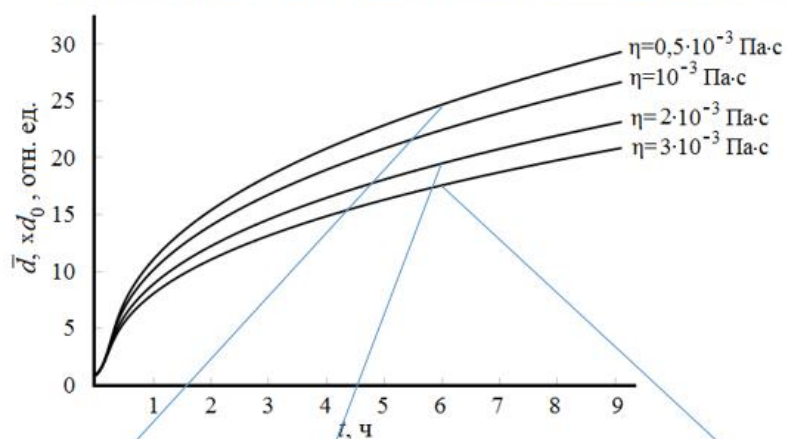
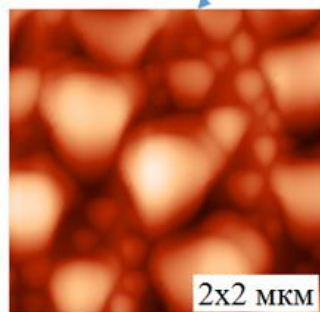
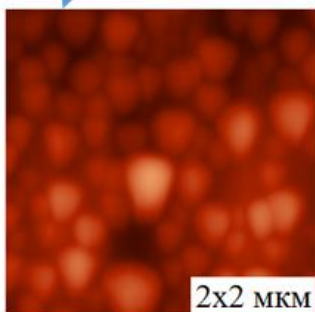
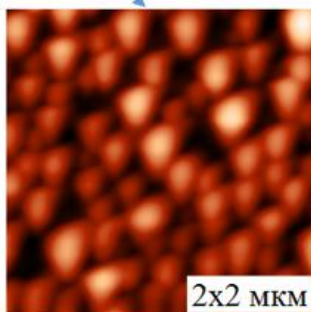
а) 30 минут; б) 60 минут; в) 90 минут

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПЛЁНКИ $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ С ЛАБИРИНТНОЙ СТРУКТУРОЙ

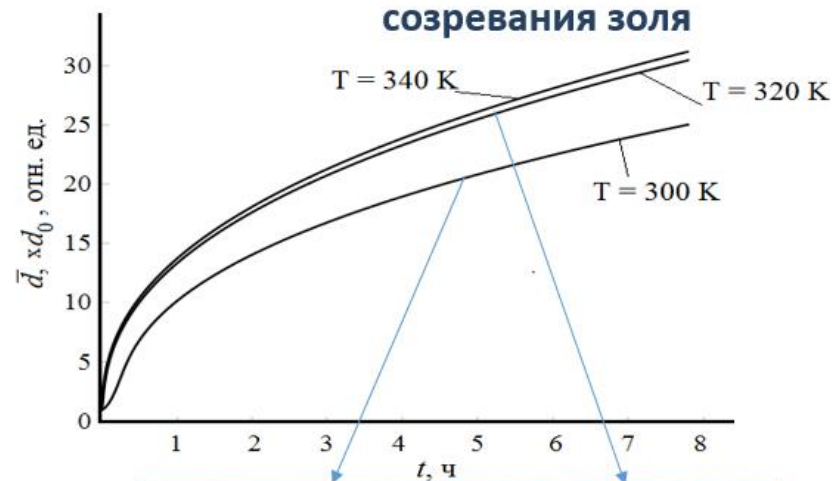
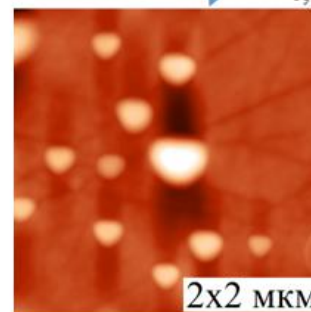
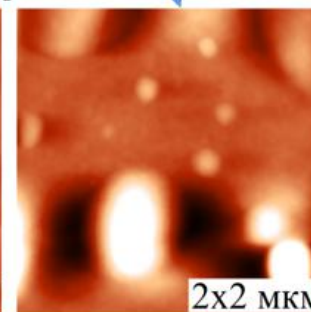


АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ СИНТЕЗА НА СТРУКТУРУ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЁНОК

Структура при различной вязкости золя



Структура при различной температуре созревания золя



Спасибо за внимание!