

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**И. И. Кузьмар, С. М. Завадский**

**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА  
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СУБМИКРОННЫХ  
СТРУКТУР.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области  
информатики и радиоэлектроники в качестве пособия  
для специальности 7-06-0713-02 «Электронные системы и технологии»*

Минск БГУИР 2025

УДК [620.186+620.179.11](076.5)  
ББК 32.844.1я73  
К89

Рецензенты:

кафедра радиофизики и электроники  
учреждения образования «Гомельский государственный  
университет имени Ф. Скорины»  
(протокол № 12 от 12.06.2024);

заведующий кафедрой «Интеллектуальные и мехатронные системы»  
Белорусского национального технического университета  
кандидат технических наук, доцент А. В. Гулай

**Кузьмар, И. И.**

К89

Контроль и диагностика твердотельных субмикронных структур. Лабораторный практикум : пособие / И. И. Кузьмар, С. М. Завадский. – Минск : БГУИР, 2025. – 62 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-802-2.

Содержит описание лабораторных работ, цель которых – закрепить теоретические знания студентов специальности 7-06-0713-02 «Электронные системы и технологии» профилизации «Интегрированные технологии производства электронных средств», полученные ими на лекциях и в процессе самостоятельного изучения дисциплины; ознакомиться со специализированным диагностическим оборудованием отечественных и зарубежных производителей, реализующим методы оптической микроскопии и интерферометрии, атомно-силовой микроскопии, спектральные методы анализа поверхности субмикронных структур; приобрести практические навыки контроля и диагностики морфологии поверхности и функциональных свойств материалов, применяемых при производстве электронных средств.

УДК [620.186+620.179.11](076.5)  
ББК 32.844.1я73

ISBN 978-985-543-802-2

© Кузьмар И. И., Завадский С. М., 2025  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Лабораторная работа № 1. Контроль и диагностика параметров субмикронных структур методом оптической микроскопии.....                                                    | 4  |
| Лабораторная работа № 2. Контроль линейных размеров субмикронных структур методом оптической интерферометрии .....                                                      | 11 |
| Лабораторная работа № 3. Контроль поверхности субмикронных структур методом атомно-силовой микроскопии.....                                                             | 20 |
| Лабораторная работа № 4. Диагностика поверхности субмикронных структур методом атомно-силовой микроскопии .....                                                         | 29 |
| Лабораторная работа № 5. Спектральные методы анализа для диагностики поверхности субмикронных структур .....                                                            | 31 |
| Лабораторная работа № 6. Зондовые методы контроля электрофизических характеристик тонкопленочных структур.....                                                          | 38 |
| Лабораторная работа № 7. Контроль микротвердости тонкопленочных покрытий .....                                                                                          | 44 |
| Лабораторная работа № 8. Триботехнические испытания поверхности тонкопленочных покрытий .....                                                                           | 48 |
| Приложение А. Справочная информация о тестовых образцах для исследований .....                                                                                          | 53 |
| Приложение Б. Пример оформления результатов выполнения лабораторной работы № 4 «Диагностика поверхности субмикронных структур методом атомно-силовой микроскопии» ..... | 55 |

## Лабораторная работа № 1

### КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

#### Цель работы

Изучить принцип действия и методику работы с оптическим микроскопом МИКРО 200-01, приобрести практические навыки. Методом оптической микроскопии исследовать линейные размеры структур и морфологию поверхности покрытий.

#### Теоретические сведения

Оптическая микроскопия – совокупность методов визуализации и анализа объектов, основанная на использовании оптических микроскопов различной конструкции [1].

Описание оборудования и принципов его работы приведено в соответствии с информацией с сайта производителя [1]. Микроскопы МИКРО 200-01, МИКРО 200Т-01 (рисунок 1.1) предназначены для визуального контроля топологии интегральных микросхем на полупроводниковых пластинах и фотошаблонах при производстве изделий электронной техники, для изучения структур шлифов различных тонкопленочных структур, а также для исследований в других областях науки и техники.

Диагностическое оборудование позволяет проводить исследования при увеличении в 50–1250 крат с возможностью оцифровки изображения и обработкой на компьютере.



*a*



*б*

*a* – МИКРО 200-01; *б* – МИКРО 200Т-01

Рисунок 1.1 – Оптические микроскопы [2]

Технические параметры микроскопов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические параметры микроскопа МИКРО 200(Т)-01

| Характеристика                              | Значение                                       |                  |                  |                  |                   |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Окуляры (2 шт.)                             | 10 <sup>×</sup> /22                            |                  |                  |                  |                   |
| Объективы                                   | 5 <sup>×</sup>                                 | 10 <sup>×</sup>  | 20 <sup>×</sup>  | 50 <sup>×</sup>  | 100 <sup>×</sup>  |
| – числовая апертура                         | 0,15                                           | 0,25             | 0,45             | 0,80             | 0,90              |
| – рабочие отрезки объективов, мм            | 5,6                                            | 2,25             | 1,25             | 0,55             | 0,32              |
| – разрешающая способность, лин/мм, не менее | 400                                            | 750              | 1200             | 1800             | 2400              |
| Увеличение, крат                            | 50 <sup>×</sup>                                | 100 <sup>×</sup> | 200 <sup>×</sup> | 500 <sup>×</sup> | 1000 <sup>×</sup> |
| Линейное поле зрения, мм, не менее          | 4,4                                            | 2,20             | 1,10             | 0,42             | 0,21              |
| Револьверная головка                        | Пятипозиционная с электромеханическим приводом |                  |                  |                  |                   |
| Насадка тринокулярная                       | С переменным наклоном окулярных тубусов        |                  |                  |                  |                   |
| Предметный стол                             | С ручным управлением                           |                  |                  |                  |                   |
| – ход стола, X, Y, мм, не менее             | 200 × 200                                      |                  |                  |                  |                   |
| – ход стола, Z, мм, не менее                | 25                                             |                  |                  |                  |                   |
| – тонкая фокусировка, мм/оборот             | 0,05                                           |                  |                  |                  |                   |
| Блок питания                                | ~ 230 В, 50 Гц                                 |                  |                  |                  |                   |
| Блок светофильтров                          | Синий, зеленый                                 |                  |                  |                  |                   |
| Габариты, мм                                | 750 × 530 × 500                                |                  |                  |                  |                   |
| Масса, кг                                   | 45                                             |                  |                  |                  |                   |

В микроскопах МИКРО 200-01, МИКРО 200Т-01 реализованы следующие режимы наблюдения объекта:

- светлое и темное поле в отраженном свете (для МИКРО 200-01);
- светлое поле в проходящем свете, светлое и темное поле в отраженном свете (для МИКРО 200Т-01);
- поляризационный контраст в отраженном свете (дополнительно);
- дифференциально-интерференционный контраст в отраженном свете (дополнительно).

Светлопольная микроскопия основана на формировании изображения под воздействием пучка света. Особенно эффективно ее методы применяются для контроля структуры изучаемых объектов, содержащих в себе либо производящие тени элементы, либо элементы, которые имеют очень резко отличающийся от своего окружения коэффициент преломления.

Метод светлого поля в отраженном свете применяется для изучения непрозрачных отражающих свет объектов (окрашенные шлифы металлов или руд, биологических тканей). Особенно эффективным применение данного метода может быть для контроля полупроводниковых пластин и фотошаблонов при проектировании и производстве различных изделий функциональной

электроники, т. к. они содержат в своем составе элементы, имеющие очень резко отличающийся от своего окружения коэффициент преломления. Освещение объекта наблюдения производится строго сверху через объектив, являющийся в данном случае конденсором. Изображение создается за счет того, что разные участки объекта наблюдения имеют разную отражающую способность, а отраженные лучи имеют различную интенсивность.

Метод светлого поля в проходящем свете является одним из самых широко применимых методов наблюдения в оптической микроскопии. Он идеально подходит для изучения прозрачных объектов, состоящих из элементов с разной оптической плотностью (тонкие окрашенные срезы животных и растительных тканей, тонкие шлифы минералов и т. д.). Особенно эффективно данный метод может применяться для обнаружения дефектов фотошаблонов, т. к. изображение получается очень контрастным из-за разной плотности элементов структуры и стеклянной подложки фотошаблона.

Световой пучок, выходящий из осветителя микроскопа, проходит через образец и объектив и дает вблизи фокальной плоскости окуляра равномерно освещенное поле. Элементы структуры образца частично поглощают и частично рассеивают падающий на них свет, в результате чего на светлом фоне формируется темное изображение. Данный метод подходит также и для наблюдения неабсорбирующих (не поглощающих свет) объектов, но лишь в том случае, если они рассеивают световой пучок настолько сильно, что значительная часть его не попадает в объектив.

Темнопольная микроскопия основана на рассеивании света микроскопическими объектами, в том числе теми, размеры которых меньше предела разрешения светового микроскопа.

Свет от осветителя и зеркала проходит через специальный темнопольный конденсор, который формирует световой пучок в виде полого конуса и направляет его на объект наблюдения. Роль темнопольного конденсора в отраженном свете выполняет эллиптическое зеркало, надетое на оправу объектива. При выходе из конденсора основная часть лучей проходит мимо объектива (который находится внутри этого конуса). Изображение в микроскопе формируется при помощи лишь небольшой части лучей, рассеянных микрочастицами объекта наблюдения внутрь конуса и прошедших через объектив. Таким образом, в поле зрения на темном фоне видны светлые изображения элементов структуры объекта, отличающиеся от окружающей среды показателем преломления.

Метод темного поля в отраженном свете чаще всего применяется для изучения непрозрачных образцов, которые невозможно увидеть с помощью светlopольной микроскопии, например шлифы металлов. Кроме того, метод идеально подходит для контроля мелких дефектов на полупроводниковых пластинах, которые на изображении имеют вид ярких вспышек.

Метод поляризационного контраста применяется главным образом для изучения анизотропных объектов, обладающих двойным лучепреломлением или отражением. Это минералы, кристаллы, шлаки, некоторые животные и растительные ткани и клетки, искусственные и естественные волокна. Поляризация

представляет собой метод исследования объектов в поляризованном свете, т. е. свете, образованном двумя лучами, поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях. С этой целью к обычной схеме микроскопа добавляют два специальных поляризационных фильтра – поляризатор и анализатор. Эти фильтры, введенные последовательно в ход лучей и повернутые относительно друг друга на  $90^\circ$ , не пропускают свет. Первый фильтр (поляризатор) изменяет плоскость поляризации света таким образом, что пропущенный им свет не может пройти через второй фильтр (анализатор). При работе с проходящим светом поляризатор устанавливается в конденсор, а анализатор находится за объективом. В отраженном свете анализатор остается на своем месте, а поляризатор устанавливается перед дихроичным зеркалом сразу после апертурной диафрагмы осветителя отраженного света. В обоих случаях объект наблюдения освещается плоскополяризованным светом. Если объект при освещении поворачивает направление колебаний поляризованного света из плоскости, заданной поляризатором, то в окулярах мы начинаем видеть свет, который частично пропускает анализатор. Применение поляризации позволяет убрать блики поверхностей с высоким коэффициентом отражения, получить качественное и насыщенное изображение, измерить углы поляризации для определения состава объекта.

Метод дифференциально-интерференционного контраста (метод Номарского) широко применяется для создания контраста в неокрашенных прозрачных образцах и используется как в материаловедении, так и при проведении биологических исследований. Он позволяет определить оптическую плотность исследуемого объекта на основе принципа интерференции и таким образом увидеть недоступные глазу детали. Относительно сложная оптическая система позволяет создать черно-белую картину образца на сером фоне. Принцип данного метода состоит в том, что поляризованный луч расщепляется призмой Номарского на два луча, которые проходят через образец разными оптическими путями. Длина этих оптических путей (т. е. произведение показателя преломления и геометрической длины пути) различна. Впоследствии эти лучи интерферируют при слиянии. Это позволяет создать объемное рельефное изображение, соответствующее изменению оптической плотности образца, акцентируя линии и границы. Чем круче становится градиент оптических пучков, тем резче контраст изображения.

Микроскоп МИКРО 200 позволяет работать в режимах наблюдения объекта как в отраженном свете по методу светлого и темного поля, так и в проходящем свете.

Несущей частью микроскопа является корпус и основание. Сверху на корпусе закреплена насадка гринокулярная, имеющая выход для установки телевизионной камеры с присоединительной резьбой. Камера как дополнительное устройство устанавливается через переходной адаптер ТВ.

На левой стороне корпуса от оператора расположена ручка смены фильтров: голубого и зеленого. Ручкой на правой стороне осуществляется управление полевой диафрагмой, предназначенной для согласования диаметров поля осветителя объектива. При помощи рукоятки производится управление

апертурной диафрагмой для измерения степени заполнения светом выходного зрачка объектива, что определяет разрешающую способность микроскопа, а также освещенность контролируемого объекта.

Спереди микроскопа есть пульт управления с ручкой для изменения яркости свечения лампы, с кнопками переключения объективов, а также прозрачный щиток, защищающий рабочую зону микроскопа.

Стол микроскопа служит для перемещения объекта наблюдения. С помощью вертикального перемещения стола осуществляется наводка микроскопа на резкое изображение.

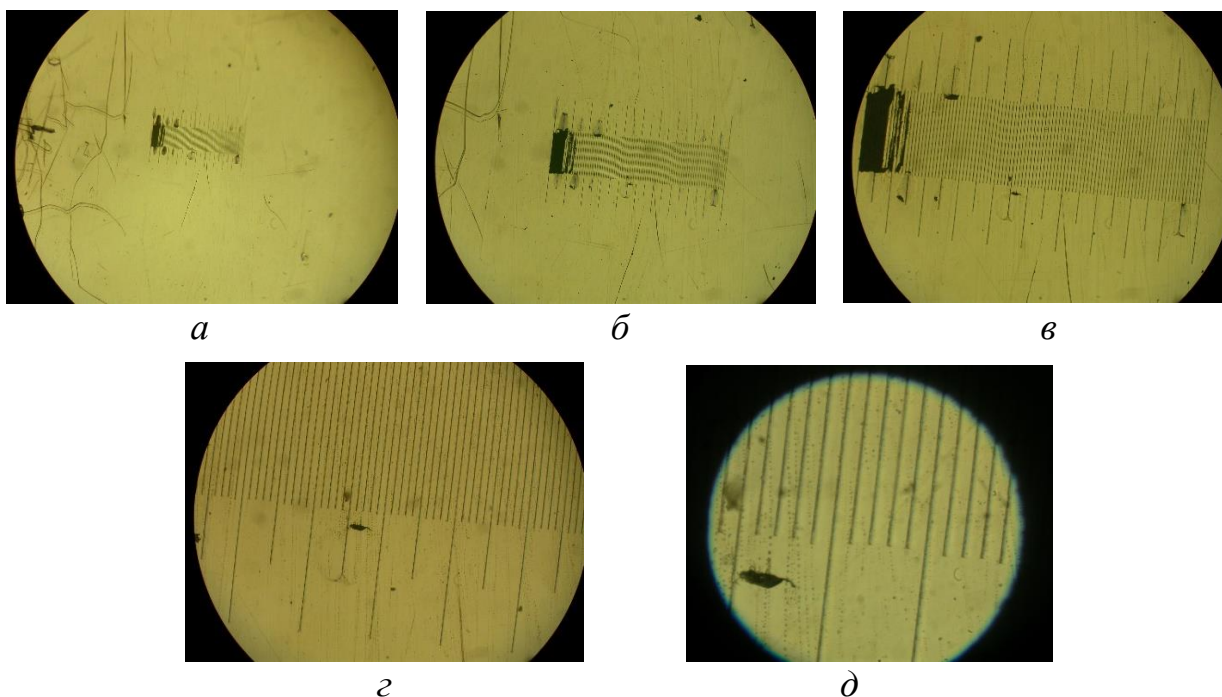
Для работы в режиме светлого поля необходимо установить оптимальную диафрагму для используемого объектива. В большинстве случаев оптимальной для хорошей контрастности и разрешения считается диафрагма, изображение которой в плоскости выходного зрачка объектива составляет до  $2/3$  диаметра зрачка. Также необходимо установить оптимальную полевую диафрагму в зависимости от используемого окуляра. Для работы в режиме темного поля необходимо полностью открыть апертурную и полевую диафрагмы.

Использование метода оптической микроскопии позволяет как контролировать линейные размеры топологии интегральных микросхем на полупроводниковых пластинах и фотошаблонах, так и исследовать структурные особенности морфологии многофункциональных покрытий. В радиоэлектронной промышленности нашли применение тонкопленочные системы, полученные химическим или электрохимическим осаждением, с использованием ионно-плазменных технологий. В зависимости от условий формирования осадки имеют структурные особенности, которые определяют функциональные свойства изделий радиоэлектронной промышленности.

Классификационные признаки для описания морфологии следующие [2]:

- по однородности размера зерен: равнозернистая или неравнозернистая;
- по абсолютному размеру зерен: крупнозернистая ( $10^{-2}$ – $10^{-3}$  мм), среднезернистая ( $10^{-3}$ – $10^{-4}$  мм), мелкозернистая ( $10^{-4}$ – $10^{-5}$  мм), ультрадисперсная (менее 5–10 нм);
- по форме зерен: равноосная, пластинчатая, игольчатая;
- по расположению плотно упакованных плоскостей зерен относительно подложки: латеральное, нормальное, беспорядочное;
- по взаимной ориентации зерен: неориентированная, ориентированная, полиориентированная;
- по внутреннему строению зерен: монокристаллическое, субзернистое, двойниковое.

Изображения поверхностей тонкопленочных структур, их морфологию и линейные размеры, полученные с помощью оптического микроскопа МИКРО 200-01, можно проанализировать и дать количественную оценку с помощью приложенных библиотек мир – шаблонов эталонного изображения для соответствующего увеличения с нанесенным рисунком в виде измерительной шкалы (рисунок 1.2).



*a* – увеличение  $\times 5$ ; *б* – увеличение  $\times 10$ ; *в* – увеличение  $\times 20$ ;

*г* – увеличение  $\times 40$ ; *д* – увеличение  $\times 100$

Рисунок 1.2 – Мира при увеличении объектива

### Порядок выполнения работы

1 При выполнении заданий практических занятий по дисциплине «Контроль и диагностика субмикронных структур» студентами специальности 7-06-0713-02 «Электронные системы и технологии» профилизации «Интегрированные технологии производства электронных средств» сформированы тестовые образцы с электрохимическими покрытиями для исследований при выполнении лабораторных работ. В приложении А приведена соответствующая справочная информация по каждому образцу: номер образца, условия его формирования, количественный элементный состав по результатам EDX-анализа согласно источнику [3].

2 Получить в соответствии с номером варианта образцы для исследований (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Распределение тестовых образцов для исследований студентами

| Номер варианта | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Номер образца  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  | 1  | 8  | 1  | 1  |
|                | 10 | 3  | 4  | 5  | 6  | 4  | 3  | 6  | 9  | 4  | 2  |
|                | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 10 | 9  | 7  |

3 Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации оптического микроскопа МИКРО 200Т-01. Подготовить оптический микроскоп к работе.

4 Согласно правилам работы с микроскопом МИКРО 200Т-01 получить снимки поверхности исследуемых образцов с увеличением  $\times 5$ ,  $\times 10$ ,  $\times 20$ ,  $\times 40$ ,  $\times 100$ .

5 Наложить соответствующую миру на изображение. Описать полученные изображения тонкопленочных структур в соответствии с морфологической классификацией.

6 Проанализировать результаты исследований, сделать вывод о влиянии условий формирования на структуру тонкопленочных покрытий.

### **Содержание отчета**

1 Цель работы.

2 Теоретическая часть.

3 Экспериментальные данные и их обработка.

4 Выводы.

### **Контрольные вопросы и задания**

1 Что такое оптическая микроскопия?

2 Какие режимы наблюдения объекта реализованы в микроскопе МИКРО 200-01?

3 Особенности метода светлопольной микроскопии.

4 Особенности метода темнопольной микроскопии.

5 Классификационные признаки при описании морфологии поверхности.

### **Список использованных источников**

1 Открытое акционерное общество «Оптоэлектронные системы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.optes.by>.

2 Ковенский, И. М. Металловедение покрытий : учеб. для вузов / И. М. Ковенский, В. В. Поветкин. – М. : Интермет Инжиниринг, 1999. – 296 с.

3 Кузьмар, И. И. Метод нестационарного электролиза для управления составом поликомпозиционных никелевых покрытий / И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер, Д. Ю. Гульпа // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. XIII Междунар. симпозиума, Минск, 5–7 апреля 2023 г. : в 2 ч. / Беларуская навука. – Минск, 2023. – Ч. 2. – С. 55–62.

## Лабораторная работа № 2

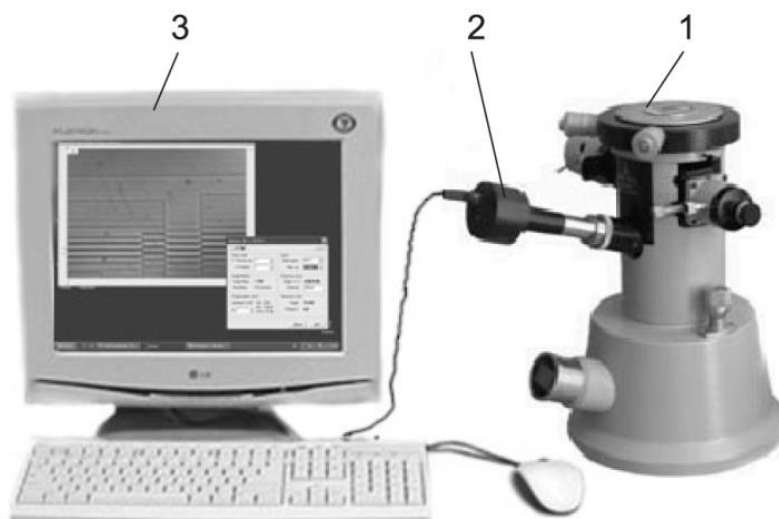
### КОНТРОЛЬ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

#### Цель работы

Изучить принцип действия и методику работы с профилометром оптическим интерферометрическим ПОИ-08, приобрести практические навыки. Методом оптической интерферометрии измерить планиметрические размеры элементов твердотельной электроники.

#### Теоретические сведения

Для контроля размеров топологии тонкопленочных структур и морфологии поверхности можно использовать метод интерферометрии. Профилометр оптический интерферометрический ПОИ-08 (рисунок 2.1, таблица 2.1) – это программно-аппаратный комплекс, реализованный на базе микроинтерферометра МИИ-4, оснащенный цифровой программной системой регистрации и обработки информации [1; 2].



1 – блок регистрации интерференционной картины (МИИ-4);

2 – модуль регистрации цифровых изображений (цифровой окуляр);

3 – управляющий блок на базе ПК

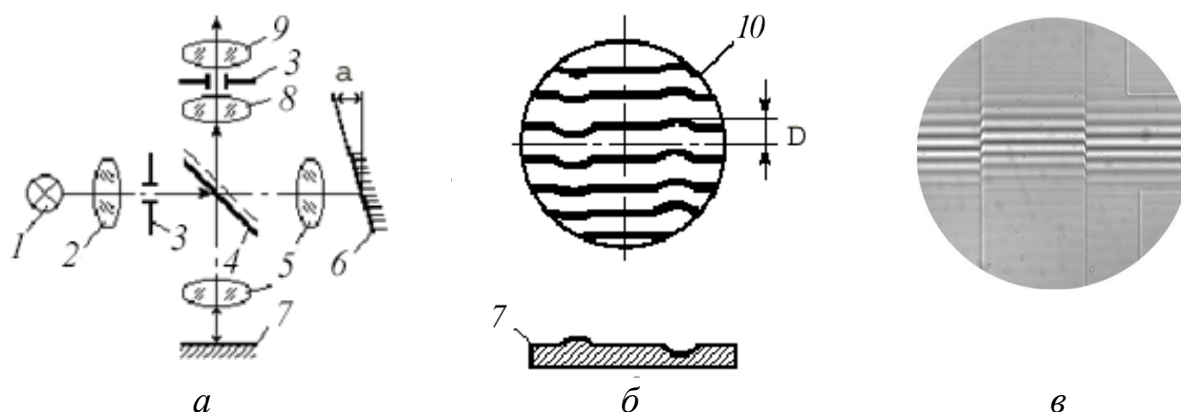
Рисунок 2.1 – Профилометр оптический интерферометрический ПОИ-08

Следующая информация приведена в соответствии с руководством по эксплуатации прибора [1]. Прибор позволяет определить высоту профиля поверхности в выбранном месте исследования в диапазоне размеров от 10 нм до 5 мкм в изучаемой области размером до  $300 \times 300$  мкм, определить планиметрические

линейные размеры объектов на цифровых изображениях. Оптическая схема микроинтерферометра и пример интерферограммы исследуемого объекта приведены на рисунке 2.2.

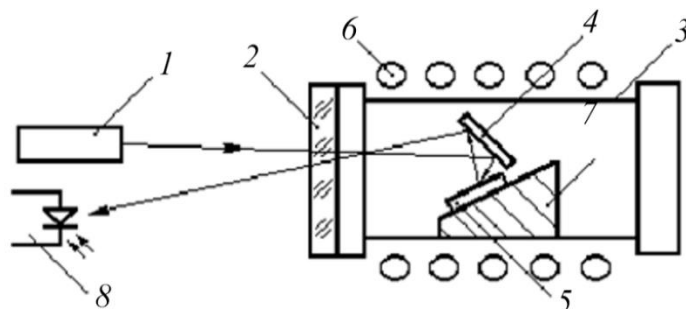
Таблица 2.1 – Технические характеристики профилометра оптического интерферометрического ПОИ-08

| Характеристика                                            | Значение           |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Блок регистрации интерференционной картины (МИИ-4)</b> |                    |
| Вертикальное разрешение, мкм                              | 0,01               |
| Максимальная высота измерения, мкм                        | 5                  |
| Максимальное поле зрения, мкм                             | $0,32 \times 0,32$ |
| Оптическое увеличение, крат                               | 120                |
| <b>Модуль регистрации цифровых изображений</b>            |                    |
| Тип, цветовой формат                                      | ПЗС, RGB           |
| Размер матрицы, пиксел                                    | $0,64 \times 0,48$ |
| Физический размер (диагональ), мм                         | 6,35               |
| Интерфейс передачи данных                                 | USB                |
| <b>Условия эксплуатации</b>                               |                    |
| Рабочее напряжение                                        | 220 В, 50 Гц       |
| Температура окружающего воздуха, °С                       | 10–30              |
| Относительная влажность воздуха, %                        | до 80              |
| Атмосферное давление, кПа                                 | 84–107 (630–800)   |



1 – осветитель; 2 – конденсор; 3 – диафрагма; 4 – светоделительное полупрозрачное зеркало; 5 – микрообъективы; 6 – эталонное зеркало; 7 – исследуемая поверхность; 8, 9 – окуляр; 10 – интерферограмма  
Рисунок 2.2 – Оптическая схема микроинтерферометра (а), схема наблюдаемой интерферограммы (б) и пример интерференционной картины в белом освещении (в) [1; 2]

Принцип действия микроинтерферометра Линника МИИ-4 основан на сравнении световых волн, получаемых при отражении когерентных пучков света от контролируемой и эталонной поверхностей (рисунок 2.3).



- 1 – лазер; 2 – оптическое окно; 3 – трубчатый реактор; 4 – зеркало;  
5 – пластина; 6 – ВЧ-индуктор;  
7 – графитовый нагреватель; 8 – фотоприемник

Рисунок 2.3 – Оптическая схема лазерного интерференционного прибора для контроля толщины диэлектрических пленок [1; 2]

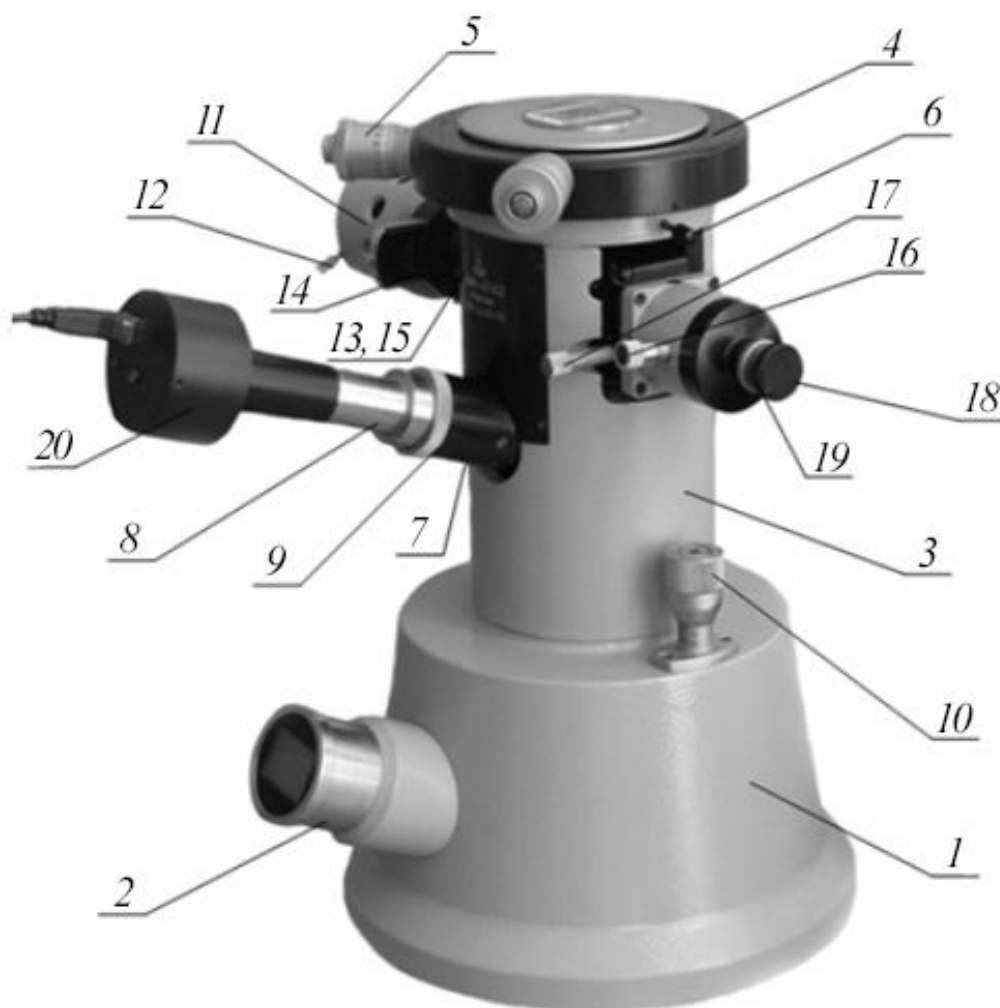
Внешний вид блока регистрации интерференционной картины с цифровым окуляром представлен на рисунке 2.4. Измерительный столик прибора имеет координатное перемещение в двух взаимно перпендикулярных направлениях (по 10 мм каждое) и вращение на  $360^\circ$  относительно вертикальной оси. Цена деления барабана микрометрических винтов столика – 0,005 мм.

Микроинтерферометр имеет круглое основание 1, на котором установлена рамка 2 с матовым стеклом. К верхнему торцу основания привинчена полая цилиндрическая колонка 3, на которой установлен предметный столик 4. При помощи двух микрометрических винтов 5 столик можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях, величину перемещения столика отсчитывают по шкалам барабанов винтов. Столик можно также поворачивать вокруг вертикальной оси и стопорить винтом 6. В колонке 3 под углом  $70^\circ$  к вертикальной оси расположен визуальный тубус 7, в отверстие которого устанавливается прикладываемый к микроинтерферометру симметричный окуляр  $\times 15$  со шкалой или сеткой.

В приборе ПОИ-08 для измерения величины искривления интерференционных полос на наружный диаметр тубуса вместо окуляра или окулярного микрометра 8 (МОВ-1-15х) устанавливается модуль регистрации цифровых изображений 20.

На тубусе имеется кольцо 9, вращением которого можно вводить в оптическую систему или выводить из нее зеркало визуального тубуса. При визуальном наблюдении или измерении зеркало должно быть введено в оптическую систему, а при фотографировании – выведено. Фокусировка микроскопа на объект осуществляется перемещением интерференционной головки при вращении микрометрического винта 10. Величина вертикального перемещения

интерференционной головки может быть отсчитана по шкале барабана микрометрического винта. Интерференционная головка укреплена на внутреннем стакане микроинтерферометра. Она состоит из левой, средней и правой частей.



- 1 – лазер; 2 – оптическое окно; 3 – трубчатый реактор; 4 – зеркало;  
 5 – пластина; 6 – ВЧ-индуктор; 7 – графитовый нагреватель;  
 8 – фотоприемник; 9 – кольцо; 10 – микрометрический винт; 11 – фонарь;  
 12, 17, 18 – винты; 13 – трубка; 14 – пластинка; 15 – кольцо с накаткой;  
 16 – рукоятка; 19 – контргайка

Рисунок 2.4 – Микроинтерферометр Линника МИИ-4

Левая часть головки включает в себя фонарь 11 с винтами 12 (для центрировки лампы) и трубку 13, в которую вмонтирована осветительная часть системы. В трубке установлена горизонтально выдвигающаяся пластинка 14 с тремя отверстиями. В двух крайних отверстиях этой пластинки закреплены светофильтры разных характеристик (зеленый или желтый) для получения монохроматического света, среднее отверстие, свободное, используется при работе в белом свете. Вращением кольца с накаткой 15 изменяется диаметр отверстия апертурной диафрагмы. В среднюю часть интерференционной головки ввинчен

объектив. В корпусе средней части установлены разделительная пластинка и компенсатор. Рукоятка 16 служит для включения шторки. При включенной шторке лучи не попадают в объектив. В этом случае на микроинтерферометре можно работать как на металлографическом микроскопе. На торце рукоятки 16 нанесена стрелка, указывающая положение шторки. В правой части головки установлены объектив и эталонное зеркало. Эта часть имеет устройство для изменения ширины и направления интерференционных полос. Ширина полос изменяется вращением винта 17 вокруг его оси. Изменение направления полос производится этим же винтом путем вращения его вокруг оси интерференционной головки. Винт 18 служит для смещения интерференционных полос в поле зрения микроскопа.

С помощью микрометрического винта 10 можно добиться наиболее резкого изображения полос и исследуемой поверхности. Если при резкой фокусировке на объект наиболее резкие и контрастные интерференционные полосы получились не в центре поля зрения, то следует отвернуть контргайку 19 и, вращая винт 18, привести полосы в центр поля зрения. Затем проверить фокусировку по исследуемой поверхности и закрепить винт 18 контргайкой 19. Винтом 18 и контргайкой 19 разрешается пользоваться только в случае, описанном выше, в других случаях трогать винт и контргайку не рекомендуется.

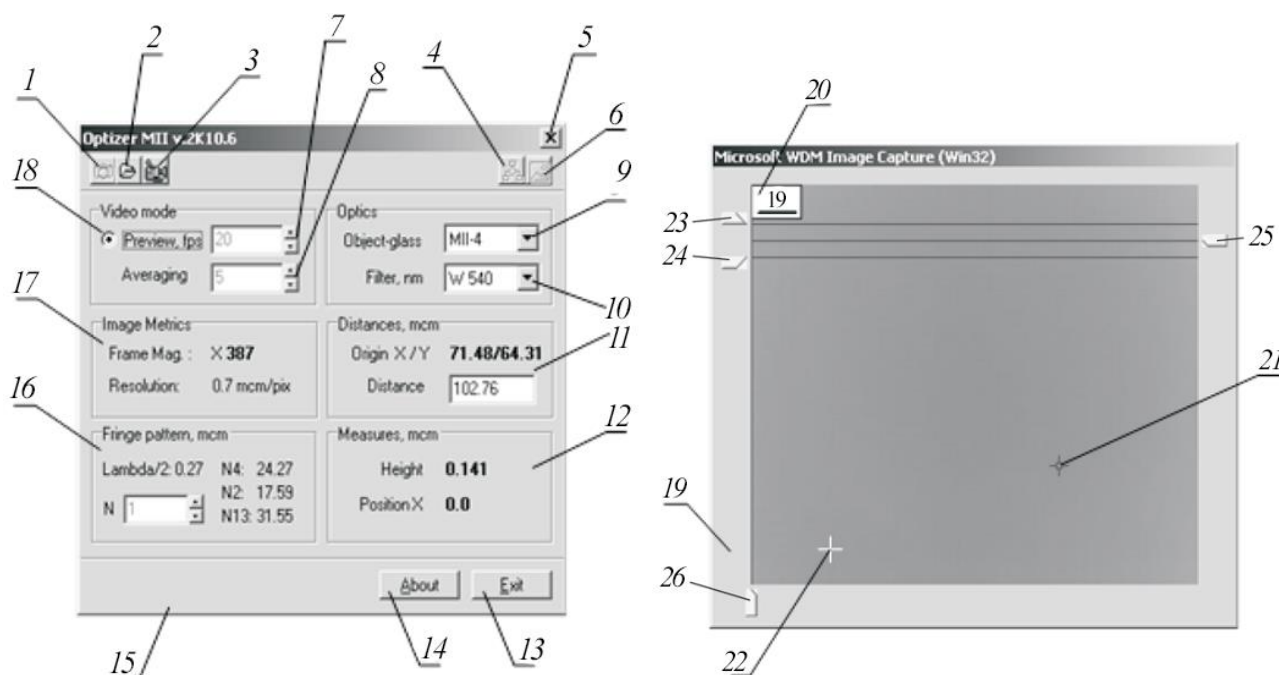
Для получения большей контрастности полос нужно поворотом кольца 15 несколько уменьшить отверстие апертурной диафрагмы. Вращением винта 17 вокруг его оси установить необходимый для работы интервал между полосами. Поворотом винта 17 вокруг оси интерференционной головки установить интерференционные полосы перпендикулярно штрихам на исследуемой поверхности. Для работы с монохроматическим светом необходимо включить один из светофильтров перемещением в одно из крайних положений пластинки 14.

На рисунке 2.5 представлен графический интерфейс управляющей программы с обозначением основных управляющих элементов, а на рисунке 2.6 – окна работающей программы при измерении элементом топологии ИМС. Прибор реализует абсолютный метод измерения и не требует проверки. Точность результатов определения высот неровностей определяется точностью отсчетов положения интерференционных полос.

### **Порядок выполнения работы**

1 Ознакомиться с документом «Техническое описание и инструкция эксплуатации. Профилометр оптический интерферометрический ПОИ-8» (государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси»).

2 Подготовить профилометр оптический интерферометрический ПОИ-8 к работе.



1 – захват кадра; 2 – запись изображения; 3 – режим просмотра видеопотока; 4 – установка источника сигнала; 5 – системная кнопка закрытия программы; 6 – установка формата кадра; 7 – установка скорости просмотра видеопотока; 8 – число усреднений результирующего изображения; 9 – тип объектива; 10 – тип интерференционного фильтра; 11 – значение отсчета измеряемых расстояний; 12 – результаты определения высоты; 13 – выход из программы; 14 – информация о версии и разработке программы; 15 – управляющее окно программы; 16 – параметры настройки интерферометра; 17 – параметры выводимого изображения; 18 – переключение в режим Preview; 19 – окно просмотра видеопотока и захваченного изображения; 20 – маркер масштаба изображения; 21 – маркер отсчета расстояний; 22 – указатель манипулятора mouse; 23–25 – указатели положений интерференционных полос N2, N4 и N13 соответственно; 26 – указатель расстояния по оси X [2]

Рисунок 2.5 – Графический интерфейс программной системы OptizerMII

3 Получить у преподавателя образец для измерения высоты профиля тонкопленочной структуры.

4 Измерить высоту неровностей по интерферометрической картине с помощью программной системы OptizerMII. Полученные данные записать в таблицу 2.2. В отчет вставить снимок поверхности.

5 Рассчитать среднее значение, доверительный интервал и относительную погрешность измерений [3]. Полученные данные записать в таблицу 2.2. Сделать вывод о равномерности нанесенного тонкопленочного покрытия.

6 Сделать снимок поверхности исследуемой тонкопленочной структуры.

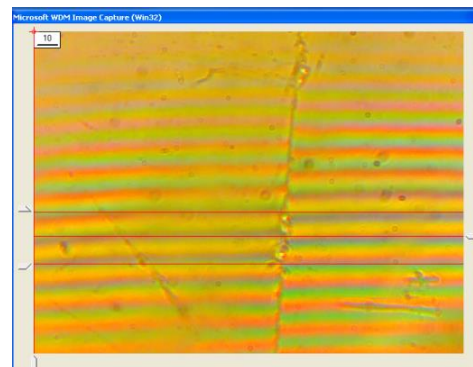
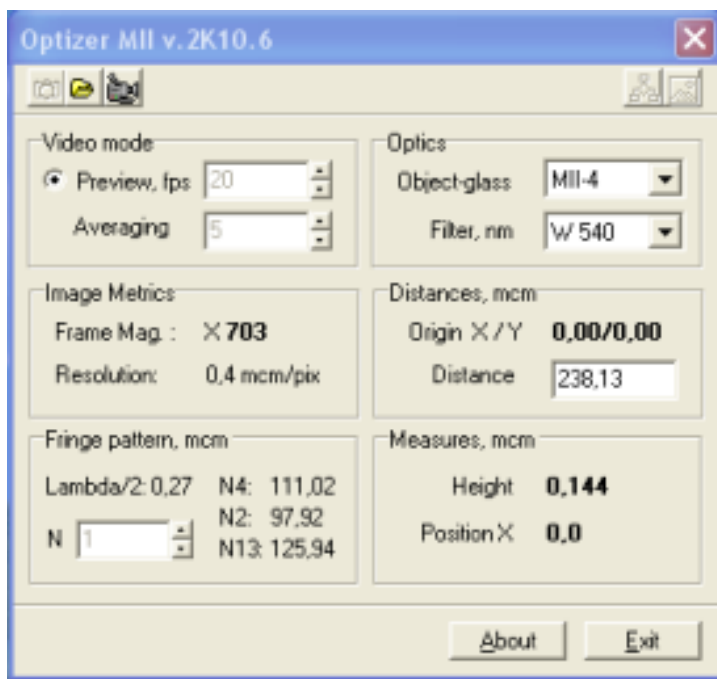


Рисунок 2.6 – Пример измерения высоты профиля неровностей по интерферометрической картине с помощью программной системы OptizerMII

Таблица 2.2 – Высота профиля поверхности структуры, измеренная с помощью профилометра оптического интерферометрического ПОИ-08

| Номер измерения и результаты статистической обработки измерений | Элемент структуры |   |   |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------|---|---|
|                                                                 | 1                 | 2 | 3 |
| Измерение № 1, $d_1$                                            |                   |   |   |
| Измерение № 2, $d_2$                                            |                   |   |   |
| Измерение № 3, $d_3$                                            |                   |   |   |
| Измерение № 4, $d_4$                                            |                   |   |   |
| Измерение № 5, $d_5$                                            |                   |   |   |
| Среднее значение высоты профиля                                 |                   |   |   |
| Среднеквадратичное отклонение                                   |                   |   |   |
| Доверительный интервал                                          |                   |   |   |
| Высота профиля с учетом доверительного интервала                |                   |   |   |
| Относительная погрешность измерений                             |                   |   |   |

7 Используя навыки, полученные студентами при выполнении заданий на практических занятиях по дисциплине «Контроль и диагностика субмикронных структур», и программу Gwyddion [4; 5], рассчитать параметры шероховатости исследуемых структур, такие как средняя шероховатость ( $R_a$ ), средняя максимальная высота профиля ( $R_z$ ), максимальная шероховатость от пика до впадины ( $R_{max}$ ), среднее расстояние между неровностями профиля ( $S_m$ ), коэффициент асимметрии ( $R_{sk}$ ), заполнить таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры шероховатости тонкопленочной структуры

| Элемент структуры | Значения параметров шероховатости структуры |       |           |       |          |
|-------------------|---------------------------------------------|-------|-----------|-------|----------|
|                   | $R_a$                                       | $R_z$ | $R_{max}$ | $S_m$ | $R_{sk}$ |
| 1                 |                                             |       |           |       |          |
| 2                 |                                             |       |           |       |          |
| 3                 |                                             |       |           |       |          |

8 Получить у преподавателя образцы № 1 и № 2 для измерения геометрических размеров топологии ИМС.

9 Повторить пункты 4 и 5 для геометрических размеров топологии ИМС. Полученные данные записать в таблицу 2.4. Сделать вывод о равномерности геометрических размеров топологии ИМС. В отчет вставить фото исследуемого элемента.

Таблица 2.4 – Топология ИМС образца № 1

| Результаты исследования                  | Образец № 1 |             | Образец № 2 |             |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                          | Длина, мкм  | Ширина, мкм | Длина, мкм  | Ширина, мкм |
| Номер исследования 1                     |             |             |             |             |
| Номер исследования 2                     |             |             |             |             |
| Номер исследования 3                     |             |             |             |             |
| Номер исследования 4                     |             |             |             |             |
| Номер исследования 5                     |             |             |             |             |
| Среднее значение                         |             |             |             |             |
| Доверительный интервал                   |             |             |             |             |
| Размер с учетом доверительного интервала |             |             |             |             |
| Относительная погрешность измерений      |             |             |             |             |

### Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Теоретическая часть.
- 3 Экспериментальные данные и их обработка.
- 4 Выводы.

### Контрольные вопросы и задания

- 1 Область применения профилометра оптического интерферометрического ПОИ-08.
- 2 Принцип работы профилометра оптического интерферометрического ПОИ-08.

3 Последовательность действий при измерении высоты профиля тонкоплёночных структур с использованием профилометра оптического интерферометрического ПОИ-08.

4 Последовательность действий при измерении латеральных размеров элементов топологии тонкоплёночных структур с использованием профилометра оптического интерферометрического ПОИ-08.

### **Список использованных источников**

1 Техническое описание и инструкция эксплуатации. Профилометр оптический интерферометрический ПОИ-8 / ИММС НАН Беларуси. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2010. – 24 с.

2 Диагностика оптоэлектронных устройств и систем. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие / А. П. Достанко [и др.]. – Минск : БГУИР, 2014. – 70 с.

3 Степанова, Н. Н. Методы исследования материалов и процессов : учеб. пособие / Н. Н. Степанова. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 133 с.

4 Gwyddion User Guide [Electronic resource]. – Access mode: <http://gwyddion.net/documentation/>.

5 Руководство пользователя Gwyddion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gwyddion.net/download/user-guide/gwyddion-user-guide-ru.pdf>.

## Лабораторная работа № 3

### КОНТРОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

#### Цель работы

Изучить принцип действия и методику работы со сканирующим зондовым микроскопом с оптическим видеомикроскопом Certus Standard V (ООО «Нано Скан Технологии», Россия, г. Долгопрудный), приобрести практические навыки. Методом атомно-силовой микроскопии измерить размеры калибровочной решетки.

#### Теоретические сведения

Теоретическая информация приведена в соответствии с руководством по эксплуатации сканирующего зондового микроскопа с оптическим видеомикроскопом Certus Standard V (ООО «Нано Скан Технологии», Россия, г. Долгопрудный) [1; 2].

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ, англ. SPM – Scanning Probe Microscope) – микроскоп для получения изображения поверхности и информации о ее локальных характеристиках.

Атомно-силовой микроскоп (АСМ, англ. AFM – atomic-force microscope) – сканирующий зондовый микроскоп высокого разрешения, способный определять рельеф поверхности с разрешением от нанометра и выше.

Сканирующий зондовый микроскоп включает в себя: зонд; систему перемещения зонда относительно образца по координатам XYZ; регистрирующую систему.

В основе работы сканирующего зондового микроскопа лежит принцип получения информации о взаимодействии зонда с поверхностью в одной точке. При малом расстоянии между поверхностью и зондом можно зафиксировать действие сил взаимодействия и проявление различных эффектов (например, туннелирование электронов). Для регистрации взаимодействия используют различные типы сенсоров, чувствительность которых позволяет зафиксировать такие возмущения.

Для построения растрового изображения используется система перемещения зонда (система развертки) относительно поверхности по координатам XYZ (рисунки 3.1–3.3). Регистрирующая система фиксирует величину параметра, зависящего от силы взаимодействия между зондом и поверхностью образца. На основе известных или предполагаемых зависимостей величины взаимодействия от расстояния между зондом и поверхностью в ходе сканирования строится топография поверхности (трехмерное изображение по координатам XYZ, где в плоскости XY строится распределение параметра, а по Z – величина того или иного параметра). Регистрируемое значение обрабатывается системой

отрицательной обратной связи, которая управляет положением образца или зонда по одной из координат (в большинстве случаев по Z). В качестве системы обратной связи чаще всего используется ПИД-регулятор.

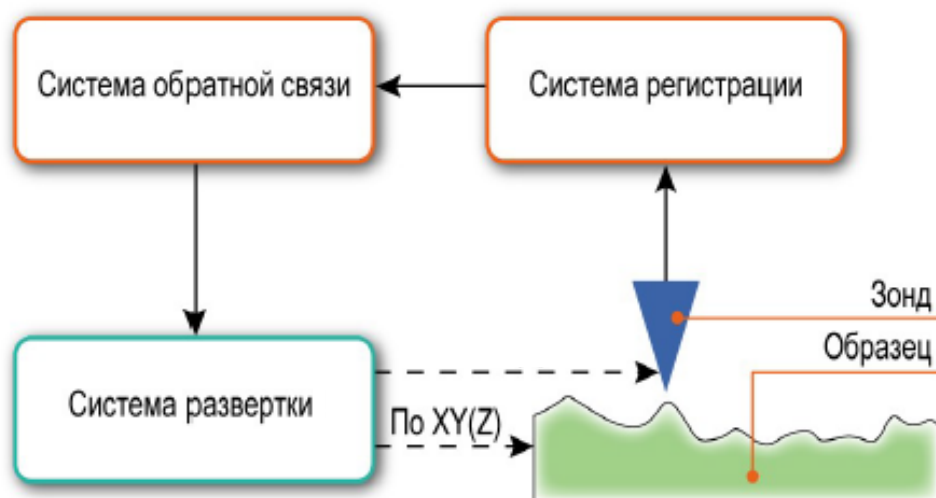


Рисунок 3.1 – Принципиальное устройство сканирующего зондового микроскопа

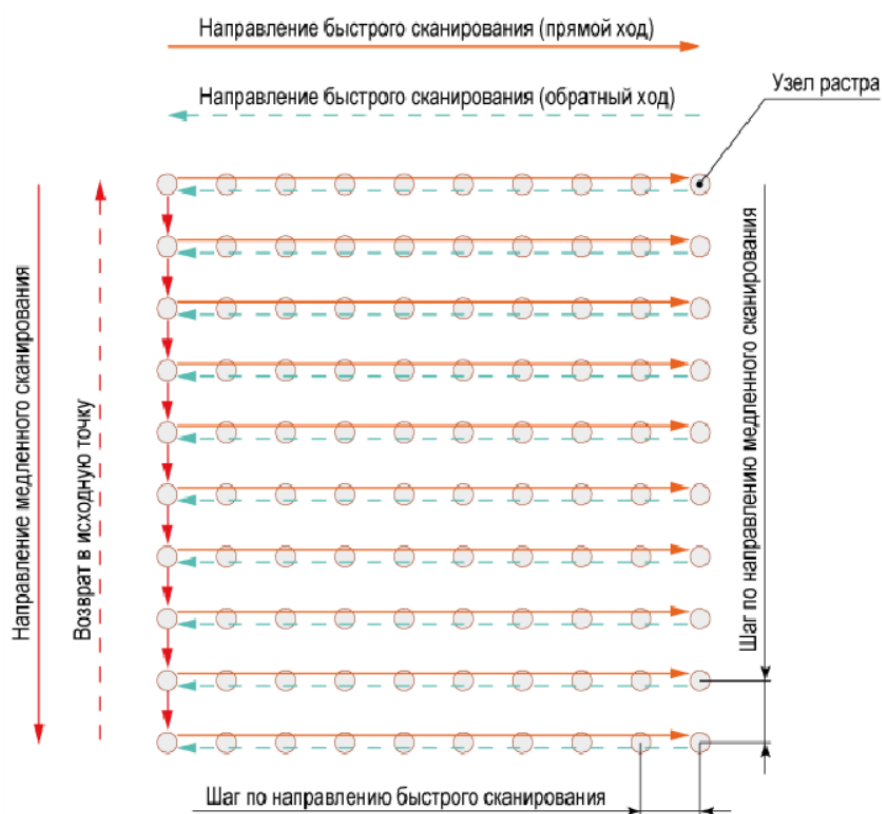


Рисунок 3.2 – Иллюстрация процесса сканирования

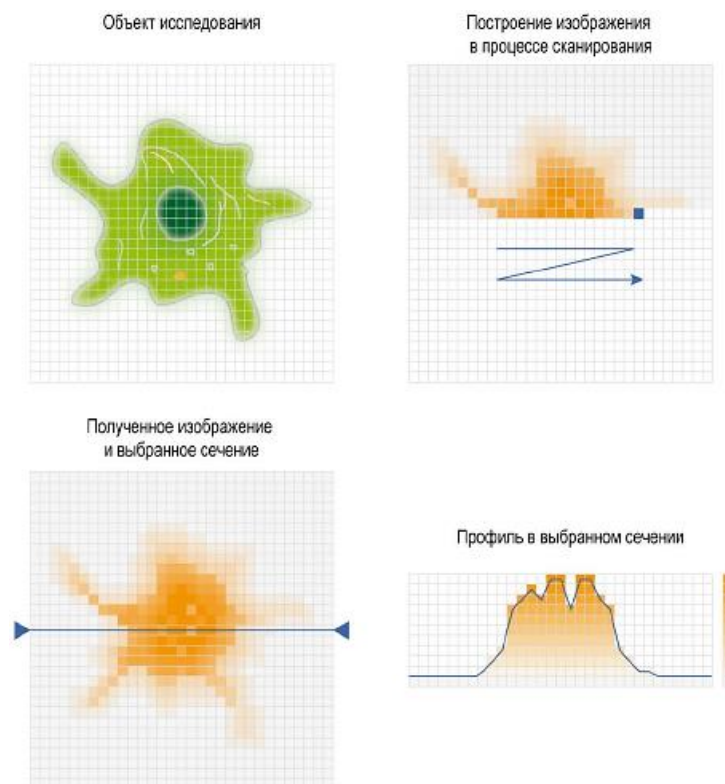


Рисунок 3.3 – Принцип построения изображений сканирующим зондовым микроскопом

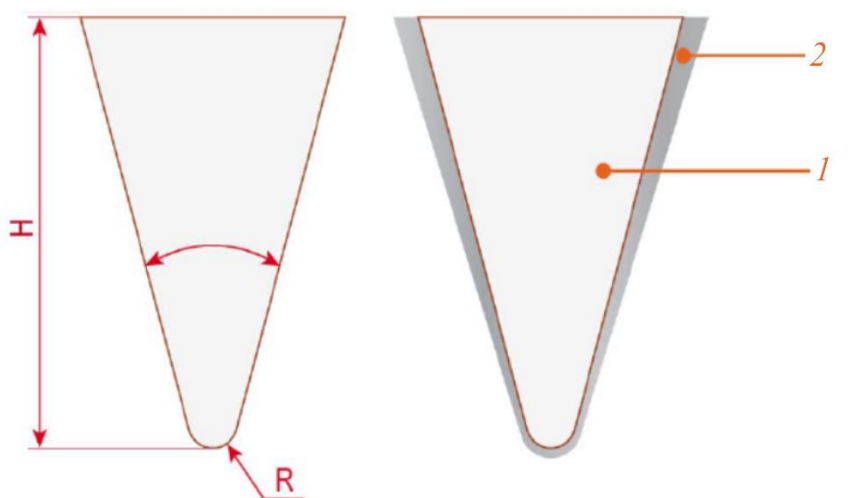
Для получения изображения в сканирующих зондовых микроскопах используются системы развертки по координатам XY или XYZ. Процесс сканирования происходит следующим образом. Сканер осуществляет растровое перемещение зонда относительно образца. В узлах растра происходит оцифровка измеряемых сигналов. Направление строк, вдоль которых движется сканер, называется направлением быстрого сканирования. Перпендикулярное ему направление называется направлением медленного сканирования. Итоговое изображение строится на основе данных, получаемых по быстрому направлению сканирования на прямом или на обратном ходу сканирования.

В АСМ зонд – это микроострие, закрепленное на упругой консоли (кантилевер); измеряемая величина – сила взаимодействия между острием и исследуемой поверхностью. В простейшем случае атомно-силовой микроскоп можно рассматривать как профилометр сверхвысокого разрешения, который работает в воздухе, вакууме и жидкости и позволяет увидеть трехмерный профиль поверхности. Области применения АСМ: физика твердого тела, тонкопленочные технологии, нанотехнологии, микро- и нанотрибология, микроэлектроника, оптика, испытательные системы прецизионной механики, магнитной записи, вакуумной техники и др.

Изображение поверхности в атомно-силовом микроскопе получают при сканировании образца в горизонтальной плоскости зондом с радиусом кривизны острия порядка десятков – сотен нанометров, который зафиксирован на

чувствительной консоли. Управляющая система следит за положением зонда относительно поверхности образца в каждой измеряемой точке и поддерживает расстояние «игла – образец» на постоянном заданном уровне. Изменения вертикального положения зонда в каждой точке измерений образуют матрицу АСМ-данных, которая записывается в файл и используется в дальнейшем для обработки, визуализации и анализа.

В общем случае зонд – это игла конической или пирамидальной формы (рисунок 3.4). Наиболее распространенные материалы для зондов: металлы (вольфрам, платина и подобные для туннельной микроскопии), кремний и нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  для атомно-силовой микроскопии, кремний с покрытием для магнитных и проводящих методик, кремний с алмазным покрытием для инден-



$H$  – высота иглы;  $R$  – радиус иглы зонда; 1 – основной материал зонда;  
2 – покрытие зонда

Рисунок 3.4 – Схематическое изображение игл зондов

От радиуса закругления вершины зонда и угла конуса зависит разрешение и точность отображения элементов на поверхности. От высоты зонда зависит максимальный доступный для отображения перепад высот на поверхности. Покрытия зондов позволяют использовать различные методики сканирующей зондовой микроскопии.

Кроме этих параметров, на качество получаемого изображения, набор методик и возможность исследования образцов разной природы влияют жесткость балки зонда, или силовая константа, и резонансная частота зонда.

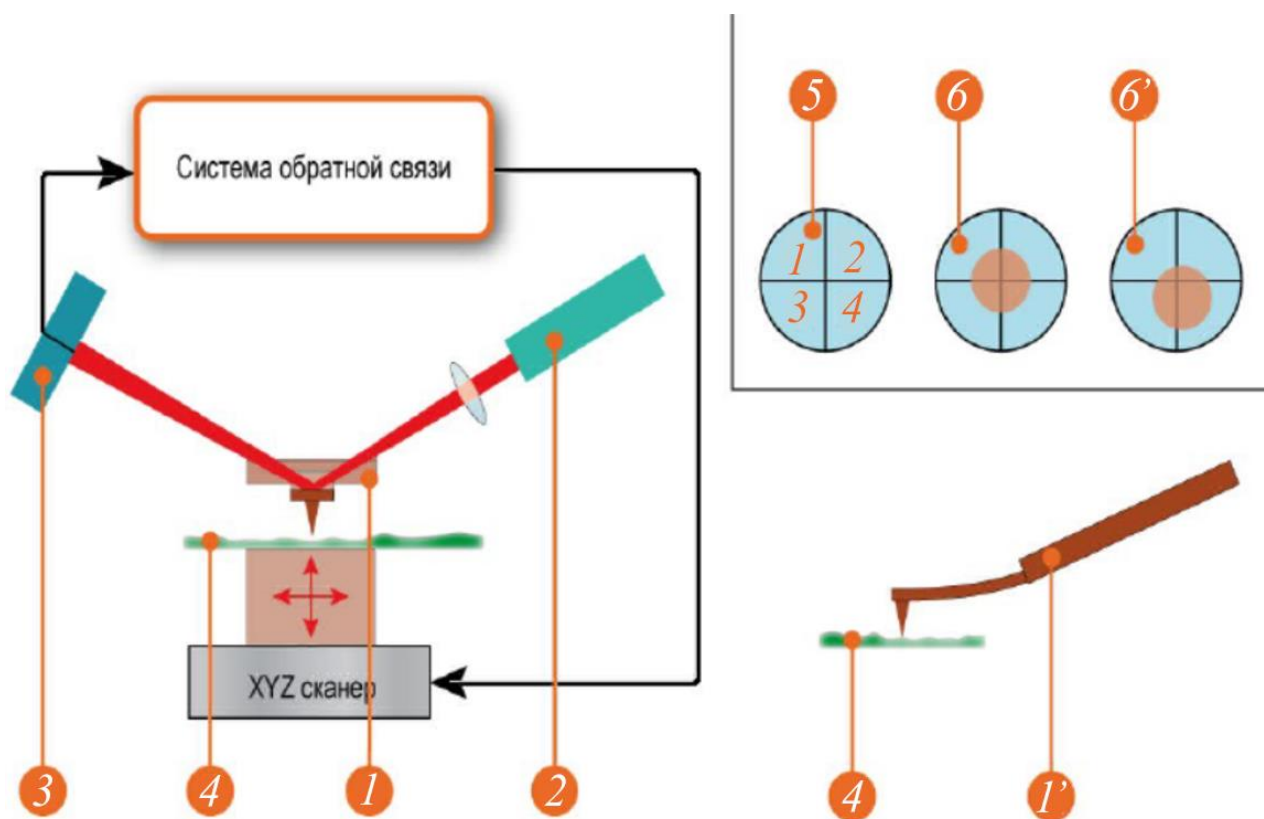
Для регистрации отклонения зонда наиболее распространена оптическая система регистрации на основе лазерного дефлектометра (рисунок 3.5).

Лазерный луч сфокусирован на балке зонда. Отраженный луч попадает на четырехсекционный фотодиод. По соотношению интенсивности на секциях фотодиода определяется положение отражающей части зонда в пространстве.

При перемещении зонда по оси  $Z$  или поворотах балки происходит изменение положения лазерного пятна на фотодиоде. В результате по заранее определенным соотношениям определяется положение зонда относительно поверхности.

К основным недостаткам сканирующей зондовой микроскопии относят: трудности с установкой зонда точно в выбранную точку на поверхности объекта исследования, выделение участков поверхности, представляющих интерес с научной точки зрения, сопоставление оптической и топографической информации о поверхности объекта исследования.

Для преодоления этих ограничений совмещают сканирующий зондовый микроскоп с оптическим микроскопом. Методики оптической микроскопии позволяют выделить необходимый участок на поверхности, навести на него зонд сканирующего микроскопа и провести сканирование.



1 – зонд; 1' – отображение изгиба кантилевера; 2 – лазер;  
3 – четырехсекционный фотодиод; 4 – образец; 5 – схема четырехсекционного фотодиода (секции обозначены 1, 2, 3, 4); 6 – положение лазерного пятна по центру фотодиода; 6' – случайное положение лазерного пятна на фотодиоде  
Рисунок 3.5 – Схематическое изображение дефлектометра

Certus Light V – специализированный сканирующий зондовый микроскоп, реализующий метод атомно-силовой микроскопии, разработанный для совмещения методик сканирующей зондовой микроскопии, оптической микроскопии и спектроскопии. В основе СЗМ Certus Light V лежит трехкоординатный плоскопараллельный пьезокерамический сканер. СЗМ Certus Light предназначен для

получения СЗМ-изображения поверхности, определения рельефа различных веществ, материалов и структур, получения силовой спектроскопии поверхности, осуществления СЗМ-литографии при использовании различных методик получения информации о физико-химических свойствах поверхности исследуемых образцов, получения оптических микроскопических изображений в отраженном свете. В качестве образцов могут выступать поверхности полимерных, биологических, неорганических и полупроводниковых материалов, биологических клеток, тканей, отдельных биологических структур и молекул, покрытий, элементов электронной техники и т. д.

В состав сканирующего зондового микроскопа Certus Light V входят: СЗМ-головка Certus, оптический видеомикроскоп с подсветкой и видеокамерой, основание с моторизованной подвижкой для позиционирования образца, со сканирующим столиком и системой фокусировки и перемещения оптического видеомикроскопа, контроллер EG-3000 (EG-1000), программное обеспечение NSpec (рисунок 3.6). Основные операции при работе с СЗМ Certus Light V приведены в таблице 3.1.



- 1 – цифровая видеокамера; 2 – микровинты позиционирования образца;  
3 – оптический микроскоп; 4 – объектив; 5 – предметный столик;  
6 – головка Certus

Рисунок 3.6 – Основные узлы СЗМ Certus Light V

Таблица 3.1 – Основные операции при работе с СЗМ Certus Light V (методики атомно-силовой микроскопии)

| Характеристика                                     | Значение                                                                                                          |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Настройка размаха и смещения емкостных датчиков    | Операция не является обязательной, есть автоматический и ручной режимы настройки                                  |
| Настройка обратной связи датчиков (ПИД-регулятора) | Выполняется единожды при настройке микроскопа                                                                     |
| Установка зонда                                    | Обязательная операция                                                                                             |
| Настройка регистрирующей системы                   | Обязательная операция                                                                                             |
| Настройка параметров обратной связи                | Обязательная операция                                                                                             |
| Настройка задающего значения для обратной связи    | Обязательная операция                                                                                             |
| Предварительное позиционирование образца           | При необходимости                                                                                                 |
| Подвод к поверхности                               | Обязательная операция                                                                                             |
| Позиционирование образца                           | При необходимости                                                                                                 |
| Предварительное сканирование                       | Операция не является обязательной и необходима только для образцов, для которых параметры сканирования неизвестны |
| Корректировка параметров сканирования              | Операция не является обязательной и необходима только для образцов, для которых параметры сканирования неизвестны |
| Сканирование                                       | Основная операция                                                                                                 |
| Калибровка пьезоэлементов                          | Выполняется единожды при настройке микроскопа                                                                     |
| Калибровка емкостных датчиков                      | Выполняется единожды при настройке микроскопа                                                                     |
| Первичная обработка и сохранение результатов       | При необходимости                                                                                                 |
| Отвод от поверхности                               | Обязательная операция                                                                                             |

Горизонтальное перемещение образца в процессе сканирования (перемещение в плоскости XY) осуществляется посредством пьезокерамического сканера. Образец перемещается под острием зонда от точки к точке по растровой схеме (см. рисунки 3.2, 3.3). Сканер начинает перемещаться вдоль первой линии сканирования и обратно. Затем он осуществляет перемещение на один шаг в перпендикулярном направлении ко второй линии сканирования, движется вдоль нее и обратно. Затем снова осуществляет перемещение на один шаг в перпендикулярном направлении к третьей линии и т. д. АСМ регистрирует данные только при движении зонда в одном направлении, которое называется направлением быстрого сканирования. Для перемещения сканера по подобной растровой схеме

электроника АСМ прикладывает соответствующее напряжение к сегментам пьезотрубки, что вызывает ее изгиб в плоскости, параллельной поверхности образца.

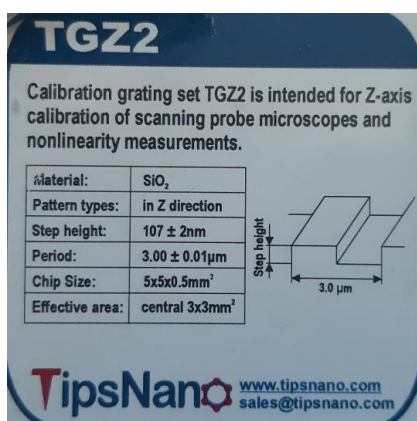
АСМ детектирует положение зонда в каждой точке измерений. Когда острие зонда находится у поверхности образца на расстоянии около нескольких нанометров, консоль с зондом изгибается под действием молекулярных сил (притяжения или отталкивания), возникающих между острием и поверхностью образца. Для измерения отклонения кантилевера зонда используется позиционно-чувствительный фотодетектор (ФД). Луч света, отраженный от обратной стороны кантилевера зонда, попадает на фотодетектор. В результате изменения положения зонда (изгиба кантилевера) происходит перемещение отраженного светового пятна по фотодетектору. Данное перемещение может быть легко измерено. Таким образом, по изменению положения отраженного пятна на ФД электронная система определяет изменение расстояния между зондом и образцом и прикладывает соответствующее напряжение к Z-электроду пьезотрубки, чтобы сжать или удлинить ее в направлении Z и поддерживать зазор между зондом и образцом на постоянном уровне. В результате острие зонда перемещается на постоянной высоте над поверхностью образца и в точности повторяет ее рельеф.

В каждой точке измерений регистрируется величина напряжения, приложенного к пьезотрубки. Это значение запоминается и используется системой для формирования матрицы АСМ-изображения. На основе полученных данных о высоте рельефа и соответствующих изображений контрастов строится трехмерное АСМ-изображение поверхности. Для интерпретации результатов АСМ-исследования используют программный продукт Gwyddion [3; 4].

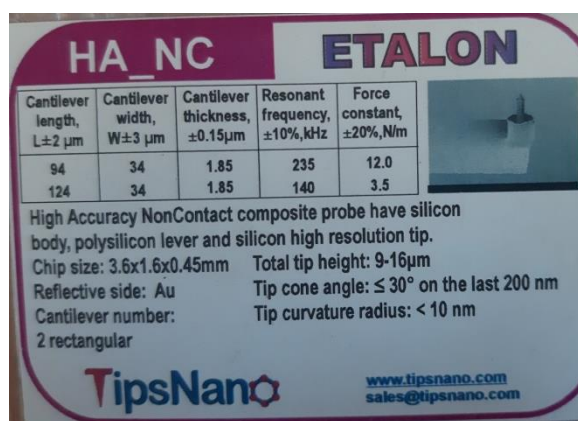
На рисунке 3.7 представлены примеры используемых в работе со сканирующим зондовым микроскопом Certus Light V калибровочной решетки и кантилевера.

### **Порядок выполнения работы**

- 1 Получить у преподавателя калибровочную решетку.
- 2 Ознакомиться с документами «Certus Light V. Сканирующий зондовый микроскоп с оптическим видеомикроскопом. Руководство пользователя» и «Certus Light V. Программное обеспечение NSpec. Руководство пользователя».
- 3 Подготовить к работе сканирующий зондовый микроскоп Certus Light V.
- 4 Определить резонансную частоту кантилевера.
- 5 Сканировать поверхность тестовой пластины.
- 6 Получить АСМ-изображение поверхности калибровочной решетки.
- 7 Используя программу Gwyddion, построить профили калибровочной решетки и измерить ее параметры.



*a*



*б*

*a* – калибровочная решетка; *б* – пример используемого кантилевера  
Рисунок 3.7 – Калибровочная решетка и пример используемого кантилевера при работе со сканирующим зондовым микроскопом Certus Light V

## Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Теоретическая часть.
- 3 Экспериментальные данные и результаты их обработки (АСМ-изображение калибровочной решетки, 3D-вид, профиль, 3D-вид морфологии и размеры выбранных участков поверхности).
- 4 Выводы.

## Контрольные вопросы и задания

- 1 Назначение сканирующего зондового микроскопа Certus Light V.
- 2 Основные операции при работе с СЗМ Certus Light V.
- 3 Общие принципы настройки параметров сканирования.

## Список использованных источников

- 1 Certus Light V. Сканирующий зондовый микроскоп с оптическим видеомикроскопом. Руководство пользователя / ООО «Нано Скан Технологии». – Долгопрудный : ООО «Нано Скан Технологии», 2016. – 108 с.
- 2 Certus Light V. Программное обеспечение NSpec. Руководство пользователя / ООО «Нано Скан Технологии». – Долгопрудный : ООО «Нано Скан Технологии», 2016. – 108 с.
- 3 Gwyddion User Guide [Electronic resource]. – Access mode: <http://gwyddion.net/documentation/>.
- 4 Руководство пользователя Gwyddion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gwyddion.net/download/user-guide/gwyddion-user-guide-ru.pdf>.

## Лабораторная работа № 4

### ДИАГНОСТИКА ПОВЕРХНОСТИ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

#### Цель работы

Получить при помощи сканирующего зондового микроскопа Certus Light V характеристические снимки поверхности субмикронных структур, полученных при различных условиях формирования. Обработать полученные изображения. Провести сравнительный качественный и количественный анализ изображений: определить параметры шероховатости, провести статистический анализ зерен. Установить влияние условий формирования на морфологию поверхности.

#### Теоретические сведения

Атомно-силовая микроскопия позволяет исследовать рельеф субмикронных структур [3]. Для интерпретации результатов АСМ-исследования используют программный продукт Gwyddion. Студентами при выполнении заданий на практических занятиях по дисциплине «Контроль и диагностика субмикронных структур» получены знания и сформированы навыки обработки АСМ-изображений с помощью программы Gwyddion [3].

Комплексный подход при анализе влияния условий формирования на морфологию поверхности субмикронных структур включает следующие операции:

- обработка изображения, полученного с помощью сканирующего зондового микроскопа Certus Light V, используя базовые действия (выравнивание данных (исправление нуля и обнуление, выравнивание плоскости, выравнивание граней, выравнивание поворотом), вычет фона (полиномиальный фон, выравнивание основания, вращение дуги и сферы, медианное выравнивание), артефактов линий сканирования, локальных дефектов, масштабирование, биннинг, обрезка, расширение, поворот, переворот, инвертирование);

- построение характеристических профилей для анализа;

- статистическая обработка изображений как по профилю, так и по поверхности с учетом встроенных функций (статистический анализ зерен по порогу, по водоразделу, сводная информация о зернах, статистика и распределение, расчет шероховатости);

- расчет параметров шероховатости исследуемых структур, таких как средняя шероховатость ( $R_a$ ), средняя максимальная высота профиля ( $R_z$ ), максимальная шероховатость от пика до впадины ( $R_{max}$ ), среднее расстояние между неровностями профиля ( $S_m$ ), коэффициент асимметрии ( $R_{sk}$ ).

## **Порядок выполнения работы**

1 Получить в соответствии с номером варианта образцы для исследований (см. таблицу 1.1).

2 Ознакомиться с документом «Руководство пользователя Gwyddion» [1]. Подготовить к работе сканирующий зондовый микроскоп Certus Light V.

3 Сканировать поверхность тестовых образцов.

4 Получить АСМ-изображение поверхности тестовых образцов.

5 Используя программу Gwyddion, обработать АСМ-изображение и представить внешний вид поверхности образцов, 3D-изображение поверхности образцов, профили (линии, вдоль которых определяли шероховатость), изображение поверхностей с маской по границе зерен по методу «по водоразделу», параметры шероховатости в виде таблицы. Построить графические зависимости распределения количества зерен от площади поверхности и зависимости количества зерен от радиуса эквивалентного диска. В приложении Б приведен пример оформления результатов исследований.

## **Содержание отчета**

1 Цель работы.

2 Теоретическая часть.

3 Экспериментальные данные и их обработка.

4 Выводы.

## **Контрольные вопросы и задания**

1 Особенности базовых действий с изображением, полученным сканирующим зондовым микроскопом Certus Light V.

2 Какая последовательность действий, чтобы получить из АСМ-изображения сведения о шероховатости поверхности?

3 Какая последовательность действий, чтобы получить из АСМ-изображения сведения для статистического анализа зерен?

## **Список использованных источников**

1 Certus Light V. Сканирующий зондовый микроскоп с оптическим видеомикроскопом. Руководство пользователя / ООО «Нано Скан Технологии». – Долгопрудный : ООО «Нано Скан Технологии», 2016. – 108 с.

2 Certus Light V. Программное обеспечение NSpec. Руководство пользователя / ООО «Нано Скан Технологии». – Долгопрудный : ООО «Нано Скан Технологии», 2016. – 108 с.

3 Gwyddion User Guide [Electronic resource]. – Access mode: <http://gwyddion.net/documentation/>.

## **Лабораторная работа № 5**

### **СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР**

#### **Цель работы**

Изучить принцип действия и методику работы с ИК-Фурье-спектрометром Vertex70 Bruker с приставкой RAM2 и оптическим спектрофотометром MC121, приобрести практические навыки. Получить спектры методами ИК- и рамановской спектроскопии и провести их интерпретацию. Получить спектры пропускания и поглощения. Определить ширину запрещенной зоны по спектрам пропускания. Определить коэффициент преломления по спектрам пропускания.

#### **Теоретические сведения**

Спектроскопическими методами анализа называются методы, основанные на взаимодействии вещества с электромагнитным излучением. Теоретические сведения приведены по данным источников [1; 2] и сайтов производителей приборов [3; 4]. Одним из важнейших понятий, используемых в спектроскопии, является понятие спектра. Спектр – это последовательность квантов энергии электромагнитных колебаний, поглощенных, выделившихся или рассеянных при переходах атомов или молекул из одних энергетических состояний в другие.

Для измерения спектров используют спектральные приборы – спектрофотометры, основные части которого: источник излучения, диспергирующий элемент, кювета с исследуемым веществом, регистрирующее устройство. В качестве источников излучения применяют дейтериевую (или водородную) лампу (в УФ-области) и вольфрамовую лампу накаливания или галогенную лампу (в видимой и ближней ИК-областях). Приемниками излучения служат фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и фотоэлементы (фоторезисторы на основе PbS). Диспергирующими элементами прибора являются призмный монохроматор и монохроматор с дифракционными решетками. Спектр получают в графической форме, а в приборах со встроенной мини-ЭВМ – в графической и цифровой формах. Графически спектр регистрируют в координатах: длина волны (нм) и (или) волновое число ( $\text{см}^{-1}$ ) – пропускание (%) и (или) оптическая плотность. Основные характеристики спектрофотометров: точность определения длины волны излучения и величины пропускания, разрешающая способность и светосила, время сканирования спектра. Мини-ЭВМ (или микропроцессоры) осуществляют автоматизированное управление прибором и различную математическую обработку получаемых экспериментальных данных: статистическую обработку результатов измерений, логарифмирование величины пропускания, многократное дифференцирование спектра, интегрирование спектра по различным программам, разделение перекрывающихся полос, расчет концентраций отдельных

компонентов и т. п. Спектрофотометры обычно снабжаются набором приставок для получения спектров отражения, работы с образцами при низких и высоких температурах, а также для измерения характеристик источников и приемников излучения и т. п.

Спектрофотометр МС 121 (рисунок 5.1) является универсальным прибором для применения во всех областях, использующих фотометрические методы исследования.

Возможные области применения спектрофотометра: физика, экология, биотехнология, химия, биохимия, фармакология, токсикология и другие области, использующие фотометрические методы исследования.

**Задачи, решаемые с помощью спектрофотометра МС 121:**

- измерение и регистрация спектров пропускания, поглощения и отражения образцов;
- измерение оптической плотности;
- измерение коэффициента пропускания;
- измерение коэффициента отражения;
- определение концентрации веществ.



Рисунок 5.1 – Внешний вид спектрофотометра МС 121

Конструкция спектрометра МС 121 позволяет осуществить множество задач при помощи одного прибора. Благодаря возможности регулировки спектральной щели он может быть использован для решения широкого круга задач, включая научные исследования и разработку методик. Спектрофотометр обладает возможностью подключения нескольких внешних приставок.

Спектрофотометр МС 121 предназначен для измерения коэффициента пропускания, оптической плотности, коэффициента отражения и определения концентрации веществ в жидких и твердых образцах в диапазоне длин волн 190–900 нм с выводом результатов на встроенный индикатор, внешний монитор, принтер и внешнюю ЭВМ в локальной сети.

Отличительные особенности:

- двойной монохроматор, обеспечивающий низкий уровень мешающего излучения и высокую точность измерений;
- современная оптическая схема, позволяющая работать с исследуемыми образцами малых размеров или микропробами;
- встроенный мощный персональный компьютер класса Pentium, позволяющий проводить развернутую обработку результатов измерений, архивацию данных и т. п.;
- встроенный полноцветный жидкокристаллический TFT-дисплей;
- возможность подключения к прибору широкого спектра внешних устройств: манипулятор типа «мышь», клавиатура, принтер, внешний дисплей;
- непосредственное подключение к локальной компьютерной сети учреждения и к глобальной сети Интернет;
- модульная система кюветного отделения, позволяющая существенно расширять функциональные возможности спектрофотометра (например, измерять коэффициент отражения образцов, проводить поляризационные исследования и т. д.).

Измерительные функции:

- измерение спектров поглощения, пропускания и отражения;
- измерение оптической плотности, коэффициента пропускания и коэффициента зеркального отражения на фиксированных длинах волн;
- измерение концентрации одноволновым методом, а также на двух и трех длинах волн, многоволновые измерения;
- кинетические измерения как на одной, так и на нескольких длинах волн. Измерение концентрации по предварительно запрограммированным методикам;
- расчет координат цвета и координат цветности в различных колориметрических системах МКО (МКО 1931 г. и МКО 1964 г.) для различных типов источников (А, В, С и D65), а также цветовых различий в соответствии с МКО 1976 г. (CIELAB);
- сохранение результатов измерений и оформление отчетов.

Применение спектрофотометра: в экологических и природоохранных лабораториях, заводских лабораториях различных отраслей промышленности.

Благодаря возможности регулировки спектральной щели прибор может быть использован для решения широкого круга задач, включая научные исследования и разработку методик.

Инфракрасным излучением называют излучение с длинами волн от 0,85 до 1000 мкм. В ИК-диапазоне осуществляются переходы между колебательными и вращательными уровнями энергии молекул. ИК-спектроскопия основана на поглощении электромагнитного излучения молекулами изучаемого вещества. При поглощении инфракрасного излучения происходит возбуждение колебаний и вращений молекул. ИК-спектры содержат информацию о функциональных группах молекул и являются такими же специфичными для различных молекул, как отпечатки пальцев для людей. Поэтому данные ИК-измерений часто называют «отпечатками пальцев» молекул.

Этот метод крайне полезен при расшифровке неизвестных структур, т. к. некоторые химические группы (метильная, карбонильная и др.) имеют характерные полосы поглощения, положение и интенсивность которых более или менее постоянны.

Изучение ИК-спектров соединений позволяет получить значительную информацию о строении, составе, взаимодействии структурных единиц, составляющих вещество как в твердом состоянии, так и в растворе. ИК-спектры дают также сведения о состоянии молекул, сорбированных на поверхности вещества или находящихся внутри его объема благодаря наличию каналов, пор, интервалов между слоями и межзеренных пространств.

Благодаря успехам в развитии спектрального приборостроения в настоящее время имеются приборы различных конструкций, охватывающие весь диапазон инфракрасного излучения. По принципу получения спектра приборы для ИК-области можно разделить на две основные группы: диспергирующие и недиспергирующие.

Диспергирующие спектрометры. В качестве диспергирующего устройства используются призмы из материала с соответствующей ИК-диапазону дисперсией и дифракционные решетки. Обычно применяют призмы из монокристаллов KBr или  $\text{CaF}_2$ . В настоящее время призмы находят незначительное применение и практически вытеснены дифракционными решетками, дающими большой выигрыш в энергии излучения и высокое разрешение. Но несмотря на высокое качество этих приборов, они все больше заменяются на Фурье-спектрометры, относящиеся к группе недиспергирующих приборов.

Недиспергирующие спектрометры. В основе действия Фурье-спектрометров лежит явление интерференции электромагнитного излучения. Для изготовления этих приборов используют интерферометры нескольких типов. Наибольшее распространение получил интерферометр Майкельсона. В этом приборе поток инфракрасного излучения от источника преобразуется в параллельный пучок и затем разделяется на два луча с помощью светоделителя. Один луч попадает на подвижное зеркало, второй – на неподвижное. Отраженные от зеркал лучи возвращаются тем же оптическим путем на светоделитель. Эти лучи интерферируют благодаря приобретенной разности хода, а следовательно, и разности фаз,

создаваемой подвижным зеркалом. В результате интерференции получается сложная интерференционная картина, являющаяся наложением интерферограмм, которые отвечают определенной разности хода и длине волны излучения. Объединенный световой поток проходит через образец и попадает на приемник излучения. Усиленный сигнал поступает на вход компьютера, который осуществляет Фурье-преобразование интерферограммы и получение спектра поглощения исследуемого образца.

Задачи, решаемые с помощью ИК-спектроскопии:

- качественный анализ;
- количественный анализ смесей веществ;
- исследование межмолекулярных взаимодействий: водородные связи, донорно-акцепторные взаимодействия и др.;
- изучение кинетики химических реакций;
- характеристика интермедиатов химических реакций.

На ИК-Фурье-спектрометрах Bruker VERTEX (рисунок 5.2) реализуются методики для качественного и количественного анализа веществ. ИК-спектры могут использоваться для идентификации химических веществ: полученный спектр неизвестного вещества встроенное программное обеспечение сравнивает с библиотечными спектрами, находит спектры соединений, максимально согласующиеся с новым спектром и идентифицирует неизвестное вещество. Библиотека содержит более 4300 спектров, из них более 4000 – спектры органических соединений. Имеется большой ряд специализированных библиотек. Программа может также определить компоненты смеси и добавки.



Рисунок 5.2 – Внешний вид спектрометра VERTEX 70

ИК-Фурье-спектрометр VERTEX 70 обладает непревзойденными характеристиками и универсальностью. Конструкция спектрометра позволяет решить множество задач при помощи одного прибора. Спектрометр содержит две

внутренние позиции детектора, две внутренние позиции источника, пять выходных портов – с правой и левой стороны оптической скамьи и фронтальный, два входных порта с правой (используется апертура) и задней стороны оптической скамьи. Контроль и выбор всех позиций осуществляется программным обеспечением. Сбор данных может происходить по двум каналам. Спектрометр обладает возможностью подключения нескольких внешних приставок.

### Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с руководством по эксплуатации спектрофотометра МС 121 и спектрометра VERTEX 70.

2 Снять спектры пропускания и поглощения при помощи спектрофотометра МС 121 для стекла, органического стекла, оптического стекла ВК7, стекла с ZnO, стекла с ZrO<sub>2</sub>. Построить графические зависимости и заполнить таблицы 5.1 и 5.2.

3 Применить метод инфракрасной спектроскопии для качественного анализа веществ. Построить спектры образцов полистирола, полиэтилена и орг-стекла. Распознавать вещества по библиотеке встроенной в программное обеспечение для спектрометра VERTEX 70. Оценить точность определения состава.

Таблица 5.1 – Коэффициент пропускания образцов, в %

| Образец                   | Длина волны, нм |     |     |     |     |
|---------------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
|                           | 400             | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Стекло                    |                 |     |     |     |     |
| Органическое стекло       |                 |     |     |     |     |
| Оптическое стекло ВК7     |                 |     |     |     |     |
| Стекло с ZnO              |                 |     |     |     |     |
| Стекло с ZrO <sub>2</sub> |                 |     |     |     |     |

Таблица 5.2 – Коэффициенты поглощения образцов, в %

| Образец                   | Длина волны, нм |     |     |     |     |
|---------------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
|                           | 400             | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Стекло                    |                 |     |     |     |     |
| Органическое стекло       |                 |     |     |     |     |
| Оптическое стекло ВК7     |                 |     |     |     |     |
| Стекло с ZnO              |                 |     |     |     |     |
| Стекло с ZrO <sub>2</sub> |                 |     |     |     |     |

## **Содержание отчета**

- 1 Цель работы.
- 2 Теоретическая часть.
- 3 Экспериментальные данные и их обработка.
- 4 Выводы.

## **Контрольные вопросы и задания**

- 1 Особенности работы спектрофотометра МС 121.
- 2 Особенности работы ИК-Фурье-спектрометра Bruker VERTEX 70.

## **Список использованных источников**

- 1 Физические методы в исследованиях осаждения и коррозии металлов : учеб. пособие / С. С. Виноградова [и др.]. – Казань : КНИТУ, 2014. – 144 с.
- 2 Газенаур, Е. Г. Методы исследования материалов : учеб. пособие / Е. Г. Газенаур, Л. В. Кузьмина, В. И. Крашенинин. – Кемерово : КГУ, 2013. – 336 с.
- 3 Описание спектрофотометров МС 122 и МС 124 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://solinstruments.by/produkcija/spektrofotometry/mc-122/opisanie/>.
- 4 Спектрометр VERTEX Research FT-IR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bruker.com/ru/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-research-spectrometers/vertex-research-ft-ir-spectrometer/vertex-70v-ft-ir-spectrometer.html>.

## Лабораторная работа № 6

### ЗОНДОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

#### Цель работы

Изучить руководства по эксплуатации прибора для измерения контактного электросопротивления по трехзондовому методу и ИУС-3. Измерить удельное и контактное электросопротивление многослойных тонкопленочных покрытий. Установить влияние условий формирования на электрические свойства тонкопленочных структур.

#### Теоретические сведения

По характеру проявляемых электрических свойств материалы делятся на диэлектрики, проводники и полупроводники [1].

Проводниками являются материалы с сильно выраженной электропроводностью. По применению их делят на материалы высокой проводимости и материалы высокого сопротивления.

Диэлектрики – материалы, не проводящие электрический ток, способные поляризоваться и сохранять электростатическое поле. Различают пассивные и активные диэлектрики, свойствами которых можно управлять внешним энергетическим воздействием.

К полупроводникам относят материалы с сильной зависимостью электропроводности от концентрации и вида примесей, дефектов структуры и внешних энергетических воздействий.

Основной электрической характеристикой при исследовании материалов является удельная электропроводность  $\gamma$ , См/м (сименс на метр) – как коэффициент пропорциональности между плотностью тока  $j$  и напряженностью электрического поля  $E$ , В/м, в законе Ома:

$$j = \gamma E. \quad (6.1)$$

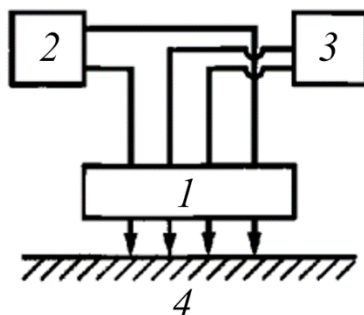
Удельная электропроводность зависит только от свойств материала.

Для оценки электропроводности материалов и систем также широко используется обратная величина – удельное электрическое сопротивление –  $\rho$ , Ом·м:

$$\rho = \frac{1}{\gamma}. \quad (6.2)$$

Значение  $\rho$  составляет для проводников  $\rho < 10^{-5}$  Ом·м, для диэлектриков –  $\rho > 10^8$  (до  $10^{16}$ ) Ом·м, для полупроводников –  $\rho = 10^{-5} \dots 10^8$  Ом·м.

Значение удельного электрического сопротивления на плоской поверхности можно измерить четырехзондовым методом (рисунок 6.1) [1; 2].



1 – четырехзондовая измерительная головка; 2 – источник постоянного тока;  
3 – прибор для измерения электрического напряжения; 4 – образец  
Рисунок 6.1 – Структурная схема прибора для измерения удельного сопротивления четырехзондовым методом

Для измерения удельного поверхностного сопротивления используют четырехзондовый метод, реализованный в цифровом измерителе ИУС-3 (рисунок 6.2).

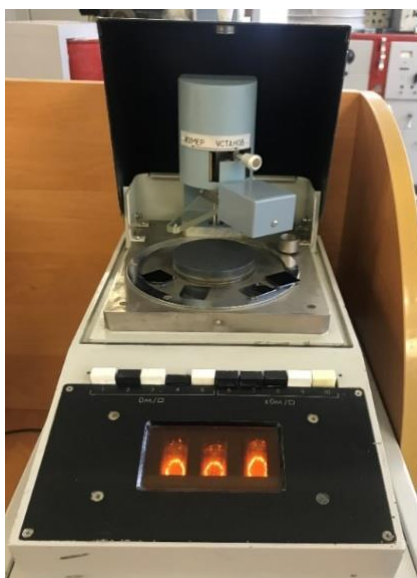


Рисунок 6.2 – Цифровой измеритель ИУС-3

Данный метод основан на измерении разности потенциалов между двумя зондами четырехзондовой измерительной головки, установленной на поверхности контролируемого образца, при пропускании электрического тока определенной величины через два других точечных зонда, расположенных на той же поверхности, и вычислении удельного электрического сопротивления.

На поверхность образца, установленного в держатель, плавно опускают зонды измерительной головки перпендикулярно поверхности.

Через образец пропускают электрический ток и измеряют значение разности потенциалов между внутренними потенциальными зондами при двух полярностях электрического тока. За результат измерения разности потенциалов  $U$  принимают среднее арифметическое полученных значений. Далее вычисляют значение удельного электрического сопротивления  $\rho$ , Ом·см, по формуле

$$\rho = 2l_{\text{эфф}} \frac{U}{I}, \quad (6.3)$$

где  $l_{\text{эфф}}$  – эффективное значение межзондового расстояния, вычисляемое по формуле

$$l_{\text{эфф}} = \left( \frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_1+l_2} - \frac{1}{l_2+l_3} + \frac{1}{l_3} \right)^{-1}, \quad (6.4)$$

где  $l_1, l_2, l_3$  – расстояния между первым и вторым, вторым и третьим, третьим и четвертым зондами соответственно;

$U$  – значение разности потенциалов, В;

$I$  – значение электрического тока, при котором проводили измерения, А.

Четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления полупроводников является самым распространенным. Преимущество этого метода состоит в том, что для его применения не требуется создания омических контактов к образцу, возможно измерение удельного сопротивления образцов самой разнообразной формы и размеров. Условием его применения с точки зрения формы образца является наличие плоской поверхности, линейные размеры которой превосходят линейные размеры системы зондов. Схема измерения сопротивления четырехзондовым методом представлена на рисунке 6.3.

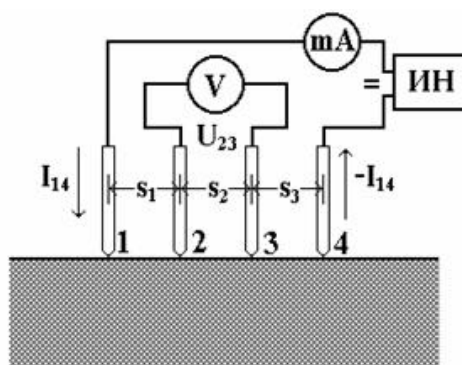


Рисунок 6.3 – Электрическая схема измерения

На плоской поверхности образца вдоль прямой линии размещены четыре металлических зонда с малой площадью соприкосновения. Расстояния между зондами:  $s_1, s_2$  и  $s_3$ . Через внешние зонды 1 и 4 пропускают электрический ток  $I_{14}$ , на внутренних зондах 2 и 3 измеряют разность потенциалов  $U_{23}$ . По измеренным значениям  $I_{14}$  и  $U_{23}$  можно определить удельное поверхностное сопротивление:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2+S_3} - \frac{1}{S_1+S_2} - \frac{1}{S_3}} \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}}. \quad (6.5)$$

Если расстояния между зондами одинаковы, т. е.  $S_1 = S_2 = S$ , то

$$\rho = 2\pi S \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}}. \quad (6.6)$$

Для измерения контактного электросопротивления разработан лабораторный макет в соответствии с ГОСТ 9.302–88, который реализует трехзондовый метод вольтамперометрии (рисунок 6.4), основанный на определении переходного сопротивления точечного контакта металлического образца контролируемого покрытия и эталонного электрода (зонда).



Рисунок 6.4 – Лабораторный макет, реализующий трехзондовый метод вольтамперометрии

Использовали зонды из латуни с радиусом закругления в точке контакта 3,2 мм, центральный зонд покрыт слоем гальванического золота толщиной 1,5–2,0 мкм и нагружен с помощью груза, сила нажима на образец 0,49 Н (50 г). Сила тока через исследуемый контакт составляла 150 мА, а напряжение источника питания при раскрытых зажимах – 20 мВ. Напряжение между потенциальными проводниками измеряли через 10 с после момента соприкосновения зонда с исследуемой поверхностью с помощью цифрового вольтметра В7-40/1. Образцы предварительно очищали под струей воздуха. За конечный результат бралось среднеарифметическое значение из десяти измерений, проведенных в разных точках исследуемой поверхности. Контактное сопротивление  $R_K$  вычисляли по формуле

$$R_K = \frac{U}{I}, \quad (6.7)$$

где  $U$  – напряжение между потенциальными проводниками;

$I$  – ток, протекающий по токовым проводникам ( $I = 0,015$  А).

## Порядок выполнения работы

1 Получить у преподавателя образцы для измерения – в качестве исследуемых структур будут многослойные тонкопленочные покрытия «никель – медь», полученные методом ионно-плазменного напыления [3].

2 Измерить контактное электросопротивление образцов с помощью ИУС-3. Заполнить таблицу 6.1. Для расчета удельного поверхностного сопротивления воспользоваться формулой

$$R_{Cu} = \frac{R_{Ni} \cdot R_{ИУС}}{R_{Ni} - R_{ИУС}}. \quad (6.8)$$

3 По формуле (6.9) рассчитать удельные сопротивления меди  $\rho$ , представленные в таблице 6.2.

$$\rho = R \cdot d. \quad (6.9)$$

Таблица 6.1 – Экспериментальные данные исследования удельного электросопротивления

| Номер измерения  | Образец                      |                             |
|------------------|------------------------------|-----------------------------|
|                  | $R_{ИУС}, \text{Ом}/\square$ | $R_{Ni}, \text{Ом}/\square$ |
| 1                |                              |                             |
| 2                |                              |                             |
| 3                |                              |                             |
| 4                |                              |                             |
| 5                |                              |                             |
| Среднее значение |                              |                             |

Таблица 6.2 – Рассчитанные данные

| Параметры                                       | Образец |
|-------------------------------------------------|---------|
| $d, \text{мм}$                                  |         |
| $R_{Cu}, \text{Ом}/\square$                     |         |
| $\rho \cdot 10^{-4}, \text{Ом} \cdot \text{см}$ |         |

4 Измерить на лабораторном макете трехзондовым методом вольтамперометрии контактное электросопротивление тонкопленочных структур, заполнить таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Экспериментальные данные исследования контактного электросопротивления

| Номер образца | Напряжение, мВ |                |                |                |                |                 | Контактное электросопротивление, мОм |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------------------------|
|               | U <sub>1</sub> | U <sub>2</sub> | U <sub>3</sub> | U <sub>4</sub> | U <sub>5</sub> | U <sub>ср</sub> |                                      |
|               |                |                |                |                |                |                 |                                      |
|               |                |                |                |                |                |                 |                                      |

5 Сделать вывод о влиянии условий формирования на электрические параметры тонкопленочных систем.

### Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Теоретическая часть.
- 3 Экспериментальные данные и их обработка.
- 4 Выводы.

### Контрольные вопросы и задания

- 1 Что такое контактное электросопротивление?
- 2 Что такое удельное электросопротивление?

### Список использованных источников

- 1 Газенаур, Е. Г. Методы исследования материалов : учеб. пособие / Е. Г. Газенаур, Л. В. Кузьмина, В. И. Крашенинин. – Кемерово : КГУ, 2013. – 336 с.
- 2 ГОСТ 24392–80. Кремний и германий монокристаллические. Измерение удельного электрического сопротивления четырехзондовым методом. – Введ. 1981–01–01. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2001.
- 3 Ионно-плазменные системы в технологии тонких пленок = Plasma systems in Thin Film technology / А. П. Достанко [и др.] // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22, № 2. – С. 20–31.

## Лабораторная работа № 7

### КОНТРОЛЬ МИКРОТВЕРДОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

#### Цель работы

Изучить руководства по эксплуатации микротвердомера Leica VMHT MOT и микротвердомера ПМТ-3М. Измерить микротвердость покрытий по методу Виккерса и по методу Кнупа. Получить снимки морфологии поверхности покрытий. Установить влияние условий формирования на структуру и свойства тонкопленочных покрытий.

#### Теоретические сведения

Определение микротвердости является важным методом контроля качества покрытий. Твердость определяется как отношение силы сопротивления к площади поверхности, площади проекции или объему внедренной в материал части индентора. Твердость металлов измеряют методами Бринелля, Роквелла, Виккерса и др. [1; 2] в трех диапазонах. Макродиапазон регламентирует величину нагрузки на индентор от 2 Н до 30 кН. Микродиапазон регламентирует величину нагрузки на индентор до 2 Н и глубину внедрения индентора больше 0,2 мкм. Нанодиапазон регламентирует только глубину внедрения индентора, которая должна быть меньше 0,2 мкм.

Испытание на определение микротвердости осуществляется путем вдавливания индентора специальной формы в поверхность испытуемого образца. Получившийся отпечаток или невосстановившаяся площадь затем измеряется с помощью микроскопа либо измерение производится автоматически с помощью программного обеспечения, анализирующего изображение.

В Международной системе единиц микротвердость выражается в паскалях (Па) и имеет размерность ньютон на квадратный метр (Н/м<sup>2</sup>):

$$1 \text{ кг/мм}^2 = 10^7 \text{ Н/м}^2 = 10^7 \text{ Па.}$$

Метод Кнупа. Алмазный наконечник для испытаний по Кнупу оставляет удлиненный ромбовидный отпечаток с соотношением между длинной и короткой диагональю 7 : 1 (рисунок 7.1, а). Для четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием микротвердость (НК) вычисляют по формуле

$$\text{НК} = \frac{F}{S} = 2F \frac{\text{tg}_2^a \text{ctg}_2^b}{d^2} = 14,229 \frac{F}{d^2}, \quad (7.1)$$

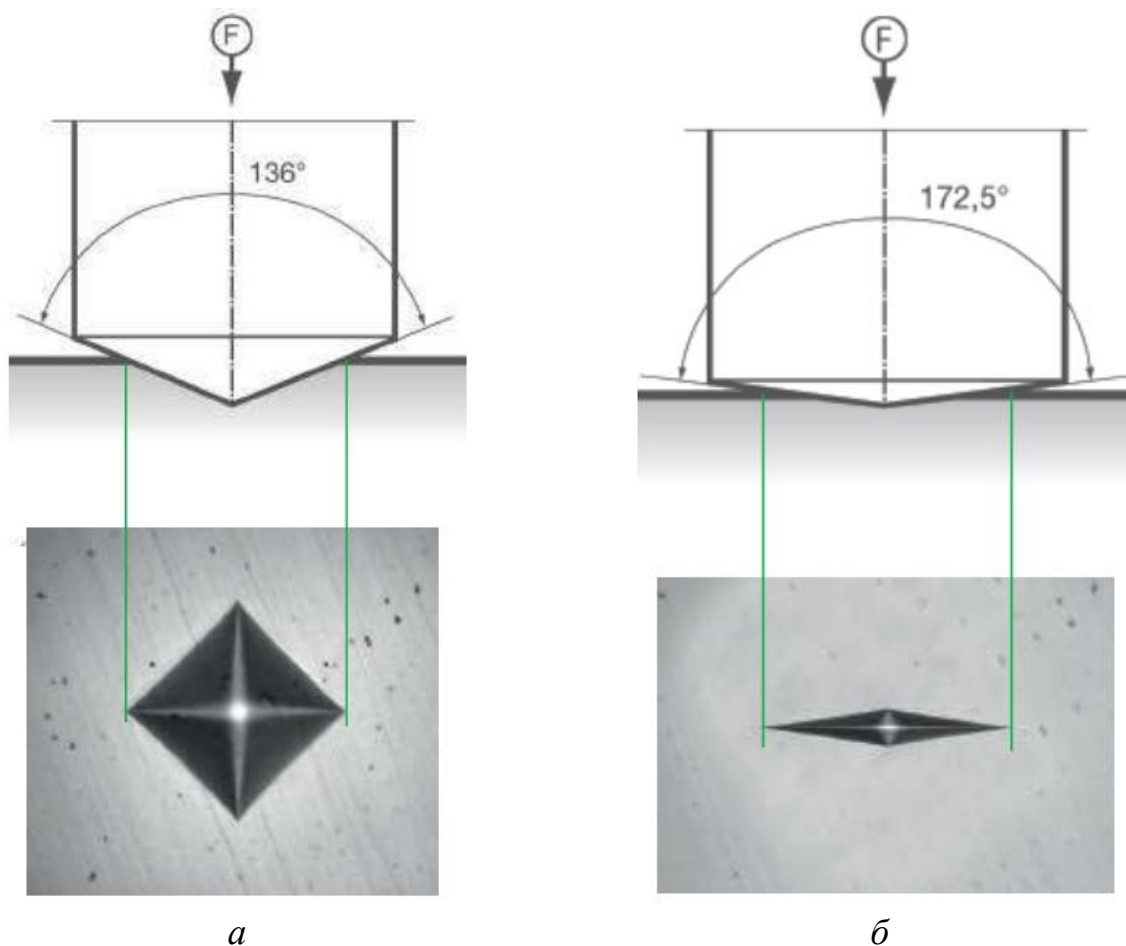
где  $F$  – испытательная нагрузка, Н;

$S$  – условная площадь боковой поверхности полученного отпечатка, мм<sup>2</sup>;

$\alpha$ ,  $\beta$  – угол пересечения выступающих продольных и поперечных ребер, градус ( $\alpha = 172^\circ 30'$  и  $\beta = 130^\circ$ );

$d$  – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм.

Метод испытаний по Кнупу идеально подходит для твердых тонких слоев, практически не наносит ущерба тестовой поверхности.



*a* – метод Кнупа; *б* – метод Викерса

Рисунок 7.1 – Схема измерения микротвердости

Метод Викерса. Испытание на микротвердость проводят вдавливанием в испытуемый образец четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$  (рисунок 7.1, *б*). Микротвердость по Виккерсу (HV) определяется отношением нагрузки  $P$  (кг) к поверхности полученного отпечатка  $S$  ( $\text{мм}^2$ ):

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2p \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{h}{d^2},$$

где  $P$  – нагрузка на пирамиду, кг;

$\alpha$  – угол между противоположными гранями пирамид, градус;

$d$  – среднее арифметическое длин двух диагоналей отпечатка, измеренных после снятия нагрузки, мм.

Для измерения микротвердости используют микротвердомеры, в частности, прибор LEICA VMHT MOT. На рисунке 7.2 и в таблице 7.1 приведены его внешний вид и технические характеристики. Оценка микротвердости на приборе основана на измерении величины диагонали оттиска, получаемого от вдавливания с определенной нагрузкой алмазной пирамиды в исследуемый материал. При интерпретации результатов учитывалось, что измерения микротвердости твердых покрытий на микротвердомере LEICA VMHT MOT носят относительный характер, т. к. этот метод достоверен при глубине внедрения пирамиды, составляющей  $< 10 \%$  толщины покрытия.



*а*



*б*

*а* – внешний вид микротвердомера; *б* – алмазные пирамидки  
Рисунок 7.2 – Микротвердомер LEICA VMHT MOT

Таблица 7.1 – Технические характеристики микротвердомера LEICA VMHT MOT (индентор по Виккерсу, Кнупу)

| Параметры                       | Значения                 |
|---------------------------------|--------------------------|
| Диапазон увеличений, крат       | 100–1000                 |
| Диапазон нагрузок, Гс           | 0,5–2000                 |
| Максимальный размер образца, мм | $50 \times 50 \times 50$ |

LEICA VMHT MOT не только имеет новый дизайн, но и делает тестирование микротвердости более удобным для пользователя, чем любой другой прибор:

- моторизованный выбор испытательного усилия обеспечивает полный контроль с помощью сенсорной панели. Механическая ручка набора номера не требуется;
- выбираемая скорость захода на посадку предотвращает прыгающие воздействия на определенные материалы;

- VMHT MOT предлагает моторизованную башню и дисплей с сенсорной панелью для более полной информации и взаимодействия;
- благодаря хорошей оптике его можно использовать как простой металлический микроскоп с ярким полем.

### **Порядок выполнения работы**

- 1 Получить у преподавателя образцы для измерения.
- 2 Измерить значение микротвердости, сравнить это значение для структур, сформированных при разных условиях.

### **Содержание отчета**

- 1 Цель работы.
- 2 Теоретическая часть.
- 3 Экспериментальные данные и их обработка.
- 4 Выводы.

### **Контрольные вопросы и задания**

- 1 Как определить микротвердость по методу Виккерса?
- 2 Как определить микротвердость по методу Кнупа?

### **Список использованных источников**

- 1 Газенаур, Е. Г. Методы исследования материалов : учеб. пособие / Е. Г. Газенаур, Л. В. Кузьмина, В. И. Крашенинин. – Кемерово : КГУ, 2013. – 336 с.
- 2 Обзорная таблица методов измерения твердости от Qness [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.s-i.ru/wp-content/uploads/2016/03/%D0%9E%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F%D1%82%D0%B0%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D1%86%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%D1%82%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8-%D0%BE%D1%82-Qness.pdf>.

## Лабораторная работа № 8

### ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

#### Цель работы

Изучить руководства по эксплуатации микротрибометра МТ-4.05. Измерить коэффициент трения и величину объемного износа. Получить изображения морфологии поверхности. Установить влияние условий формирования на структуру и свойства тонкопленочных покрытий.

#### Теоретические сведения

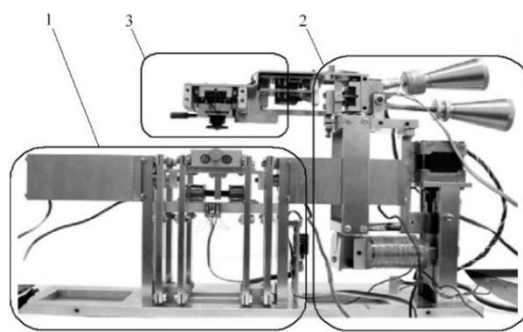
Триботехнические испытания позволяют исследовать износостойкость изделий. Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Износостойкость зависит от состава и структуры тонкопленочного покрытия и количественно характеризуется коэффициентом трения и величиной износа.

Микротрибометр МТ 4.05 (Гомель) (рисунок 8.1, *а*) применяют для измерения износостойкости. Описание особенностей работы оборудования приведено согласно руководству пользователя [1; 2]. Основные узлы микротрибометра показаны на рисунке 8.1, *б*.

В приборе реализована схема испытаний «сфера – плоскость», позволяющая наиболее точно рассчитать площадь пятна контакта и величины контактного давления, а также исключить неизбежное влияние наклона индентора и пластины на геометрию контакта. Диаметр шарика выбирается в диапазоне 1–5 мм в зависимости от требуемой величины контактного давления. Контролируемая нормальная нагрузка от 10 мН до 1 Н; скорость скольжения 0,1–10 мм/с.



*а*



*б*

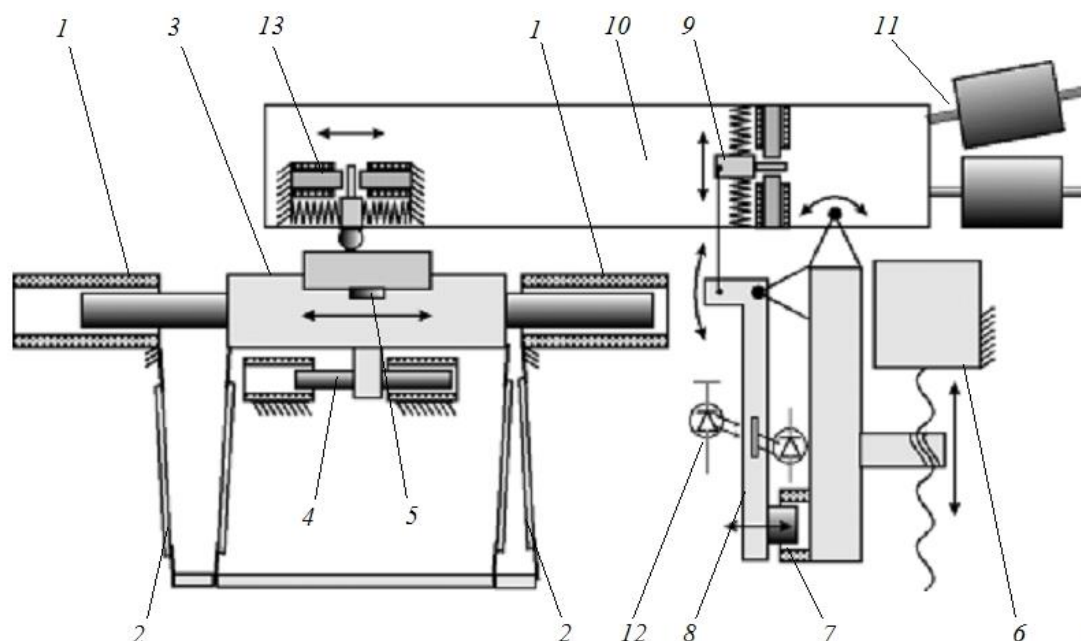
*а* – микротрибометр МТ 4.05; *б* – внешний вид со снятыми декоративными крышками:

1 – привод; 2 – система нагружения;

3 – система измерения силы трения

Рисунок 8.1 – Внешний вид микротрибометра МТ 4.05

Схема прибора приведена на рисунке 8.2. Для минимизации механического шума и вибрации, негативно влияющих на измерение малых сил трения, применен бесконтактный привод. В сочетании с использованием направляющих изгиба электромагнитный привод позволил реализовать перемещение образца в требуемом диапазоне скоростей при длине дорожки трения от 0,1 до 10 мм. Обратная связь по положению дает возможность уменьшить время переходного процесса  $\tau$  при изменении направления движения образца и расширить зону движения образца с постоянной скоростью в пределах единичного цикла тестирования (рисунок 8.3).



1 – электромагниты привода; 2 – направляющие изгиба;  
 3 – столик-держатель образца; 4 – датчик положения; 5 – датчик  
 трибоакустической эмиссии; 6 – шаговый привод; 7 – электромагнит системы  
 нагружения; 8 – рычаг; 9 – датчик нагрузки; 10 – головка;  
 11 – балансировочные грузы; 12 – оптопара; 13 – датчик силы трения  
 Рисунок 8.2 – Схема микротрибометра

Исследуемые покрытия наносят либо на пластину из кремния, поликора, стали марки 65Г, либо на шарик для расширения диапазона исследуемых пар трения. Нормальная нагрузка индентора на образец устанавливается и поддерживается постоянной во время тестирования с помощью электромагнитной системы с обратной связью. Тяговое усилие электромагнита 7 (см. рисунок 8.2) передается с помощью рычага 8 через датчик нагрузки 9 на качающуюся головку 10. Начальная балансировка головки осуществляется с помощью грузов 11. Угловое положение головки отслеживается с помощью оптопары 12, сигнал которой зависит от угла наклона рычага 8. Электромагнит 7 и датчик нагрузки 9 электрически соединены в цепь с обратной связью, благодаря чему обеспечивается поддержание нормальной нагрузки постоянной независимо от вертикального

смещения головки, вызываемого погрешностью изготовления и установки образца. Шаговый привод  $\delta$  служит для подвода индентора к поверхности образца перед началом тестирования, а также отвода от поверхности по окончании тестирования.

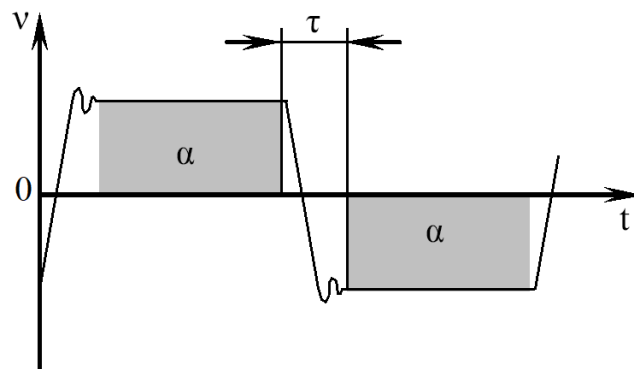


Рисунок 8.3 – Изменение скорости движения образца в пределах единичного цикла тестирования

Передача, прием и обработка данных осуществляются с помощью персонального компьютера (рисунок 8.4). Программное обеспечение позволяет устанавливать скорость движения образца, величину нормальной нагрузки и длину трека, вести запись величины силы и коэффициента трения. Полученные данные могут быть сохранены в файле для дальнейшего анализа.

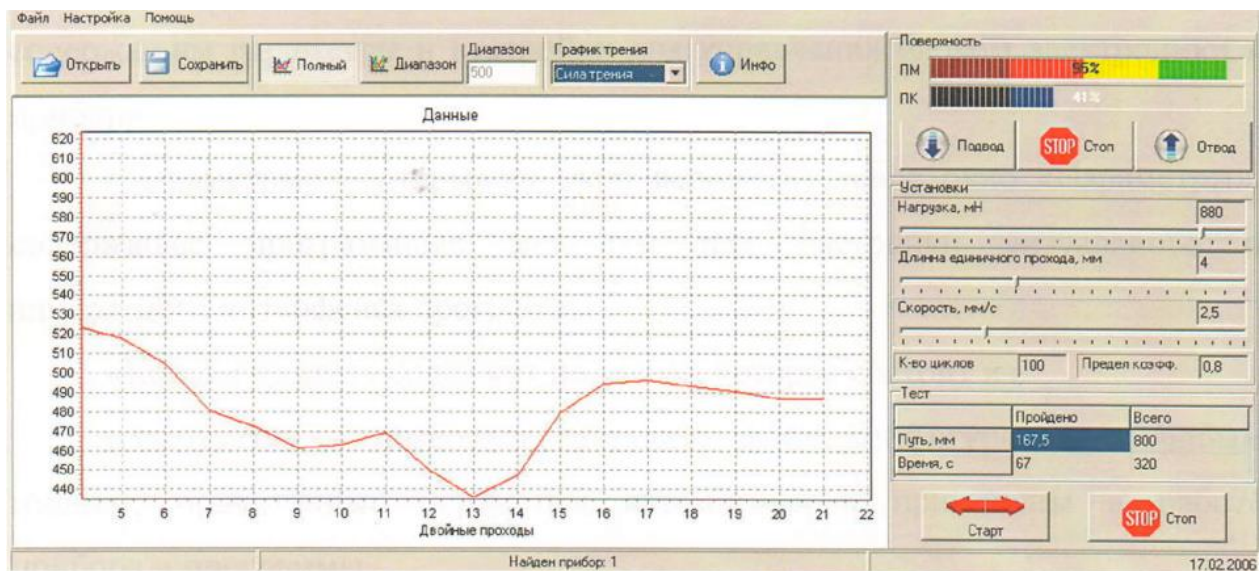


Рисунок 8.4 – Активное окно управляющей программы микротрибометра МТ-4.05

Обработка экспериментальных данных состоит в построении графических зависимостей коэффициента трения от времени истирания, сравнении значения коэффициента трения для исследуемых поверхностей при определенном

количестве циклов истирания и измерении после определенного количества циклов трения контртелом (шариком радиусом  $R$ ) по поверхности образца ширины дорожки трения  $d$  с последующим расчетом глубины  $h$  дорожки трения по формуле (8.1) и объемного износа за один цикл  $W$  по формуле (8.2):

$$h = 2R - \sqrt{4R^2 - d^2}, \quad (8.1)$$

$$W = \frac{d^3}{16Rn}. \quad (8.2)$$

### Порядок выполнения работы

1 Получить согласно выполняемому варианту (см. таблицу 1.2) два образца для проведения исследований. Характеристики образцов приведены в приложении А в таблице А.1.

2 Ознакомиться с руководством по эксплуатации микротрибометра МТ-4.05.

3 Подготовить микротрибометр МТ-4.05 и компьютер к работе.

4 Закрепить первый образец. Провести измерение коэффициента трения (нагрузка 120 мН, двойной проход, количество циклов истирания образца 1000, скорость 3 мм/с, длина дорожки трения 22 мм).

5 Данные измерений записать в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 – Результаты исследования триботехнических свойств тонкопленочных покрытий (нагрузка 120 мН)

| Образец [номер] |          |                 |                    | Образец [номер] |          |                 |                    |
|-----------------|----------|-----------------|--------------------|-----------------|----------|-----------------|--------------------|
| Время истирания | Путь, мм | Сила трения, мН | Коэффициент трения | Время истирания | Путь, мм | Сила трения, мН | Коэффициент трения |
|                 |          |                 |                    |                 |          |                 |                    |
|                 |          |                 |                    |                 |          |                 |                    |
|                 |          |                 |                    |                 |          |                 |                    |

6 Построить графики зависимости коэффициента трения от времени истирания.

7 Получить снимок поверхности исследуемых образцов, измерить дорожку трения.

8 Провести расчет параметров по формулам (8.1) и (8.2).

9 Повторить пункты 4–8 для второго образца.

10 Добавить полученные данные в сводную таблицу 8.2.

11 Сделать вывод о влиянии условий формирования тонкопленочных структур на триботехнические свойства осадков.

## **Содержание отчета**

- 1 Цель работы.
- 2 Теоретическая часть.
- 3 Экспериментальные данные и их обработка.
- 4 Выводы.

## **Контрольные вопросы и задания**

- 1 Как оценить износостойкость тонкопленочных систем?
- 2 Как определить коэффициент трения?
- 3 Как определить объемный износ?
- 4 Основные узлы микротрибометра МТ-4.05.

## **Список использованных источников**

- 1 Универсальный микротрибометр MTU-2K7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mpri.org.by/universalnyj-mikrotribometr-mtu-2k7/>.
- 2 Аппаратно-программный измерительный комплекс. Микротрибометр возвратно-поступательного типа. Руководство пользователя. – Гомель, 2005. – 21 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Справочная информация о тестовых образцах для исследований

При выполнении практических заданий студентами специальности 7-06-0713-02 «Электронные системы и технологии» профилизации «Интегрированные технологии производства электронных средств» сформированы тестовые образцы с электрохимическими покрытиями для исследований. В таблице А.1 приведены номер образца, соответствующие условия формирования и состав тонкопленочных структур. Состав осадков взят из источников [1; 2], где авторы приводят содержание углерода C(C), никеля C(Ni) и кислорода C(O), полученное методом EDX-анализа.

Для электроосаждения использован ток разной формы: постоянный (ПТ) (рисунок А.1, а), импульсный униполярный (ИТ) (рисунок А.1, б), импульсный реверсированный (РТ) (рисунок А.1, в), а также метод программного изменения режимов (ПР) (чередование по 1 мин ПТ и ИТ либо ПТ и РТ). Для ИТ варьировались значения длительностей импульса и паузы, для РТ – длительностей прямого и обратного импульсов.

Для всех режимов средняя катодная плотность тока равна  $i_{\text{ср}} = 2,5 \text{ А/дм}^2$ .

Таблица А.1 – Характеристики исследуемых тонкопленочных систем

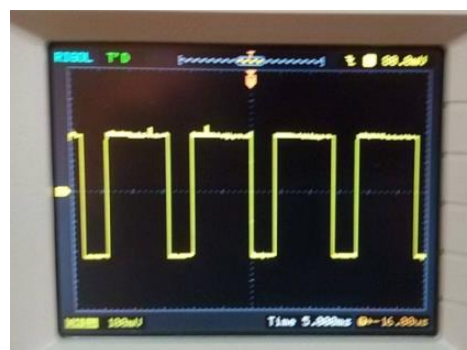
| Номер образца | Форма тока | Длительность, мс |       |              |                | Содержание, мас. % |       |       |
|---------------|------------|------------------|-------|--------------|----------------|--------------------|-------|-------|
|               |            | имп.             | паузы | прямого имп. | обратного имп. | C(C)               | C(Ni) | C(O)  |
| 1             | ПТ         |                  |       |              |                | 67,75              | 30,47 | 1,78  |
| 2             | РТ         |                  |       | 0,6          | 0,2            | 66,41              | 31,59 | 2,00  |
| 3             | РТ         |                  |       | 60           | 20             | 32,95              | 65,36 | 1,70  |
| 4             | РТ         |                  |       | 60           | 30             | 60,51              | 37,38 | 2,27  |
| 5             | РТ         |                  |       | 300          | 100            | 58,05              | 39,30 | 2,65  |
| 6             | РТ         |                  |       | 12           | 4              | 22,73              | 75,92 | 1,35  |
| 7             | РТ         |                  |       | 0,8          | 0,06           | 60,53              | 36,52 | 2,95  |
| 8             | ИТ         | 300              | 700   |              |                | 51,43              | 46,63 | 1,95  |
| 9             | ИТ         | 30               | 70    |              |                | 42,12              | 55,23 | 2,66  |
| 10            | ИТ         | 3                | 7     |              |                | 48,42              | 49,28 | 2,30  |
| 11            | ПР         | 3                | 7     |              |                | 64,11              | 29,95 | 5,95  |
| 12            | ПР         |                  |       | 60           | 20             | 22,87              | 66,28 | 10,85 |
| 13            | ПР         |                  |       | 60           | 30             | 55,85              | 42,74 | 1,41  |
| 14            | ПР         |                  |       | 300          | 100            | 35,00              | 63,86 | 1,14  |
| 15            | ПР         |                  |       | 12           | 4              | 59,64              | 38,48 | 1,88  |



*a*



*б*



*в*

*a* – постоянный; *б* – импульсный униполярный;

*в* – импульсный реверсированный

Рисунок А.1 – Формы тока при электроосаждении тестовых образцов

### Список использованных источников

1 Использование реверсированного тока для электроосаждения композиционного покрытия на диски алмазные режущие / И. И. Кузьмар [и др.] // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 433–436.

2 Кузьмар, И. И. Метод нестационарного электролиза для управления составом поликомпозиционных никелевых покрытий / И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер, Д. Ю. Гульпа // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. XIII Междунар. симпозиума, Минск 5–7 апреля 2023 г. : в 2 ч. / Беларуская навука. – Минск, 2023. – Ч. 2. – С. 55–62.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### **Пример оформления результатов выполнения лабораторной работы № 4 «Диагностика поверхности субмикронных структур методом атомно-силовой микроскопии»**

#### *Экспериментальная часть*

1 Исследуемые образцы – электрохимическая медь, полученная при условиях формирования № 13, 14, 15.

2 Исследование структуры поверхности осуществляли с помощью сканирующего зондового микроскопа с оптическим видеомикроскопом Certus Light V.

3 Сканирование проводилось бесконтактным методом.

4 Тип кантилевера: высокоточный неконтактный композитный датчик с кремниевым телом, рычагом и кремниевым наконечником высокого разрешения. Радиус скругления  $< 10$  нм.

5 Размер области сканирования поверхности  $40 \times 40$  мкм для образцов № 13, 14, 15, однако для № 15 для исследования была выделена область  $40 \times 20$  мкм.

#### *Обсуждения*

На рисунках Б.1 и Б.2 представлены 2D и 3D соответственно АСМ-изображения изучаемых поверхностей. Структура мелкокристаллическая равномерная. Размах высот для образца № 13 составляет 1,07 мкм, для № 14 – 0,7 мкм, для № 15 – 0,39 мкм, высота размаха у образца № 13 в два раза больше, чем у образца № 14, и в три раза больше, чем у образца № 15.

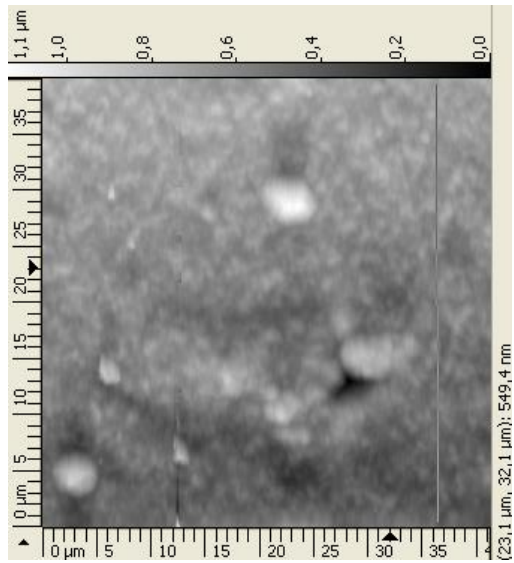
Выделены линии профилей на каждом образце для определения параметров шероховатости (рисунок Б.3). В результате видно, что образец № 13 имеет наихудшую структуру. Размах «пик – впадина» наибольший. Размер структурных кластеров у образца № 15 в два раза меньше, чем у образца № 13.

В таблице Б.1 представлены амплитудные, пространственные и гибридные характеристики шероховатости поверхности образцов № 13, 14, 15, рассчитанные по линиям профилей.

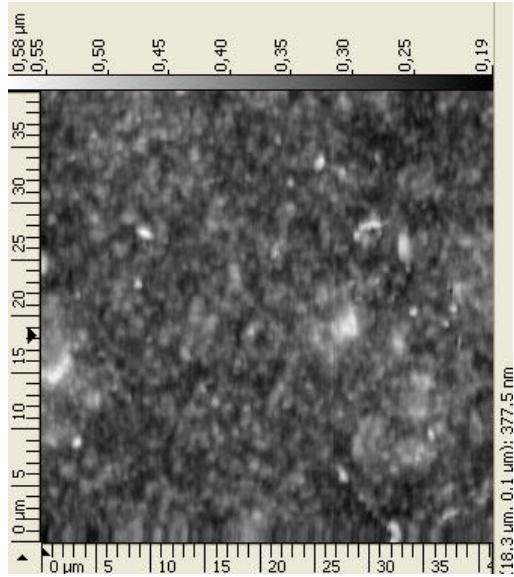
Средняя шероховатость № 14 гораздо меньше, чем у образца № 13, но близка к средней шероховатости № 15, что говорит о качестве изготовленных образцов у № 14 и 15, лучше для применения в производстве.

У образцов № 13 и 15 коэффициент асимметрии  $R_{sk} > 0$ , что говорит о высоких пиках на поверхности. Это снижает опорные свойства поверхности, для которых необходимо  $R_{sk} < 0$ . Максимальное значение  $R_p$  у образца № 13, а у образцов № 14 и 15 меньше в полтора раза (они близки по значению).

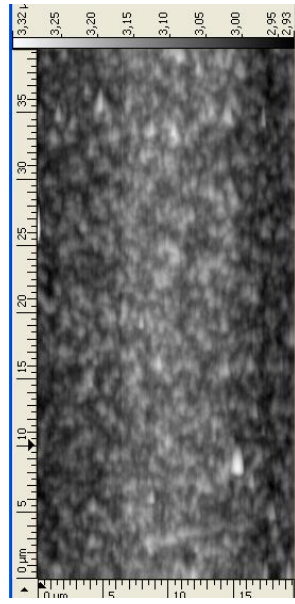
Для анализа размера зерен был применен метод «по водоразделу» (рисунок Б.4). По полученным данным построили распределение количества зерен в зависимости от площади поверхности (рисунок Б.5) и зависимость количества зерен от радиуса эквивалентного диска (рисунок Б.6).



*a*

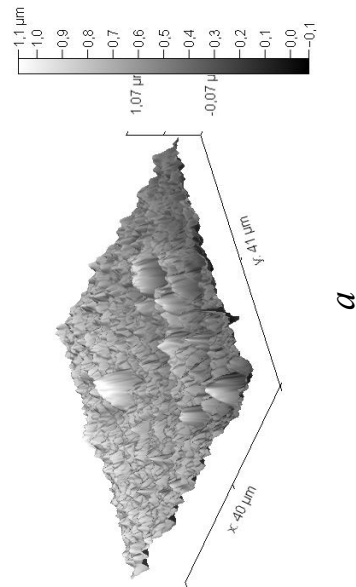


*б*

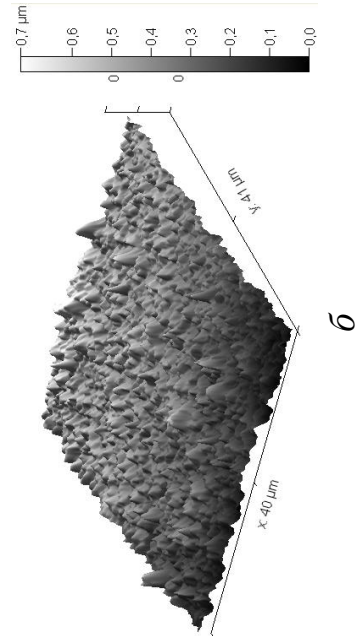


*в*

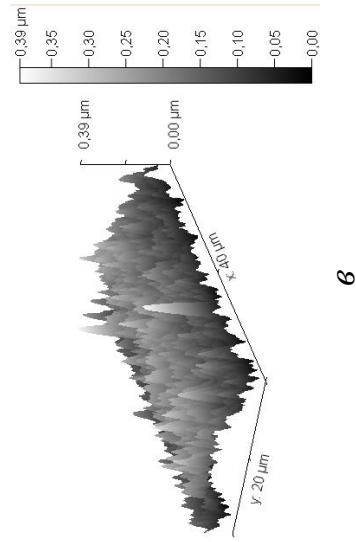
*a* – образец № 13; *б* – образец № 14; *в* – образец № 15  
Рисунок Б.1 – Внешний вид поверхности образцов



*a*

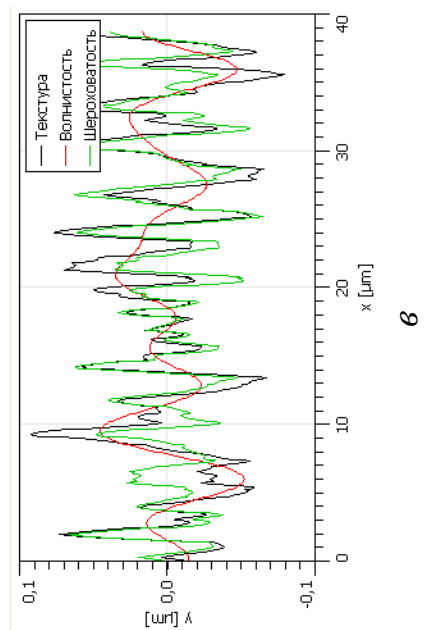
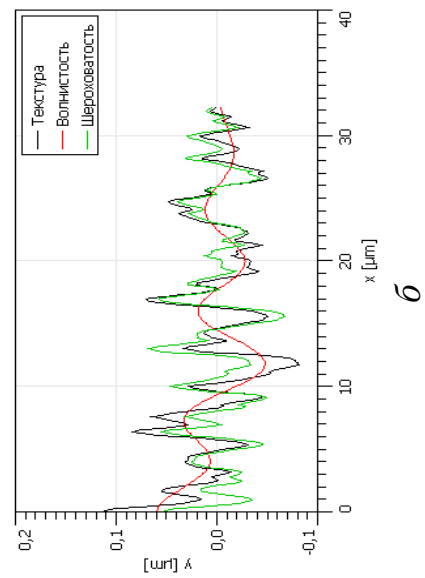
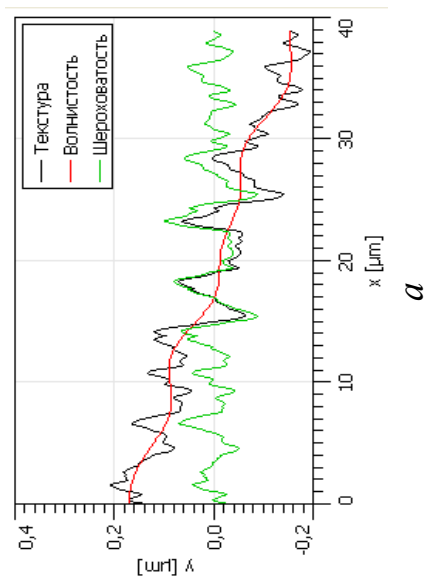


*б*



*в*

*a* – образец № 13; *б* – образец № 14; *в* – образец № 15  
Рисунок Б.2 – 3D-изображение поверхности образцов



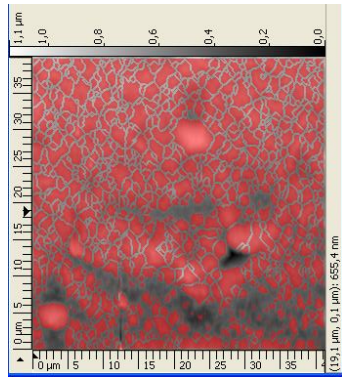
$a$  – образец № 13;  $б$  – образец № 14;  $в$  – образец № 15  
Рисунок Б.3 – Шероховатость образцов

Таблица Б.1 – Амплитудные, пространственные и гибридные характеристики образцов № 13, 14 и 15

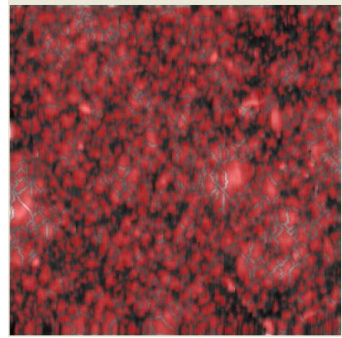
| Шероховатость                                                                                             |  | Образец № 13 | Образец № 14 | Образец № 15 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|
| Амплитуда                                                                                                 |  |              |              |              |
| Средняя шероховатость ( $R_a$ ), нм                                                                       |  | 28,49        | 21,15        | 23,87        |
| Среднеквадратичная шероховатость ( $R_q$ ), нм                                                            |  | 35,38        | 26,36        | 28,70        |
| Максимальная высота шероховатости ( $R_t$ ), нм                                                           |  | 186,20       | 134,41       | 130,59       |
| Максимальная глубина впадины шероховатости ( $R_v$ ), нм                                                  |  | 87,17        | 67,31        | 63,31        |
| Максимальная высота пика шероховатости ( $R_p$ ), нм                                                      |  | 99,03        | 67,10        | 67,21        |
| Средняя максимальная высота шероховатости ( $R_{tm}$ ), нм                                                |  | 147,88       | 95,45        | 108,75       |
| Средняя максимальная глубина долины шероховатости ( $R_{vm}$ ), нм                                        |  | 70,68        | 46,83        | 50,89        |
| Средняя максимальная высота пика шероховатости ( $R_{pm}$ ), нм                                           |  | 77,19        | 48,62        | 57,85        |
| Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины ( $R_{3z}$ ), нм    |  | 119,946      | 100,32       | 114,03       |
| Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины ( $R_{3z}$ ISO), нм |  | 106,57       | 71,34        | 75,48        |

## Продолжение таблицы Б.1

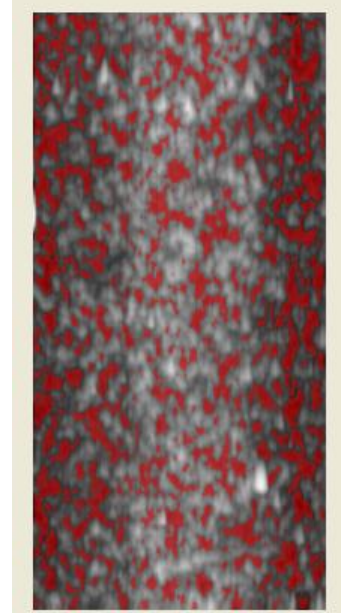
| Шероховатость                                                         | Образец № 13 | Образец № 14 | Образец № 15 |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Средняя максимальная высота профиля ( $R_z$ ), нм                     | 136,18       | 106,10       | 116,05       |
| Средняя максимальная высота шероховатости ( $R_z$ ISO), нм            | 147,88       | 95,45        | 108,75       |
| Максимальная шероховатость от пика до впадины ( $R_y = R_{max}$ ), нм | 185,86       | 134,41       | 125,90       |
| Коэффициент асимметрии ( $R_{sk}$ ), нм                               | 0,23         | -0,02        | 0,25         |
| Экссесс ( $R_{ku}$ )                                                  | 2,928        | 2,81         | 2,34         |
| Средняя волнистость ( $W_a$ ), нм                                     | 84,81        | 18,94        | 18,95        |
| Среднеквадратичная волнистость ( $W_q$ ), нм                          | 99,27        | 23,43        | 23,09        |
| Максимальная высота волнистости ( $W_y = W_{max}$ ), нм               | 325,38       | 107,95       | 97,49        |
| Максимальная высота профиля ( $P_t$ ), нм                             | 402,38       | 194,10       | 170,39       |
| Пространственные                                                      |              |              |              |
| Среднее расстояние между неровностями профиля ( $S_m$ ), мкм          | 3,00         | 2,15         | 2,03         |
| Средняя длина волны профиля ( $\lambda_a$ ), мкм                      | 2,78         | 2,29         | 2,09         |
| Среднеквадратичная длина волны профиля ( $\lambda_q$ ), мкм           | 2,79         | 2,32         | 2,00         |
| Гибридные                                                             |              |              |              |
| Средний по модулю наклон ( $\Delta a$ )                               | 0,06         | 0,05         | 0,07         |
| Среднеквадратичный наклон ( $\Delta q$ )                              | 0,07         | 0,07         | 0,08         |
| Длина ( $L$ ), мкм                                                    | 39,02        | 32,36        | 38,75        |
| Длина растянутого профиля ( $L_o$ ), мкм                              | 39,02        | 32,44        | 38,91        |
| Относительная длина профиля ( $l_r$ )                                 | 1,00         | 1,00         | 1,00         |



*a*



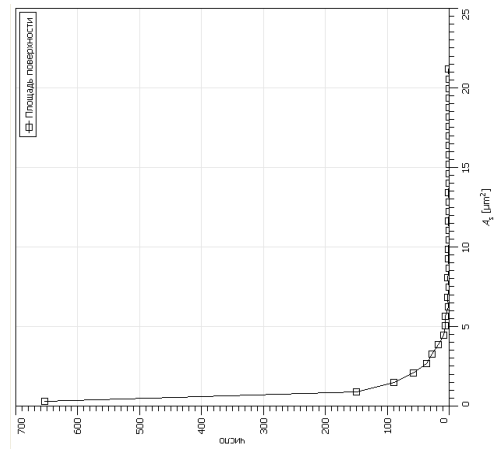
*б*



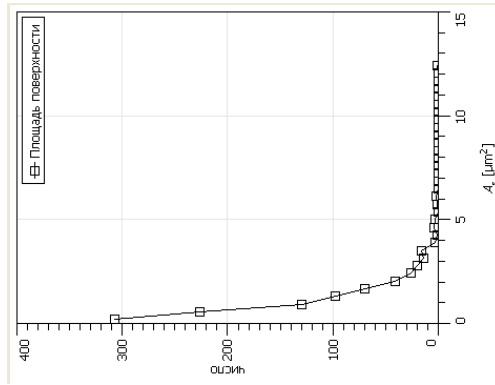
*в*

*a* – образец № 13; *б* – образец № 14; *в* – образец № 15

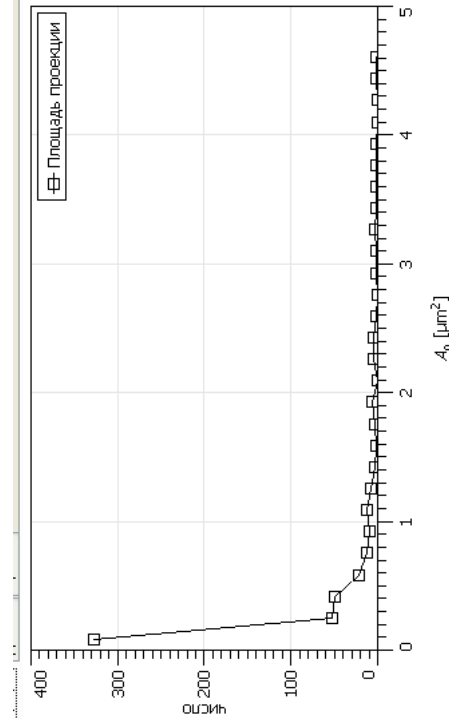
Рисунок Б.4 – Изображение поверхности с маской по границе зерен по методу «по водоразделу»



*a*



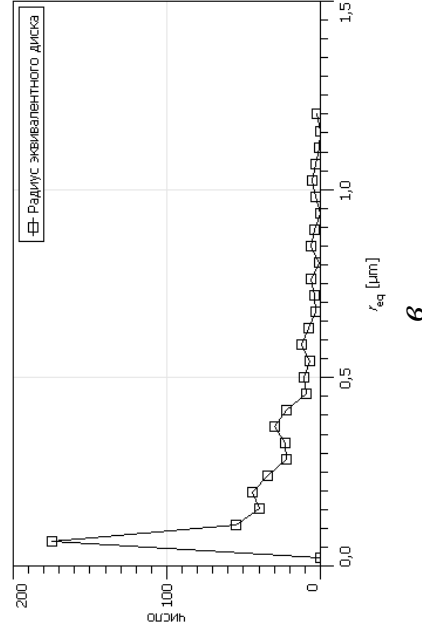
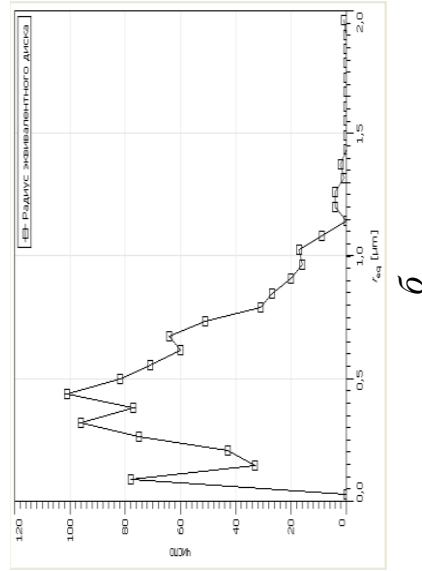
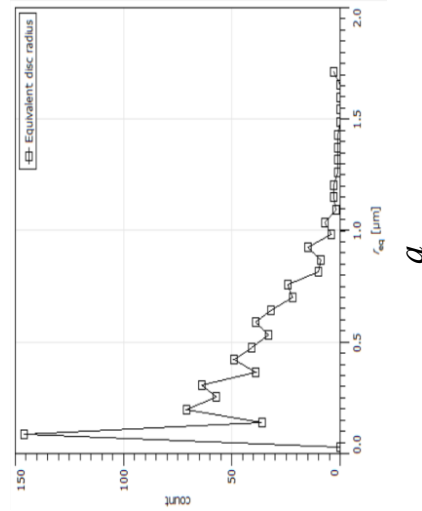
*б*



*в*

*a* – образец № 13; *б* – образец № 14; *в* – образец № 15

Рисунок Б.5 – Распределение количества зерен в зависимости от площади поверхности



$a$  – образец № 13;  $б$  – образец № 14;  $в$  – образец № 15  
Рисунок Б.6 – Зависимость количества зерен от радиуса эквивалентного диска

Для образца № 13 выявлено 96 % зерен размером  $< 0,15 \text{ мкм}^2$ , для образца № 14 – 96 % зерен размером  $< 0,2 \text{ мкм}^2$ , для образца № 15 – 96 % зерен размером  $< 0,4 \text{ мкм}^2$ . Максимальный размер зерен для образцов № 13, 14 и 15 соответственно 21,5, 12,5 и 4,7  $\text{мкм}^2$  (см. рисунок Б.5).

Для образца № 13 получено максимальное число зерен при радиусе эквивалентного диска 0,2–1,0  $\text{мкм}$ , для образца № 14 – 0,2–1,1  $\text{мкм}$ , для образца № 15 – 0,2–0,5  $\text{мкм}$  (см. рисунок Б.6).

### *Заключение*

Методом АСМ исследована структура медных электрохимических покрытий, сформированных на стеклянных подложках с подслоем никеля. С помощью программы Gwyddion обработаны полученные изображения. Установлены структурные особенности полученных образцов. По полученным данным образец № 13 обладает крупнозернистостью, а образцы № 14 и 15 мелкозернисты. Наилучшее качество поверхности у образца № 15.

*Учебное издание*

**Кузьмар Инна Иосифовна**  
**Завадский Сергей Михайлович**

**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА  
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**ПОСОБИЕ**

Редактор *А. Ю. Шурко*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. А. Долгая*

Подписано в печать 05.09.2025. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,84. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 30 экз. Заказ 203.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск



