

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Мельникова Яна Сергеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование пределов применений СЭМ при анализе наноплёнок  
углерода на полимере**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19303

**Научный руководитель:**

к. ф.-м. н., А. С. Золкин

Оценка научного руководителя

---

« 22 » декабрь 2020 г.

**Преподаватель практикума**

к. ф.-м. н. А. А. Симонов

Оценка преподавателя практикума

---

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Куратор практикума:**

к. т. н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

---

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

## **Аннотация**

В работе обсуждаются пределы применений сканирующей электронной микроскопии в исследованиях морфологии поверхностей при различных условиях измерений системы: образец-подложка. Рассмотрены физические основы работы сканирующей электронной микроскопии, приведены основные характеристики современных приборов. Получены изображения поверхности углеродной пленки на полиметилметакрилате. Установлено, что покрытие является дисперсным. При малых увеличениях (1000) покрытие напоминает застывший расплав. При больших увеличениях (20000) покрытие состоит из нано блоков размером около 150-200 нм. Высота блоков 100-150 нм. Минимальный размер блоков, примерно 50 нм. Покрытие исследовано на атомно-силовом микроскопе. Подтверждена идентичность морфологии поверхности при двух методах измерений. Получены спектры пропускания и отражения покрытия в диапазоне длин волн 150 – 3200 нм. Максимум пропускания находится в ИК области: 1900 – 2050 нм и равен ~ 30%, максимум отражения также в ИК 3000 – 3150 нм и равен ~ 7-8 %. Нано покрытие получено с помощью магнетронной распылительной системы. Толщина покрытия ~ 500 нм, диаметр покрытия 20 мм; диаметр подложек - 60 мм, толщина – 5 мм.

**Ключевые слова:** Углеродные пленки, полимер, магнетронная распылительная система, атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, отражение, поглощение, спектрофотометр.

## Оглавление

1. Введение .....	4
2. Теоретическая часть .....	6
2.1 Физические основы работы сканирующего электронного микроскопа.....	6
2.2 Физические основы работы атомно-силового микроскопа.....	9
2.3 Физические основы работы спектрофотометра SHIMADZU UV-3600...	10
3. Экспериментальная часть.....	12
3.1 Методика получения изображений СЭМ.....	12
3.2 Методика получения спектров со спектрофотометра.....	12
3.3 Методика получение изображений АФМ.....	13
4. Результаты.....	14
4.1 Результаты диагностики СЭМ.....	14
4.2 Результаты диагностики спектров.....	16
4.3 Результаты диагностики АФМ.....	17
5. Выводы.....	18
6. Благодарности.....	18
7. Литература.....	19

## **Введение**

Последнее время активизировались работы, связанные с различными покрытиями на полимеры. Одно из сильных направлений - это создание гибких экранов для компьютеров. Исследуют возможность осаждения различных материалов, применяемых в жидкокристаллических мониторах. Особый интерес представляет углерод, например, - графен. Углеродные покрытия исследуют с целью создания конденсаторов, аккумуляторов, антибактериальных покрытий и других интересных для потребителей устройств. Технология металлических покрытий была отработана ранее для получения отражающих плёнок, радиационных экранов в криогенных технологиях, включая космические. Для создания покрытий специального назначения необходимо исследовать структуру: внутреннюю и внешнюю. Внутренняя – это тип связи в углеродном покрытии, а внешняя – это морфология. Последнее может дать информацию о степени дисперсности, что важно для поглощающих покрытий.

Для исследования морфологии применяют сканирующие электронные микроскопы и атомно-силовые, а для исследования поглощающих свойств – спектрофотометрию. Эти диагностики дают достаточную информацию для создания покрытий с заданными свойствами. Однако нужно знать пределы применимости всех методов. Часто это связано со свойствами покрытий и возможностями приборов.

Исследование пределов применений СЭМ при анализе нано плёнок углерода на полимере необходимо, или можно, разбить её на три части. Первая относится к предельным возможностям современных сканирующих микроскопов при исследовании проводящих образцов на проводящих подложках. Вторая – к предельным возможностям микроскопов при исследовании резистивных образцов на проводящих подложках. Третья – к возможностям исследования резистивных образцов на диэлектрических подложках.

**Цель данной работы:** изучить возможности сканирующей электронной микроскопии и исследовать морфологию поверхности углеродного покрытия,

Поставлены следующие задачи: освоить СЭМ, рассмотреть возможности СЭМ при работе с углеродным покрытием на полимере, получить изображения морфологии поверхности углеродного покрытия. Провести дополнительную дальнейшую диагностику поверхности на основе изображений с атомно-силового микроскопа. С помощью спектрофотометра получить спектральные характеристики, а именно спектры отражения и пропускания покрытия и оценить его оптические свойства. Последние две диагностики – это дополнительные в рамках данной работы. Более подробно они рассмотрены в других курсовых работах. Данная тема решалась в рамках командной работы с целью: лучше разобраться в результатах исследования покрытия. Необходимо понять: что представляет собой углеродное покрытие на полимере? Это сплошная гладкая поверхность или дисперсная, состоящая из отдельных частиц?

## 2. Теоретическая часть

### 2.1 Физические основы работы сканирующей электронной микроскопии.

Для определения морфологии поверхности была поставлена задача получить изображения в различном увеличении со сканирующего электронного микроскопа.

В эксперименте использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Hitachi S-3400N. Типичная схема СЭМ представлена на рис. 1(а) и (б). Система состоит из источника электронов (термоэмиссионный вольфрамовый катод), оптической системы для фокусировки электронов и сканирования (электронно-оптической колонны), камеры с образцом и детекторов для регистрации сигнала, а также включает в себя систему откачки, необходимую для создания вакуума в микроскопе и дьюар с азотом, который обеспечивает охлаждение специальных детекторов, которые могут использоваться, например, для определения элементного состава материалов. [9]

Сама колонна включает в себя электронную пушку, где формируется пучок электронов; набор электромагнитных катушек, которые этот пучок фокусируют; камеру образцов, где и размещаются образцы.

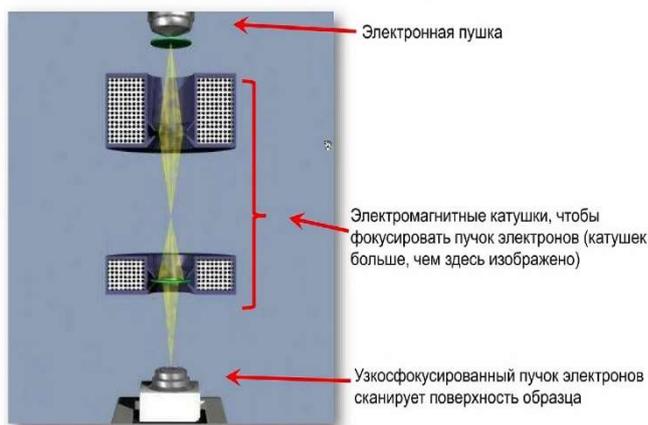
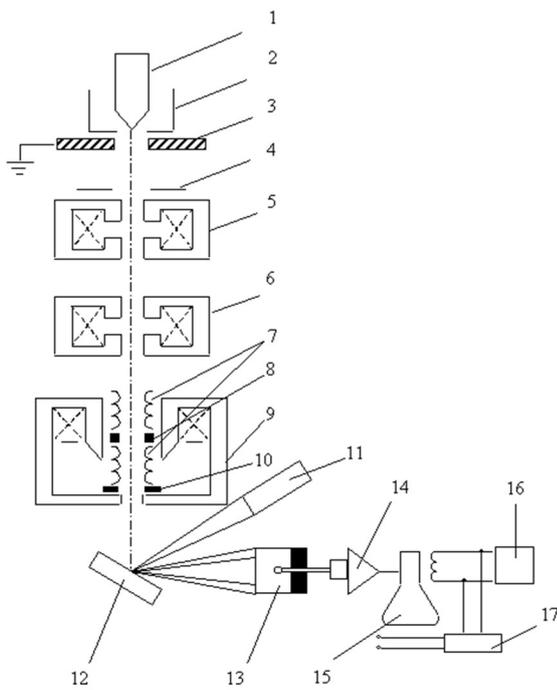


Рис. 1(а) – схема электронно-оптической колонны СЭМ



Испускаемые катодом электроны, проходя через систему электронной оптики, фокусируются и ускоряются в направлении образца. В процессе сканирования сфокусированным пучком поверхности образца происходит эмиссия вторичных электронов, которые регистрируются детектором. Таким образом, на систему сбора данных поступает информация о координатах пучка на образце и величине

сигнала с детектора.

*Рис. 1(б) – схема сканирующего  
Электронного микроскопа*

При построении изображения каждой точке образца приписывается яркость пропорциональная величине сигнала, измеренного в момент, когда пучок находился в этой точке.

На рис.1(б). представлена более подробная типичная схема сканирующего электронного микроскопа. Электронная пушка состоит из катода 1, управляющего электронным током цилиндра Венельта 2 и анода 3. Обычно в качестве катода используется вольфрамовая V-образная проволока, согнутая под углом, как это показано на рисунке. При нагреве катода прямым пропусканием тока происходит термоэмиссия электронов. Электроны ускоряются напряжением, приложенным между катодом и анодом, которое можно изменять от 1 до 50 кВ. Цилиндр Венельта имеет высокий отрицательный потенциал и служит для регулировки потока электронов. Пучок электронов от пушки проходит через три электромагнитные линзы 5, 6, 9. Фокусировка потока электронов осуществляется магнитным полем, имеющим осевую симметрию. Оно создается электромагнитной линзой, которая представляет собой соленоид. Магнитное поле возникает при пропускании электрического тока через обмотку соленоида, концентрируется с помощью так называемого полюсного

наконечника и воздействует на проходящий через него поток электронов. Фокусное расстояние линзы можно плавно регулировать путем изменения силы тока в обмотке соленоида. В системе имеются две диафрагмы 4, 10, ограничивающие расходимость пучка электронов.



а)



б)

Рис. – 2: а) - общий вид сканирующего электронного микроскопа Park-XE15: 1 –электронно-оптическая колонна; 2 – столик для образца; 3 – дьюар с азотом; 4 – детектор; б) – устройство для установки образца. На рис. 2(б) на столике установлен наш образец.

Создание высокого вакуума в пушке, колонне и камере микроскопа является необходимым условием для проведения эксперимента. Мы работали на микроскопе Hitachi S-3400N. [7,8]. Его разрешающая способность составляет 1-2нм. Условия эксперимента: ток электронного сканирующего пучка составлял 45 мкА, ускоряющее напряжение 20 кВ, давление в рабочей камере  $10^{-4}$  Па. Откачка воздуха из рабочей камеры производилась сначала форвакуумным насосом до 40 Па, после – турбомолекулярным до  $10^{-4}$  Па. Характеристики прибора позволяют исследовать поверхность с целью измерения её шероховатости, морфологии углеродного покрытия. Для лучшего понимания предельных возможностей СЭМ сделан анализ лучших микроскопов и фирмы Jeol (Япония). Основные характеристики СЭМ приведены в Приложении №1 курсовой работы.

В результате, при выполнении курсовой работы мы познакомились с современным электронным сканирующим микроскопом и использовали его при исследовании углеродного покрытия на полимерной подложке.

## 2.2 Физические основы работы АФМ

Для более детального исследования поверхности проведено дополнительное исследование на атомно-силовом микроскопе Park-XE15 с разрешающей способностью в плоскости  $XY = 1-2 \text{ nm}$  и по вертикали, по  $Z = 0,1 \text{ nm}$ . Изображения изучались на площадях  $10 \times 6 \text{ nm}$ ,  $1 \times 1 \text{ nm}$  и  $250 \times 250 \text{ nm}$  с целью подробного изучения покрытия. Уровень шума для микроскопа составлял  $< 0,05 \text{ nm}$ . Первичная информация изображений конвертировалась с помощью программы XEI для получения реального изображения.

В случае атомно-силовой микроскопии измеряют силу Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий или электростатическое притяжение / отталкивание, а зонд, называемый кантилевером, представляет собой тонкую иглу, закрепленную вертикально на тонкой упругой балке.

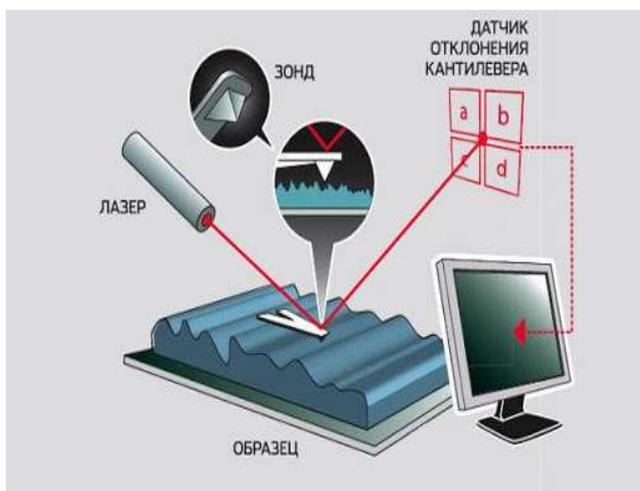
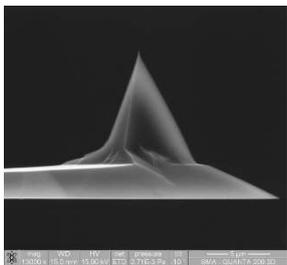


Рис. 4(а) - Общая схема работы АФМ

центр регистрирующего устройства, разбитого на четыре сектора (рис. 4(а)).

В зависимости от изменения силы взаимодействия кантилевер—поверхность, происходит изгиб балки, несущей зонд, и луч лазера отклоняется от центральной позиции в один из секторов детектора. Система обратной связи изменяет положение кантилевера, возвращая его (и лазер тоже) в «нулевое» центральное положение.



Таким образом, регистрируя сдвиг кантилевера, необходимый для возврата лазера в «нулевую» точку, система измеряет топологию поверхности. Кончик иглы кантилевера – несколько нм.

Рис. 4(б) - кантилевер

Схема сканирования поверхности представлена на рис 4(б). Данная схема позволяет лучше понять процесс сканирования поверхности образца (рис. 4 (в)):

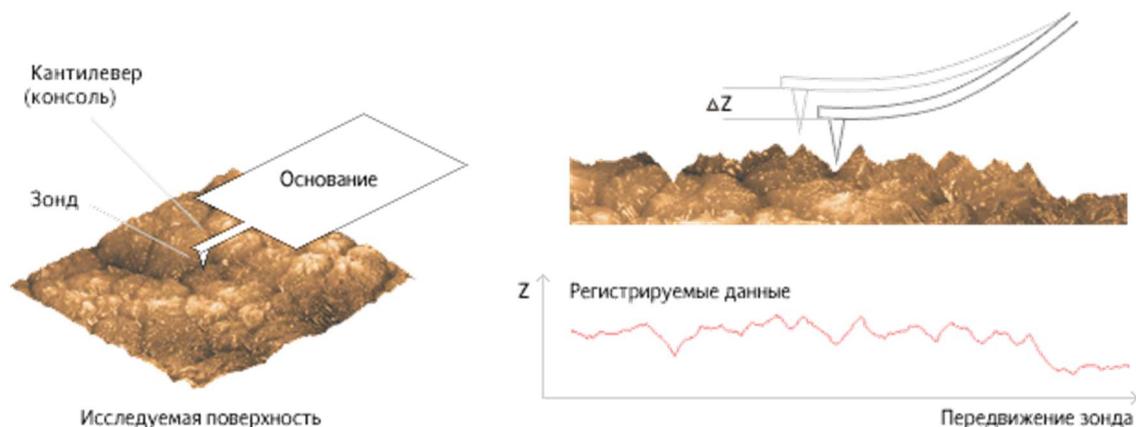
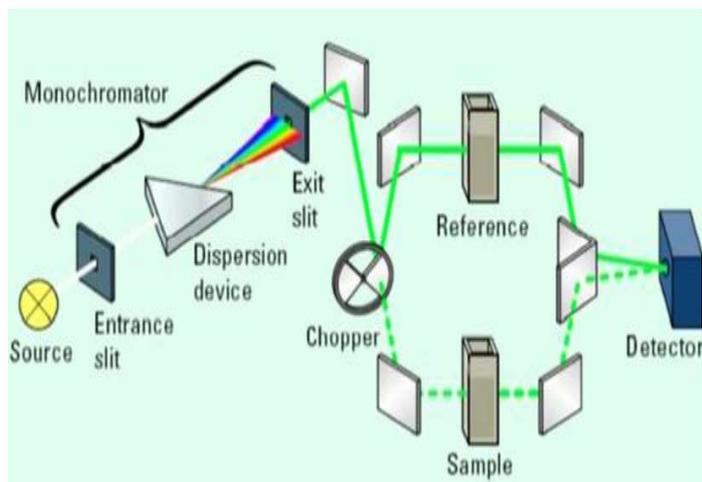


Рис.4(в). Схема сканирования поверхности кантилевером.

### 2.3 Физические основы работы спектрофотометра SHIMADZU UV-3600

Для исследования свойств покрытия нам нужно знать не только морфологию поверхности, но и спектральные характеристики. В данном случае, эта информация является дополнительной и интересной. Это позволит лучше понять структуру покрытия. В работе использовался двухлучевой спектрофотометр SHIMADZU UV-3600. В основу его работы положен принцип измерения отношения двух световых потоков: потока, прошедшего через исследуемый образец, и потока, прошедшего через базовую линию. Для разложения света в спектр применяются дифракционные решетки.



Световой пучок из осветителя попадает в монохроматор через входную щель и разлагается дифракционной решеткой в спектр. Изменение пропускаемой длины волны осуществляется за счёт изменения угла поворота монохроматора.

Рис. 3 – схема двухлучевого спектрофотометра

В монохроматический поток излучения, поступающий из выходной щели в кюветное отделение, поочередно вводятся контрольный и исследуемый образцы. Лучи проходят образец и контроль в противофазе, и разница в интенсивностях регистрируется.

Фотодетектор преобразует свет, полученный через образец, в ток. Далее процессор сигналов преобразует ток и требуемые спектральные характеристики отображаются на цифровом дисплее прибора.

Спектрофотометр SHIMADZU UV-3600 включает в себя три детектора:

- PMT (photomultiplier tube - ФЭУ) - УФ/видимый диапазон
- InGaAS - Ближний ИК-диапазон
- PbS

Таблица №1 – Соотношение детекторов и измеряемых диапазонов волн.

	165 nm	380 nm	780 nm	3300 nm
	UV		Visible	NIR
PMT	185~1000 nm			
InGaAs			700~1800 nm	
PbS				1600~3300 nm

Измерения проводились в диапазоне длин волн 190-3300 nm. Данный спектрофотометр обеспечивает низкий уровень рассеянного света (макс. 0,00005 % при 340 nm) при постоянном оптимальном разрешении 0,1 nm для УФ и видимого диапазона спектра, и 0,4 nm для ближней ИК-области.

### **3. Экспериментальная часть**

#### **3.1 Методика получения изображений СЭМ**

Экспериментальная установка для исследования топографии нано пленки – сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N. Исследование образца проводилось при токе 45 мкА, напряжении 20 кВ, давлении в рабочей камере  $10^{-4}$  Па.

Так как образец исследования находится на диэлектрике (органическое стекло), мы применили специальную методику измерений в условиях низкого вакуума, когда газ в колонне микроскопа частично ионизируется и ионы компенсируют заряд исследуемой поверхности при взаимодействии электронного пучка. Однако, в условиях низкого вакуума изображение не было получено. Достаточной компенсации заряда не произошло. Поэтому мы перешли в режим работы при высоком вакууме: давлении в рабочей камере  $10^{-4}$  Па. Последовательность операций была следующая.

1. Измеряется высота подложки, на которой располагается объект. Образец закрепляется на столике с помощью специального углеродного проводящего скотча. Это важно для автоматической установки фокусного расстояния прибора.

2. Откачка воздуха из рабочей камеры: сначала форвакуумным насосом до 40 Па, после – турбомолекулярным до  $10^{-4}$  Па.

3. Происходит анализ морфологии поверхности, анализ изображения.

4. Напуск воздуха в камеру и извлечение из нее образца.

#### **3.2 Методика получения спектров на спектрофотометре**

Экспериментальная установка для исследования оптических свойств тонких пленок – спектрофотометр SHIMADZU UV-3600. Вывод спектров происходит с помощью программы UVProbe. Измерение коэффициентов пропускания и отражения нано плёнок на подложках проводилось в диапазоне длин волн 150-3300 nm. Материал подложки – полиметилметакрилат (оргстекло) с матовой

поверхностью. Пленки – осажденный магнетронным распылительным способом углерод. Матовую поверхность получена шлифовкой тонким абразивом. Порядок действий:

1. Запуск программы UVProbe. Выбор нужных параметров: какой коэффициент измеряется и в каком диапазоне длин волн.

2. Перед установкой образцов в кюветы записывается базовая линия. Базовая линия нашего эксперимента – матовая подложка.

3. Далее в одну из кювет устанавливается эталон – матовая подложка при измерении поглощения, эталонное зеркало – при измерении отражения; в другую – измеряемый образец.

4. Происходит сравнение двух пучков монохроматического света, один из которых прошел через эталон, а другой через исследуемый образец.

### **3.3 Методика получения изображений АФМ**

Экспериментальная установка для получения изображения топографии поверхности – Park XE15. Изображения анализировались в программе XEI. Методика:

1. Закрепление образца в камеру, для правильного подведения кантилевера необходима абсолютно ровная поверхность подложки.

2. Откачка воздуха из-под подложки, чтобы было совершенное закрепление образца, ручное подведение зонда.

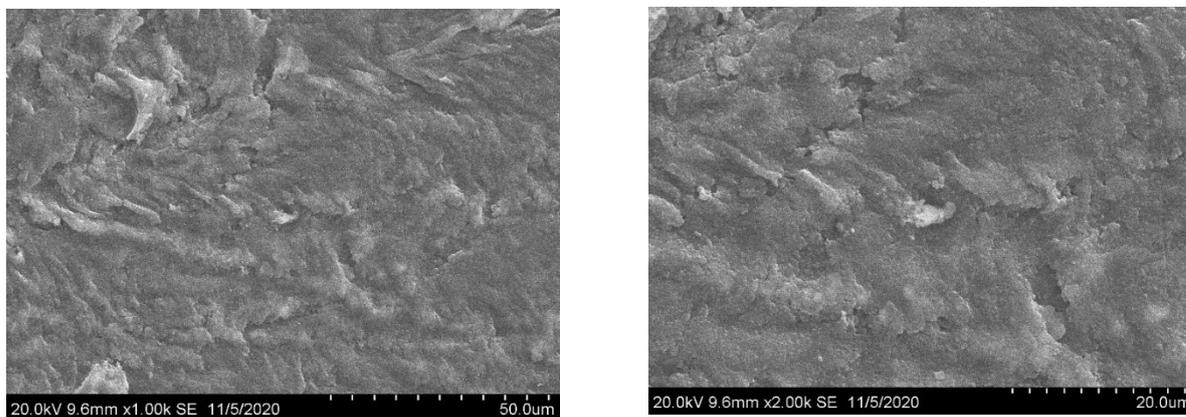
3. Настройка, автоматическое подведение зонда к поверхности проводилось в программе SmartScan for XE.

4. Выбор интересующей площади поверхности образца для исследования с последующим сканированием.

## 4. Результаты

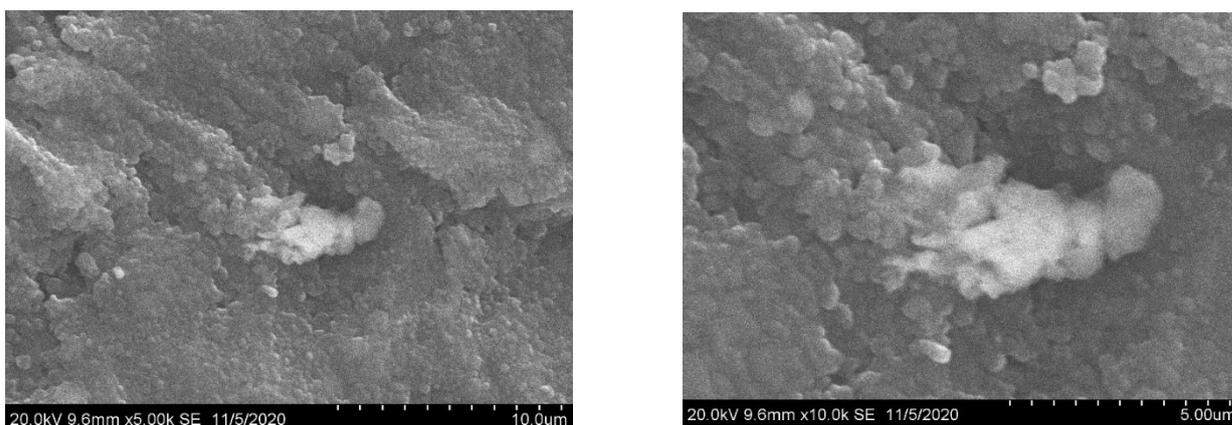
### 4.1 Результаты диагностики углеродного покрытия СЭМ

Ниже представлены фотографии поверхности при различных увеличениях, полученные на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N:



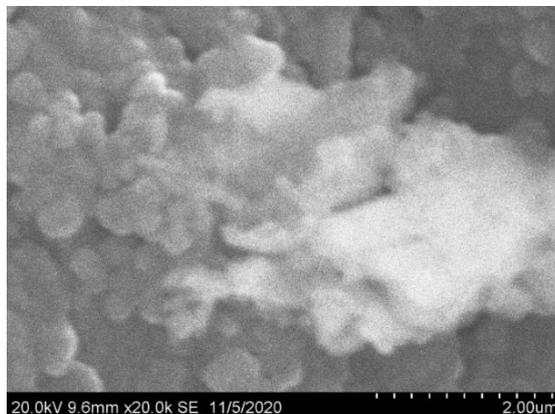
*Рис.5 – изображение углеродного покрытия на полимере, полученное при токе 45 мА, напряжении 20 кV, давлении в рабочей камере  $10^{-4}$  Па: при увеличении 1000 (слева), при увеличении 2000 (справа)*

На первом и втором фото мы не видим четкой структуры образца, видим лишь потоки, вероятнее всего, это пласти застывшего углерода, напыляемого при высокой температуре. Нас интересует дисперсная ли поверхность, или же она гладкая, для этого рассмотрим фото при больших увеличениях.



*Рис.6 – изображение углеродного покрытия на полимере, полученное при токе 45 мА, напряжении 20 кV, давлении в рабочей камере  $10^{-4}$  Па: при увеличении 5000 (слева), при увеличении 10000 (справа)*

Здесь уже наиболее отчетливо видна структура образца, в особенности на фото справа. Можно сказать, что образец состоит из мелких шаровидных частиц размером порядка  $\sim 0,5 - 1 \text{ nm}$ . Также отчетливо видна зарядка поверхности, что ухудшает результаты.



*Рис. 7 – изображение углеродного покрытия на полимере, полученное при токе 45 мА, напряжении 20 кV, давлении в рабочей камере  $10^{-4}$  Па: при увеличении 20000.*

На рис. 7 резкость ухудшается, а “засвет” увеличивается. Это максимальное увеличение для данного образца. Итого, мы видим, что поверхность дисперсная, не игольчатая, вероятно, при напылении пленки температура была высокой, что повлияло на видимые “пласты” (рис. 5).

При увеличении в 20 000 раз изображение становится размытым, что нетрудно заметить на рис. 8. Засвеченная область на рисунке говорит о том, что в этих зонах образовалось наибольшее скопление электронов, что в конечном итоге привело к “засвету” изображения на этом участке. Если образец имеет достаточную проводимость, то проблема накопления заряда решается путем заземления образца проводящим углеродным скотчем. В нашем же случае, пленка напылена по оргстекло с низкой теплопроводностью, и сам углерод также является диэлектриком, следовательно, даже заземление образца не обеспечивает достаточное стекание заряда.

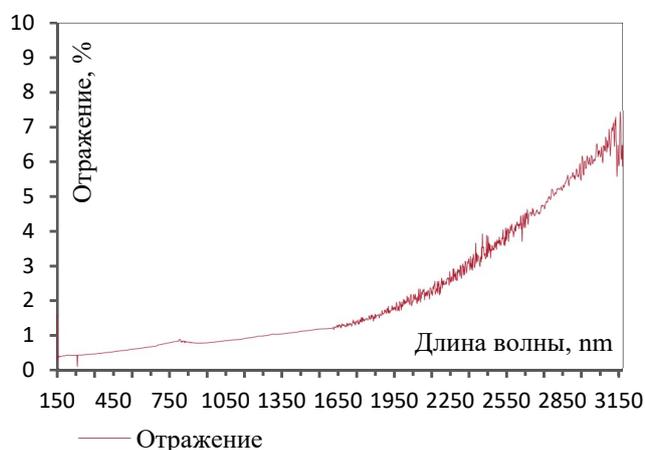
Максимально увеличенное изображение, которое мы смогли увидеть на данном микроскопе имеет размеры  $6 \times 4 \text{ nm}$  (рис. 7). Это во много раз превышает увеличение изображения полученного с АСМ (рис. 10), там размер изображения

равен 1000x1000 nm. Главная проблема, возникшая с СЭМ – это зарядка образца, что сильно искажает изображение.

## 4.2 Результаты диагностики спектров

Были получены спектры пропускания и отражения на спектрофотометре SHIMADZU UV-3600 в диапазоне волн от 150-3200 nm.

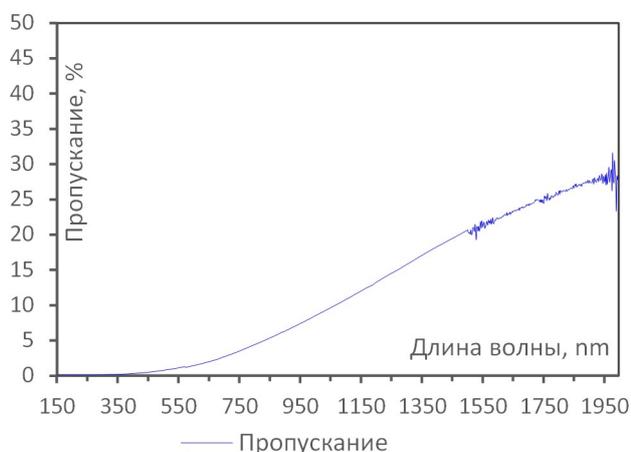
Первичные необработанные результаты имели “скачки” в областях смены решеток монохроматоров. Поэтому необходимо было избавиться от подобных флуктуаций на графиках: то есть вырезать данный скачок из графика путем совмещения крайних гладких кривых. Это ухудшает скорость обработки данных. Ниже представлены обработанные результаты:



Уровень чувствительности в ближней инфракрасной области значительно повышается за счет использования комбинации детектора InGaAs и охлаждаемый детектора PbS, так как допустимые диапазоны волн совпадают [1600 –

1800 nm].

Рис. 8 – спектр отражения углеродной пленки толщиной 500 nm.



Приборная погрешность спектрофотометра составляет не более 0,1% (от стопроцентного пропускания) в ИК-диапазоне и 0,001% в видимой области спектра. При измерениях основная погрешность обусловлена неоднородностью толщины.

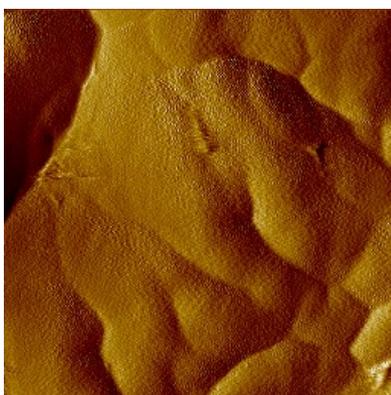
Рис. 9 – спектр пропускания углеродной пленки толщиной 500 nm.

Максимум прозрачности пленки приходится на область ИК-излучения и равен  $\sim 30\%$ .

Стоит обратить внимание на наличие шумов на спектральных зависимостях начиная с 1500 нм. В этом диапазоне значительный вклад в значение спектров вносят ошибки спектрофотометра, так как здесь большие длины волн и граница рабочего диапазона прибора. Коэффициент пропускания в УФ спектра имеет значение в диапазоне  $\sim 0,1 - 0,2\%$ , в видимом спектре  $\sim 0,2 - 4\%$ , в ИК спектре  $\sim 4 - 30\%$

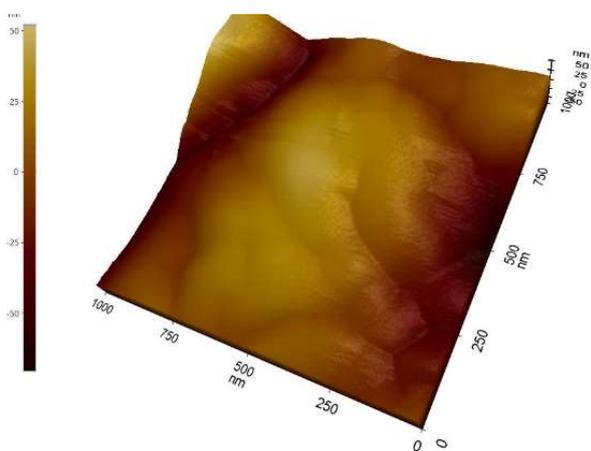
### 4.3 Результаты диагностики углеродного покрытия АФМ

Проведенный анализ углеродного покрытия дал следующие результаты:



*Рис. 10 – изображение участка поверхности АФМ (вид сверху), изображение соответствует размеру 1  $\mu\text{m}$ .*

На фото мы видим холмистую структуру образца, без острых кромок, но и не гладкую. Блоки (холмы) имеют разные размеры, но большая часть из составляет  $\sim 250 \times 250$  нм. Максимальная высота данного участка составляет  $\sim 54$  нм. Сопоставляя рис.10 и рис.11, можно увидеть, что эти два участка имеют одинаковую площадь равную  $1000 \times 1000$  нм или  $1 \times 1$   $\mu\text{m}$ .



*Рис. 11 – трехмерное изображение участка поверхности пленки размером  $1 \times 1$   $\mu\text{m}$ , характеризующее толщину пленки*

С целью предотвращения скопления индуцированных зарядов на поверхности диэлектрического образца, был приклеен проводящий скотч к поверхности углеродной пленки, чтобы обеспечить стекание заряда.

## **5. Выводы**

Рассмотрены физические основы работы сканирующего электронного микроскопа. Исследована поверхность углеродного покрытия на полимере. Получены изображения топографии поверхности со сканирующего электронного микроскопа. Максимально увеличенное изображение, которое смогли увидеть на данном микроскопе имеет размеры  $6 \times 4$  nm. Установлено, что углеродное покрытие является дисперсным. Наблюдалось скопление заряда на образце в сканирующем электронном микроскопе. С целью изучения оптических свойств покрытия получены спектральные характеристики: пропускание и отражение. Максимум пропускания находится в диапазоне ИК излучения и равен  $\sim 30$  %.

Проведена диагностика поверхности на атомно-силовом микроскопе.

## **6. Благодарности**

Выражаю искреннюю благодарность А.С. Золкину за организацию всех экспериментов, предложенную тему, методику, помощь в оформлении курсовой работы и обсуждение результатов. Также благодарю С.Ю. Чепкасова (ФФ НГУ) за помощь в получении спектров поглощения и отражения углеродных пленок, Е.А. Максимовского (ИНХ РАН) – в получении данных топографии поверхности с СЭМ, А.Е. Маточкина, Р.И. Куц, С.Л. Микерена (ИАЭ РАН) – в получении данных топографии поверхности с АСМ.

Работа выполнена в лаборатории Экспериментальной физики Кафедры общей физики Физического факультета НГУ. Диагностика выполнена в институте горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН и в Центре коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» Института автоматизации и электрометрии СО РАН.

## 7. Литература

1. Научный технический центр тонкопленочных технологий // Портал Сколково. URL: <http://sk.ru/>;
2. Сильницкая О. А. Исследование и разработка многофункциональных наноконструированных барьерных слоев на основе фторуглеродных пленок // Москва. – 2017.
3. Золкин А.С. Плазменные нанотехнологии и молекулярная физика. Факультативный спецкурс. Часть 4. НГУ, 2011; Часть 2. НГУ, 2010;
4. Что такое СЭМ? // Портал TESCAN. URL: <https://tescan.ru/primenenie/akademiya-teskan/korotko-o-sem/>;
5. А.А. Суслов, А.С. Чижик. Методы испытаний и оборудование. Сканирующие зондовые микроскопы (обзор) // Материалы, Технологии, Инструменты – Т.2 (1997), №3;
6. Park System, XE15. URL: <https://parksystems.com/products/large-sample-afm/park-xe15/overview> .
7. Видео о микроскопе Hitachi S-3400N. SEM Instructional Video featuring Dr. Paul Wallace. Адрес в Интернет: [https://www.youtube.com/watch?v=Y1Eyz5N1Q\\_Y](https://www.youtube.com/watch?v=Y1Eyz5N1Q_Y)
8. Лекция об СЭМ. Scanning Electron Microscopy (SEM) Lecture with Animations and Real Measurement. Адрес в Интернет: [https://www.youtube.com/watch?v=Mr9-1Sz\\_CK0&t=126s](https://www.youtube.com/watch?v=Mr9-1Sz_CK0&t=126s)

