

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
Кафедра вакуумной электроники

## АТОМНО СИЛОВОЙ МИКРОСКОП

Лабораторная работа по курсу  
вакуумная электроника

Выполнил: студент 654гр.  
Нехаев А.С.

г. Долгопрудный  
2018 год

# **Содержание**

<b>1. Цель работы</b>	<b>2</b>
<b>2. Практическая часть</b>	<b>3</b>
2.1. Измерение резонансной частоты собственных колебаний кантилевера . . . . .	3
2.2. Разрешающая способность микроскопа в контактном режиме . . . . .	4
2.3. Бесконтактный режим работы прибора . . . . .	5
<b>3. Вывод</b>	<b>7</b>

## **1. Цель работы**

Ознакомиться на практике с физическими принципами функционирования атомно-силового микроскопа и основными методиками измерения.

Изучить работу сканирующего зондового микроскопа NanoEducator, проведя измерения в бесконтактном атомно-силовом режиме.

## 2. Практическая часть

### 2.1. Измерение резонансной частоты собственных колебаний кантилевера

В атомно силовом микроскопе используются зонды кантилеверного типа. Кантилевер представляет собой балку, один конец которой закреплен на твердой подложке, которая вставляется в держатель зонда, расположенного под сканером. Второй конец кантилевера свободен и на нем находится острия игла.

Важными характеристиками кантилевера являются коэффициент жесткости и резонансная частота материала. Первый должен быть минимально низкий, чтобы кантилевер мог изгибаться под действием сверхмальных сил, вторая же при этом должна быть максимально высокой, чтобы в игле не возбуждались собственные колебания возвратно-поступательных движений.

Проведем измерения АЧХ зонда для определения резонансной частоты материала кантилевера.

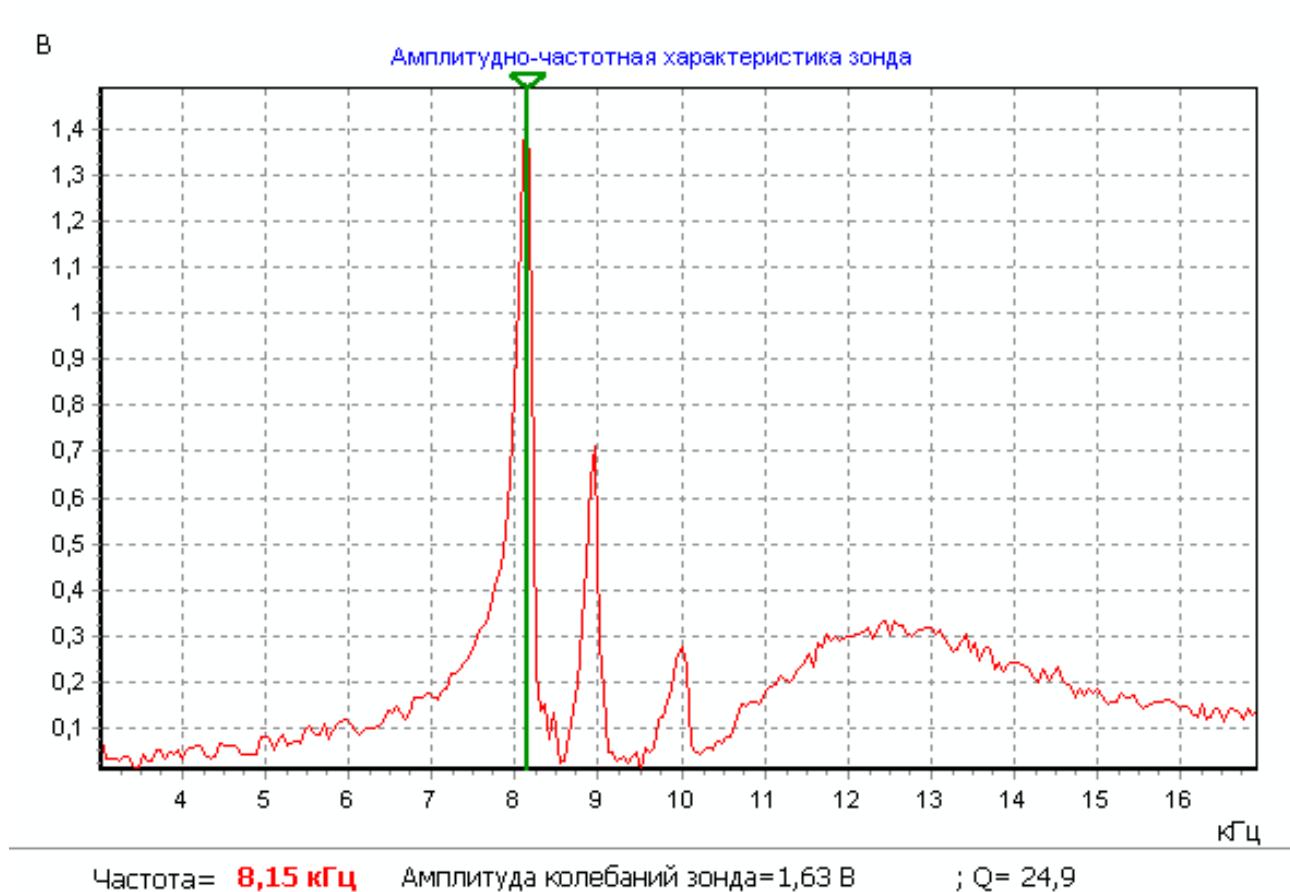


Рис. 1: Амплитудно-частотная характеристика зонда

Данные показатели для различных кантилеверов определяются геометрическими размерами и материалом изготовления и лежат в интервале от 0.01 до 100 Н/м для коэффициента упругости и 15-500 кГц для резонансной частоты собственных колебаний.

Как видно из графика АЧХ зонда, резонансная частота собственных колебаний кантилевера равна 8.15 кГц, что в полтора раза меньше нижней границы, заявленной в теоретических данных.

## 2.2. Разрешающая способность микроскопа в контактном режиме

Критерием разрешающей способности по нормали  $\Delta Z$  может служить минимальное изменение координаты  $Z$  при сканировании, детектируемое на уровне шумов.

Пусть зондирующее острие характеризуется радиусом кривизны  $R$ , разрешаемые особенности поверхности  $r$ , тогда возможность *латерального* разрешения поверхностных особенностей  $d$  будет связана с пределом разрешения по нормали  $\Delta Z$ . Критерием разрешения является условие возможности детектирования разницы в значениях вертикальной координаты иглы над объектами и между ними.

Соотношение минимального расстояния между разрешаемыми поверхностными особенностями, при котором «провал» между ними на АСМ-изображении ещё может быть детектирован (равен пределу  $\Delta Z$ ):

$$d \approx \sqrt{8(R + r)\Delta Z}$$

Поскольку достижимое пространственное разрешение должно являться инвариантом, то его следует определить, рассматривая условия детектирования двух точечных объектов ( $r = 0$ ), тогда:

$$d = \sqrt{8R\Delta Z}$$

Таким образом, связав разрешения латеральное  $d$  и по нормали  $\Delta Z$ , можно найти радиус кривизны зондирующего острия  $R$ .

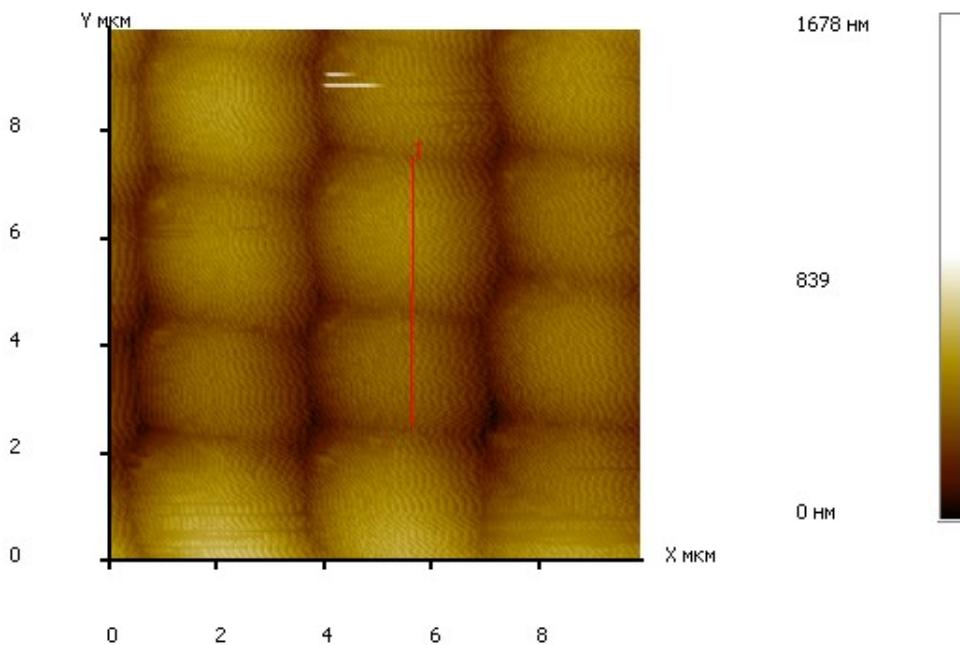


Рис. 2: Топография решетки

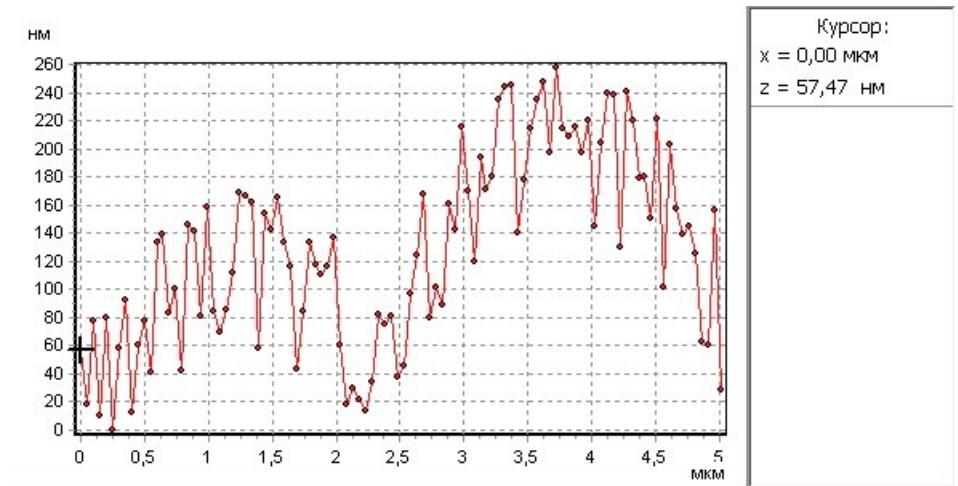


Рис. 3: Вертикальное сечение выступа, изображенного на рис. 2

Полученное вертикальное сечение позволяет оценить радиус кривизны острия зонда:

$$R = \frac{d^2}{8\Delta Z} = 2.8 \text{ мкм}$$

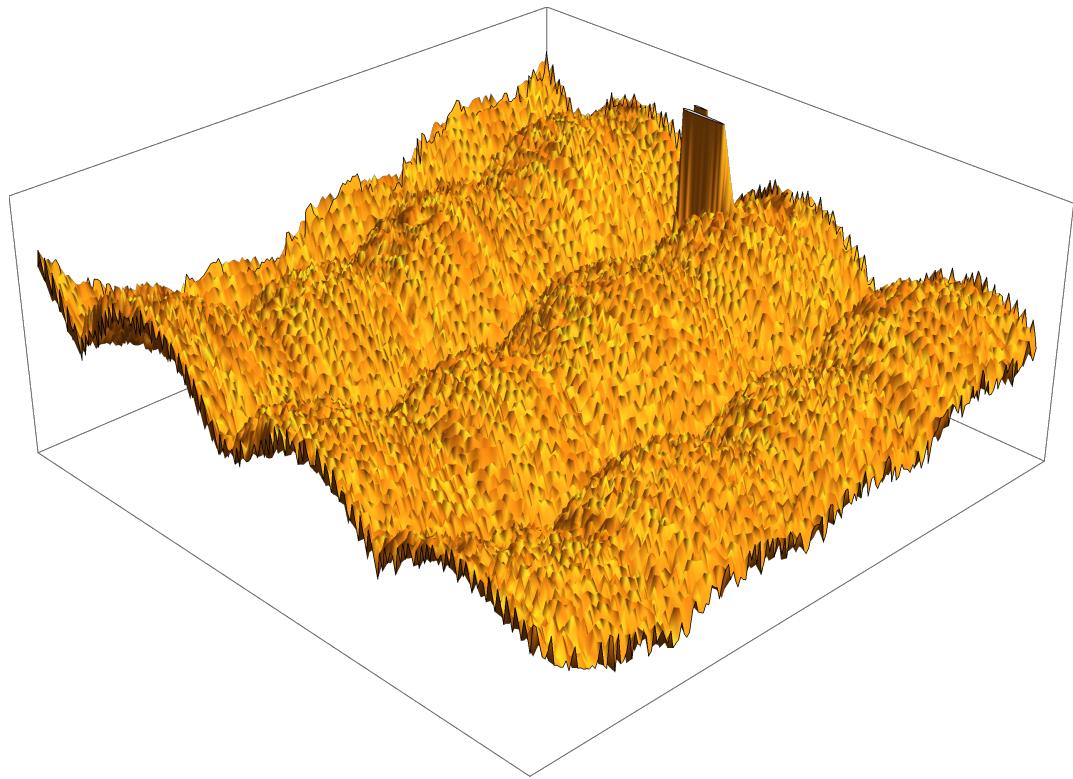


Рис. 4: Трехмерное изображение рельефа

### 2.3. Бесконтактный режим работы прибора

В микроскопе NanoEducator в качестве основного режима сканирования используется бесконтактный режим. В этом режиме работы зонд находится достаточно близко от поверхности образца в области действия сил притяжения.

Силы притяжения и их градиенты обычно слабее отталкивающих контактных сил, поэтому для их детектирования обычно используется модуляционная методика. Для этого *пьезовибратор*, на котором укреплен кантileвер с зондом прикладывается переменное напряжение, которое вызывает изменение его геометрических размеров.

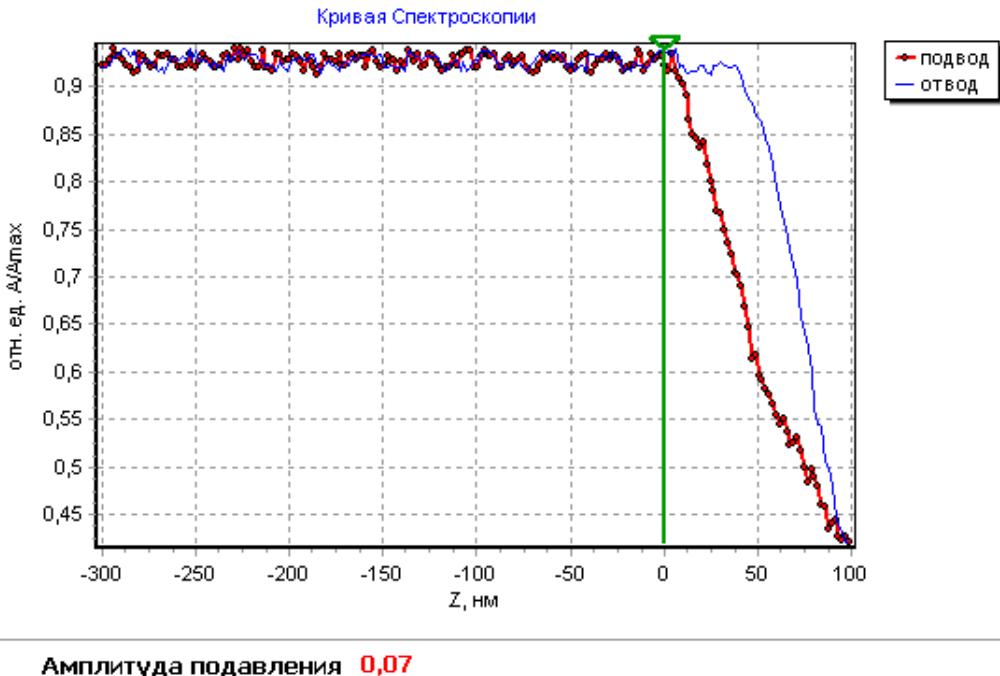


Рис. 5: Кривая спектроскопии

**Спектроскопия.** Пьезодрайвер программируется таким образом, чтобы компенсировать отталкивающие контактные силы для выражения более слабых гравитационных сил и их детектирования. Для этого производится калибровка корректирующего сигнала пьезодрайвера  $\omega$  по расстоянию зонд-образец  $z$ .

Уравнение, описывающее движение зонда при малой амплитуде колебаний:

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dz}{dt} + \omega_0^2(z - z_0) = \Delta z \omega_0^2 \cos(\omega t)$$

Сдвиг фаз  $\varphi$  колебаний свободного конца кантileвера относительно закрепленного определяется выражением:

$$\tan \varphi = \frac{1}{Q} \frac{\omega \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Приближение зонда к поверхности образца приводит к возникновению заметного градиента силы взаимодействия между ними., что приводит к смещению АЧХ и ФЧХ колебаний кантileвера влево по сравнению с измеренными вдали от поверхности.

Резонансная частота изменяется при изменении градиента силы  $\delta F/\delta z$  (при приближении зонда к поверхности) по сравнению со свободно резонирующим кантileвером (вдали от поверхности) в соответствие с выражением:

$$\bar{\omega} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{k} \frac{\delta F}{\delta z}}$$

Так как частота вынуждающих колебаний кантileвера поддерживается постоянной и равной  $\omega_0$  в свободном состоянии, то при приближении зонда к поверхности образца

амплитуда регулируется с помощью оптической системы и может быть определена по относительному изменению переменной освещенности верхней и нижней половинок фотодетектора. Далее с помощью синхронного детектора выделяется постоянный сигнал, согласованный с синхросигналом от генератора напряжений.

Компаратор сохраняет текущий сигнал в цепи сенсора с изначально заданным напряжением  $V_s$  (характеризует уровень силы, на котором зонд удерживается от поверхности образца) и при его отклонении вырабатывает корректирующий сигнал  $V_{fb}$ . Взаимодействие зонда и образца поддерживается постоянным за счет приближения и отвода системы обратной связи, управляющей  $Z$ -пьезоприводом таким образом, чтобы сила взаимодействия между зондом и образцом была постоянной. Сигнал о высоте  $z$  берется в каждой точке плоскости изображения ( $x, y$ ) из канала  $Z$ -пьезопривода.

В результате спектроскопии было обнаружено, что для поддерживания взаимодействия зонда с образцом на расстоянии  $z = 0$  постоянным требуется корректирующий сигнал, равный  $V_{fb} = 0.07V_s$ .

### 3. Вывод

В ходе работы мы ознакомились на практике с физическими принципами функционирования атомно-силового микроскопа и основными методиками измерения.

Изучили работу сканирующего зондового микроскопа NanoEducator.

Оценили радиус кривизны острия зонда по разрешающей способности АСМ в контактном режиме для решётки (2.8 мкм).

Определили при помощи спектроскопии величину корректирующего сигнала для поддерживания взаимодействия зонда с образцом на расстоянии  $z = 0$  постоянным ( $V_{fb} = 0.07V_s$ ).