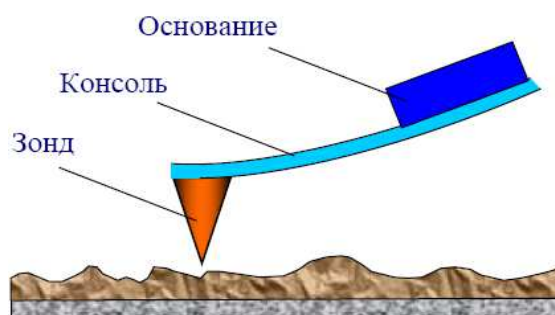


УДК 620.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ  
МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ****И. В. ЗЮЗЕНКО, И. С. РУДАК***(Представлено: канд. техн. наук А. В. СПИРИДОНОВ, канд. техн. наук Е. В. САФРОНОВА)*

В данной статье рассматриваются основы сканирующей зондовой микроскопии для исследования поверхностей образцов различных твердых физических тел. В настоящее время в Республике Беларусь и мировой практике уделено повышенное внимание развитию нано-технологий. Проводить данные исследования возможны на атомно-силовых микроскопах. Показан принцип работы атомно-силового микроскопа NT-207, используемого в научно-исследовательских работах кафедрой Технологии и оборудования переработки нефти и газа. Выполнены работы по исследованию топографии поверхностей твердых тел и представлены результаты в виде фотографий.

Для детального исследования структурных особенностей материалов и определения размеров структурных элементов существует много разнообразных методов. В настоящее время одним из наиболее мощных современных методов исследования особенностей структуры, топографии, а также локальных физико-механических свойств поверхности материалов является метод сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) [1-2]. Для получения увеличенных изображений поверхности в сканирующем зондовом микроскопе используется механический зонд (рис 1).

**Рисунок 1. – Схематическое изображение зондового датчика АСМ**

Датчики изготавливаются методами фотолитографии и травления из кремниевых пластин. Упругие консоли формируются, в основном, из тонких слоев легированного кремния или нитрида кремния. На конце кантилевера формируется пирамидальный зонд. Радиус закругления современных АСМ зондов составляет 1-50 нм в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления.

Принцип действия силового датчика основан на использовании сил атомных связей, действующих между атомами вещества. Совершенно аналогичные силы действуют и между любыми сближающимися телами.

В атомно-силовом микроскопе такими телами служат исследуемая поверхность и скользящее над нею остриё. При изменении силы, действующей между поверхностью и остриём, кантилевер, на котором оно закреплено, отклоняется от положения равновесия, и такое отклонение регистрируется датчиком положения кантилевера. Таким образом, атомно-силовой сенсор представляет собой механический зонд, аналогичный обычному зонду механического профилометра. Однако его чувствительность настолько высока, что позволяет регистрировать силы взаимодействия между отдельными атомами. Отличительной особенностью атомно-силового микроскопа по сравнению с профилометром является наличие системы обратной связи, позволяющей управлять силой взаимодействия между зондом и образцом.

Соотношение между силой  $F$ , воздействующей на зонд, и отклонением кантилевера  $x$  определяется законом Гука:

$$F = -kx$$

Возможно изготовление кантилевера с упругой константой  $k$  порядка 1 Н/м. Под действием силы взаимодействия между двумя атомами порядка 0,1 нН величина отклонения таких кантилеверов составляет порядка 0,1 нм.

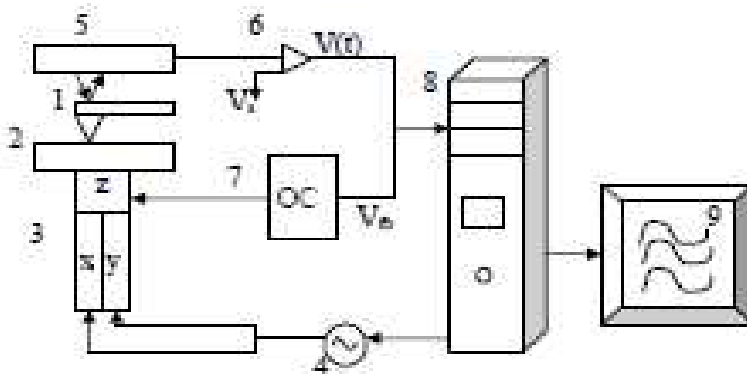
При работе АСМ используются кантилеверы с относительно малыми коэффициентами жесткости (0,01-0,2 Н/м), что позволяет обеспечить высокую чувствительность и избежать нежелательного чрезмерного воздействия зонда на образец.

При приближении зонда к образцу он сначала притягивается к поверхности, благодаря наличию сил Ван-дер-Ваальса. Эти силы обычно доминируют на достаточно больших расстояниях, когда перекрытие волновых функций атомов взаимодействующих тел несущественно. По сравнению с характерными энергиями химической связи энергия вандер-ваальсова взаимодействия мала.

При дальнейшем приближении зонда к образцу электронные оболочки атомов на конце иглы и атомов на поверхности образца начинают перекрываться, что приводит к появлению отталкивающей силы. При дальнейшем уменьшении расстояния отталкивающая сила становится доминирующей. Реальное взаимодействие зонда с образцом имеет более сложный характер, однако основные черты данного взаимодействия сохраняются — зонд АСМ испытывает притяжение со стороны образца на больших расстояниях и отталкивание на малых.

При перемещении зонда вдоль поверхности образца происходит изменение параметра взаимодействия, обусловленное рельефом поверхности. Система обратной связи обрабатывает эти изменения, так что при перемещении зонда в плоскости  $XU$  сигнал на исполнительном элементе оказывается пропорциональным рельефу поверхности. При сканировании зонд вначале движется над образцом вдоль определенной линии (строчная развертка), при этом величина сигнала на исполнительном элементе, пропорциональная рельефу поверхности, записывается в память компьютера. Записанный таким образом при сканировании сигнал обратной связи обрабатывается компьютером, и затем СЗМ-изображение рельефа поверхности  $Z = f(x, y)$  строится с помощью средств компьютерной графики.

Информация, полученная с помощью СЗМ, хранится в виде двумерного массива целых чисел  $a_{ij}$  (матрицы). Физический смысл данных чисел определяется той величиной, которая оцифровывалась в процессе сканирования. Каждому значению пары индексов  $ij$  соответствует определенная точка поверхности в пределах поля сканирования. Как правило, такие массивы чисел представляют собой квадратные матрицы, имеющие размер  $256 \times 256$  или  $512 \times 512$  элементов. Визуализация СЗМ данных производится средствами компьютерной графики, в основном, в виде трехмерных и двумерных яркостных (или цветowych) изображений. В последнем случае яркость или цвет однозначно связаны с представляемой величиной в данной точке поверхности.



1 – зонд, 2 – образец, 3 – пьезоэлектрические двигатели, 4 – генератор напряжения развертки пьезокерамики, 5 – электронный сенсор, 6 – компаратор, 7 – электрическая цепь обратной связи, 8 – компьютер, изображение поверхности образца  $z(x, y)$

Рисунок 2. – Общая схема сканирующего зондового микроскопа

Основными составными частями атомно-силового микроскопа (рис. 2) являются:

- зонд;
- пьезоэлектрические двигатели для прецизионного перемещения зонда над поверхностью исследуемого образца;
- электронный сенсор, детектирующий величину локального взаимодействия между зондом и образцом;
- компаратор, сравнивающий текущий сигнал в цепи сенсора  $V(t)$  с изначально заданным  $VS$ , и, при его отклонении, вырабатывающий корректирующий сигнал  $Vfb$ ;
- электронная цепь обратной связи, управляющая положением зонда по оси  $z$ ;
- компьютер, управляющий процессом сканирования и получением изображения.

Для контролируемого перемещения иглы на сверхмалых расстояниях используются пьезокерамические двигатели (рис. 3).

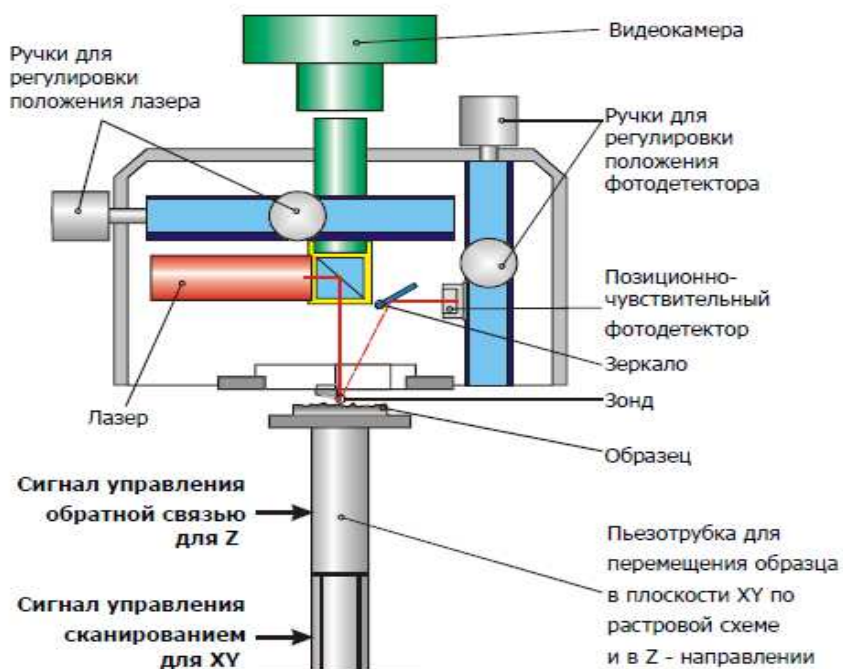


Рисунок 3. – Схема работы блока сканирования АСМ

Используемые в них пьезокерамические материалы изменяют свои размеры под действием приложенного к ним электрического напряжения (пьезоэлектрический эффект).

В приборе применена измерительная схема с неподвижным зондом над подвижным образцом. В ходе измерений прецизионные перемещения образца обеспечиваются трубчатым пьезосканером, на котором образец и устанавливается. В измерительной системе использована лазерно-лучевая схема детектирования отклонения кантилевера. В качестве зондов применяются промышленно изготавливаемые чипы размерами 3,4\*1,6 мм (например, производства Mikromasch). При этом для обеспечения удобства установки и смены зондов разработан сменный держатель.

Существует много типов и форм, в которых выпускаются пьезокерамические двигатели. Каждый имеет свой уникальный пьезоэлектрический коэффициент от 0,1 до 300 нм/В. Так, керамика с коэффициентом расширения 0,1 нм/В позволяет получить перемещение 0,01 нм при приложении напряжения 100 мВ. Таким образом осуществляется прецизионное позиционирование иглы. В этом режиме работы взаимодействие зонда и образца осуществляется в области действия сил отталкивания. Сила  $F$ , действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу кантилевера.

Величина изгиба регистрируется, как правило, с помощью оптической системы, состоящей из полупроводникового лазера и четырехсекционного фотодиода (рис. 4).

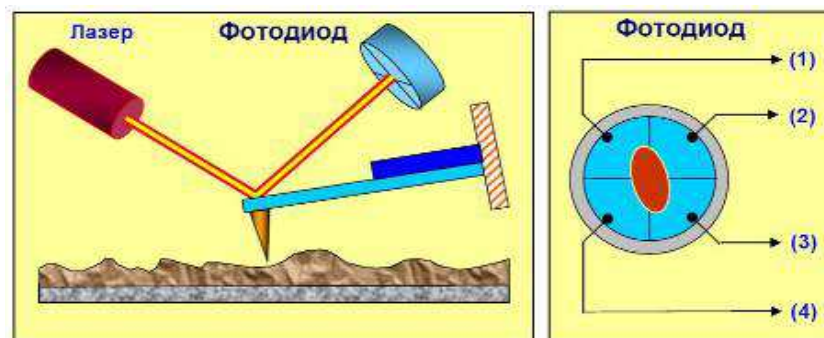


Рисунок 4. – Схема оптической регистрации изгиба консоли зондового датчика АСМ

Оптическая система АСМ юстируется таким образом, чтобы излучение лазера фокусировалось на конце кантилевера, а отраженный луч попадал в центр фотодетектора. При изгибе кантилевера под действием контактных сил отраженный от него луч лазера смещается относительно центра фотодетектора.

Таким образом, отклонение кантилевера может быть определено по относительному изменению освещенности верхней и нижней половинок фотодетектора. На таком оптическом датчике взаимодействия сейчас основано действие большинства современных зондовых микроскопов.

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) NT-206 (рис. 5) [3-7] в комплексе с управляющим программным обеспечением SurfaceScan и средствами обработки АСМ-изображений SurfaceView предназначен для измерения и анализа микро- и субмикрорельефа поверхностей, объектов микро- и нанометрового размерного диапазона с высоким разрешением.



Рисунок 5. – Внешний вид АСМ NT-206

Перед измерениями зонд может быть перемещен в необходимую область над образцом при помощи автоматизированной платформы (в диапазоне 10 мм в плоскости XY). Для обеспечения обзора области сканирования и объектов, над которыми находится зонд, в приборе применена видеочкама, позволяющая в реальном масштабе времени наблюдать за перемещениями зонда над поверхностью.

Видеосистема и платформа автоматизированного перемещения зонда над образцом включены в базовую комплектацию прибора (встроены по умолчанию). Сочетание этих двух опций позволяет достаточно гибко выбирать на поверхности области (объекты) для сканирования при непосредственном визуальном контроле оператора. Механическая система прибора изначально создавалась с учетом наличия этих опций, что потребовало разработки таких компонентов, как интегрированная оптическая система, специализированный механизм позиционирования лазера, моторизованная платформа.

Данные функции разрабатываются и проходят испытание совместно с лабораторией нанопроцессов и технологий ИТМО НАНБ (Институт теплообмена Национальной академии наук Беларуси). Измеренные данные можно дополнительно проанализировать в программе SurfaceView.

На рис. 6-9 изображены образцы различных твердых материалов, которые были сканированы в лаборатории 304 учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой» на АСМ NT-206 и обработаны программой SurfaceView.

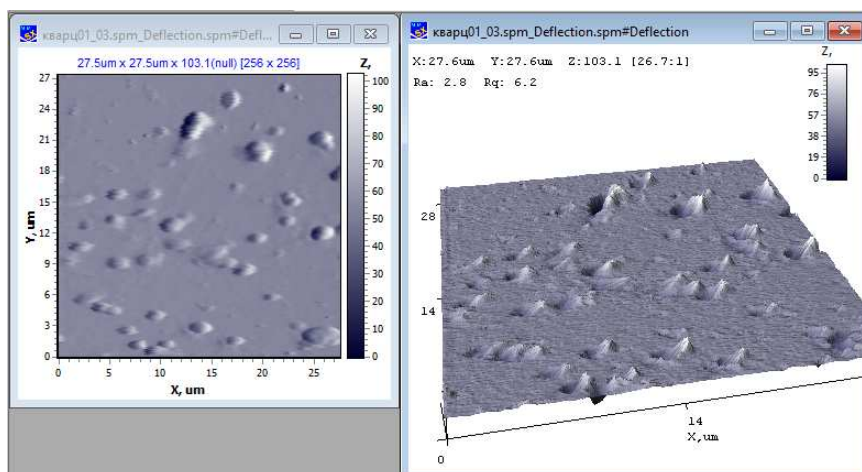


Рисунок 6. – Кварц

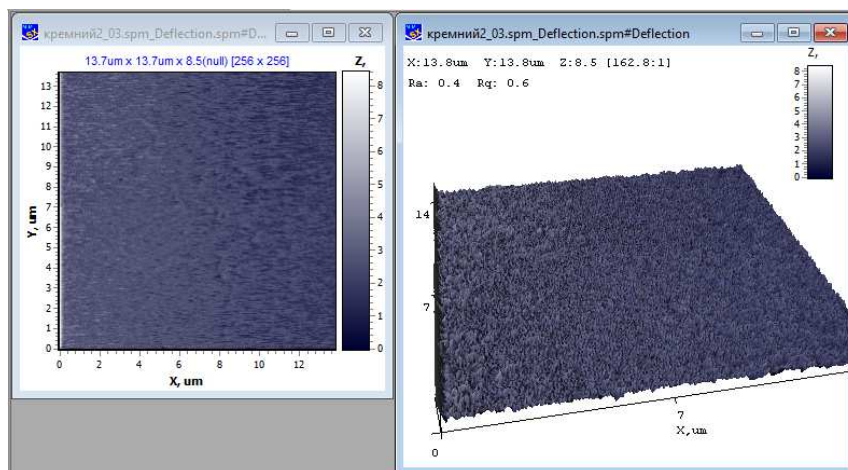


Рисунок 7. – Кремний

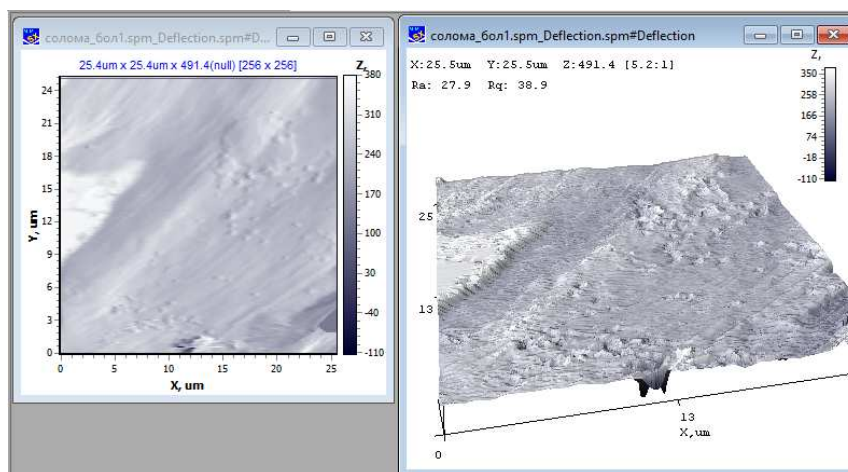


Рисунок 8. – Солома

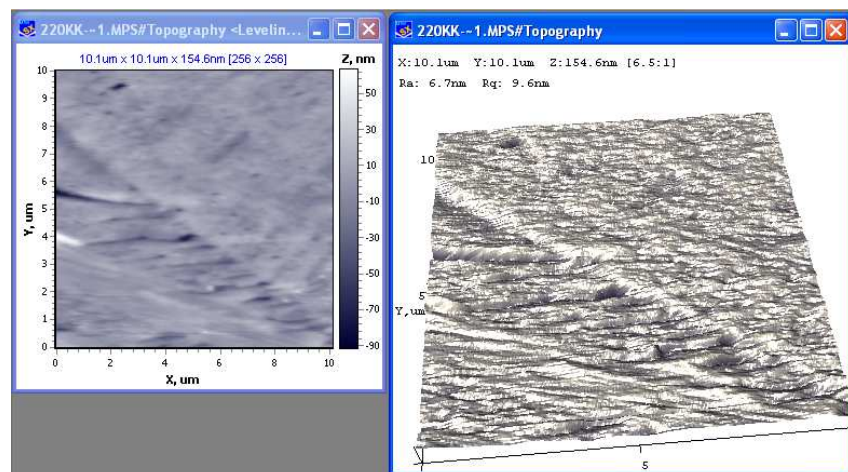


Рисунок 9. – Кокс

Как видно из фотографий с помощью АСМ можно получить двумерное и трехмерное изображения поверхностей на уровне нескольких нанометров.

**В заключение** следует отметить области применения АСМ – физика твердого тела, тонкопленочные технологии, нанотехнологии, микро- и нанотрибология, микроэлектроника, оптика, испытательные системы прецизионной механики, магнитной записи, вакуумной техники и др. АСМ NT-206 предназна-

чен для использования в научных и промышленных лабораториях, преимущественно специализирован для характеристики физико-механических свойств материалов на микро- и наноуровне.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Бинниг, Х.Рорер. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности. Нобелевские лекции по физике – 1986. УФН, т. 154 (1988), вып.2, с. 261.
2. А.А. Бухараев, Д.Б. Овчинников, А.А. Бухараева. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор). Заводская Лаборатория. Исследование структуры и свойств, Физические методы исследования и контроля. 1996, №1, с.10-27.
3. А. А. Суслов, В. В. Чикунов, Д. И. Шашолко, С. А. Чижик. АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОП NT-206: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ. 6-й Белорусский семинар по сканирующей зондовой микроскопии: БелСЗМ-6: Сб. докл., Минск, [12-15 окт.] 2004 г. / Редкол.: А.И.Свириденко и др.
4. Чижик С. А. Комплексная характеристика материалов методом сканирующей зондовой микроскопии // Тепло- и массоперенос-2003: Сборник научных трудов. Мн.: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Б, 2003. С. 226-232.
5. Наночастицы в конденсированных средах / Под ред. П.А. Витязя. Минск, 2008. – 286 с.
6. Суслов А.А., Чижик С.А. Сканирующие зондовые микроскопы // Материалы. Технологии. Инструменты. 1997. Т. 28, № 3. С. 78–89.
7. Кузнецова Т.А., Андреев М.А., Маркова Л.В., Чижик С.А. Применение атомносиловой микроскопии при определении микротвердости тонких покрытий методом склерометрии // Трение и износ. 2007. Т. 28, № 3. С. 276–282.