

11. СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ



«Лиса Алиса и слепой Кот
Базилио»

Для того чтобы увидеть атом, существует, как известно, громоздкий и дорогой электронный микроскоп. Однако, несмотря на поговорку, не всегда лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать. В ряде случаев можно получить больше информации, если атом ощупать, в буквальном смысле. Для этого и существует сканирующая зондовая микроскопия. Зонд – это микроскопический, чрезвычайно чувствительный щуп, который пробегает, сканирует, шероховатости поверхности атомарного размера. Более того, в ряде случаев зонд физически может двигать атомы.

В основе сканирования или «ощупывания» лежит достаточно простой принцип – атомы острия щупа «чувствуют» атомы, находящиеся на поверхности, тем сильнее, чем ближе они находятся друг к другу. Это похоже на то, как отталкиваются два сухих воздушных шарика, наэлектризованные о шерстяной свитер или волосы. В случае СЗМ возникающие силы межатомного взаимодействия чуть-чуть изменяют положение щупа и это можно обнаружить за счет чувствительных детекторов.

Подобным образом мы ощущаем приближающийся наэлектризованный воздушный шарик, который еще даже не коснулся наших волос. Другой известным всем пример – мошенник кот Базилио из сказки «Золотой ключик», который шел и «вслепую» ощупывал дорогу впереди себя специальной палочкой (Рис.1). Зонды СЗМ как правило, именно «вслепую», но без всякого мошенничества, ощупывают поверхность.

Первый сканирующий зондовый микроскоп был придуман на кочке пера и затем создан в 1981 году Г. Биннигом и Г. Рорером из Цюрихского отделения фирмы IBM. Этот микроскоп, правда, регистрировал не изменение положения острого щупа, но изменение так называемого туннельного тока, возникающего за счет «туннелирования» электронов, происходящего между поверхностью материала и зондом (сверхтонкой иглой), как только он приближается к поверхности на расстояние, сравнимое с межатомным. Движение зонда над поверхностью образца осуществлялось с помощью специальных «пьезодвигателей», способных создавать запрограммированные компьютером перемещения с шагом в сто миллиардные доли метра (0,01 нм или 0,1 Å). Столь необычный и чрезвычайно эффективный способ исследования поверхности очень быстро был оценен научной общественностью и в 1986 году Бинниг и Рорер получили нобелевскую премию за разработку «сканирующего туннельного микроскопа» (СТМ). Всего через год (1982 г. Д.В. Пол) на основе аналогичных принципов был создан сканирующий оптический микроскоп ближнего поля, где в качестве зонда использовали остро заточенное оптоволокно, через которое регистрировали оптические свойства образца: отражение и пропускание света, люминесценцию, спектральные характеристики излучения. С появлением СТМ, СБОМ, а в последствии «атомно-силового микроскопа» (АСМ, 1986 г.) стало возможным сделать новый шаг в изучении окружающего мира.

Современные методы зондовой микроскопии позволяют изучать рельеф, состав и структуру с разрешением в доли ангстрем, «видеть» и перемещать единичные атомы и молекулы. За последнее десятилетие применение зондовой микроскопии позволило значительно расширить познания в различных областях физики, химии и биологии

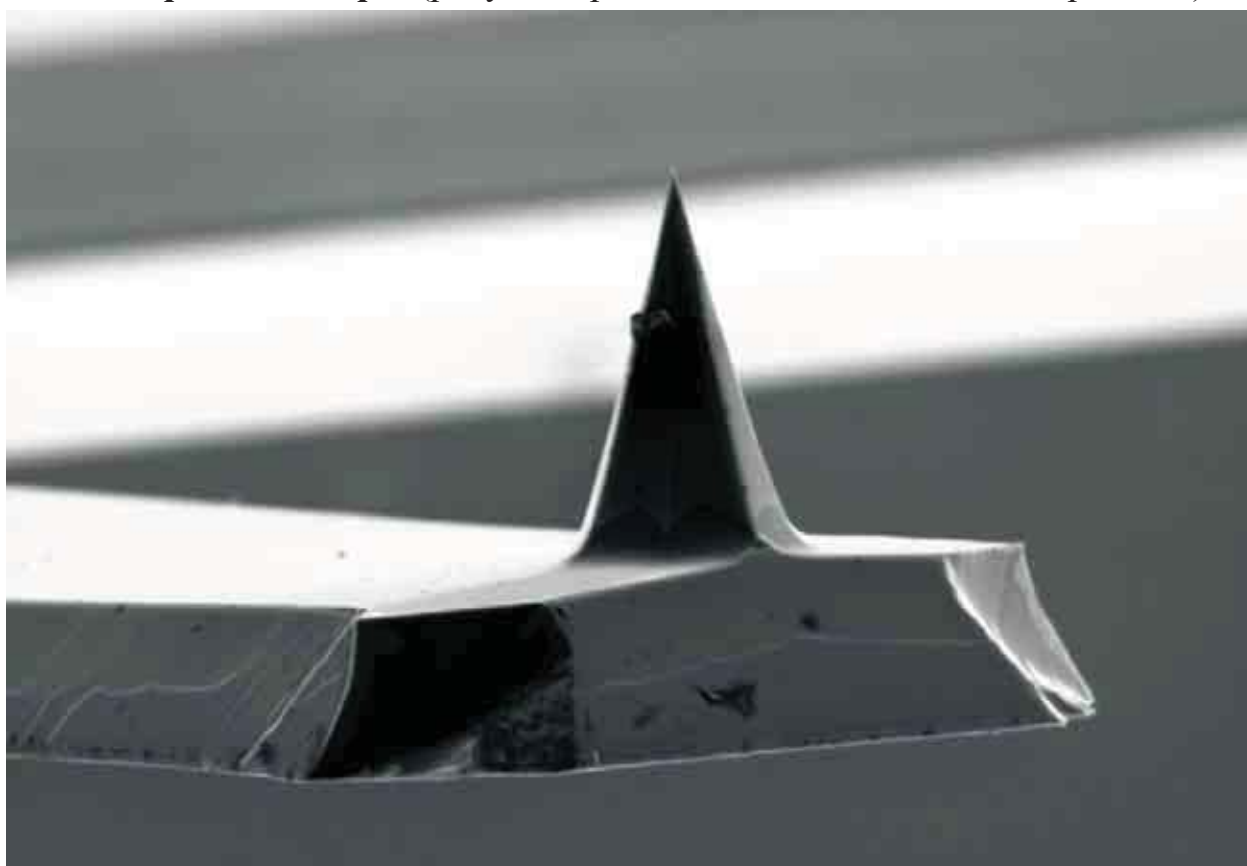
Основой всех типов сканирующей зондовой микроскопии является, как уже отмечалось, взаимодействие зонда с исследуемой поверхностью за счет механических, электрических или магнитных сил. Так, для «сканирующей туннельной микроскопии» откликом системы является туннельный ток, протекающий между зондом и сканируемой поверхностью, для «атомно-силового микроскопии» – Ван-дер-Ваальсовы силы отталкивания зонда от поверхности, в случае «магнитно-силового микроскопии» зонд реагирует на изменение магнитного поля над образцом, в ближнеполевой микроскопии оптические свойства образца детектируются через диафрагму, находящуюся в ближней зоне источника фотонов и т.д. Природа взаимодействия и определяет принадлежность прибора к тому или иному члену семейства зондовых микроскопов.

www.ntmtdt.ru

Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications Ed. Dawn Bonnell Wiley-VCH; 2 edition, 2000.

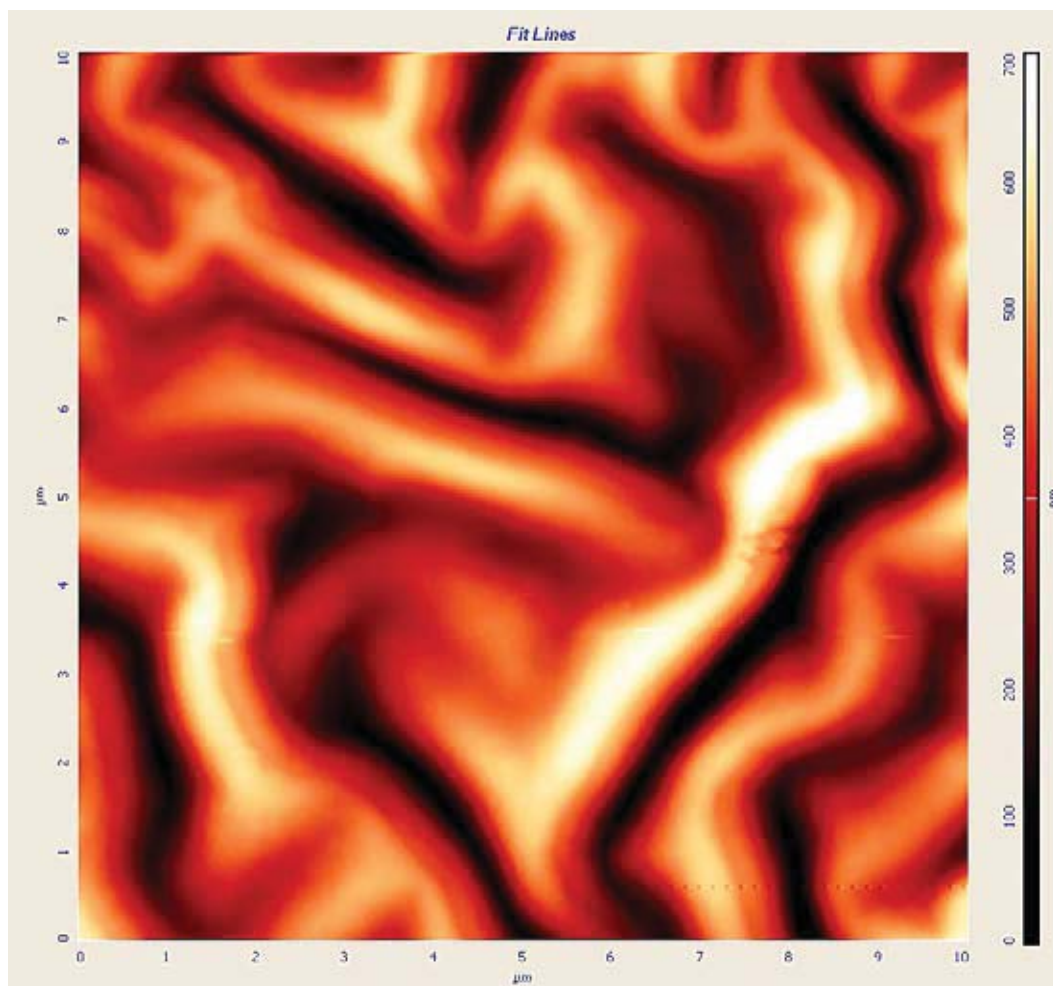


Аллегория наномира. (рисунок предоставлен компанией «Микромаш»)

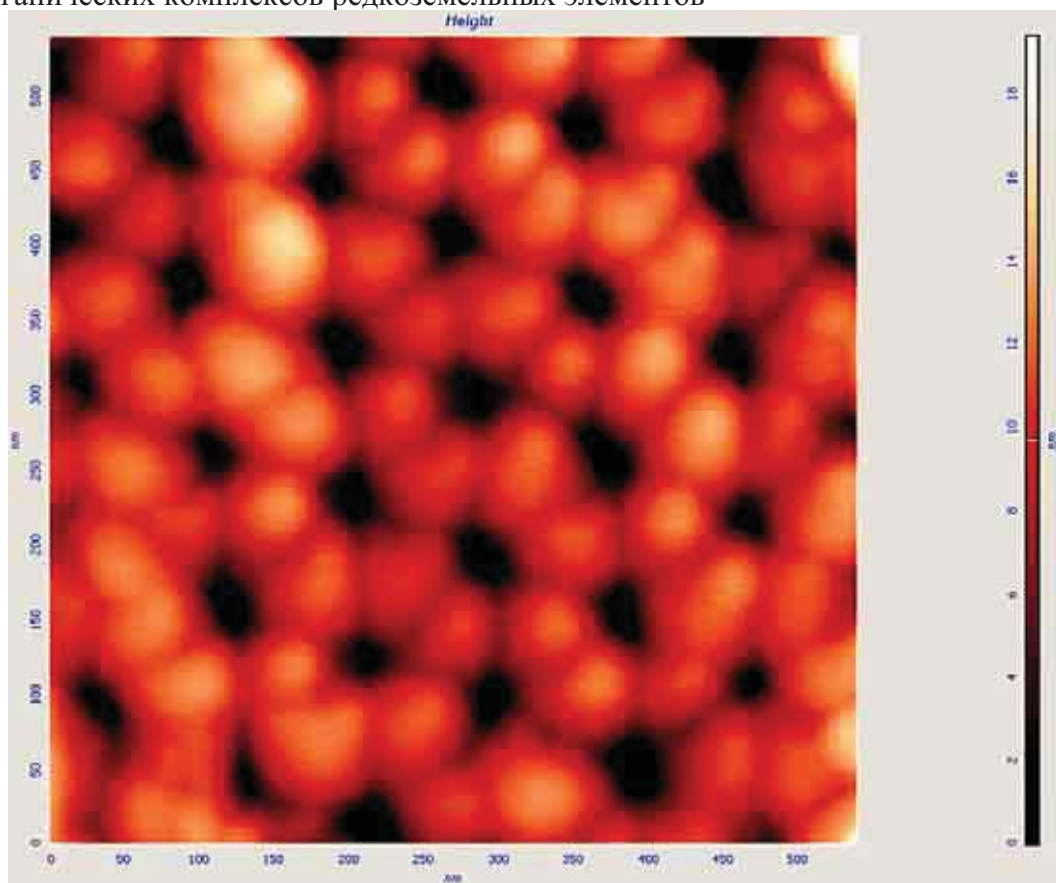


Mag = 5.00 K X 10µm EHT = 5.00 kV Signal A = SE2 MSU HSMS
WD = 15 mm Photo No. = 9862 Date :5 Jul 2005

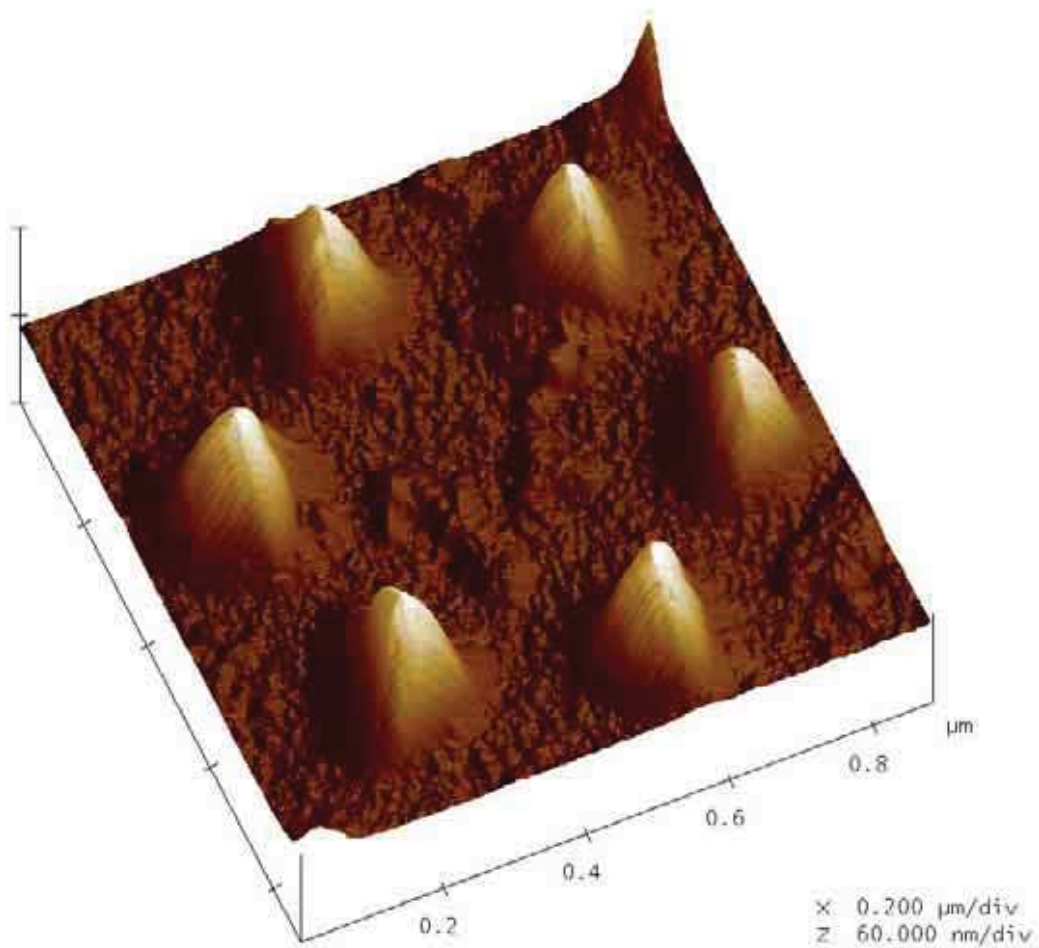
Фотография реального кантилевера (электронная микроскопия, ФНМ МГУ)



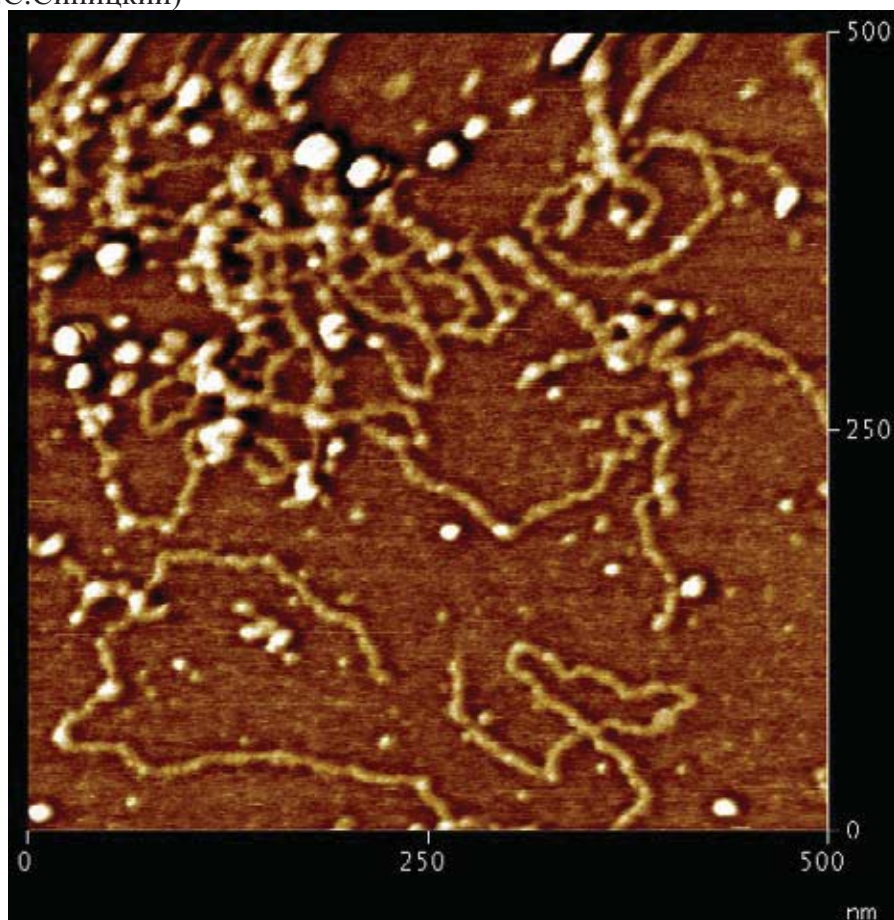
«Металлорганический светоч» - поверхность люминесцентной пленки, состоящей из металлорганических комплексов редкоземельных элементов



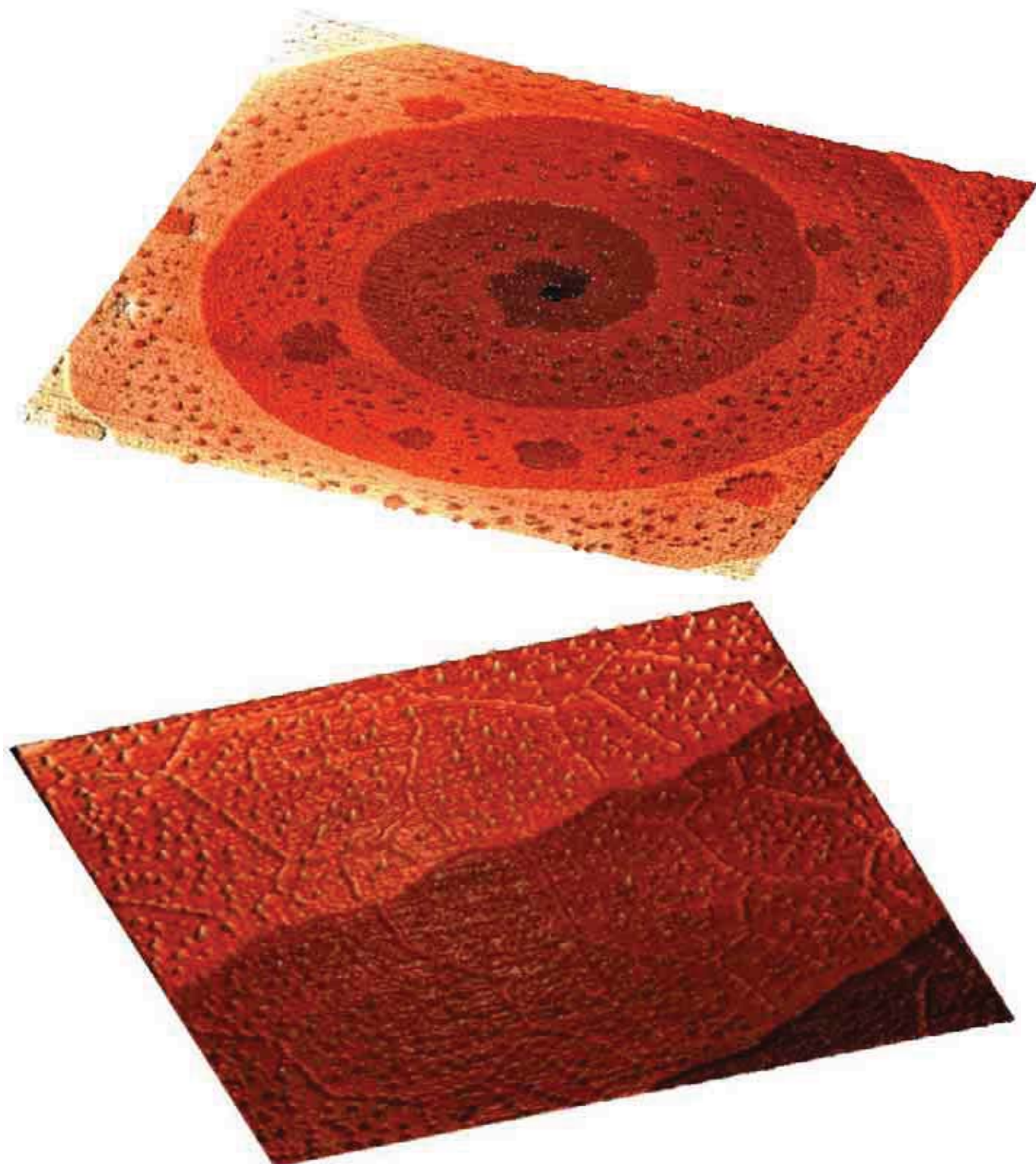
Поверхность пленки пористого оксида алюминия, полученного анодированием.



Магнитные островки из наночастиц кобальта, полученных с помощью микросферной литографии (А.С.Синицкий)



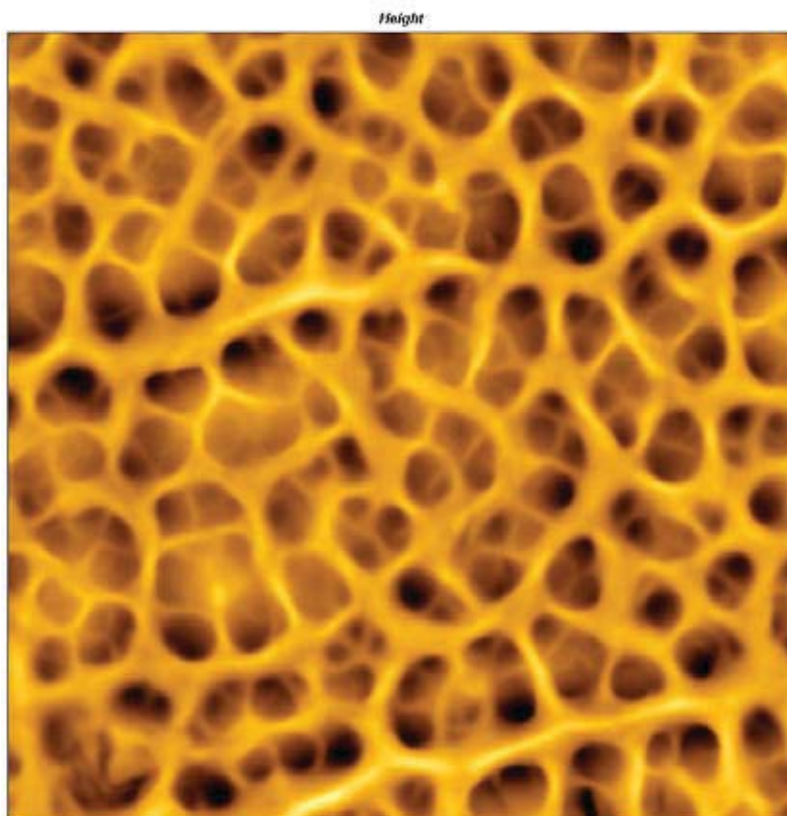
Магнитные наночастицы оксида железа (III), конъюгированные с молекулами ДНК.



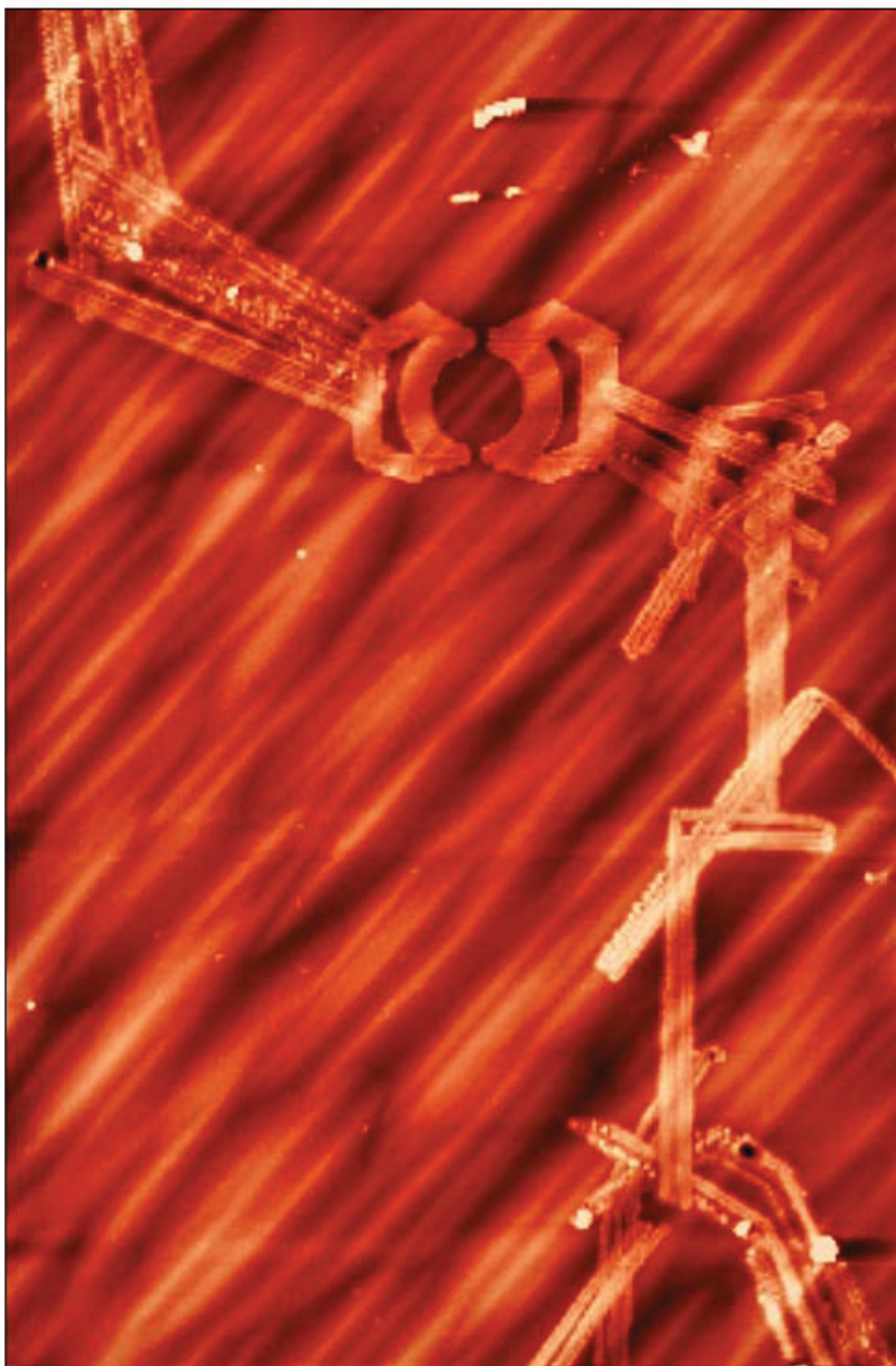
Спиральная ступень на поверхности Si(111), образовавшаяся вследствие выхода винтовой дислокации на поверхность, и двумерные (глубиной 0,31 нм) отрицательные островки (с латеральными размерами несколько десятков нанометров), после термического отжига кристалла кремния в кислородной атмосфере (вверху). Самоорганизация наноструктур кремния (высотой 0,3-0,6 нм) на ступенчатой поверхности Si(111) как метод формирования поверхностных наноструктур (внизу). Показано упорядочение двумерных островков кремния (атомной и двухатомной высоты) на специально созданных междоменных границах сверхструктуры 7x7 на грани кремния (111) Mode: "Полуконтактный" Метод СЗМ модель: Solver P47H-PRO (Родякина Е.Е., Косолюбов С.С., Щеглов Д.В., Латышев А.В., Институт физики полупроводников СО РАН, Россия)



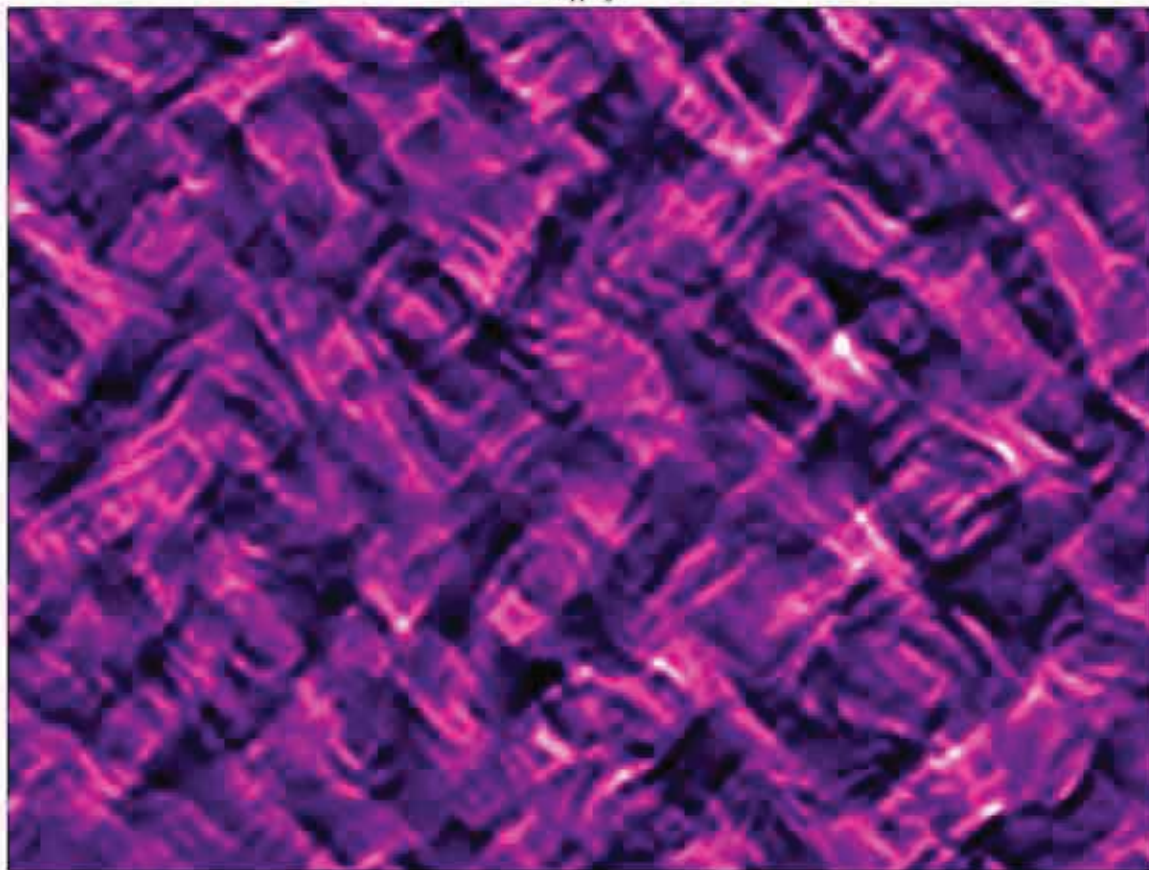
Две бактерии *Helicobacter pylori*, в процессе образования кокковидной формы. Шлифованный кремний, покрытый полимером. Визуализация морфологических изменений бактериальных клеток. Оценка адгезивных свойств поверхности, и ее влияние на жизнеспособность бактерий. Mode: "Полуконтактный" метод, СЗМ модель: Solver P47-PRO (Будашов И.А. (МГУ им. М.В. Ломоносова; Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля (РАН). Препарат *H. pylori* предоставлен Момыналиевым К.Т, НИИ физико-химической медицины, Росздрав)



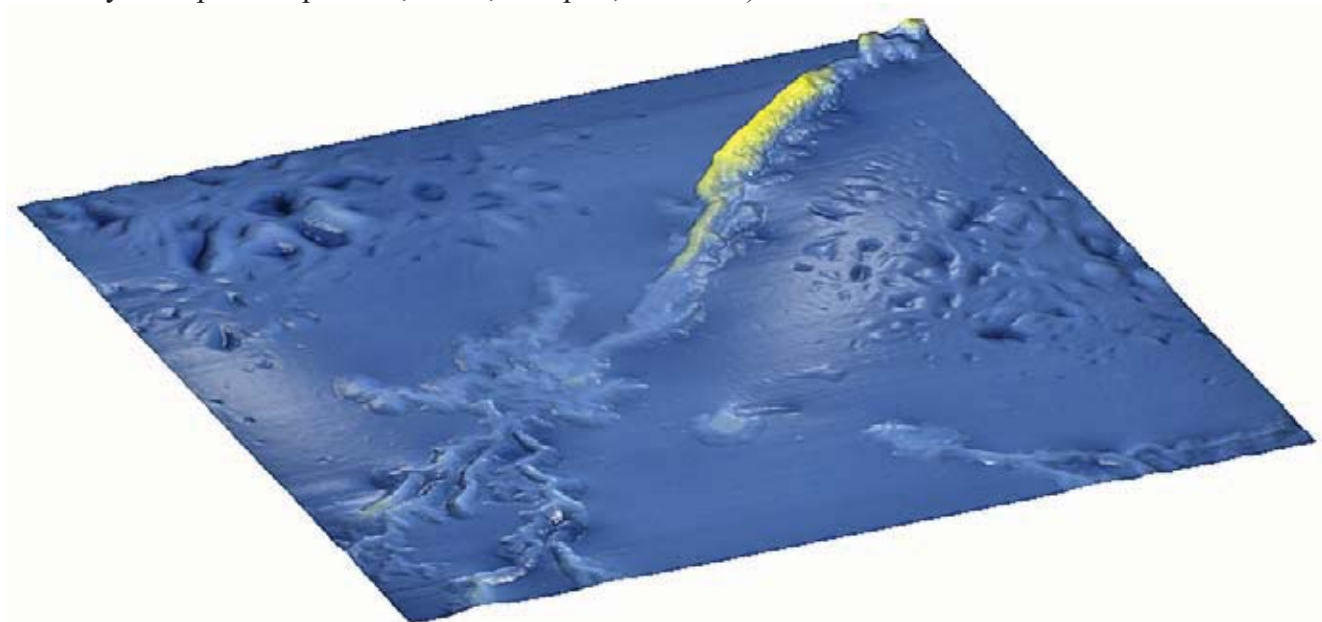
SiGe/Si(001) релаксированный буферный слой (выращенный методом газофазной эпитаксии) подвергнутый травлению. Этап отработки технологии формирования «искусственных подложек» SiGe Mode: "Полуконтактный" Метод СЗМ модель: Solver PRO (Шалеев М.В., Институт физики микроструктур РАН, подготовка образца: О.А.Кузнецов, научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ им.Н.И.Лобачевского, травление образца: А.В.Новиков, И.Б.Шулешова, М.В.Шалеев, институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия)



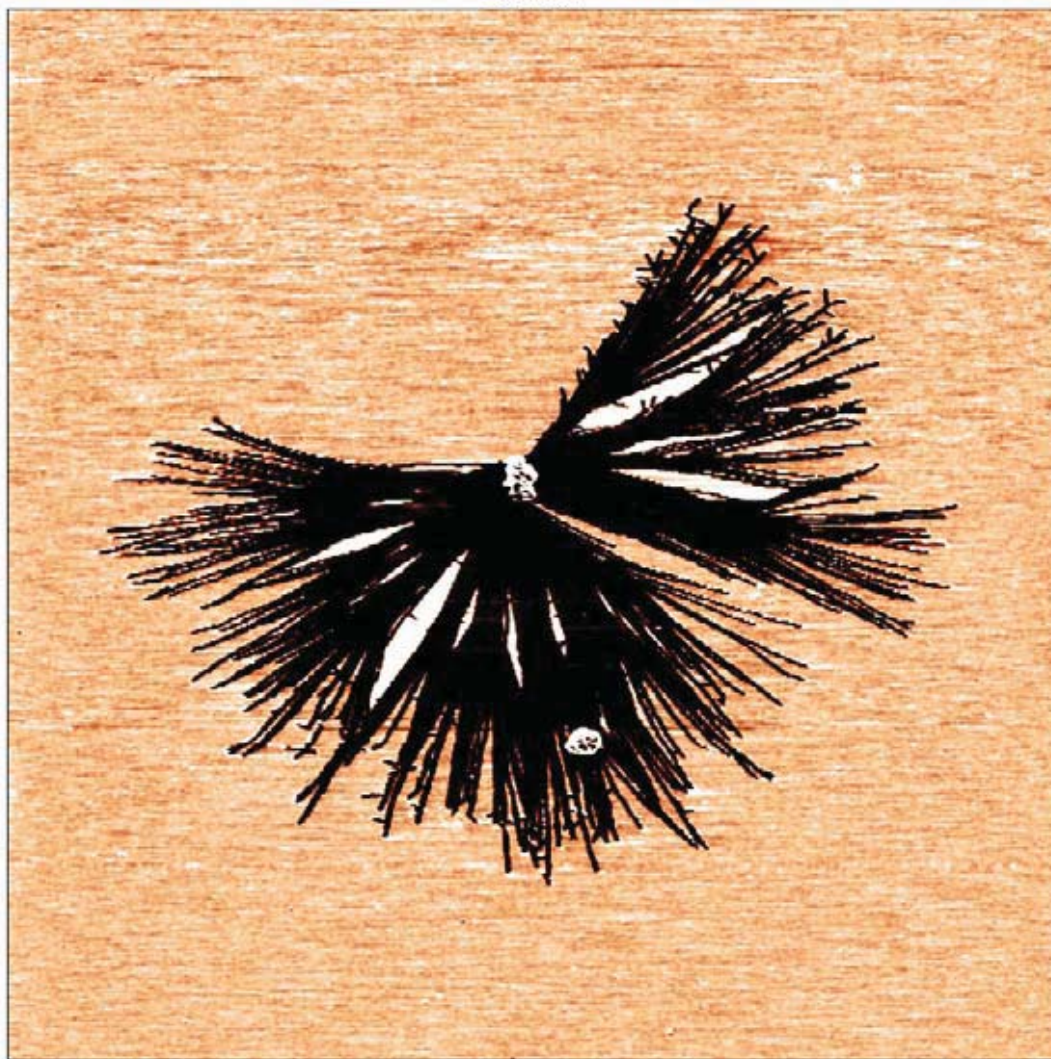
Гетероструктура Ga[Al]As с двумерным электронным газом (ДЭГ), располагающимся на глубине 80нм под поверхностью. На рисунке в режиме градиента по Z показана топография поверхности канала ДЭГ (две четких косых линии вверху и внизу – границы канала) с открытой квантовой точкой (КТ) (круглая область диаметром 1мкм с двумя нано-сужениями) и соединительными ломаными линиями (разрезами) до границ канала. КТ и разрезы получены локальным анодным окислением (ЛАО) поверхности с помощью стандартного DCP – зонда с резонансной частотой 332кГц. "Полуконтактный" Метод СЗМ модель: Solver P47-PRO (Мельников М.Ю., ИФТТ РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия))



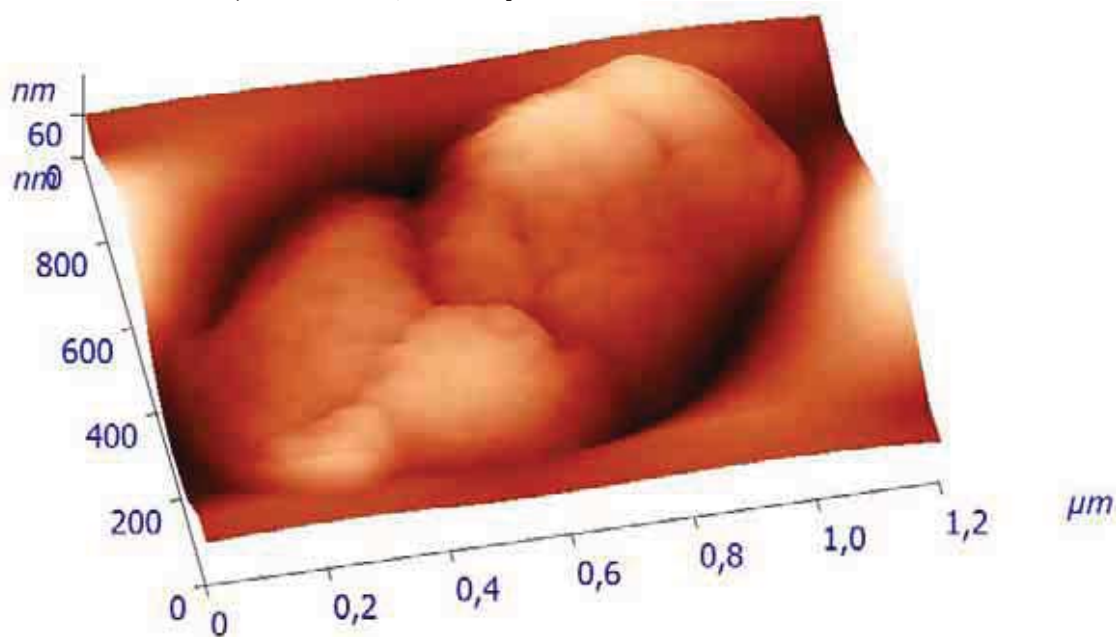
Пленка, выращенная методом атомно-слоевой МЛЭ на подложке GaAs. Впервые, используя селективное химическое травление и АСМ удалось выявить модуляции состава в виде квазипериодических полос, возникающие в результате протекания процесса спинодального распада в квазибинарной системе InAs-GaAs. "Полуконтактный" Метод СЗМ модель: Solver P47H-PRO (Еременко В.Г., ИПТМ РАН, Россия, образец предоставлен докт. Луиза Гонсалес, Институт микроэлектроники, CSIC, Мадрид, Испания)



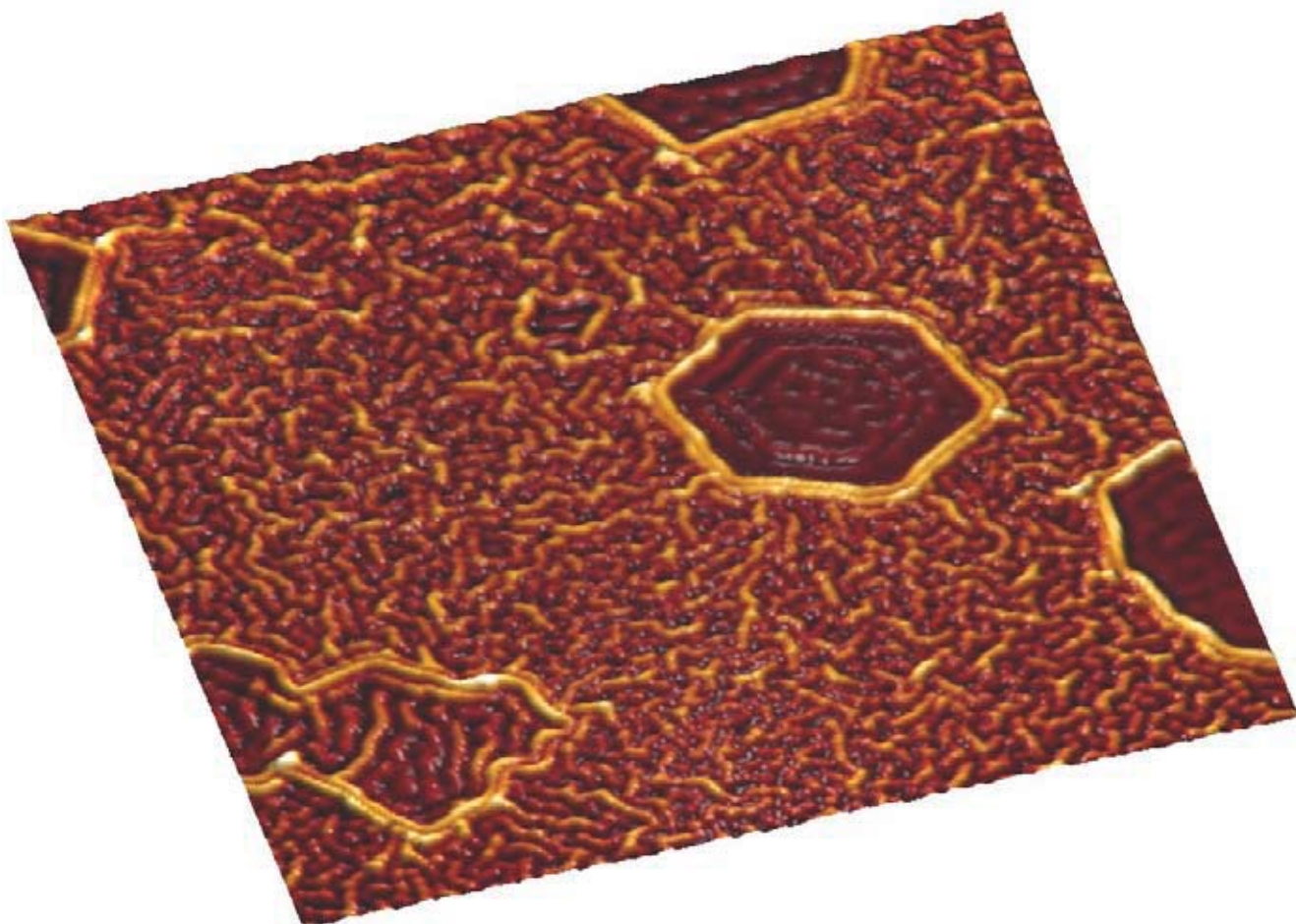
Фуллерид SnxC_{60} в виде нитевидных кристаллов. Новая, ранее неизвестная, фаза SnxC_{60} в виде нитевидных кристаллов, образовавшаяся в результате термического отжига пленок олово-фуллерит Mode: АСМ СЗМ модель: Solver P47-PRO (Баран Л.В., Белорусский государственный университет, Республика Беларусь)



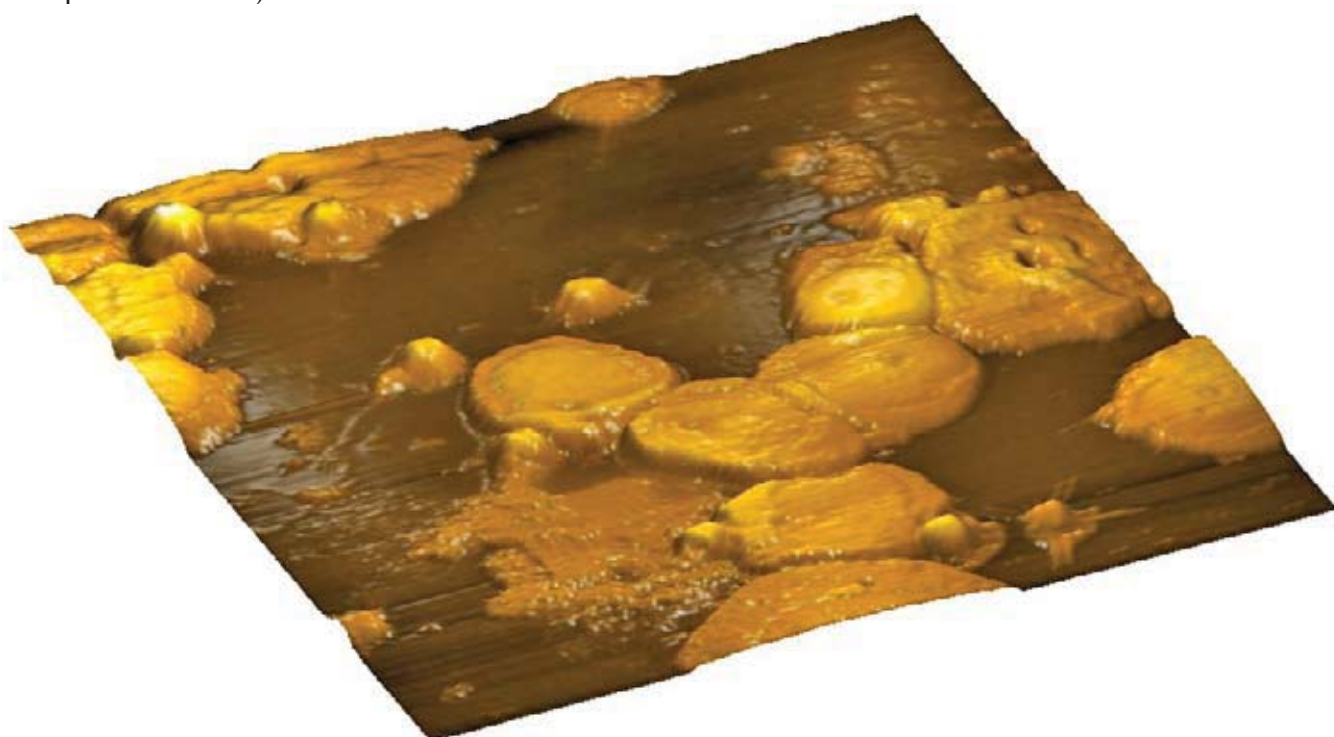
Углеродные нанотрубки, показан центр роста семейства нанотрубок "Полуконтактный" Метод СЗМ модель: Solver PRO (Солнцев А., институт тепло- и массообмена им А.В. Лыкова АН РБ)



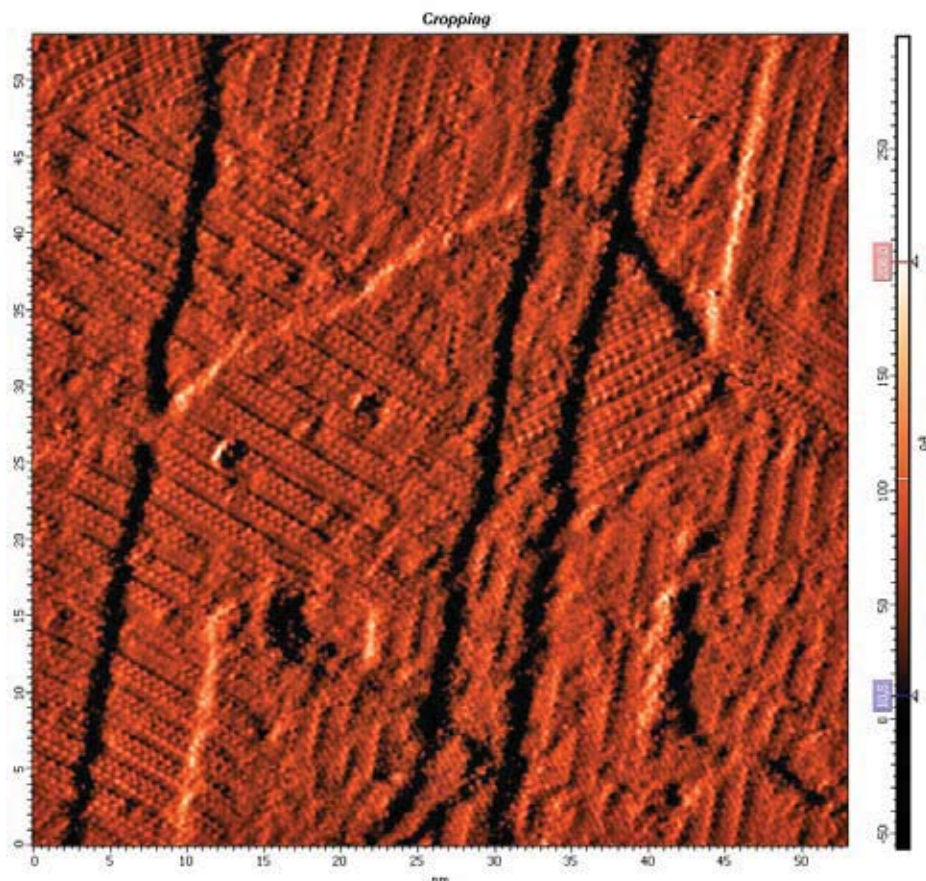
Частицы оксида железа (Fe_2O_3) в силикатной оболочке, полученные золь-гель методом из спиртового раствора тетраэтоксисилана и солей железа и кобальта с добавлением на последующей стадии процесса нанокристаллического порошка железа. Полученные гели подвергались термообработке при 900 С в течение 1 часа. (Карбань О.В., Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск, Россия. Образец предоставлен Михайловой С.С.)



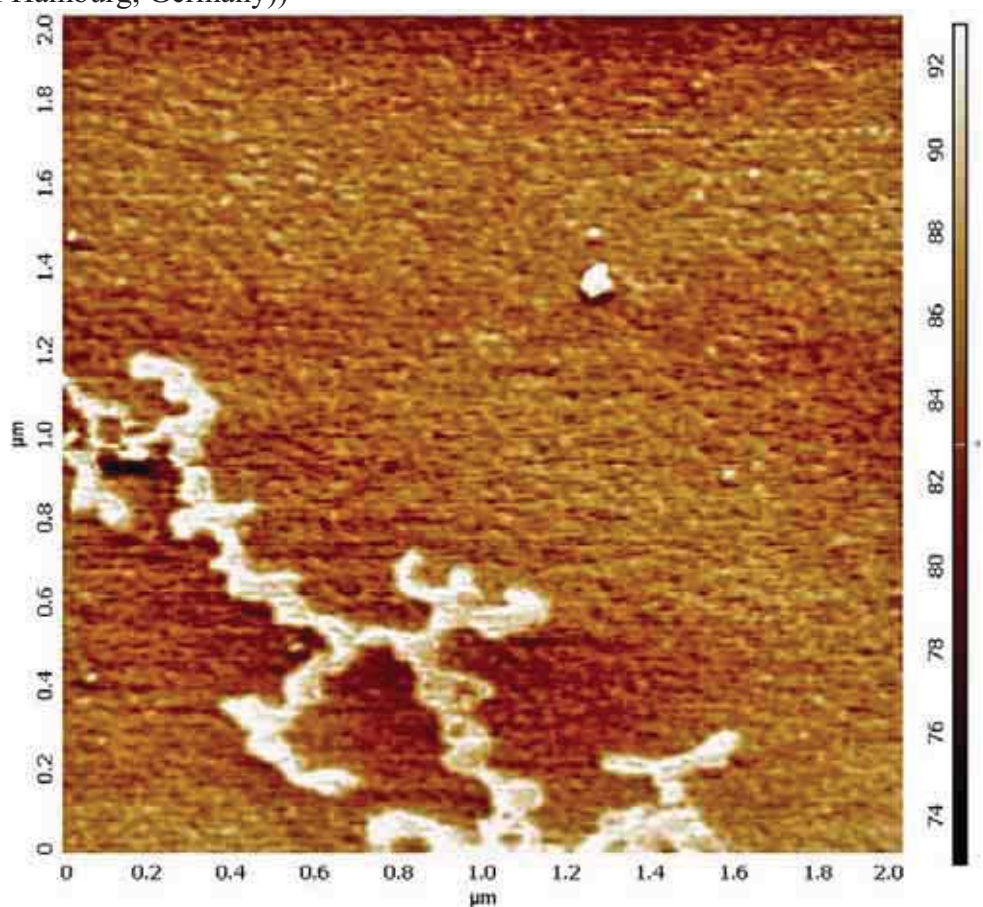
Простейшая форма надмолекулярной структуры в аморфном состоянии полимера, представляющее собой длительно живущее флуктуационное образование. Контактные методы СЗМ модель: Solver PRO-M (Волков А.В., Соловьев В.С., институт систем обработки изображений РАН)



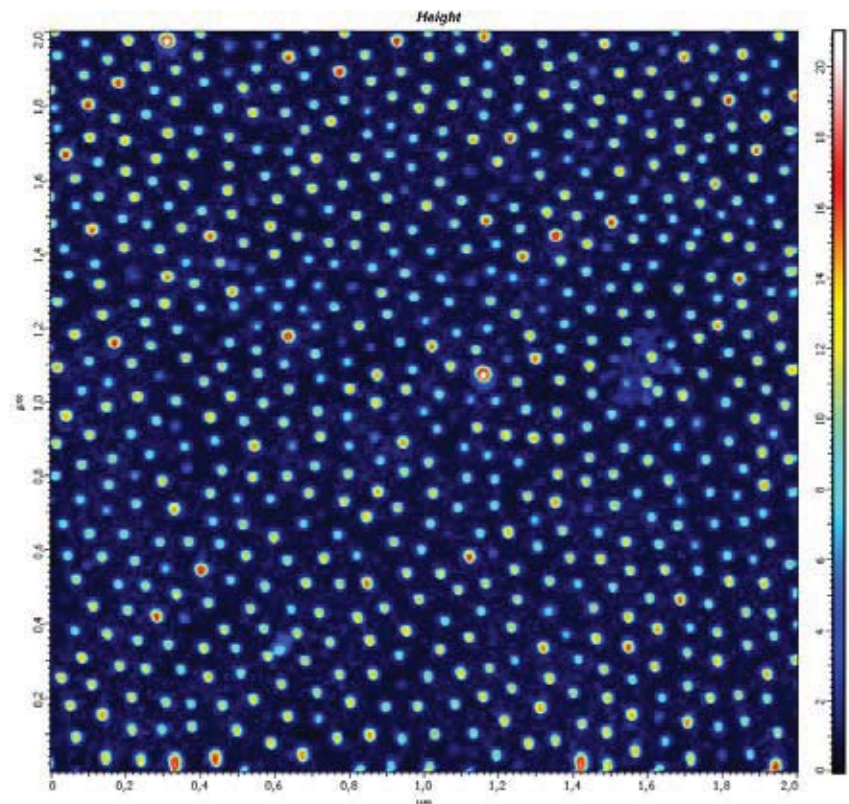
Лимфоциты на покровном стекле. "Полуконтактный" Метод СЗМ модель: Solver P47H-PRO (Benedetta Carlotti (изображение - Prof. Fausto Elisei, Benedetta Carlotti, University of Perugia, Perugia-Italy, образец - Prof. Carla Emiliani, University of Perugia, Perugia-Italy))



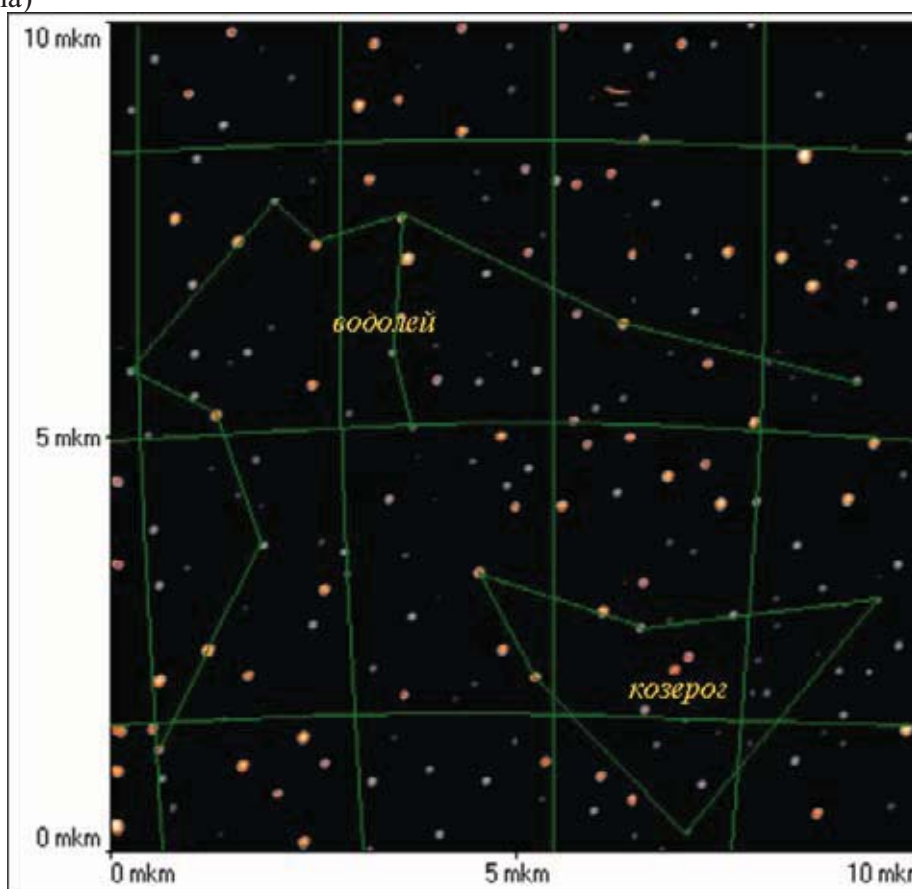
Атомное разрешение молекулярных цепочек самособирающихся слоев на золотой (111) подложке. "Полуконтактный" Метод СЗМ модель: ИНТЕГРА Прима (Dr. Andreas Terfort, University of Hamburg, Germany))



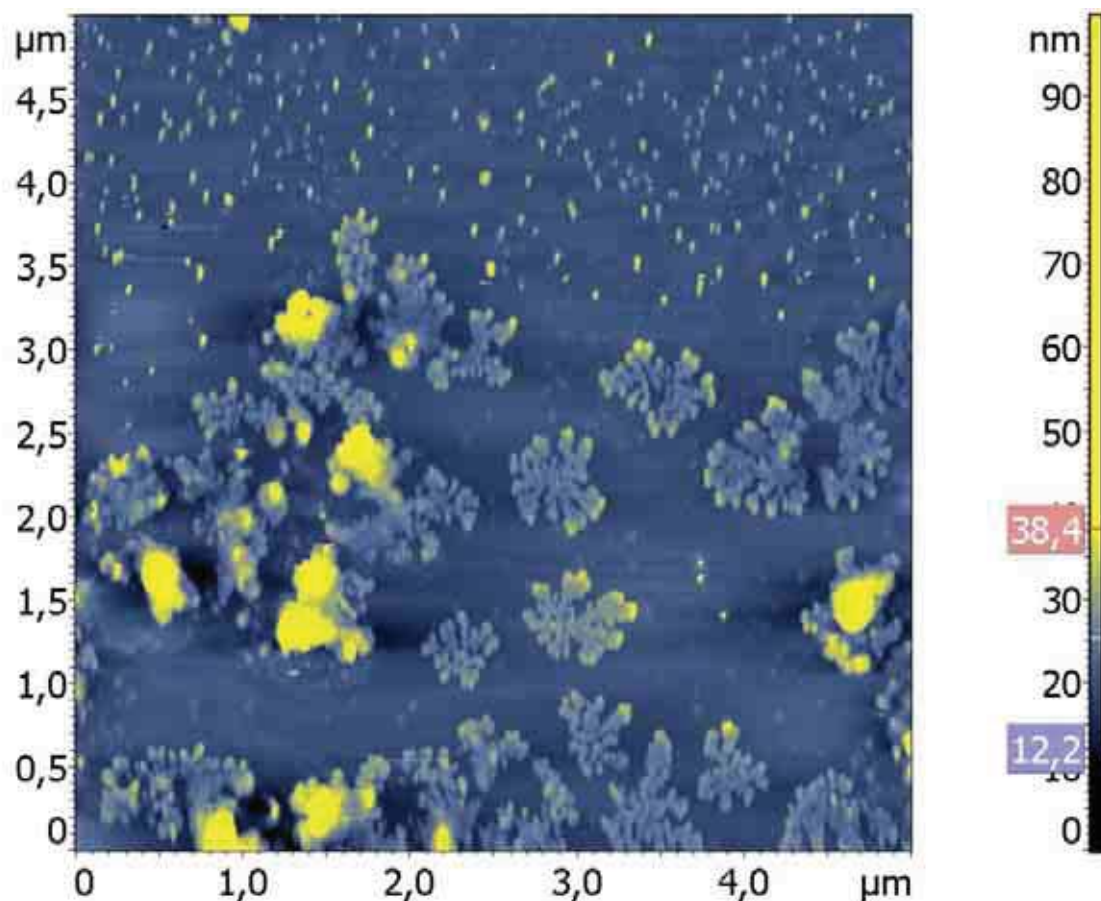
Молекулы ДНК, абсорбированные на слюде (ЕюCanettaб Department of Physics, University of Surrey (UK), образец: Mrs. Lesley Beeton – Department of Biosciences, University of Surrey (UK)),



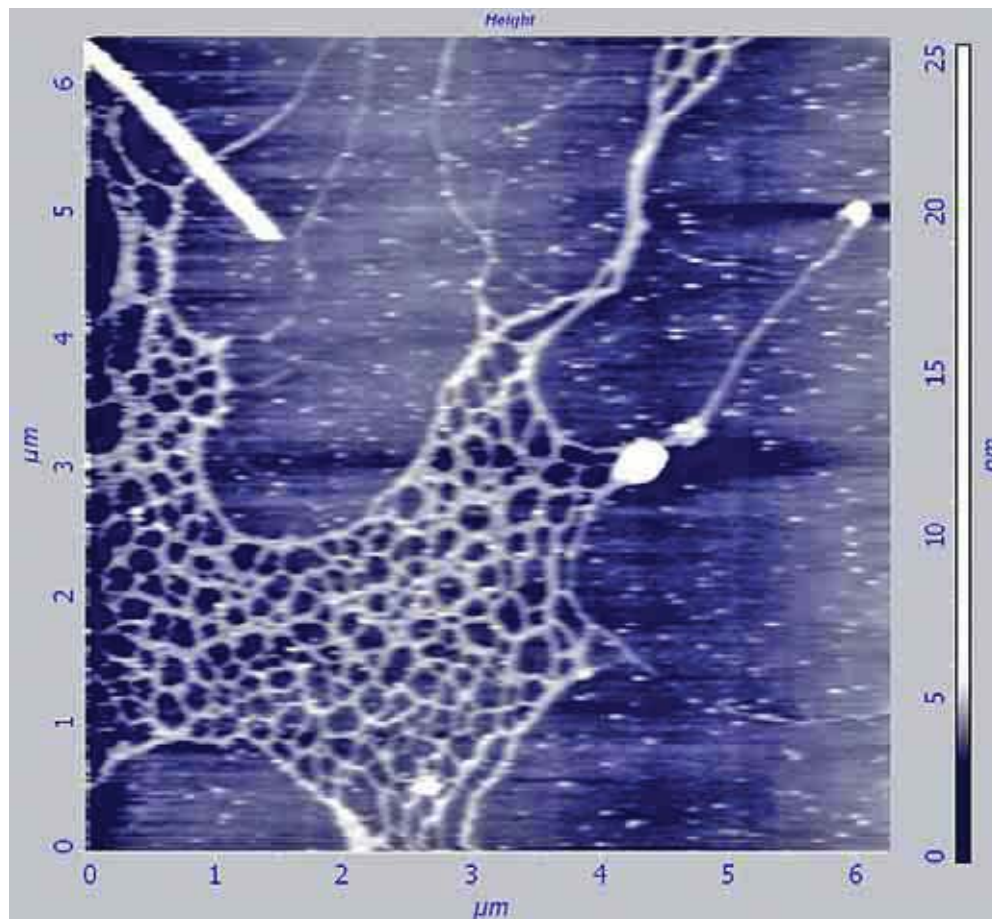
Самособирающиеся квазигексагональные упорядоченные ряды наночастиц золота для изучения плазмонного резонанса. "Полуконтактный" Метод СЗМ модель: Solver P47-PRO (Jing Bi You (изображение: Xing Wang Zhang & Jing Bi You, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, образец: Yan Feng, College of Chemistry and Chemical Engineering, SuZhou University, China))



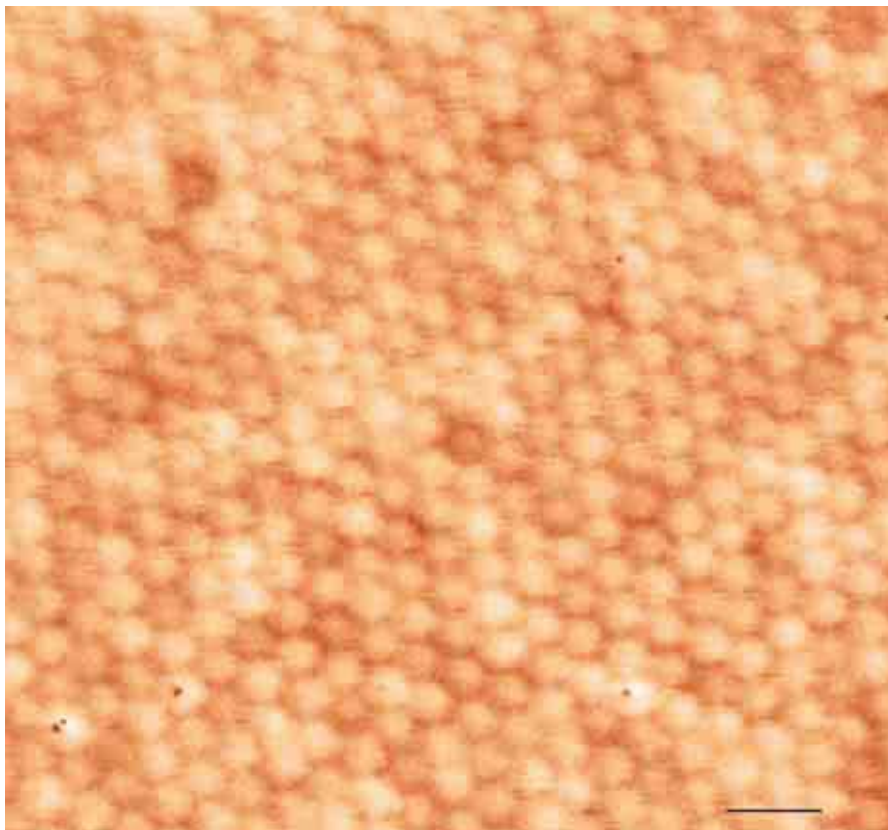
«Нановселенная». Гетероструктуры GeSi/Si(001) с массивом поверхностных, самоформирующихся нанокластеров, выращенные сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксией (СМЛЭ) с газообразным источником Ge (Сипрова С.В., Нижегородский государственный университет им.Н.И. Лобачевского, Россия))



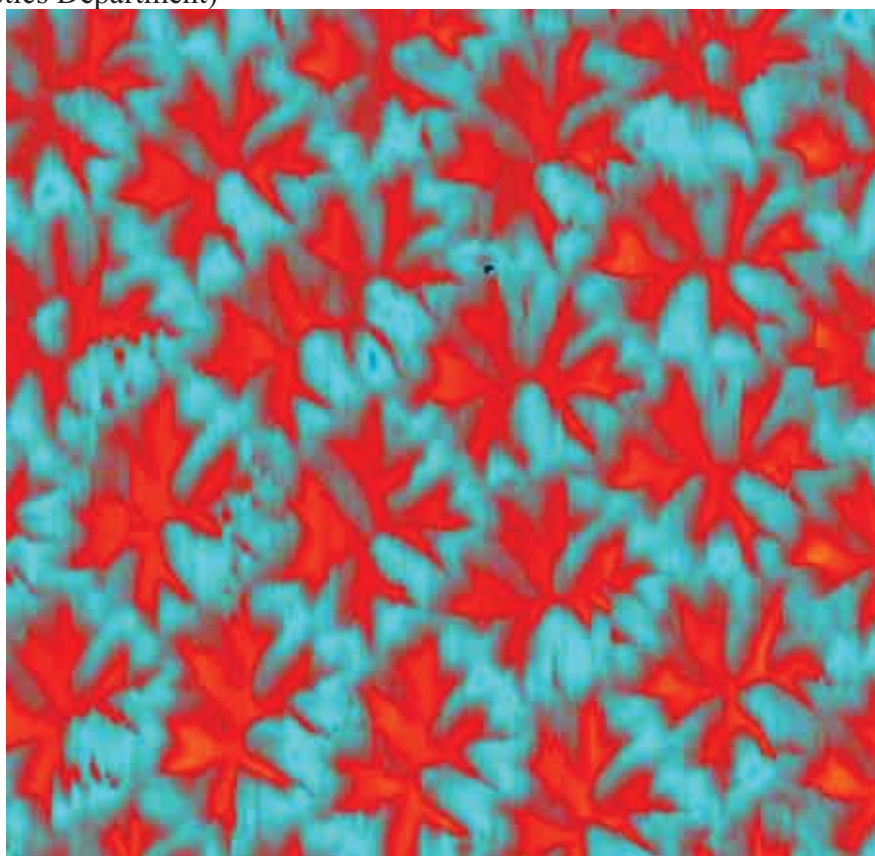
Буферный раствор иммуноглобулина, нанесенный на свежий скол слюды. На слюде образовались дендридные структуры из элементов буферного раствора. (Гриценко Ю.В., Институт кристаллографии им. Шубникова РАН, Россия)



Раствор Лямбда-ДНК и катионов марганца в бидистиллированной воде (Шарипов Т.И., Башкирский государственный университет, Россия))



Высокоупорядоченный поверхностный слой белка на кремнии (*Deinococcus Radiodurans* bacteria) – нанотемплат (Senem Donatan, Z. Beril Akinci, Istanbul Technical University Molecular biology and genetics Department)



"Осенний листопад": изображение магнитных доменов, существующем в узком приповерхностном слое пленки железо-иттриевого граната с неоднородным распределением анизотропии по толщине. Пленка ЖИГ была выращена эпитаксиально на подложке гадолиний-галлиевого граната в режиме меняющейся в процессе роста температуры. Данное изображение показывает возможности АСМ регистрировать приповерхностные домены, недоступные для оптической микроскопии. Скан получен с помощью АСМ "Смена А" производства фирмы "НТ-МДТ", МСМ мода, двухпроходная методика. Размер скана 40x40 мкм. (М.П.Темирязева)