

# ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Г.Мешков, А.Рахимова, А.Филонов, Д.Яминский, И.Яминский<sup>1</sup>  
yaminsky@nanoscopy.net

Сочетание уникальных возможностей зондовой микроскопии с современными коммуникационными решениями – способ достижения наибольшей эффективности работы аппаратуры. Доступность прибора через Интернет для управления им и получения данных измерений во многих случаях полезна, а часто просто необходима. С особенной очевидностью это проявляется при длительных измерениях, например, при наблюдении за ростом белковых кристаллов или кинетикой медленных химических реакций на поверхности при изучении процессов окисления и коррозии.

Официальным временем рождения сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) принято считать март 1981 года "Первую четкую экспоненциальную зависимость силы туннельного тока от расстояния между образцом и острием, характерную для туннелирования, мы получили ночью, едва дыша от возбуждения и из боязни вызвать вибрации. Это случилось в знаменательную ночь 16 марта 1981 года", – так 9 декабря 1986 года спустя пять с половиной лет описывали это знаменательное событие Г.Бинниг и Г.Рорер в лекции при вручении им в Стокгольме Нобелевской премии за изобретение СТМ [1].

Этот прибор стал родоначальником большого семейства сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ). В первую очередь следует упомянуть сканирующий силовой (часто называемый атомно-силовой) микроскоп (АСМ) (1986), ставший основным инструментом современной экспериментальной нанотехнологии. Большой интерес для практических применений представля-

ют также сканирующий ближнепольный оптический микроскоп (1982), магнитно-силовой микроскоп (1987), сканирующий фрикционный микроскоп (1987) и многие другие приборы.

Если, используя туннельный микроскоп, можно измерять в основном проводящие поверхности (рис.1), то для АСМ (рис.2) такие ограничения отсутствуют. Пространственное разрешение, получаемое в таком приборе, зависит от остроты сканирующего зонда – кантилевера. Качественные зонды (рис.3) имеют радиус закругления менее 10 нм. Разрешение мож-

но повысить, используя кантилеверы с выращенными на их вершине алмазными усиками (рис.4). Разработанная недавно технология изготовления таких усиков [2] позволяет увеличить латеральное разрешение до 1 нм. Тогда ширина молекул ДНК, наблюдаемых в АСМ, близка к реальной – около 2 нм (рис.5).

Существенное достоинство СЗМ – получение трехмерных данных. Обычно это рельеф поверхности, когда регистрация объектов наблюдения осуществляется в трех измерениях – по длине, ширине и высоте. Другие парамет-

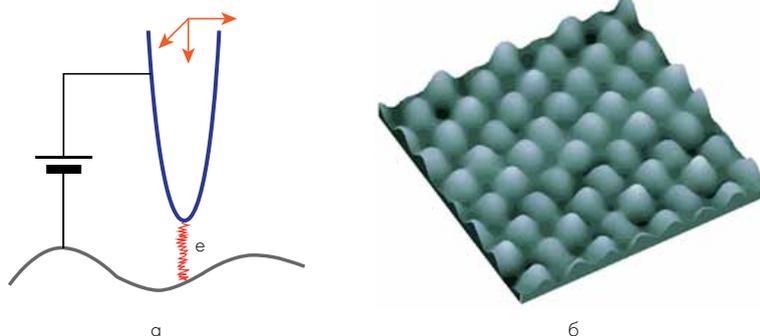


Рис.1. Схема СТМ (а) и изображение атомной решетки графита, полученное с помощью СТМ (б)

<sup>1</sup> Статья подготовлена МГУ им. М. В. Ломоносова и Центром перспективных технологий.

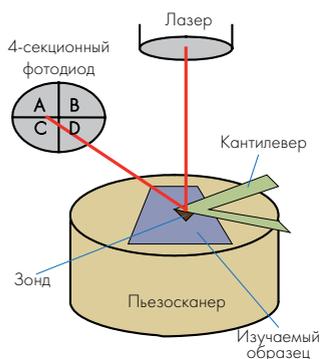


Рис.2. Схема механической части АСМ

ры (величина механического трения на поверхности, распределение магнитного или электрического поля, карта поверхностной электропроводности или что-то иное) также представляются в трехмерном виде, причем данные зондовой микроскопии хорошо представляются визуально. Для их изображения успешно применяются современные компьютерные графические возможности (рис.6).

Взросление сканирующей зондовой микроскопии происходило одновременно с бурным развитием информационных технологий. Четверть века они успешно продвигаются вперед, взаимно помогая друг другу. Элементарная база компьютеров уже перешла на субмикронный уровень. В результате появляются новые технологические задачи и проблемы, а зондовый микроскоп помогает понять процессы в наномире, увидеть наноструктуры, изучить их свойства. С другой стороны, разнообразие структур и объектов наномира требует от такого прибора умения справляться с большими потоками данных и наличия разнообразных встроенных коммуникационных возможностей.

В 1999 году в Центре перспективных технологий был создан СЗМ ФемтоСкан, в котором управление всеми параметрами эксперимента стало возможным через Интернет. Придирчивый читатель может подумать: «А зачем это нужно? Если уж есть микроскоп, то надо работать на нем непосредственно. Да и вообще, как образец ставить через Интернет?». Вопрос не праздный, тем более что разработчики на отечественных и международ-

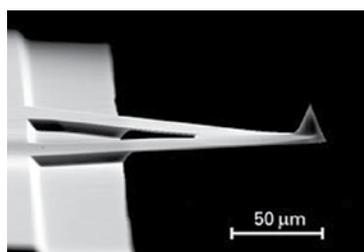


Рис. 3 Изображение кантилевера, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа

ных конференциях сталкивались с ним не раз. Когда рассказывалось об интернет-микроскопии, большая часть аудитории обычно выражала недоумение. Однако меньшинство (процентов 20), приходило в необычайный восторг от возможности удаленного управления сложным прибором – СЗМ и синхронной передачи информации сразу многим заинтересованным исследователям.

В самом деле, зондовая интернет-микроскопия нужна, например, для образовательных целей. Преподаватель демонстрирует слушателям эксперименты в области зондовой микроскопии, показывает на лекциях, как управлять микроскопом. Полезность этого не вызывает сомнения, и все, как правило, солидарны в такой оценке. Другое применение – интернет-микроскопия открывает новые возможности для техниче-

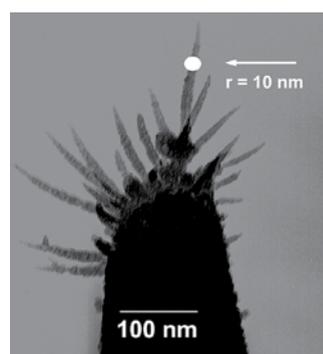


Рис.4. Кантилевер с выращенными на вершине его острия алмазными усиками

ского обслуживания и тестирования. Например, у исследователя что-то не получается, он звонит в сервисный центр, и специалист, не выезжая на место, тестирует микроскоп или просто демонстрирует, как надо на нем работать. Другой случай – проведение длительного эксперимента. Положим, пятый день растет белковый кристалл. Устав от напряжения, исследователь продолжает работу, однако такая ситуация возможна только в том случае, если у него нет замены или отсутствует интернет-управление прибором. Если последнее имеется, исследователь может уйти домой, и уже оттуда будет осуществлять контроль. Если что-то идет не так, ФемтоСкан сообщит ему об этом. А что делать, если в подготовке эксперимента принимало участие, например, 12

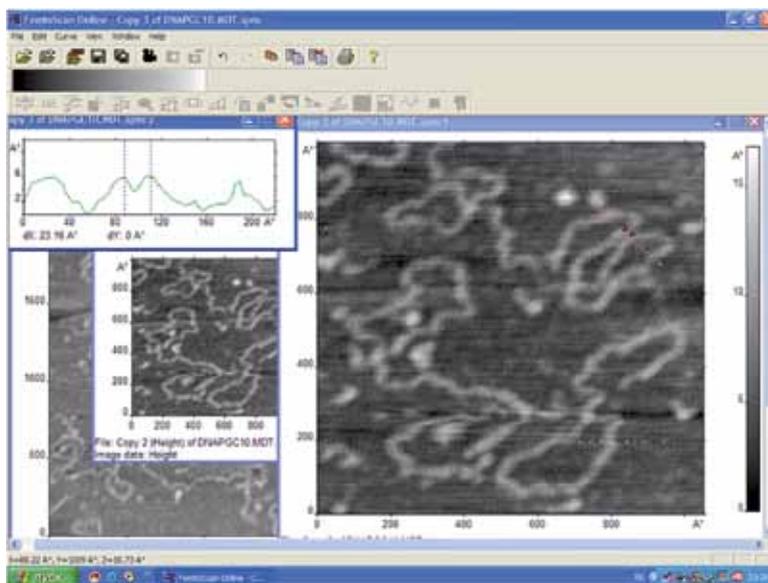


Рис.5. Изображения молекул ДНК

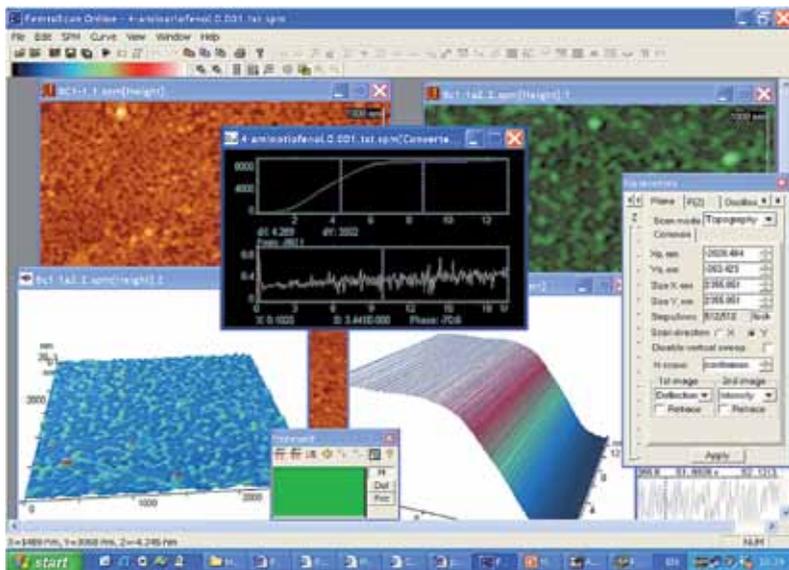


Рис.6. Рабочий экран программы ФемтоСкан Онлайн в режиме обработки изображений

человек: три биолога, два химика, четыре физика, два инженера и один материаловед. Все они хотят участвовать в его проведении. Все эти специалисты необходимы для эксперимента, однако если все они соберутся у микроскопа, то, возможно, последнему станет совсем худо. В самом деле, голоса и хождение и, как следствие, легкие сотрясения микроскопа не являются помощью ему, а скорее действуют во вред. В самом деле, для некоторых деликатных экспериментов сотрудни-

ки фирмы IBM помещают микроскоп в звукоизолированные, сейсмически чистые, термостатированные комнаты. Несомненно, в подобных случаях Интернет или удаленный доступ необходимы. Однако, даже если работа ведется один на один с микроскопом, почему бы не управлять им через Wi-Fi, лежа, например, на лужайке, поскольку комфорт при эксперименте – вещь немаловажная.

Все вышесказанное можно делать с помощью СЗМ ФемтоСкан Онлайн – первого в мире микро-

скопа с полным интернет-управлением.

Сердце микроскопа ФемтоСкан – цифровой сигнальный процессор. Такие процессоры применяют для обработки аналоговых сигналов, когда не должно быть задержки во времени, например, в мобильной телефонии. Подобный сигнальный процессор задает все временные циклы – своеобразный сердечный ритм прибора. Он же управляет аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями, принимает и передает сигналы. Для таких процессоров обычно создают эффективный программный код на языке нижнего уровня, что обеспечивает их более быструю и надежную работу. Процессор связан с большим компьютером, который может зависнуть, например, из-за ошибки в системе Windows. Вместе с тем процессор продолжит работать, а микроскоп будет сканировать поверхность иглой. В большом компьютере обычно запускается серверная программа, которая общается с сигнальным процессором, а также передает данные конечным пользователям на их клиентское программное обеспечение (ПО). На экран монитора можно выводить экспериментальные данные, менять параметры измерений, управляя микроскопом через Интернет, а рабочий экран может выглядеть так, как показано на рис. 7.

Управлять прибором в этом случае может только один человек, назовем его мастером, хоть и находясь на удалении, он – полный хозяин зондового микроскопа. Имея клиентское ПО, любой человек при наличии компьютера и Интернета может также в реальном масштабе времени получать все экспериментальные данные. Единственно, что он не может делать – управлять микроскопом. Правда, только до тех пор, пока он не обратится к мастеру с просьбой получить возможность делать это. Просьбу пользователя и согласие мастера можно передать с помощью встроенной в клиентскую программу службы сообщений. В результате появляется возможность работать по 24 ч в сутки без проблем. Такие запросы можно получать сначала из России, потом из Америки, а вслед за этим из Австралии. Если чита-

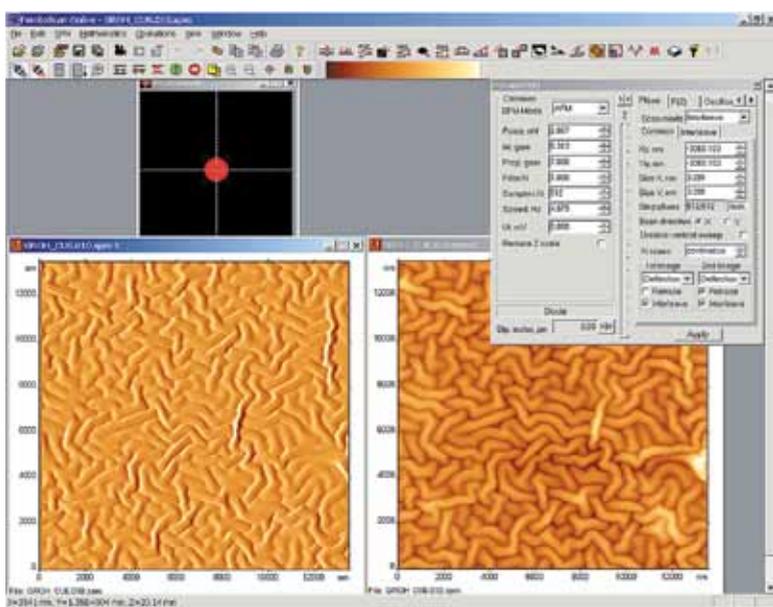


Рис.7. Рабочий экран программы «ФемтоСкан Онлайн» во время проведения эксперимента



тель еще не поверил в это – пусть приходит в "Центр перспективных технологий", приобретает клиентское ПО и работает на микроскопе ФемтоСкан удаленно, больше не приходя в Центр.

Если у читателя все еще сохранились сомнения в пользе Интернета для зондовой микроскопии, то он – неискраивимый пессимист. В самом деле, авторам известен один очень пожилой человек, который настроен против мобильного телефона, который, по мнению этого человека, ведет к потере личной свободы. Однако СЗМ ФемтоСкан Онлайн – это приобретение личной свободы. Исследователь больше не привязан к тому помещению, где стоит микроскоп. Он может перемещаться куда угодно и при этом все время контролировать получаемые результаты: следить за ростом кристалла, наблюдать деление бактериальных клеток или просто изучать процесс, что раньше сотрется – образец или игла СЗМ.

СЗМ ФемтоСкан Онлайн может делать практически все, что и любой другой продвинутый СЗМ: работать на воздухе или в жидких

средах; функционировать в условиях контролируемого нагрева образца; быть АСМ или СТМ, а также магнитно-силовым, электростатическим, резистивным микроскопом, при этом одновременно считать фотоны из области контакта, измерять жесткость образца, адгезию и трение, впрочем все эти функции могут реализовываться и через Интернет.

Если существует потребность рассмотреть образцы при сверхнизких температурах, для этого подойдет модификация СЗМ ФемтоСкан – КριοСкан (рис. 8).

На базе СЗМ ФемтоСкан также разрабатываются химические и биологические сенсоры. Так, уже удается взвешивать ничтожные количества вещества на уровне  $10^{-14}$  г. Делается это с использованием прибора, который называется атомными весами [3]. С применением кантилеверов оптимизированной геометрии его чувствительность достигает  $10^{-18}$  г, а это уже масса одной белковой молекулы.

Важно отметить, что КριοСкан и атомные весы могут работать че-



Рис. 8. СЗМ КριοСкан –2200 для исследования образцов при низких температурах

рез Интернет также надежно, как и СЗМ ФемтоСкан Онлайн.

#### Литература

1. Бинниг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности. Нобелевские лекции по физике – 1986. – УФН, 1988, 154, вып. 2, с.261–278.
2. <http://www.nanoscopy.net/en/klinov.shtml>
3. <http://www.biosensoracademy.com>