

СКАНИРУЮЩИЙ ЗОНДОВЫЙ МИКРОСКОП

Каждому школьнику знаком оптический микроскоп. Именно с его помощью будущие великие учёные впервые заглядывают в микромир. Но увлекающемуся человеку всегда хочется большего, хочется раздвинуть пределы, недоступные для оптических микроскопов, и из микро-перешагнуть в наномир.

Настоящему учёному в этом помогают электронные и зондовые микроскопы. Некоторые скажут, что у них в школе есть электронный микроскоп, но скорее всего это обычный оптический микроскоп, оснащённый цифровой камерой. В школьной лаборатории можно найти именно его, а никак не электронный микроскоп, который в качестве источника использует пучок электронов и имеет очень внушительные размеры. Выдающиеся представители электронных микроскопов занимают сразу несколько этажей, как, например, микроскоп фирмы JEOL на один мегавольт (рис. 1). На таком оборудовании можно увидеть отдельные атомы! Но излучение электронов может повредить структуру объектов исследования, поэтому для большинства материалов подобный микроскоп не подходит. Да и работать на нём можно, только когда уровень шума в городе достаточно низкий, потому что вибрации от метро, работающих электроприборов и т. д. будут вносить помехи в получаемое изображение.

Так неужели нет прибора, который помог бы школьникам заглянуть в наномир? Такой прибор есть, причём он компактен, не работает с источниками излучения электронов и тоже называется микроскопом, хотя на самом деле им не является. Это сканирующий зондовый микроскоп.

Строго говоря, название «сканирующий зондовый микроскоп» относится к целому семейству приборов. Первым из этого семейства появился сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). Его сконструировали сотрудники компании IBM Герд Бинниг и Генрих Рорер в 1981 г., а уже в 1986 г., всего через 5 лет, получили за его создание Нобелевскую премию по физике!

В настоящее время каких только зондовых микроскопов ни существует: магнитно-силовой, электростатический, сканирующий резистивный... Но всех их объединяет общий принцип работы.

Принцип работы

Сканирующий зондовый микроскоп не является микроскопом в привычном смысле этого слова. Он не «увеличивает», а «ощупывает» образец сверхтонкой острой иглой. Как, например, слепой человек ощупывает окружающие его предметы с помощью своей белой трости, или как патефон скользит по дорожке пластинки своей иглой. То есть зондовый микроскоп отслеживает профиль, топографию поверхности, строит её трёхмерную модель. Он имеет больше общего с патефоном, чем с обычным микроскопом – оптическим прибором, состоящим из системы линз, осветителя и пр. Конечным «продуктом» работы зондового микроскопа будет не микрофотография, а карта распределения различных регистрируемых параметров: высоты, амплитуды, трения, электрического сопротивления и т. д. Какие параметры регистрируются, зависит от выбранной иголки (зонда, щупа) и применяемого метода.

Как вы догадываетесь, одна из основных частей каждого зондового микроско-

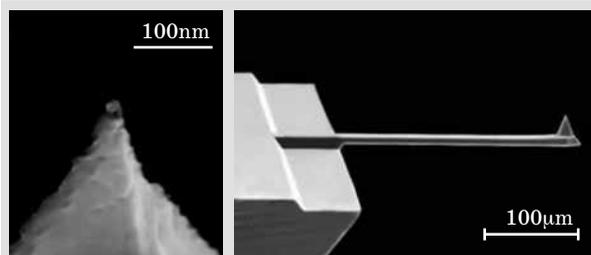


Рис. 2. Слева направо: игла сканирующего зондового микроскопа, игла на кантилере

Рис. 1. Электронный микроскоп фирмы JEOL

Рис. 3. СЗМ «Фемтоскан-001»



па – это сканирующий зонд, или, попросту говоря, очень острая игла. При контакте зонда и образца на зонд действует сила. Из-за неровностей на поверхности образца эта сила будет меняться при движении зонда.

Зонд располагается на конце кантилевера – упругой балки (рис. 2, 3). Под действием силы кантилевер изгибается. Этот изгиб регистрируется при помощи оптической системы, состоящей из лазера, зеркала и фотодиода, и позволяющей фиксировать даже очень малые изгибы.

На рисунке 4 показана упрощённая схема механической части сканирующего зондового микроскопа. В ней сканирование осуществляется образцом: это значит, что кантилевер остаётся неподвижным, а образец под ним перемещается. Точно передвигать образец, оставляя изгиб кантилевера постоянным, позволяет система обратной связи. Управляется микроскоп специальной компьютерной программой.

ЧТО ТАКОЕ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ?

«Обратная связь» – не какой-то экзотический научно-технический термин, а весьма полезное реальное явление, с которым все сталкиваются ежедневно. Если в процессе каких-то действий мы можем их подправлять, всё время наблюдая результат, то у нас работает обратная связь. Вот несколько жизненных примеров.

Пример 1. Проверки на дорогах, или Пьянству – бой!

С закрытыми глазами дотроньтесь указательным пальцем до своего носа или по стойте на одной ноге. Справиться с этим помогает *отрицательная обратная связь*. Почувствовав, что вас повело в сторону, вы тут же стремитесь в противоположную сторону, исправляя отклонение. Потому такую обратную связь и называют отрицательной. Она часто повышает устойчивость системы.

А вот подвыпивший человек вряд ли выполнит это задание. Обратная

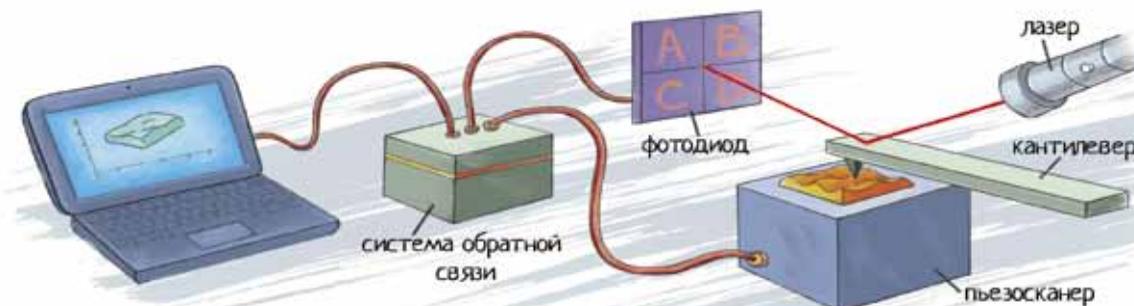


Рис.4. Схема сканирующего зондового микроскопа (масштаб не соблюден).



связь у него разладилась, и команды мышцам отдаются без оглядки на результат. За рулём это может привести к катастрофе. К счастью, плохо работающая обратная связь у подвыпивших водителей позволяет и легко выявлять их подобными тестами (есть и современные компьютерные способы).

Пример 2. Маленький ребёнок

Человек не рождается с настроенной «обратной связью» и тратит годы на её отладку. Сначала нужно научиться фокусировать взгляд, методом проб и ошибок добиваясь чёткого изображения. Затем заставить ручки и ножки слушаться и делать то, что хочется малышу, а не то, что «хочется» им. Речь развивается тоже с помощью обратной связи.

В этих примерах мы говорили о координации движений, то есть о согласованности в работе различных мышц с органами чувств. Само слово «координация» означает «согласование». Она может нару-

шаться и в результате болезни (например, инсульта), и тогда её приходится настраивать заново. Есть много способов для развития координации движений: полезно играть на музыкальных инструментах, заниматься лепкой, вязать, собирать пазлы.

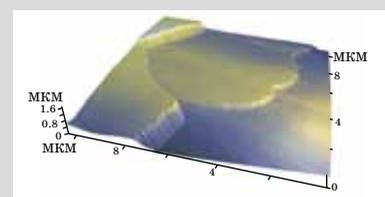
Интересно, что у человека полное развитие координации движений происходит только к 13 – 14 годам.

Пример 3. Магазин

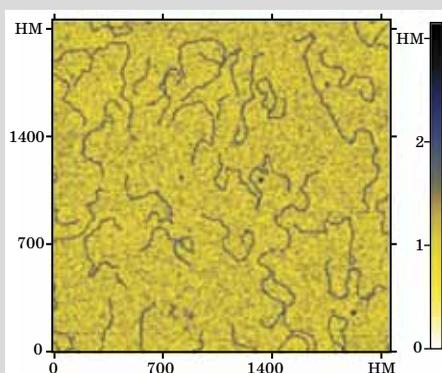
Везде, где от участников требуются согласованные действия, важна обратная связь. Пример – магазин. Чтобы понять, что, когда и почём продавать, нужно знать, что и когда понадобится покупателям и сколько они готовы платить. Например, если какой-то товар быстро разбирают, то надо завозить больше товара, а если он залёживается на полках, то меньше. С помощью такой обратной связи магазин постепенно находит оптимальное количество этого товара для продажи. Похожим образом регулируется цена: чем

Изображения СЗМ объединённой лаборатории зондовой микроскопии в МГУ

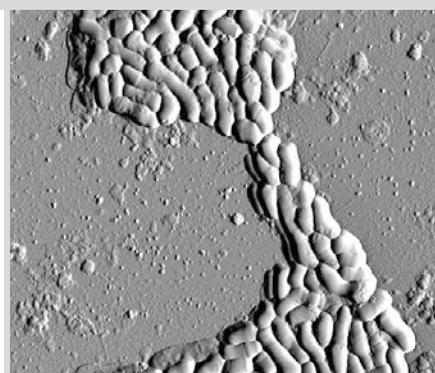
<http://www.nanoscopy.net>
<http://spm.genebee.msu.ru>



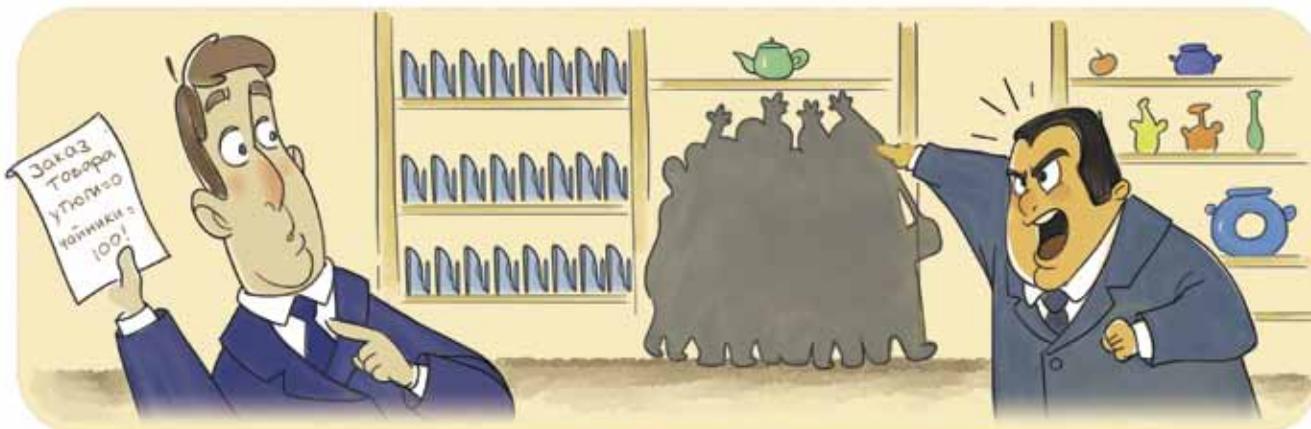
Человеческий волос



Молекулы ДНК



Бактерия *Helicobacter pylori* на слюде



охотнее покупают продукт, тем больше можно делать цену на него, но чем выше цена, тем меньше будут его покупать.

Пример 4. Микрофон + колонки = ...

Наверное, вы замечали, как иногда микрофоны «фонят»: при этом колонки громко пищат. Так получается из-за положительной обратной связи между микрофоном и колонками. Ведь микрофон «слышит» не только говорящего в него человека, но и результат своей работы – усиленный звук из колонок. Чем громче звучат колонки, тем более громкий звук возвращается в микрофон, заставляя колонки ещё сильнее повышать голос, а тот снова попадает в микрофон, и так далее. Если расположить микрофон близко к колонкам, даже тихие шумы усилятся до оглушительного писка. Здесь обратная связь названа положительной, поскольку увеличение сигнала увеличивает и выдаваемую громкость. Такая обратная связь делает систему неустойчивой.

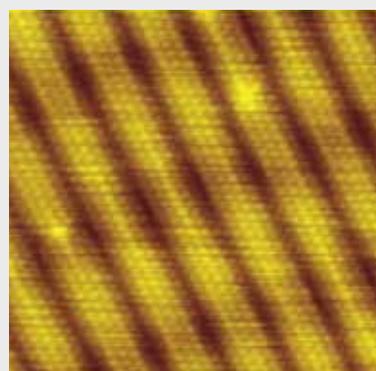
Пример 5. Крылатые ракеты

Крылатая ракета должна лететь по извилистой местности на малой высоте, огибая рельеф. Её можно назвать беспилотным самолётом-бомбой, а вместо пилота у неё – автоматика с отрицательной обратной связью. Едва ракета приблизится к земле, автоматика отруливает в обратную сторону, и наоборот. Благодаря этому ракета стабильно летит низко, но ни во что не врежется.

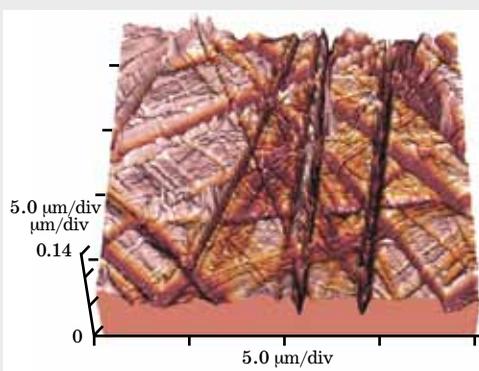
Пример 6. Зондовый микроскоп

Чтобы получить адекватное изображение, игла микроскопа должна располагаться на оптимальном расстоянии от исследуемой поверхности. Отодвинем её слишком далеко – резко снизится точность измерений, пододвинем слишком близко – рискуем испортить образец и саму иглу.

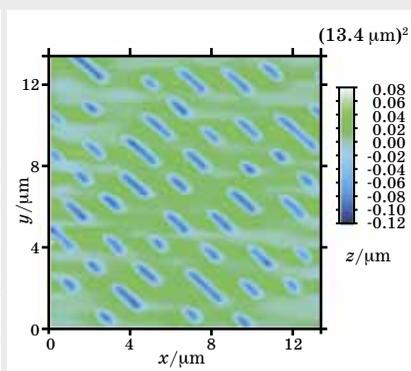
Обратная связь в микроскопе «следит» за тем, чтобы изгиб кантилевера постоянно был такой, будто игла только-только коснулась поверхности.



Монокристалл золота



Поверхность стекла



Запись на компакт-диске

Первое изображение получено на туннельном СЗМ, а два других – на атомно-силовом СЗМ



При малейшем отклонении образец автоматически пододвигается в обратную сторону.

Интересно, что микроскоп, прощупывая рельеф, запоминает в качестве результата не изгиб балки с иглой (он практически не меняется), а усилия мотора,двигающего зонд.

«Такой уж народ эти взрослые, им всегда нужно всё объяснять...»

Теперь обратимся к мировой литературе и вспомним сказку «Маленький принц», написанную для детей и взрослых французским лётчиком Антуаном де Сент-Экзюпери. Не случайно все иллюстрации к «Маленькому принцу» выполнил сам автор.

Посмотрите на рисунки 5 и 6. Глядя на рисунок 5, трудно себе представить, что на нём изображена не шляпа, а слон в удаве, но из поясняющего рисунка 6 всё становится понятно.

Сканирующая зондовая микроскопия не может заглянуть внутрь исследуемых

образцов, её удел – изучать поверхность. Зондовый микроскоп дал бы изображение, похожее на рисунок 5 (тут в роли образца выступает слон, а в роли микроскопа – удав). Но мы хотим понять, что же там внутри, и как можно точнее проследить исследуемую поверхность.

Что же нужно для этого? Посмотрите на рисунок 7. Глядя на него, многие, кто говорил, что на рисунке 5, изображена шляпа, уже засомневаются: «А шляпа ли это?» – и будут строить новые предположения, делать новые догадки. Но что изменилось? На рисунке 7 удав более плотно прилегает к съеденному им слону. Говоря иначе, лучше прослежена поверхность образца (слона) зондовым микроскопом (удавом), потому что лучше настроена обратная связь.

Кстати, с помощью «Маленького принца» можно познакомиться со многими непонятными и загадочными вещами, например, с таким понятием радиоэлектроники, как «чёрный ящик».

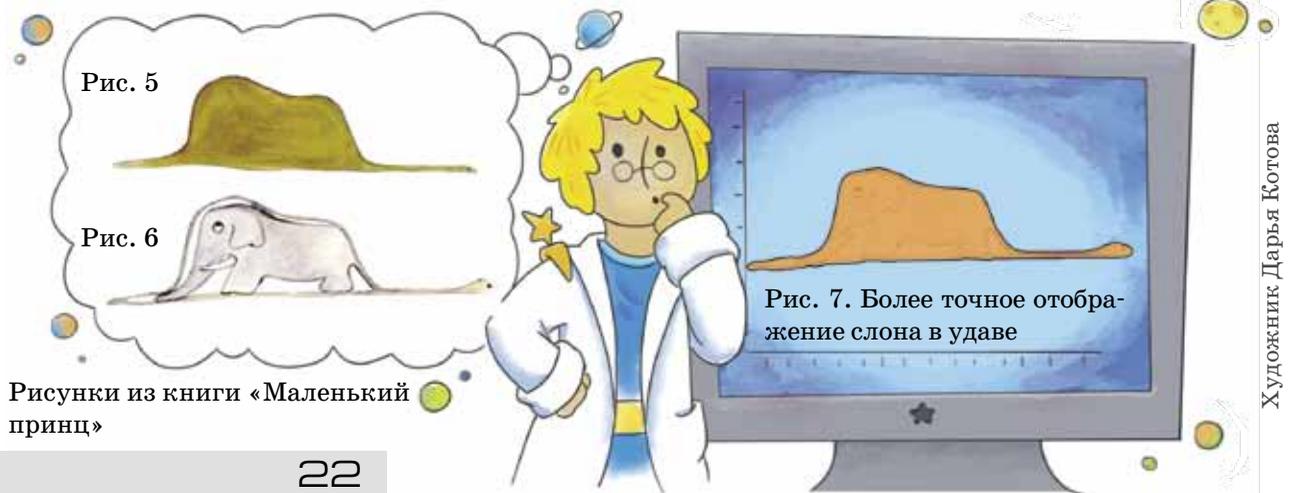


Рис. 5

Рис. 6

Рис. 7. Более точное отображение слона в удаве

Рисунки из книги «Маленький принц»