



ВЗГЛЯД В НАНОМИР: В КОНТАКТЕ LOOK INTO THE NANOWORLD: IN CONTACT

И.В.Яминский^{1,2,3,4}, д.ф.-м.н., проф. физического и химического факультетов МГУ имени М.В.Ломоносова, вед. научн. сотр. ИНЭОС РАН, директор Центра перспективных технологий, (ORCID: 0000-0001-8731-3947) / yaminsky@nanoscopy.ru

I.V.Yaminskiy^{1,2,3,4}, Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Prof. of Lomonosov Moscow State University, Physical and Chemical departments, Director of Advanced Technologies Center, Leading Sci. of INEOS RAS

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.2.136.141

Получено: 27.03.2021 г.

Как нам увидеть то, что недоступно человеческому глазу и даже не видно в самый лучший оптический микроскоп? Как увидеть атомы и молекулы? Как детально рассмотреть объекты живой природы масштаба нано в обычных условиях – на воздухе или в жидкости? На помощь к нам приходит атомно-силовой микроскоп. Мы поговорим о том, как он устроен, из чего состоит, как работает, как он получает изображения наномира.

How can we see something hidden to the human eye and is not even visible in the best optical microscope? How can we observe atoms and molecules? How to view the objects of wild nature of nanoscale in details under normal conditions, in air or in liquid? An atomic force microscope comes to help ing us. We will talk about how it is arranged, which it consists of how it works and how it gets images of the nanoworld.

Атомно-силовой микроскоп был изобретен в 1986 году Гердом Биннигом, Келвином Куэйтом и Кристофом Гербером [1]. Сейчас он стал самым главным и самым популярным инструментом в семействе сканирующих зондовых микроскопов. Всего лишь за 5 лет до этого события был изобретен первый из зондовых микроскопов – сканирующий туннельный микроскоп. В том же 1986 году Герду Биннигу, соавтору атомно-силового микроскопа, совместно с Хайнрихом Рорером была вручена Нобелевская премия по физике за изобретение туннельного микроскопа [2].

Атомно-силовой микроскоп появился как модификация туннельного микроскопа для того, чтобы измерить силы в туннельном контакте. А произойти это могло более 150 лет назад после изобретения Томасом Алвой Эдисоном фонографа, в котором движение иглы по рельефу поверхности преобразовывалось в звук. В атомно-силовом микроскопе зонд движется как в граммофонном проигрывателе, отслеживая все неровности, в результате чего получается траектория, повторяющая все изгибы образца. В результате движения иглы граммофона

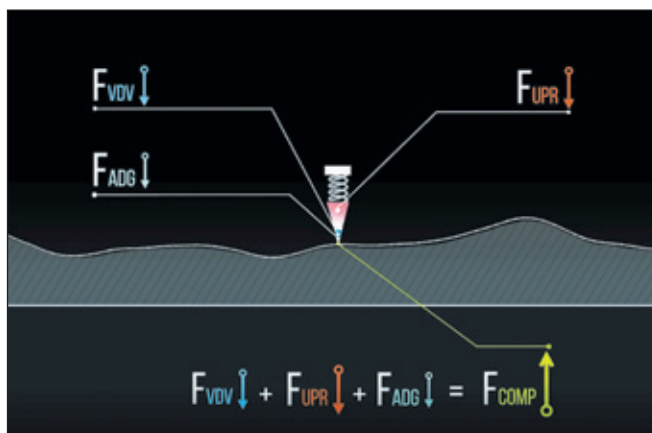


Рис.1. На зонд атомно-силового микроскопа действуют три силы притяжения: F_{VDV} – сила Ван-дер-Ваальса; F_{ADG} – сила адгезии; F_{UPR} – сила упругости, действующая со стороны консоли кантилевера, и одна сила отталкивания: реакция опоры, или контактная сила F_{COMP}

Fig.1. There are three forces of attraction acting on the atomic force microscope probe: F_{VDV} – Van der Waals force; F_{ADG} – adhesion force; F_{UPR} – force of elasticity, acting on the cantilever console, and a repulsion force: support reaction or contact force F_{COMP}

¹ МГУ имени М.В.Ломоносова, физический и химический факультеты, НИИ ФХБ имени А.Н.Белозерского МГУ Москва, Россия / Lomonosov Moscow State University, Physical and Chemical departments, A.N.Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology, Moscow, Russia.

² ООО НПП "Центр перспективных технологий", Москва, Россия / Advanced Technologies Center, Moscow, Russia.

³ ООО "Энергоэффективные технологии", Москва, Россия / Energy Efficient Technologies.

⁴ ИНЭОС РАН, Москва, Россия / INEOS RAS, Russia.

мы слышим мелодию, движение иглы атомно-силового микроскопа рождает изображение. Получая эти траектории одну за другой в атомно-силовом микроскопе, мы постепенно получаем карту неровностей всей сканируемой площади образца. Мы можем увидеть атомы на поверхности, молекулу ДНК, белки, вирусы, бактерии и даже отдельные клетки.

В атомно-силовом микроскопе в точке контакта "зонд – образец" возникают силы. Чтобы лучше понять действующие на зонд силы, представим, что зонд размещен на упругой пружинке и сканирует поверхность.

На малых расстояниях, около 10 нм, между всеми телами возникает заметная сила притяжения. Это сила Ван-дер-Ваальса. Она имеет электромагнитную природу: чем ближе к поверхности, тем больше значение данной силы. Для двух атомов или молекул энергия притяжения обратно пропорциональна 6-ой степени от расстояния между их центрами R , для силы получаем $F \sim 1/R^7$.

Если просуммировать все парные силы между молекулами зонда и образца, то мы определим

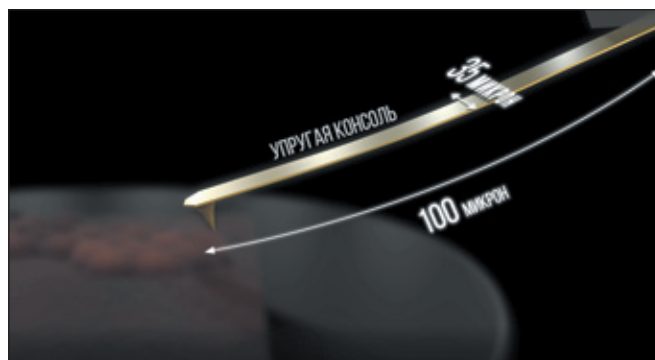


Рис.2. Изображения кантилевера атомно-силового микроскопа

Fig.2. Images of the atomic force microscope cantilever

силу Ван-дер-Ваальса и для этого случая. Когда зонд приходит в соприкосновение с поверхностью образца, сила Ван-дер-Ваальса принимает максимальное значение. При образовании контакта появляется дополнительная сила – сила адгезии. Эта сила может быть вызвана

The atomic force microscope was invented in 1986 by Gerd Binnig, Kelvin Quat and Christoph Gerber [1]. Now it has become the most important and most popular tool in the family of scanning probe microscopes. Just 5 years before this date, the first of the probe microscopes was invented – a scanning tunneling microscope. In the same 1986, Gerd Binnig, co-author of the atomic force microscope, together with Heinrich Rohrer, was awarded the Nobel Prize in Physics for invention of the tunneling microscope [2].

Atomic force microscope appeared as a modification of the tunneling microscope in order to measure forces in tunneling contact. It is interesting that this could have happened more than 150 years ago after invention of the phonograph by Thomas Alva Edison, where movement of the needle on the surface relief was converted into sound. In the atomic force microscope the probe moves like in a gramophone

player tracking all irregularities by a trajectory that repeats all the bends of the sample. As a result of movement of the gramophone needle we hear a melody, the movement of the atomic force microscope needle gives rise to an image. Getting these trajectories one after another in the atomic force microscope, we gradually get a map of the peculiarities of the entire scanned sample area. We can see atoms on the surface, DNA molecule, proteins, viruses, bacteria and even individual cells.

Forces arise at the point of the probe-sample contact in the atomic force microscope. In order to better understand the force acting on the probe, imagine that the probe is placed on an elastic spring and scans the surface.

At low distances about 10 nm a noticeable force of attraction arises between all bodies. This is the Van der Waals power. It has an electromagnetic nature: the closer to the surface, the greater the value of this force. For two atoms or molecules

the energy of attraction is inversely proportional to the 6th degree of the distance between their centers R , and for the force we obtain $F \sim 1/R^7$.

If you sum up all the pair forces between the probe molecules and the sample then we define the Van der Waals force for this case as well. When the probe comes in contact with the sample surface the Van der Waals power is maximum. An additional force appears during the formation of contact – the strength of adhesion. This force may be caused by various reasons. For example, the capillary forces arise. The force of adhesion can also appear due to the electrification of the surface of the probe and sample. This force can be observed: if a toy balloon rubs against one's hair, it is electrified and starts sticking to the surfaces. For stability of the atomic force microscope operation, the probe is additionally pressed to the sample. In this case, still another force acting on the probe arises – the force of elasticity.



Рис. 3. а – крыло самолета выполнено в виде кантилевера; б – кантилеверный мост в Санкт-Петербурге; с – чемпионка мира по фигурному катанию А.Трусова выполняет фигуру кантилевер

Fig.3. a – the wing of the aircraft is made in the shape of a cantilever; b – cantilever bridge in St. Petersburg; c – world figure skating champion A. Trusova performs a cantilever figure

различными причинами. Например, при конденсации паров в области контакта возникают капиллярные силы. Сила адгезии может быть также обусловлена электризацией поверхности зонда и образца. Эту силу можно пронаблюдать: если воздушный шарик потереть о волосы, он наэлектризуется и начнет прилипать к поверхностям. Для устойчивости работы атомно-силового микроскопа зонд дополнительно прижимают к образцу. В этом случае возникает еще одна действующая на зонд сила – сила упругости.

Итак, появились три силы, и все они воздействуют на зонд вниз. Но зонд не проваливается сквозь поверхность, значит, есть еще одна сила, которая уравнивает все три предыдущие. Эта контактная сила, или реакция опоры. Какова природа этой силы? Это самый непростой и загадочный вопрос атомно-силовой микроскопии.

So, there are three forces, and they all will press the probe down. But the probe does not fall through the surface, it means there is another force that balances all the three previous ones. This is a contact force or support reaction. What is the nature of this force? This is the most difficult and mysterious question of the atomic force microscopy.

Remember that the probe should be fixed on an elastic spring. As a rule, this spring is made in the form of an elastic cantilever – a beam fixed on one end. At its free end there is the probe. This design is called cantilever (Fig.2).

Cantilevers are used not only in the atomic force microscopy. In aircraft construction it is a plane wing, so Junkers from biplane moved to a monoplane (Fig.3a). Drawbridges in Saint-Petersburg are cantilever bridges (Fig.3b).

The element performed by the figure skating world champion A.Trusova is also a cantilever (Fig.3c).

During the scan, the probe slides over the sample surface (Fig.4a). How do we determine the trajectory of the probe? To do this, the light from the laser is focused on the cantilever free end, and a position of the reflected ray is determined using

Помните, что зонд должен быть закреплен на упругой пружинке. Как правило, такую пружинку делают в виде упругой консоли – балки, закрепленной с одной стороны. На ее свободном конце располагается зонд. Такая конструкция называется кантилевером (рис.2).

Кантилеверы есть не только в атомно-силовой микроскопии. В самолетостроении – это крыло самолета: так Юнкерс от биплана перешел к моноплану (рис.3а). Разводные мосты в Санкт-Петербурге – это кантилеверные мосты (рис.3б).

Фигура, которую выполняет чемпионка мира по фигурному катанию А.Трусова – это тоже кантилевер (рис.3с).

Во время сканирования зонд скользит по поверхности образца (рис.4а). Как нам определить траекторию зонда? Для этого свет от лазера фокусируют на кончик кантилевера, а положение

the photodetector. When the cantilever moves by dz value, the light spot on the photodiode is shifted to a significantly greater distance, which is by $2L/l$ times more. Here, L is a path of the reflected light, l is a length of the cantilever. Usually it is 1,000 times. It is for 100 microns cantilever, a distance from the cantilever to the photodiode is 5 cm. The optical system should register only microns if the relief changes in nanometers.

Photodiode has four segments – A, B, C, D (see Fig.4b). If you measure the total signal on all segments simultaneously, we get the intensity of the light falling

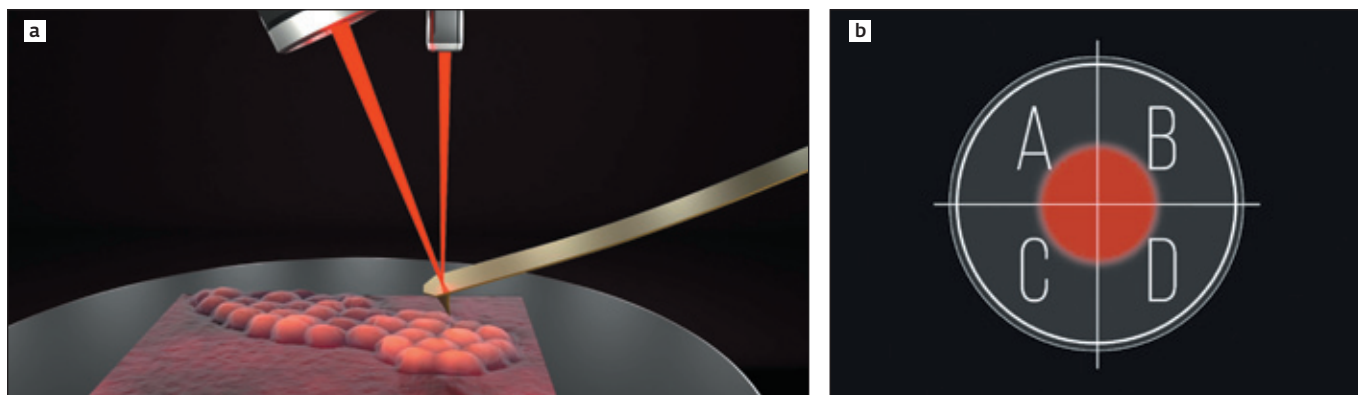


Рис.4. а – для регистрации положения кантилевера свет от лазера фокусируется на кончик кантилевера; по смещению отраженного луча в окне фотодиода регистрируют перемещение кантилевера по вертикали; б – сегменты фотодиода
 Fig.4. a – to register the cantilever position the light from the laser focuses on the free end of the cantilever; by displacement of the reflected beam in the photodiode window, the vertical movement of the cantilever is recorded; b – photodiode segments

отраженного луча определяют с помощью фотодетектора. Когда кантилевер перемещается на величину dz , пятно на фотодиоде смещается на существенно большее расстояние. В $2L/l$ раз больше. L – путь отраженного света, l – длина кантилевера. Обычно в 1000 раз больше. Это для кантилевера в 100 мкм и расстояния от кантилевера до фотодиода в 5 см. Оптическая система должна регистрировать всего лишь микроны, если перепады рельефа составляют нанометры.

У фотодиода четыре сегмента – А, В, С, D (рис.4б). Если замерить суммарный сигнал на всех диодах сразу, то мы получим интенсивность падающего на фотодиод света. При сканировании интенсивность

практически постоянна, а при настройке оптической системы мы добиваемся, чтобы интенсивность света на фотодиоде была максимальна.

Если кантилевер перемещается вверх-вниз, то пятно на фотодиоде также перемещается вверх-вниз. А значит сигнал $(A+B)-(C+D)$ указывает на высоту рельефа.

Также мы можем с помощью атомно-силового микроскопа измерить и силу трения, то есть фрикционные свойства поверхности. Сила трения направлена вдоль поверхности образца – горизонтально. Эта сила приводит к кручению кантилевера вокруг оси и смещению пятна на фотодиоде по горизонтали.

onto the photodiode. While scanning, the intensity is almost constant, and when setting up the optical system, we need to achieve that the intensity of light on the photodiode is maximum.

If the cantilever moves up and down, the spot on the photodiode is also moving up and down and therefore the signal $(A+B)-(C+D)$ indicates the height of the relief.

We can also measure the friction force by an atomic force microscope. Those are friction properties of the surface. The friction force is directed horizontally along the sample surface. This force leads to rotation the

cantilever around its axis and the horizontal shift of the light spot on the photodiode.

That is, the signal $(A+C)-(B+D)$ is nothing else but the friction force or the friction coefficient of the sample surface. In order to properly measure the friction, it is necessary that the direction of scanning is perpendicular to the longer axis of the cantilever. You need to remember this!

Hence, $A+B+C+D$ is the light intensity, $(A+B)-(C+D)$ – deflection of the cantilever and $(A+C)-(B+D)$ – friction.

The last two signals play an important role while scanning. We

will simply call them "deflection" and "friction".

Quite often, while scanning in the atomic force microscope we move the sample, not the probe. It is more convenient because the laser system is connected with the probe.

Therefore, the sample is placed on a piezoceramic manipulator, which must move the sample with an accuracy of at least 0.001 nm. It is 100 times less than the smallest atom of hydrogen. If so, then we can scan the relief of one atom.

In the atomic force microscope the feedback is used. If the relief has become higher, the sample is moved downward. As a result,



Рис.5. Схема обратной связи атомно-силового микроскопа с использованием ПИД-регулятора

Fig.5. Atomic power microscope feedback circuit with PID controller

То есть сигнал $(A+C)-(B+D)$ – есть ни что иное, как сила трения или коэффициент трения поверхности образца. Для правильного измерения силы трения необходимо, чтобы направление сканирования было перпендикулярно длинной оси кантилевера. Об этом надо помнить!

Итак,

$A+B+C+D$ – интенсивность света;

$(A+B)-(C+D)$ – отклонение кантилевера;

$(A+C)-(B+D)$ – трение.

Два последних сигнала играют важную роль при сканировании. Мы будем называть их "отклонение" и "трение".

Часто в атомно-силовом микроскопе при сканировании мы перемещаем образец, а не зонд. Так

бывает удобнее, поскольку с зондом связана лазерная система.

Поэтому образец размещают на пьезокерамический манипулятор, который должен перемещать образец с точностью как минимум до 0,001 нм. Это в 100 раз меньше, чем самый маленький атом – водород. А раз так, то мы можем просканировать рельеф одного атома.

В атомно-силовом микроскопе применяют обратную связь. Если рельеф стал выше, то образец перемещают пониже. В результате кантилевер по вертикали не перемещается и сила, с которой он давит на поверхность, остается постоянной. Таким образом, мы можем обеспечить деликатное сканирование с постоянной силой. Получается режим постоянной силы.

Как работает обратная связь? Если на склоне выступа зонд стал подниматься, то сигнал "отклонения" сразу скажет, что образец надо опустить. Для этого нужна прецизионная электроника. Сигнал с фотодиода $(A+B)-(C+D)$ поступает на чувствительный усилитель, он сравнивается с заранее выбранным значением (опорным значением), получается сигнал ошибки, он усиливается и подается на пьезоманипулятор в правильной полярности. Так, чтобы обратная связь была отрицательной. Такой регулятор называется пропорциональным.

Сигнал ошибки мы можем постоянно суммировать: ошибка то положительная, то отрицательная, и текущая сумма имеет определенное значение. Но если у нас есть маленькая ошибка, которую не может

the cantilever does not move vertically and the force of its pressure on the surface remains constant. Therefore, we can provide a delicate scanning at constant force. It means the constant force mode.

How does the feedback work? If the probe began to rise on the slope of the protrusion, the deflection signal immediately indicates that the sample should be moved downward. This requires precision electronics. The signal from the photodiode $(A+B)-(C+D)$ enters a sensitive amplifier where it is compared with the earlier preset value (so called reference value), an error

signal is obtained and is amplified and fed to a piezomanipulator in the correct polarity so that the feedback is negative. Such a regulator is called proportional regulator.

We can continuously summarise the error signal: the error varies from a positive value to the negative value and the current sum has a definite value. However, if we have a small error that a proportional regulator cannot track down then the amplified signal of the summarised error will return the probe into exactly defined position. It is an integral regulator

because the integral means a continuous summation.

If a sharp spike appears and the first two techniques do not help, then you need to measure a change in the error signal – its mathematical derivative, and in that case we will get a differential regulator.

Thus, we can build one regulator with three links and get a proportional-integral-differential regulator – PID controller.

PID regulators are used everywhere: for example, when flying a winged rocket above a rough terrain. The sensor records the height of the flight, and feedback and



отследить пропорциональный регулятор, то теперь усиленный сигнал просуммированной ошибки вернет зонд в точно определенную позицию. И это будет интегральный регулятор, ведь интеграл – это непрерывное суммирование.

А если появляется острый выступ и два первых приема не помогают, то нужно измерять изменение сигнала ошибки – его математическую производную, и мы получим дифференциальный регулятор.

Таким образом, мы можем построить один регулятор с тремя звеньями и получим пропорциональный интегральный дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор).

ПИД-регуляторы используются повсеместно: например, при полете крылатой ракеты по пересеченной местности. Датчик регистрирует высоту полета, а обратная связь и система регулирования держат выбранный курс ракеты.

А теперь вспомним наш вопрос: что это за контактная сила, которая удерживает образец на поверхности? Эта сила играет ключевую роль в атомно-силовой микроскопии. В первую очередь, нам бы хотелось контролировать и уменьшать именно ее, ведь она приложена в точке контакта или к тому атому, который располагается в вершине зонда. Если контактная сила велика, зонд и образец деформируются и мы начинаем видеть поверхность уже не так четко.

Это сила обменного взаимодействия, которая появляется из запрета или принципа Паули. В одной точке пространства не может быть

больше двух электронов, и эти два электрона должны иметь разный спин – момент количества движения.

Вы думаете, что этот принцип относится только к атомно-силовой микроскопии? Мы, наш стол, стул и сам микроскоп уже давно провалились бы сквозь пол, если бы этот принцип не работал во ВСЕХ случаях. Именно во всех.

Рассказ "ВЗГЛЯД в НАНОМИР: В контакте" можно смотреть и слушать в Интернете <https://youtu.be/RHiGj5EYlsg>. Там мы добавили анимацию и живую речь. Приятного и полезного просмотра.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Лондонского Королевского Общества № 21-58-10005, РФФИ, проект № 20-12-00389, РФФИ, проект № 20-32-90036.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch.** The Atomic Force Microscope, *Physical Review Letters*. 56 (9) (1986) 930–933. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
2. **Binnig G., Rohrer H.** Scanning tunneling microscopy, *IBM Journal of Research and Development*. 30 (4) (1986) 355–69.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

the adjustment system holds the selected rocket course.

And now let us recollect our question: what is this contact force that holds the sample on the surface? This force plays a key role in atomic force microscopy. First of all, we would like to control and reduce it, because it is applied at the point of contact or to the same atom which is located at the top of the probe. If the contact force is large, the probe and sample are deformed, and we begin to see the surface not so clear.

This is the force of exchange interaction that appears from

the Pauli exclusion principle. At one spatial point there can be not more than two electrons, and these two electrons must have different spin – the moment of the amount of movement.

Do you think this principle applies to atomic force microscopy only? We, our table, chair and the microscope itself would have long fallen through the floor if this principle would not work in ALL cases. Indeed, in all cases.

The story "Look into Nanoworld: In contact" you can watch and listen on the Internet link <https://>

youtu.be/rhigj5eyslsg. There we added animation and live speech. Pleasant and useful viewing!

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was completed with the financial support of the RFBR and the London Royal Society No. 21-58-10005, RNF, Project No. 20-12-00389, RFBR, Project No. 20-32-90036. ■

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.