



Получено: 29.04.2022 г. | Принято: 6.05.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.178.185>

Научная статья

МОДА НА ФЛИРТ МОДУ

И.В.Яминский^{1, 2, 3}, д.ф.-м.н., проф. МГУ им. М.В. Ломоносова, физический и химический факультеты, генеральный директор Центра перспективных технологий, директор Энергоэффективных технологий, ORCID: 0000-0001-8731-3947 / yaminsky@nanoscopy.ru

А.И.Ахметова^{1, 2, 3}, инженер НИИ ФХБ им. А.Н. Белозерского МГУ, ведущий специалист Центра перспективных технологий и Энергоэффективных технологий, ORCID: 0000-0002-5115-8030

Д.В.Корнилов^{1, 2}, инженер, ORCID:0000-0003-1989-668X

Аннотация. В лабораторных исследованиях с применением атомно-силового микроскопа наиболее широко используются контактный и резонансный режимы, позволяющие получать сканы за сравнительно малые времена. С другой стороны, их минусом является сложность контроля силового воздействия, что может привести к необратимым изменениям в морфологии образца. В особенности это критично при сканировании мягких сред, например бактерий, клеток, полимеров. В контактном режиме такое взаимодействие обусловлено также наличием сил трения, управлять величиной которых при сканировании поверхности образца весьма затруднительно. В резонансном режиме влияние сил трения нивелируется за счет вертикального движения зонда, однако высокая добротность колебаний кантилевера не позволяет контролировать силу его воздействия при резких перепадах рельефа наблюдаемой поверхности. Для преодоления этих препятствий нами был разработан режим деликатного и бережного сканирования поверхности, приоритетом которого является лишь легкое прикосновение к ней. Назван был нами такой режим флирт модой.

Ключевые слова: атомно-силовой микроскоп, ФемтоСкан X, пьезоманипулятор, контактный и резонансный режим, флирт мода, сканирующая зондовая микроскопия

Для цитирования: И.В. Яминский, А.И. Ахметова, Д.В. Корнилов. Мода на флирт моду. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 3-4. С. 178-185. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.178.185>

Received: 29.04.2022 | Accepted: 6.05.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.178.185>

Original paper

FASHION FOR THE FLIRT MODE

I.V.Yaminsky^{1, 2, 3}, Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Prof. of Lomonosov Moscow State University, Physical and Chemical departments, Director of Advanced Technologies Center, Director of Energy Efficient Technologies, ORCID: 0000-0001-8731-3947 / yaminsky@nanoscopy.ru

A.I.Akhmetova^{1, 2, 3}, Engineer of A.N. Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology, Leading Specialist of Advanced Technologies Center and of Energy Efficient Technologies, ORCID: 0000-0002-5115-8030

D.V.Kornilov^{1, 2}, Engineer, ORCID:0000-0003-1989-668X

Abstract. In the laboratory studies using an atomic force microscope, contact and resonance modes are the most widely used allowing acquisition of scans in relatively short times. On the other hand, their disadvantage is the difficulty of controlling the force impact, which can lead to irreversible changes in the morphology of the sample.

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

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

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



This is particularly critical when scanning soft objects such as bacteria, cells, and polymers. In the contact mode this interaction occurs also due to frictional forces which magnitude is difficult to control when scanning the sample surface. In the resonance mode the influence of frictional forces is smoothed out by vertical motion of the probe; however, high quality of the cantilever oscillations does not allow controlling its force at sudden differences in topography of the observed surface. In order to overcome these obstacles, we have developed a mode of delicate and gentle surface scanning, which employs a light touch to the surface only. We have named this mode as flirt mode.

Keywords: atomic force microscope, FemtoScan X, piezo manipulator, contact and resonance mode, flirt mode, scanning probe microscopy

For citation: I.V. Yaminsky, A.I. Akhmetova, D.V. Kornilov. Fashion for the Flirt Mode. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 3–4. PP. 178–185. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.178.185>

ВВЕДЕНИЕ

Название на английском языке – flirt mode. Флирт мода реализована в быстродействующем атомно-силовом микроскопе ФемтоСкан X с использованием программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Причем осознанный выбор сделан именно на ПЛИС, а не на микроконтроллере. Анализ ситуации показывает, что сложность алгоритмов управления и передачи данных фактически навязывает использование процессора как центрального компонента блока управления сканирующего зондового микроскопа. Отсюда, казалось бы, следует очевидное решение – использовать микроконтроллер в качестве аппаратной платформы. Благодаря архитектуре, основанной на процессоре, легкости программирования и доступности микроконтроллеры нашли широкое применение в промышленности и производстве массовой продукции.

Однако микроконтроллер исполняет программу последовательно, в режиме "одна инструкция за один такт", и не может обрабатывать несколько сигнальных соединений сразу. Этот фактор вместе с необходимостью обслуживать большое количество устройств создает в системе на базе микроконтроллера "бутылочное горлышко", примером которого может служить необходимость запуска нескольких процессов, часть из которых может исполняться лишь по выполнении определенного условия, в то время как другая могла бы делать это параллельно, "на фоне". Необходимость последовательного исполнения приводит к уменьшению скорости работы системы, а значит и к ухудшению качества получаемых результатов при сканировании.

К счастью, для сложных задач, требующих высокой производительности, параллельности исполнения и многоканальности, а именно такой задачей является разработка системы контроля и обработки данных микроскопа, существуют программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Они позволяют непосредственно из логических ячеек (LUTs) на одном кристалле сформировать и процессор,

INTRODUCTION

The name of this mode in English is flirt mode. Flirt mode is implemented in the fast atomic force microscope FemtoScan X using a programmable logic device (PLD). The deliberate choice is accomplished with the aid of a PLD, not a microcontroller. Analysis of the situation shows that the complexity of control and data transfer algorithms actually imposes the use of a processor as a central component of the scanning probe microscope control unit. Hence, the seemingly obvious solution is to use a microcontroller as a hardware platform. Thanks to their processor-based architecture, ease of programming and affordability, microcontrollers have found widespread use in industry and mass-production.

However, the microcontroller executes a program sequentially, in a "one instruction per clock cycle" mode, and cannot handle multiple signal connections simultaneously. This fact, together with the need to handle a large number of devices, creates a "bottleneck" in a microcontroller-based system, exemplified by the need to run several processes; some of them can only be executed when a certain condition is met while the others can be executed in parallel. It reduces the speed of the system and, hence, the quality of the scanning results.

Fortunately, programmable logic devices (PLDs) are available for complex tasks requiring high performance, parallel execution and multi-channel capability, such as the microscope control and data processing development. They allow of forming, directly from logic cells (LUTs) on one crystal, both a processor which is carrying out realization of high-level control algorithms of microscope modules, data processing, and low-level modules necessary to form the control signals of DAC, ADC, a frequency generator and other devices. This approach offloads the CPU, parallels the execution of microscope electronics tasks, and reduces the number of external signal connections and components of the device, thus increasing system performance. The greater programming flexibility and lack of a fixed command structure, like in microcontrollers, allows for more complex signal processing with the PLD, while the ability to re-flash enables expansion

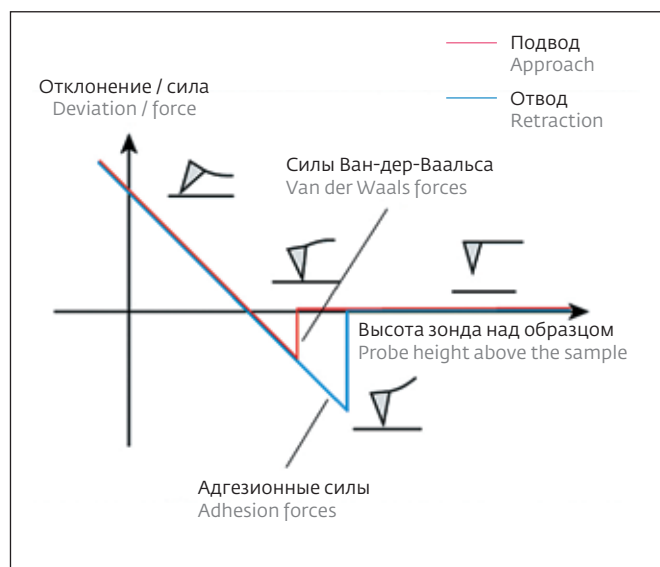


Рис.1. Типичный вид силовых кривых в АСМ измерениях
Fig.1. Typical appearance of force curves in AFM measurements

осуществляющий реализацию высокоуровневых алгоритмов управления модулями микроскопа, и обработку данных, и низкоуровневые модули, необходимые для формирования управляющих сигналов ЦАП, АЦП, генератора частоты и прочих устройств. Такой подход разгружает центральный процессор, распараллеливает выполнение задач электроники микроскопа, а также позволяет сократить число внешних сигнальных соединений и компонентов в устройстве, повышая таким образом производительность системы. Также большая гибкость в программировании и отсутствие фиксированной системы команд, как в микроконтроллерах, позволяет с помощью ПЛИС осуществлять более сложную обработку сигналов, а возможность перепрошивки позволяет расширять систему без замены процессорного устройства, существенно экономя денежные средства. Таким образом, несмотря на более высокую стоимость и необходимость в более трудоемком процессе программирования, упомянутые выше положительные стороны делают систему на основе ПЛИС более оптимальным решением в долгосрочной перспективе.

Именно такой путь и был выбран нами вначале при разработке сканирующего зондового микроскопа "ФемтоСкан X" и в дальнейшем при реализации деликатного режима сканирования - флирт моды.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ФЛИРТ МОДЫ

В сканирующем зондовом микроскопе "ФемтоСкан X" [1] для слежения за положением

without replacing the CPU, saving significant amount of money. Thus, despite the higher cost and the need to initiate the time-consuming programming process, the positive aspects mentioned above make a PLD-based system the better solution in the long run.

That was the way we first chose to develop a FemtoScan X scanning probe microscope and, later, to implement a delicate mode of scanning - the flirting mode.

DESCRIPTION OF THE FLIRT MODE OPERATION

The FemtoScan X scanning probe microscope [1] makes use of an optical circuit to track the cantilever position during scanning. The laser beam, after reflection from the cantilever surface, falls on a photodiode, which signal corresponds to the cantilever bend.

Firstly, let us consider a process of bringing the cantilever to a sample surface. In the ideal case at first, when the probe is retracted from the sample, a signal from the photodiode that corresponds to the cantilever deflection (we will call it deflection) remains constant (Fig.1). Then, when a cantilever is lowered, in the simplest case there is a peak or pit corresponding to the Van der Waals interaction between the needle and the sample. Then the signal begins to rise linearly with the cantilever bending longitudinally. Correspondingly, at the reverse stroke the pulls away and the deflection signal reaches its stationary value.

In reality, the situation is somewhat more complicated. Firstly, the signal from the photodiode can fluctuate during the feeding process due to thermal movement of a cantilever, noise in the electrical circuit or other factors (Fig.2). Secondly, the sloping parts of the power curves may not coincide due to plastic deformation of the sample. Third, when the probe detaches from the surface, oscillations can be observed, which can be additionally analyzed, but it is also possible to ignore them by quickly lifting the probe in order to save scanning time and wait for some time in the upper point of the movement trajectory until the oscillations subside already after retraction. Thus, the scanning mode must be designed to take all these features into account.

Let us describe the scanning process in the flirt mode (Fig.3). Further, for the sake of convenience, it will be described in the sample reference system, i.e. as if the probe is moving, however, it is necessary to remember that in FemtoScan X scanning probe microscope it is actually the sample that is moving. This is done in order not to disturb the precise alignment of the laser beam. At the beginning of scanning a probe is smoothly brought to the first point on the sample surface by means of a piezo manipulator (it is supposed that the sample is in the height range accessible to the piezo manipulator, and in this case the height difference of its surface points is not too big and allows only scanning of



кантилевера при сканировании используется оптическая схема. Лазерный луч после отражения от поверхности кантилевера попадает на фотодиод, сигнал с которого соответствует изгибу кантилевера.

Рассмотрим сначала процесс подвода кантилевера к поверхности образца. В идеальном случае в начале, когда зонд находится вдали от образца, сигнал с фотодиода, соответствующий отклонению кантилевера (будем называть его deflection) остается постоянным (рис.1). Затем, при опускании кантилевера, в простейшем случае наблюдается пик или яма, соответствующая Ван-дер-Ваальсову взаимодействию между иглой и образцом. После сигнал начинает линейно расти с продольным изгибом кантилевера. Соответственно, при обратном ходе сигнал линейно падает, пока силы адгезии удерживают иглу у поверхности. Затем она отрывается, и сигнал отклонения снова выходит на стационарное значение.

В реальности картина выглядит несколько сложнее. Во-первых, в процессе подвода сигнал с фотодиода может флуктуировать из-за теплового движения кантилевера, шумов в электрической цепи или других факторов (рис.2). Во-вторых, наклонные части силовых кривых могут не совпадать из-за пластической деформации образца. В-третьих, при отрыве зонда от поверхности могут наблюдаться колебания, которые можно дополнительно анализировать, но можно и не обращать на них внимания, быстро поднимая зонд с целью экономии времени сканирования, и ждать некоторое время в верхней точке траектории, пока колебания не затухнут уже после отвода. Таким образом, режим сканирования нужно строить так, чтобы учесть все эти особенности.

Опишем процесс сканирования в флирт режиме (рис.3). Далее для удобства он будет описан в системе отсчета образца, то есть как будто бы перемещается зонд, однако необходимо помнить, что в сканирующем зондовом микроскопе "ФемтоСкан X" на самом деле перемещается именно образец. Делается это для того, чтобы не возмущать прецизионную настройку лазерного луча. В начале сканирования зонд плавно подводится к первой точке на поверхности образца с помощью пьезоманипулятора (предполагается, что образец находится в диапазоне высот, доступных для пьезоманипулятора, и при этом перепад высот точек его поверхности в области сканирования не слишком велик и позволяет сканировать кадр лишь с помощью пьезоманипулятора). Для уменьшения влияния различных шумов сигнала с фотодиода при его измерении в процессе подвода используется усреднение по нескольким значениям.

При достижении сигналом с фотодиода заранее выбранного порогового значения регистрируется положение образца по вертикали. При

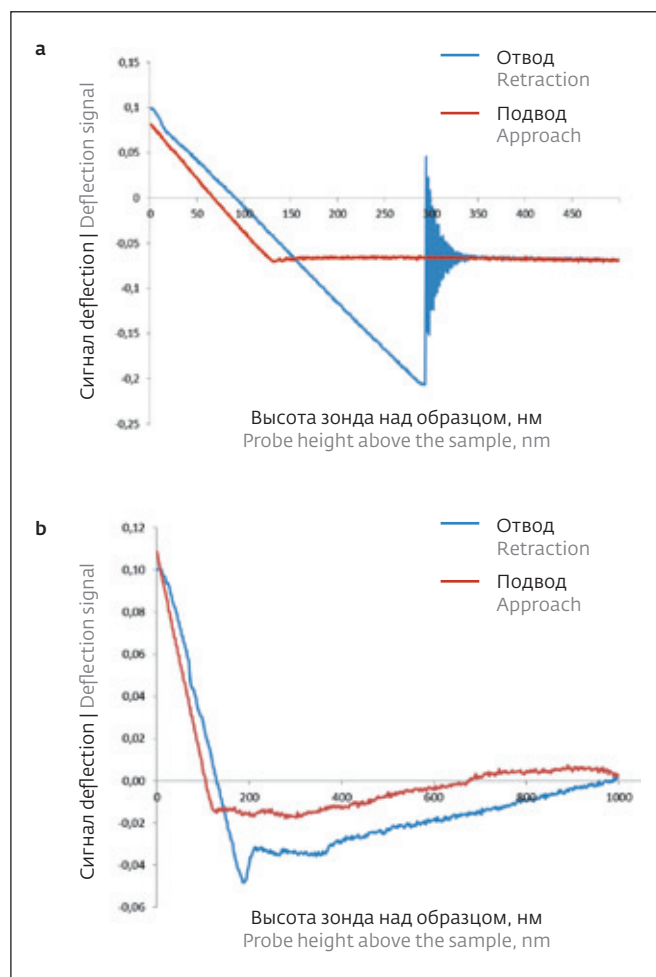


Рис.2. Силовые кривые, полученные в измерениях с (a) *Escherichia coli* и (b) 1,4-цис-полиизопреном (ластик)
 Fig.2. Force curves obtained at measurements with (a) *Escherichia coli* and (b) 1,4-cis-polyisoprene (eraser)

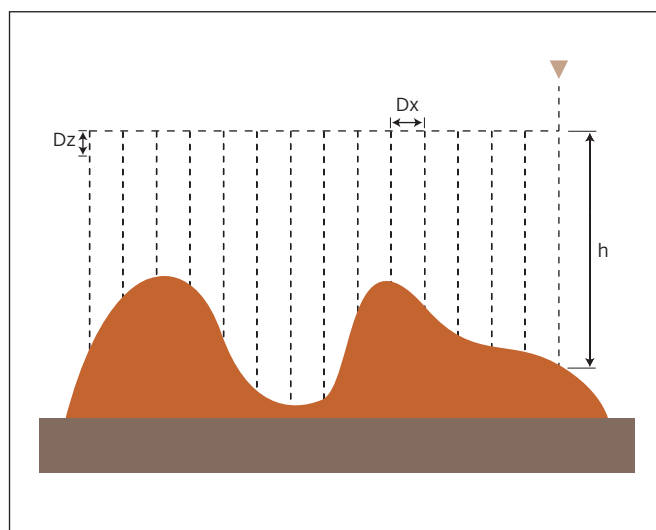


Рис.3. Траектория зонда в флирт режиме
 Fig.3. Probe trajectory in flirt mode

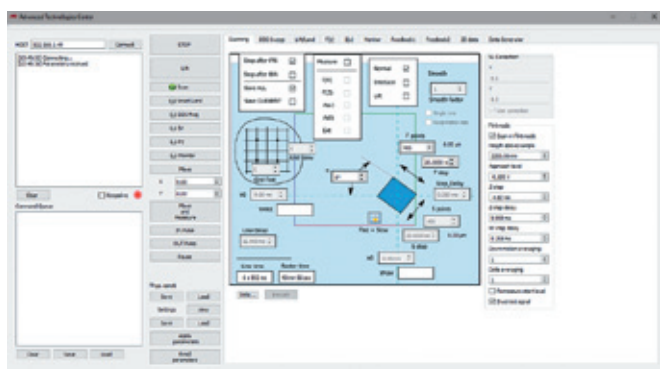


Рис.4. Обзорный вид вкладки Scanning программы-клиента "ФемтоСкан X"

Fig.4. Overview of the Scanning tab of the FemtoScan X client software

этом мы можем остановиться в процессе подвода в любой момент, например при Ван-дер-Ваальсовом взаимодействии или где-то раньше на кривой, если в системе действуют электростатические силы, а также можем контролировать задаваемый уровень силы взаимодействия зонд-образец, что, например, недостижимо в резонансном режиме, так как в нем кантилевер колеблется в условиях механического резонанса. Таким образом регистрируется первая точка поверхности, после чего зонд отводится на высоту h . При отводе можно анализировать колебания кантилевера, возникающие при отрыве зонда от поверхности. После отвода зонд смещается в плоскости X-Y к следующей позиции в кадре, с которой начнется новый подвод к образцу. При этом можно задать время ожидания в данной точке для того, чтобы колебания кантилевера успели затухнуть перед началом нового движения к поверхности. Итак, процесс подвод-отвод-смещение повторяется во всех следующих точках кадра, пока он не будет снят целиком.

Таким образом, по сравнению с контактными и резонансными режимами флирт мода обеспечивает более точный контроль сил воздействия на образец, так как оператор сам определяет, на какой части силовой кривой контакт зонда с образцом должен быть зафиксирован. Эта особенность разработанного режима крайне полезна для сканирования мягких объектов, например бактерий и клеток крови, чтобы избежать их деформаций и необратимых изменений в морфологии исследуемых объектов.

Упомянем некоторые аналоги разработанного режима. К ним можно отнести PeakForce Tapping™, в котором контакт с образцом отрабатывается петлей обратной связи, и ringing mode [2], в котором анализируются колебания кантилевера после



Рис.5. Область параметров флирт режима: выбор начального уровня высоты расположения кантилевера, порог для остановки, величина шага по оси Z, время ожидания в верхнем положении кантилевера, количество отсчетов при усреднении во время движения зонда вниз, число отсчетов усреднения при измерении данных

Fig.5. Flirt mode parameter area: selection of initial cantilever height level, threshold for stopping, step value, waiting time at top cantilever position, number of counts when averaging during downward probe movement, number of counts when probe is brought to sample

the frame by means of the piezo manipulator). To reduce influence of different signal noise from the photodiode when measuring it during the approach process, averaging over several values is used.

When the signal from the photodiode reaches a pre-selected threshold value, the vertical position of the sample is recorded. In doing so, we can stop the approach process at any point, e.g. during Van der Waals interaction or somewhere earlier on the curve if electrostatic forces are acting in the system, and we can also control a given level of probe-sample interaction force, which is, for example, unattainable in the resonance mode, as the cantilever oscillates under mechanical resonance conditions. Thus, the first surface point is recorded and afterwards the probe is moved to height h . When retracting, we can analyse cantilever oscillations that occur when the probe pulls away from the surface. After retracting, the probe moves in the X-Y plane to the next position in the frame at which a new approach to the sample will begin. It is possible to set a waiting time at this point so that the cantilever oscillations have time to fade before beginning to move to a new point. This sequence of the approach-release-displacement is repeated at all subsequent points in the frame until the entire frame has been shot.



Таблица 1. Параметры флирт моды

Table 1. Flirt mode parameters

Название опции или параметра Option or parameter name	Краткое описание Brief description
Height above sample	Высота отвода зонда h относительно первой точки поверхности образца. Если задать больше, чем может отвести пьезоманипулятор, зонд будет отводиться на максимальную высоту Probe retraction height h in relation to the first point of the sample surface. If you pre-set more than the piezo manipulator can deflect, the probe will retract to the maximum height
Approach level	Значение сигнала с фотодиода deflection, при достижении которого регистрируется подвод The signal value from the deflection photodiode at destination of which the approach is recorded
Z step	Шаг зонда dz по оси OZ. Должен быть отрицателен Probe step dz in the OZ axis. Must be negative
Z step delay	Задержка после каждого шага по Z Delay after each Z step
XY step delay	Задержка после каждого шага в плоскости XY. Нужна для затухания колебаний кантилевера, в особенности полезна при включенной опции Remeasure start level для переизмерения нуля сигнала с фотодиода Delay after each step in the XY plane. Required to attenuate cantilever oscillations; particularly useful when the Re-measure start level option is enabled to re-measure the zero signal from the photodiode
Down motion averaging	Количество значений, по которым усредняется измерение сигнала с фотодиода при подводе The signal from photodiode is averaged by a number of measured values
Data averaging	Количество значений, по которым усредняется измерение высоты и других данных, когда зонд уже подведен к образцу This is a number of values by which the height measurements and other data are averaged when the probe has been already brought to the sample
Re-measure start level	Если опция включена, перед началом каждого подвода зонда будет переизмеряться ноль сигнала с фотодиода, от которого будет отсчитываться Approach level. Если опция выключена, для регистрации подвода используется непосредственно само значение Approach level If this option is enabled, before each probe starts to approach, the photodiode zero from which the Approach level is counted will be re-measured. If this option is disabled, the Approach level itself is used to record the approach
Inverted signal	Если опция включена, система будет ожидать убывание, а не рост сигнала с фотодиода при сближении образца и зонда If this option is enabled, the system will expect the signal from the photodiode to decrease, not increase, as the sample and probe move closer together

отрыва. Из-за более сложной обработки данных время сканирования в этих режимах в среднем несколько больше, чем в флирт моде.

ПАРАМЕТРЫ ФЛИРТ МОДЫ

Рассмотрим специфичные для режима параметры сканирования (рис.4 и 5). Подробное описание параметров флирт моды приведен в табл.1.

СКАНИРОВАНИЕ В ФЛИРТ МОДЕ

Для демонстрации возможностей и преимуществ флирт моды был выбран образец кристаллов йода на поверхности слюды. Йод был выбран в качестве

Thus, as compared to the contact and resonance modes, the flirt mode provides more precise control of the forces acting on the sample, because the operator himself determines at which part of the force curve the probe-sample contact should be fixed. This feature of the developed mode is extremely useful for scanning soft objects, such as bacteria and blood cells, to avoid their deformations and irreversible changes in morphology of the studied objects.

Let us mention some analogues of the developed mode. These include PeakForce Tapping™, where the sample contact is handled by a feedback loop, and ringing mode [2] where cantilever oscillations after

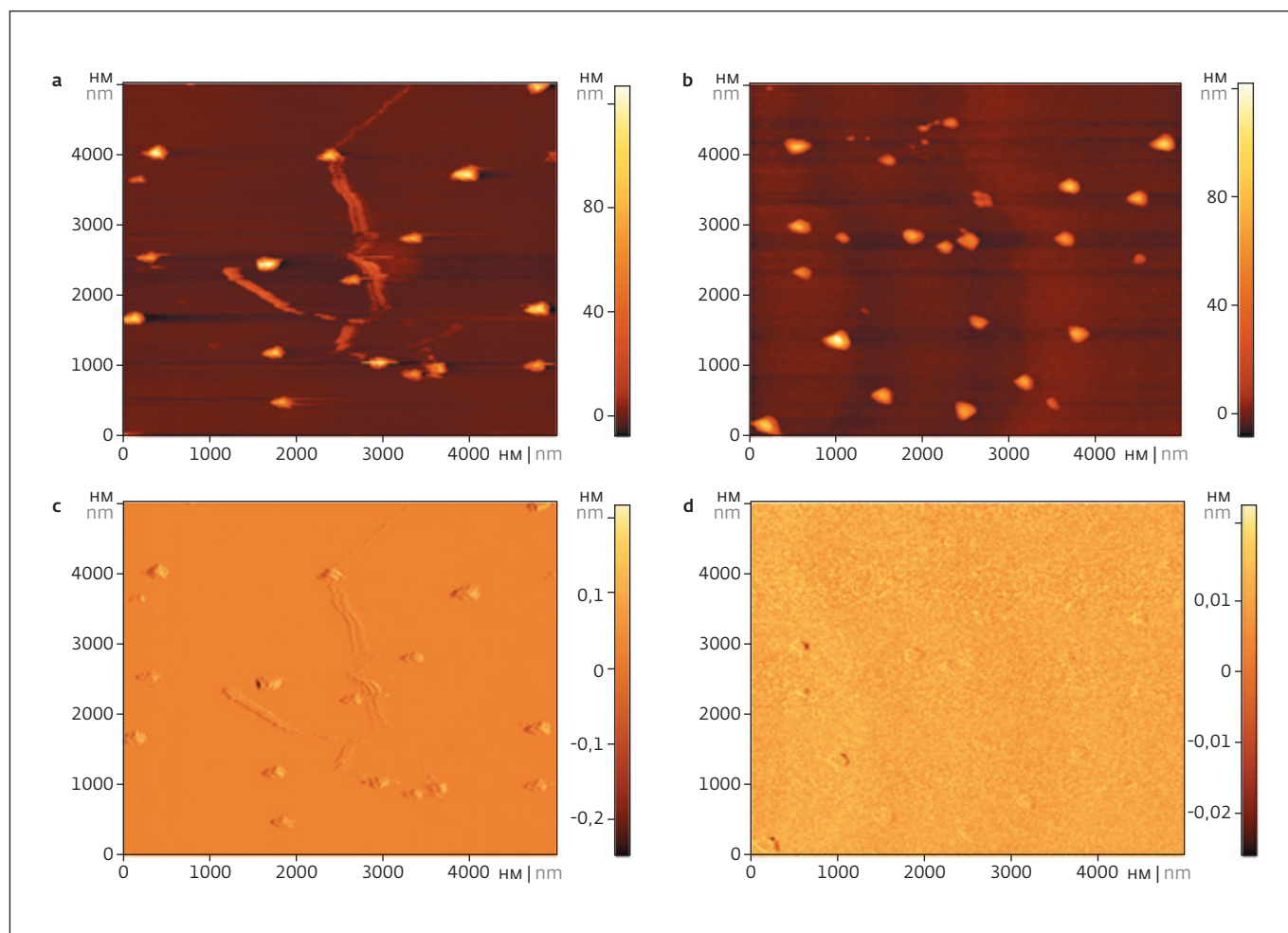


Рис.6. Результаты сканирования кристаллов йода. а – контактный режим, канал высот; б – флирт режим, канал высот; с – контактный режим, канал deflection. $\sigma = 1,3 \times 10^{-2}$ В; д – флирт режим, канал deflection. $\sigma = 3,5 \times 10^{-3}$ В

Fig.6. Results of iodine crystal scanning. a – contact mode, height channel; b – flirt mode, height channel; c – contact mode, deflection channel. $\sigma = 1.3 \times 10^{-2}$ V; d – flirt mode, deflection channel. RMS = 3.5×10^{-3} V

хрупкого материала для сравнения воздействия кантилевера в различных режимах. Сравнение проводилось для контактного режима и флирт моды. Для контактного режима были подобраны значения звеньев обратной связи, дающие наиболее качественный результат скана. По результатам сканирования видно, что в контактном режиме кристаллы были смещены зондом в процессе сканирования, в то время как в флирт режиме они остались на месте (рис.6).

Показательным критерием для оценки качества сканирования служит сигнал deflection. При идеальной обратной связи этот сигнал должен стремиться к нулю. Отклонения этого сигнала указывают на ошибки в цепи обратной связи. Величину сигнала обратной связи можно оценивать по таким параметрам, как размах значений и среднеквадратичное отклонение. Из сравнения данных

detachment are analyzed. Because of the more complex data processing, the average scanning time in these modes is slightly longer than in the flirt mode.

FLIRT MODE PARAMETERS

Let us consider the scanning parameters specific for the flirt mode (Fig.4, Fig.5). The detailed description of the flirt mode parameters is brought together in Table 1.

SCANNING IN FLIRT MODE

A sample of iodine crystals on the mica surface was chosen to demonstrate the capabilities and benefits of the flirt mode. Iodine was chosen as the brittle material to compare the effects of the cantilever in different modes. The comparison was made for the contact mode and the flirt mode. For the contact mode the values of the feedback links were chosen to give the best scanning result. It can be seen



рис.6с и 6d видно, что общий размах значений сигнала deflection для контактного режима примерно в 10 раз больше, чем для флирт моды. Сильно отличаются также и среднеквадратичные отклонения: в контактном режиме $\sigma = 1,3 \times 10^{-2}$ В, во флирт режиме $\sigma = 3,5 \times 10^{-3}$ В.

ВЫВОДЫ

В данной работе приведен лишь один из возможных наглядных примеров, когда флирт мода дает преимущество при исследовании объектов нанометрового размера. Основные достоинства флирт моды проявляются при изучении мягкой материи – живых клеток и тканей, полимерных гелей, желеобразных материалов и многих других различных систем и объектов.

В настоящей публикации представлен простейший вариант реализации флирт моды. Другие варианты ее исполнения могут дополнительно включать различные модуляционные методики, измерения на нескольких частотах, статистический анализ силовых кривых по совокупности параметров и многое другое.

Флирт мода, равно и как сама сканирующая зондовая микроскопия, находится в состоянии непрерывного усовершенствования. И, конечно, это не просто мода на флирт моду, а устойчивый интерес к ней и ее успешное применение в исследованиях живой природы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Лондонского Королевского Общества № 21-58-10005, РФФИ, проект № 20-32-90036. Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям, проект № 71108, договор 0071108. Работа выполнена при содействии компании ООО "Эндор" (Москва).

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Filonov A., Savinov S., Sinitsyna O., Meshkov G., Yaminsky I. FemtoScan X is a new scanning probe microscope. NANOINDUSTRY. 2012. No. 3. PP. 48–49.
2. Dokukin M.E., Sokolov I. Nanoscale compositional mapping of cells, tissues, and polymers with ringing mode of atomic force microscopy. Scientific Reports. 2017. No. 7. P. 11828. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12032-z>

from the scanning results that in the contact mode most crystals were shifted by the probe during scanning, while in the flirt mode they remained in place (Fig.6).

The deflection signal is an indicative criterion for judging quality of the scan. Under perfect feedback this signal should tend to zero. Deviations in this signal indicate errors in a feedback loop. Magnitude of the feedback signal can be estimated from such parameters as range and root-mean-square deviation. From a comparison of the data in Figures 6c and 6d, it can be seen that the overall magnitude of the deflection signal for the contact mode is about 10 times greater than for the flirt mode. The RMS deviations are also very different: in the contact mode $RMS = 1.3 \times 10^{-2}$ V and in the flirt mode $RMS = 3.5 \times 10^{-3}$ V.

CONCLUSIONS

This paper contains just one possible illustrative example where the flirt mode has an advantage for studying the nanometre-sized objects. The main advantage of the flirt mode becomes evident in the study of soft matter – living cells and tissues, polymer gels, jelly-like materials and many other various systems and objects.

This publication presents the simplest implementation of the flirt mode. Its other versions may additionally include various modulation techniques, measurements at multiple frequencies, statistical analysis of power curves by a set of parameters, and much more.

The flirt mode, as well as the scanning probe microscopy itself, is being improved continuously. Certainly, it is not just a fashion to use the flirt mode but a sustained interest in it and its successful application in wildlife research.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was completed with the financial support of the RFBR, the London Royal Society No. 21-58-10005, RFBR, Project No. 20-32-90036, and from the Foundation for the Promotion of Innovation, Project No. 71108, Agreement 0071108, and with the support of Endor LLC, Moscow.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU. ■

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.