



Получено: 16.03.2022 г. | Принято: 21.03.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.2.140.143>

Научная статья

СИЛА СКАНИРУЮЩЕГО СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

О.В.Синицына¹, к.х.н., науч. сотр., ORCID: 0000-0003-3381-6156

И.В.Яминский^{2, 3, 4}, д.ф.-м.н., проф. МГУ имени М.В. Ломоносова, физический и химический факультеты, генеральный директор Центра перспективных технологий, директор Энергоэффективных технологий, ORCID: 0000-0001-8731-3947 / yaminsky@nanoscopus.ru

Аннотация. У атомно-силового микроскопа есть и другое название – сканирующий силовой микроскоп. При получении изображений с его помощью необходимо использовать обратную связь для контроля силы взаимодействия между зондом и образцом. Как правило, ее нужно поддерживать на минимальном значении, чтобы не деформировать образец и зонд в процессе измерений. Напротив, в нанолитографии и наноиндентировании следует прилагать большую силу, чтобы получить четкий рисунок на поверхности. В данной статье рассматривается, какие силы возникают и сколько энергии затрачивается при возникновении типичного дефекта в виде шестиконечной звезды на графите.

Ключевые слова: атомно-силовой микроскоп, сканирующий силовой микроскоп, силовая кривая, графит, дефекты

Для цитирования: Синицына О.В., Яминский И.В. Сила сканирующего силового микроскопа. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 2. С. 140–143. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.2.140.143>

Received: 16.03.2022 | Accepted: 21.03.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.2.140.143>

Original paper

THE POWER OF A SCANNING FORCE MICROSCOPE

O.V.Sinitsyna¹, Cand. of Sci. (Chemical), Researcher, ORCID: 0000-0003-3381-6156

И.В.Яминский^{2, 3, 4}, 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@nanoscopus.ru

Abstract. The atomic force microscope has still another name – the scanning force microscope. When imaging with it, feedback must be used to control the interaction force between the probe and the sample. Generally, it must be kept at a minimum value so as not to deform the sample and probe during measurements. In contrast, in nanolithography and nanoindentation a large force must be applied to produce a clear pattern on the surface. In this paper we consider the forces that are generated and how much energy is expended when a typical defect in the form of a six-pointed star on graphite occurs.

Keywords: atomic force microscope, scanning force microscope, force curve, graphite, defects

For citation: Sinitsyna O.V., Yaminsky I.V. The power of a scanning force microscope. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 2. PP. 140–143. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.2.140.143>

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН), Москва, Россия / A.N.Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS), Moscow, Russia

² МГУ имени М.В.Ломоносова, физический и химический факультеты, Москва, Россия / Lomonosov Moscow State University, Physical and Chemical departments, Moscow, Russia

³ ООО НПП "Центр перспективных технологий", Москва, Россия / Advanced Technologies Center, Moscow, Russia

⁴ ООО "Энергоэффективные технологии", Москва, Россия / Energy Efficient Technologies, Moscow, Russia

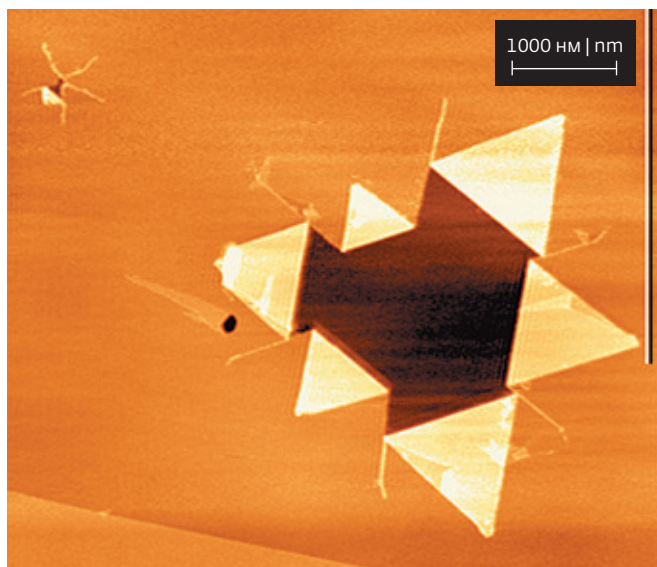


Рис.1. Шестиконечная звезда на поверхности графита. Изображение получено на микроскопе "ФемтоСкан" (Центр перспективных технологий, Россия) и обработано в программном обеспечении "ФемтоСкан Онлайн" [2]

Fig.1. A six-pointed star on the surface of graphite. The image was taken with a FemtoScan microscope (Advanced Technologies Center, Russia) and processed in FemtoScan Online software [2]

ВВЕДЕНИЕ

Согласно одной из гипотез, фигура в виде звезды образуется при скалывании графита в местах, где есть дефекты, связывающие углеродные слои между собой. Упругая энергия деформации, возникающая в этих местах при расслоении графита, тратится в дальнейшем на развитие трещин и загиб лепестков. После скола на кадрах могут присутствовать сразу несколько звезд и гофрированных полосок.

Создать такой дефект может и сам экспериментатор. Например, можно выполнить не очень аккуратный подвод зонда с образцом. Зонд при подводе касается поверхности графита, а потом, под действием обратной связи, резко отлетает. В момент касания может произойти залипание зонда за счет сил адгезии, что приводит к увлечению верхнего слоя графита зондом с последующим разрывом слоя графита по кристаллографическим осям. Так возникает "звезда". Изображение такого дефекта представлено на рис.1. Подробнее о дефектах на графите можно прочитать в статье [1].

В атомно-силовом микроскопе силы измеряют по изгибу кантилевера. Зная изгиб кантилевера dZ и его механическую жесткость k , определяют силу F их перемножением $F=k dZ$. Следует помнить, что измеренное таким

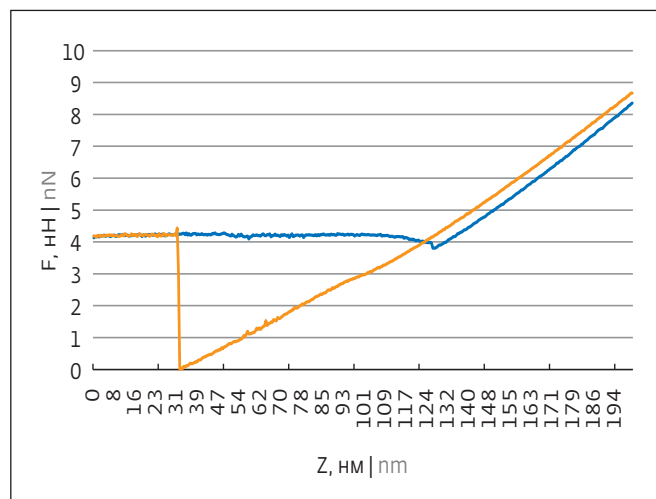


Рис.2. Силовая кривая. Синяя линия отображает силу взаимодействия при подводе, оранжевая линия – при отводе
Fig.2. Force curve. The blue line shows the interaction force at approach of the probe and the orange line at retraction

INTRODUCTION

According to one hypothesis, the star-shaped defect is formed when graphite splits in places where there are defects binding the carbon layers together. The elastic strain energy arising in these areas during graphite cleavage is then spent on cracking and bending the lobes. After cleavage, several stars and corrugated stripes may be present in the frames at once.

The experimenter can also create such a defect. For example, it is possible to approach the probe with a sample inaccurately. The probe touches the graphite surface during the approach and then under the influence of feedback abruptly flies away. At the moment of touching the probe can get stuck due to adhesive forces that lead to entrapment of the upper graphite layer by the probe with the subsequent tearing of the graphite layer along its crystallographic axes. This is how a "star" defect appears. An image of such a defect is shown in Fig.1. It is possible to read more about graphite defects in [1].

In the atomic force microscope forces are measured by the cantilever deflection. As the cantilever deflection dZ and its mechanical stiffness k are known, it is easy to determine the force F by multiplying $F=k dZ$. It should be remembered that the force value measured in this way does not determine the magnitude of the force occurring at the probe-sample contact point. In order to keep this in mind, one should watch the video clip "Atomic Force Microscope. How does it work? What is it made of?" about atomic force microscopy on Youtube channel "An insight into the nanoworld" [3].

Let's measure the force curve in an atomic force microscope. A typical view is shown in Fig.2. At first, there is no interaction between the probe and the sample



образом значение силы не определяет величину силы, возникающей в точке контакта зонд-образец. Чтобы не забывать об этом, следует посмотреть видеоролик "Атомно-силовой микроскоп. Как работает? Из чего сделан?" об атомно-силовой микроскопии на канале "Взгляд в наномир" в Youtube [3].

Давайте проведем измерение силовой кривой в атомно-силовом микроскопе. Типичный вид ее приведен на рис.2. При подводе с большого расстояния (около 1 мкм) вначале нет взаимодействия между зондом и образцом. Затем зонд слегка притягивается к образцу за счет сил Ван-дер-Ваальса. Дальше зонд и образец совершают синхронное движение. При обратном движении зонд увлекается в обратном направлении на большее расстояние за счет появления сил адгезии. В момент отрыва упругая сила со стороны кантилевера становится больше суммы сил адгезии и Ван-дер-Ваальса. Площадь образовавшегося треугольника равна работе силы, отрывающей кантилевер от образца. Для силовой кривой на рис.2 она составляет около 1,2 кэВ, т.е. это та энергия, которая могла пойти на разрыв связей в графите и образование "звезды".

Зная периметр звезды и количество составляющих ее слоев, можно оценить энергию образования звезды для двух случаев, когда разрыв слоев идет с образованием ступенек типа зигзаг и типа кресло (рис.3). Периметр звезды, показанной на рис.1, составляет 6079 нм, и она состоит из 5 углеродных слоев. Энергия связи между атомами углерода ~ 5 эВ. Таким образом, энергия образования подобного дефекта с краями типа зигзаг равна ~ 300 кэВ, с краями типа кресло ~ 350 кэВ. Видно, что различие в энергии образования звезд с двумя типами краев весьма небольшое, и, следовательно, близка вероятность встречи обоих дефектов при сканировании поверхности графита.

Если сравнить энергию образования звезды и работу силы адгезии, то в нашем эксперименте с помощью зонда атомно-силового микроскопа могла быть создана однослойная звезда с размером лепестков около 5 нм.

ВЫВОДЫ

В данной статье мы рассмотрели, как происходит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью образца на примере образования типичного дефекта в виде шестиконечной звезды на поверхности графита.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Лондонского Королевского

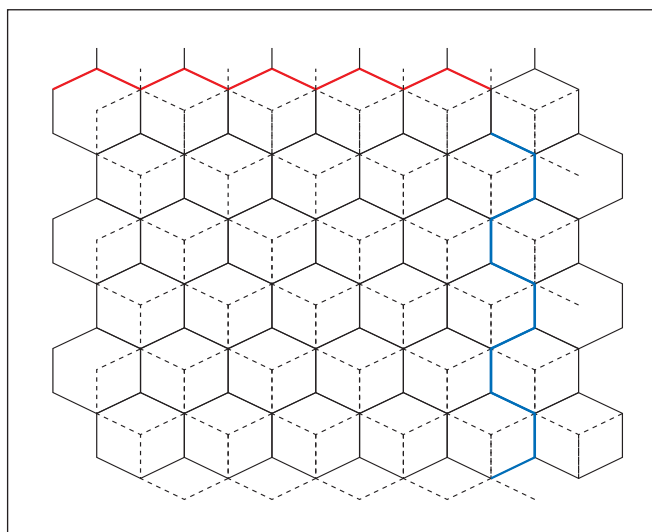


Рис.3. Схема ступенек типа зигзаг (красная линия) и кресло (синяя линия) на поверхности графита. Черной сеткой показаны два верхних слоя атомов углерода: поверхностный (сплошной линией) и приповерхностный (пунктирной линией)

Fig.3. Schematic diagram of zigzag steps (red line) and armchair (blue line) on the surface of graphite. The black grid shows two upper layers of carbon atoms: the surface layer (solid line) and the near-surface layer (dotted line)

at a large distance (about 1 μm). Then the probe is slightly attracted to the sample by Van der Waals forces. Thereafter the probe and the sample move synchronously. When the probe retracts, it is drawn further in the opposite direction due to adhesion forces. At the moment of detachment the elastic force on the cantilever side becomes greater than the sum of the adhesion and Van der Waals forces. The area of the formed triangle equals the work of the force that pulls the cantilever away from the sample. For the force curve in Fig.2 it equals about 1.2 keV, i.e. this is the energy that could be used to break bonds in graphite and form a "star".

Knowing the perimeter of the star and the number of its constituent layers, it is possible to estimate the energy of star formation for two cases when the breaking of layers occurs so as to form zigzag and armchair type stages (Fig.3). The perimeter of the star shown in Fig.1 is 6,079 nm and it consists of 5 carbon layers. The bond energy between carbon atoms is about 5 eV. Thus, the formation energy of such a defect with zigzag edges is approximately 300 keV, with armchair edges about 350 keV. It is evident that a difference in the formation energies of stars with two types of edges is very small and, consequently, the probability of occurrence of both defects when scanning the surface of graphite is great.

If we compare the energy of star formation and the work of the adhesion force, a single-layer star with a lobe



Общества № 21-58-10005, Фонда содействия инновациям, проект № 71108, договор 0071108 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

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. Meshkov G., Sinitsyna O., Yaminsky I. Dislocation superlattices on the surface of graphite. NANOINDUSTRY, 2009. No. 6. PP. 12–14.
2. Yaminsky I.V., Filonov A.S., Sinitsyna O.V., Meshkov G.B. FemtoScan Online software. NANOINDUSTRY, 2016. No. 2. PP. 42–46.
3. Электронный источник: <https://youtube.com/RHiGj5EYlsg>

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

size of about 5 nm could be created in our experiment with the aid of an atomic force microscope probe.

CONCLUSIONS

In this paper we have studied how the force interaction between the probe and the sample surface occurs, using the formation of a typical six-pointed star defect on the surface of graphite as an example.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was completed with the financial support of the RFBR, the London Royal Society No. 21-58-10005, and from the Foundation for the Promotion of Innovation, Project No. 71108, and Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

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.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Юрген Бёккер
СПЕКТРОСКОПИЯ

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 528 с., ISBN 978-5-94836-220-5

Цена 760 руб.

Спектроскопия как средство описания атомов, ионов и молекул с помощью типовых длин волн, измеряемых при возбуждении, принадлежит сегодня к важнейшим и самым распространенным методам инструментальной аналитики. Специальные измерительные устройства, в том числе абсорбционные и эмиссионные спектрометры, обеспечивают точное определение количественного и качественного состава газообразных, жидких и твердых веществ.

В книге дается обзор разных методов атомной и молекулярной спектрометрии и рассматриваются многие аналитические проблемы, решаемые в лабораториях промышленных предприятий, в естественнонаучных и технических учреждениях, а также проблемы изучения и защиты объектов окружающей среды. В книге представлена широкая гамма существующих методов исследования, а также перечень приборов с руководством по их применению.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosfera.ru; sales@technosfera.ru