

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ АТОМНОЙ РЕШЕТКИ ГРАФИТА: ИДЕИ ДЛЯ ПРАКТИКУМА

О.Синицына, Г.Мешков, И.Яминский
Sinitsyna@gmail.com

Методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) считаются главными инструментами нанотехнологии. Их история началась с изобретения сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), впервые позволившего человечеству увидеть атомы и точечные дефекты атомной решетки [1]. Представляется целесообразным, чтобы для освоения фундаментальных основ строения материи обучение естественно-научным специальностям обязательно включало практикум по СТМ.

Оптимальный объект исследования для такого практикума – высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ), основные преимущества которого – низкая шероховатость и простота получения чистой поверхности путем скола, возможность наблюдения атомной решетки при атмосферном давлении и комнатной температуре.

На образцах ВОПГ могут быть продемонстрированы физические принципы работы и возможности основных методов зондовой микроскопии: атомно-силовой, сканирующей туннельной и резистивной, нанолитографии и т.д.

Этот материал – идеальная подложка для наблюдения наноструктур, органических молекул и тонких пленок, биополимеров и биологических объектов. По этой причине около 20% работ, опубликованных за первые 15 лет развития сканирующей микроскопии, содержат упоминание о нем как основном или

вспомогательном объекте исследования [2].

Работы по локальному анодному окислению графита продемонстрировали уникальные возможности по проведению нанолитографии на поверхности этого материала, при этом в едином цикле возможно как удаление с нанометровой точностью участков поверхности, так и перевод их в диэлектрическое состояние – оксид графита [3, 4].

Существует множество тонких эффектов, которые не получили в должной мере своего объяснения. Например, аномальный контраст террас, наблюдаемый в сканирующей резистивной микроскопии [5], или наличие значительных механических сил отталкивания в туннельном переходе [6].

Типичный вид поверхности скола ВОПГ представлен на рис.1.

Основные ее особенности – это ступени скола, разделяющие атомно-гладкие террасы с характерными размерами в не-

сколько микрон. Для получения СТМ-изображений выбираются наиболее совершенные участки поверхности. Атомная решетка графита имеет слоистое строение, причем каждый слой представлен гексагональ-



Рис.1. Изображение четырех атомно-гладких террас на поверхности графита (АСМ ФемтоСкан)



ной сеткой из атомов углерода (рис.2а).

На СТМ-изображениях бездефектных областей поверхности графита выступы, соответствующие соседним атомам углерода, имеют различную высоту. Для объяснения этого эффекта необходимо рассмотреть второй от поверхности слой графита (рис.2б). Под поверхностным атомом (позиция А) расположен атом в приповерхностном слое, тогда как атом (позиция Б) расположен над дыркой – центром углеродного шестиугольника. Атомы из приповерхностного слоя оттягивают электронную плотность от каждого второго атома в поверхностном слое, что приводит к уменьшению их высоты на СТМ-изображениях (рис.3а) [7].

Сотрудники Центра перспективных технологий и Физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова разработали практикум для студентов "Визуализация атомной решетки графита" [8], цель которого – приобретение на-

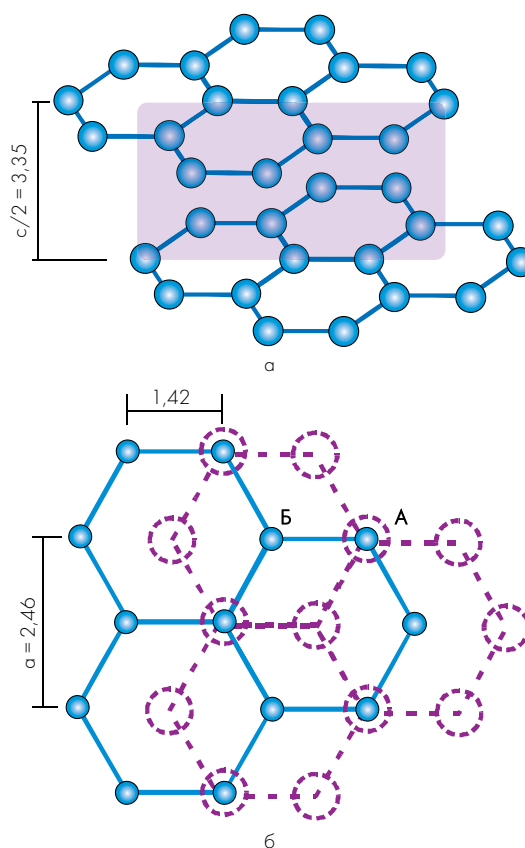


Рис.2. Кристаллическая структура графита (параметры решетки даны в ангстремах)

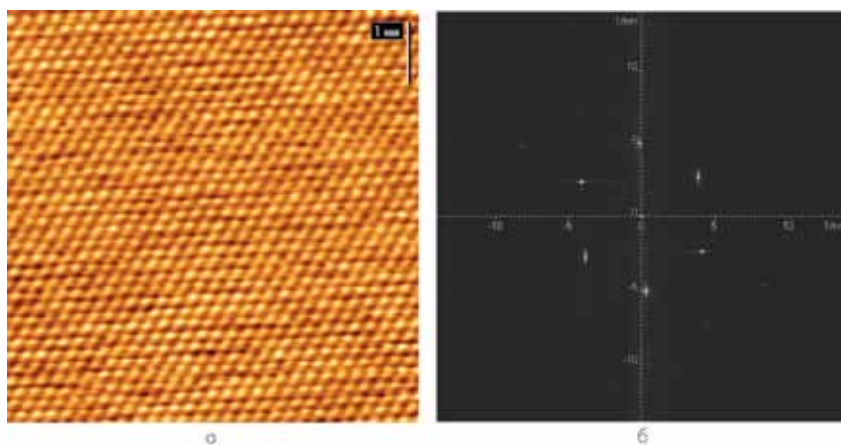


Рис.3. Поверхность графита: а – СТМ-изображение, б – Фурье-образ

выков практической работы на СТМ. В рамках практикума предлагается ознакомиться с устройством и принципами работы СТМ, режимами исследования для получения на поверхности графита атомного разрешения.

Для организации такого практикума требуется сканирующий зондовый микроскоп "ФемтоСкан" или аналогичный прибор, позволяющий получать атомное разрешение, а к описанию работы прилагается набор предварительно полученных СТМ-изображений атомной решетки графита.

Обработка изображений проводится в программе "ФемтоСкан он-лайн", первый этап которой – устранение связанных с процессом сканирования дефектов на изображениях. К этой операции можно отнести выравнивание строк сканирования по высоте и удаление шумов с помощью медианной фильтрации или фильтра усреднения. После этого студенты изучают приемы создания наглядной презентации изображений, подбирают оптимальную цветовую шкалу для двумерных изображений, строят трехмерные изображения поверхности.

На следующем этапе студенты проводят анализ топографических изображений с атомным разрешением.

Параметр решетки графита *a* предлагается определять двумя методами: измеряя непосред-

ственно расстояние между соседними атомами на изображениях и по положению рефлексов на их Фурье-образе (рис.3б). По профилям изображений определяется гофрировка поверхности графита и асимметрия выступов, соответствующих атомам в позициях А и Б. С использованием изображений, полученных в режиме постоянной высоты, для СТМ оценивается коэффициент чувствительности.

Лабораторный практикум по сканирующей зондовой микроскопии можно проводить и в дистанционном режиме. Такую возможность обеспечивает использование СЗМ ФемтоСкан с полным управлением через Интернет. Объектом удаленного наблюдения в зависимости от того, что изучается в данный момент в лабораторном практикуме, являются различные материалы, в том числе графит. (Результаты непрерывного сканирования можно наблюдать в он-лайн режиме на сайте www.nanoscopy.net в разделе "Демонстрации".)

В результате выполнения заданий практикума по визуализации атомной решетки графита студенты получают необходимые практические навыки по работе на СТМ, осваивают методы обработки, презентации и анализа получаемых изображений. Понимание уникальных возможностей СТМ, без сомнения, позволит в будущем пол-

ноценно использовать этот метод для получения новых фундаментальных знаний о природе и разработки новых технологий на атомном масштабе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект № 10-04-01574-а), ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" (контракт № П255), ФСР МФП НТС (11277), Научной программы НАТО "Наука для мира".

Литература

1. Бинниг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности: Нобелевская лекция. – УФН, 1988, т. 154, № 2.
2. Яминский И.В., Еленский В. Г. Сканирующая зондовая микроскопия: библиография (1982 – 1997). – М.: Научный мир, 1997.
3. Мешков Г., Сеницына О., Яминский И. Новые разработки в области зондовой литографии. – Наноиндустрия, 2009, №2, с.28–30.
4. О.В. Sinitsyna, G.B. Meshkov, I.V. Yaminsky. A novel tool for the local anodic oxidation of graphite. – Proc. IMechE, Part N: – J. Nanoengineering and Nanosystems, 2010, 224(Nº3–4), p.133–138.
5. Мешков Г., Сеницына О., Швец В., Яминский И. Аномальная проводимость террас на поверхности графита. – Наноиндустрия, 2010, №1 (19), с.18–19.
6. Gadau M., Hietschold M., Yaminsky I.V., Force measurements in scanning tunneling microscopy experiments, 11th International Conference "Surface Forces" (Moscow, 1996). Book of abstracts, p.152.
7. Сеницына О.В., Яминский И.В. Зондовая микроскопия поверхности графита с атомным разрешением. – Успехи химии, 2006, № 75(1), с.27–35.
8. Сеницына О.В., Мешков Г.Б., Яминский И.В. Визуализация атомной решетки графита./Учебное пособие. Описание задачи лабораторного практикума. – М.: МГУ им. М.В.Ломоносова, 2008.