Г.Мешков, О.Синицына, В.Швец, И.Яминский
sinitsyna@gmail.com

АНОМАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ТЕРРАС НА ПОВЕРХНОСТИ ГРАФИТА

Графит – инертный материал с проводящими свойствами – является основной гидрофобной подложкой для зондовой микроскопии нанообъектов. Скалыванием его верхних слоев удается получать чистую поверхность с атомно-гладкими террасами значительной протяженности. Благодаря широкому использованию графита его поверхностные свойства достаточно хорошо изучены, но ряд интересных эффектов до сих пор не получил четкого объяснения. К ним относится, в частности, аномалия в проводимости террас на поверхности графита.

Сканирующая резистивная микроскопия (СРМ) позволяет исследовать проводимость поверхности с высоким пространственным разрешением [1]. Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) изучается ее топография. В СРМ измеряется ток, протекающий через контакт зонда с поверхностью при поддерживаемом постоянном напряжении. Совмещая методы, удается одновременно изучать рельеф и локальную проводимость поверхности.

В экспериментах использовался свежесколотый высокоориентированный пиролитический графит [2] и кантилеверы с проводящим покрытием производства НИИФП им. Ф.В. Лукина. Приведенные ниже изображения получены с помощью сканирующего зондового микроскопа «ФемтоСкан» (ООО "НПП «Центр перспективных технологий»).

Характерные изображения поверхности графита представлены на рис.1. На топографическом изображении (рис.1а) видны атомные террасы, ограниченные ступенями скола, направление которых совпадает с направлением скола. На токовом изображении (рис.1б) наблюдается существенная неоднородность локальной проводимости поверхности. Изменение силы тока при сканировании достигает 10^3 раз, т.е. сопротивление контакта между зондом и поверхностью графита может изменяться в процессе съемки от 10 КОм до 10 МОм.

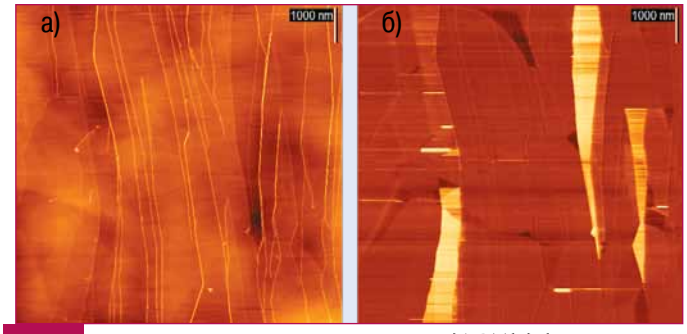

Рис.1 Топография поверхности графита (АСМ) (а), карта проводимости поверхности графита (СРМ) (б)

Выявлены следующие особенности распределения тока и локальной проводимости вдоль поверхности графита.

Во-первых, на различных террасах стабильно наблюдается различная локальная проводимость. Несмотря на проявляющееся влияние направления сканирования на измеряемое контактное сопротивление существуют террасы, локальная проводимость которых от него не зависит.

Во-вторых, в пределах одной террасы наблюдается изменение контактного сопротивления от одной строки сканирования к другой, но сохраняется некий средний уровень значений силы тока. Изменение в проводимости происходит после прохождения кантилевером дефектов на поверхности.

В-третьих, в большинстве случаев проводимость верхних террас оказывается выше, чем проводимость террас, лежащих ниже (рис.2а, б).

По всей видимости, существует несколько причин, приводящих к неоднородной проводимости террас на поверхности графита. Графит, вследствие своей слоистой структуры, обладает высокой анизотропией проводимости, которая вдоль слоев графита превосходит более чем в 10^4 раз проводимость в направлении, перпендикулярном слоям [3].

Можно предположить, что основной вклад в сопротивление поверхности графита вносят места дефектов, где проис-

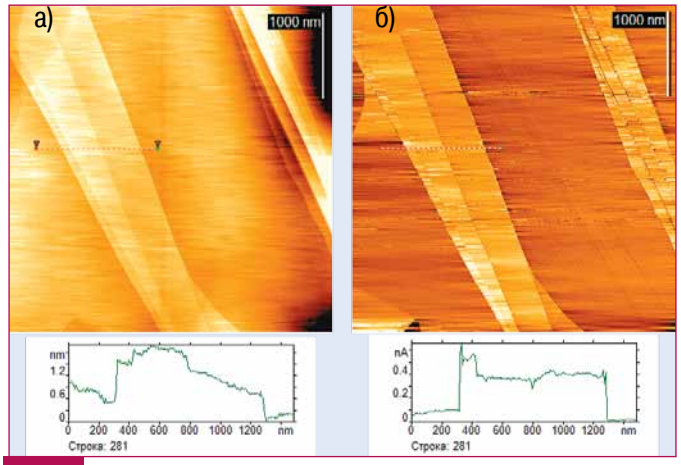

Рис.2 Топография поверхности графита (АСМ) и профиль разреза (а), карта проводимости поверхности графита (СРМ) и соответствующий профиль разреза в значениях силы тока (б)

ходит переход электронов между слоями. Когда зонд подносится к поверхности графита, токи растекаются по верхнему слою, и величина сопротивления контакта в основном определяется граничными условиями на таком слое графита.

В работе [4] указывается также на то, что проводимость графитового слоя (графена) зависит от межслоевого взаимодействия. Чем больше расстояние между слоями, тем слабее их взаимодействие и выше проводимость. Таким образом, увеличение проводимости верхних слоев может быть связано с их отслоением от объемного графита.

Наряду с эффектами, связанными со структурными особенностями графита, следует отметить влияние вещества, окружающего область контакта зонда с поверхностью. Вокруг этой области всегда присутствует адсорбционный слой вещества, который будет влиять на контактное сопротивление. При сканировании поверхности на дефектах и краях террас изменяется состояние окружающего зонд вещества, что приводит к изменению контактного сопротивления и, соответственно, протекающего через контакт тока. Компонентами адсорбционного слоя, наиболее влияющими на сопротивление контакта, являются проводящие чешуйки графита. Они образуются в процессах скола и сканирования в случае, если имеет место частичное разрушение зондом ступеней поверхности.

В процессе сканирования проводящее покрытие зонда может разрушиться, что приведет к разрыву электрического контакта между зондом и поверхностью. В экспериментах неоднократно наблюдалось восстановление проводимости контакта зонда с поверхностью графита при переходе зонда через ступень, что позволяет предположить адсорбцию на него проводящих частиц графита.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что неоднородность проводимости террас графита вызвана влиянием ряда эффектов: анизотропией проводящих свойств графита, геометрическими особенностями приповерхностных террас, составом адсорбционного слоя вещества.

Все это позволяет сделать вывод, что аномалия проводимости террас на поверхности графита служит хорошим примером того, как при уменьшении масштаба, на котором рассматривается система, ее свойства становятся существенно неоднородными.

Авторы выражают благодарность за поддержку Роснауке и Рособразованию (госконтракты: 02.512.11.2279, 02.513.11.3448, П255, П717, П973), НАТО (программа «Наука для мира» грант CBN.NR.NRSFP 983204) и Корейскому институту науки и технологий (проект KIST-MSU).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Shafai C., Thomson D.J., Simard-Normandin M.** Two-dimensional delineation of semiconductor doping by scanning resistance microscopy. – J. Vac. Sci. Technol., 1994, B 12 (1), p. 378–382.
2. http://www.nanoscopy.net/rus/products/accessories/hopg.shtm.
3. **Moore A.W.** Highly oriented pyrolytic graphite and its intercalation compounds. – Chem. Phys. Carbon, 1973, v. 11, p. 11.
4. **Banerjee S., Sardar M., Gayathri N. et al** – J. Phys. Rev. 2005, 72, p. 075418.

Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения – 2008 год.

Сборник под ред. д.т.н., профессора П.П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2008. – 416 с., ISBN 978-5-94836-180-2
Цена: 370 р.

Книга является продолжением серии книг издательства «Техносфера» по мировым достижениям в области нанотехнологий. Охватывает материалы, опубликованные в 2006 – 2008 гг. в журнале «Нано- и микросистемная техника» и сгруппированные по разделам: наноматериалы, наноэлектроника, нанодатчики и наноустройства, диагностика наноструктур и материалов, нанобиотехнология и применение нанотехнологий в медицине. В издании представлены примеры реализации и применения в области технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники.

В книгу введен раздел – англо-русский терминологический словарь по микро- и наносистемной технике.

Сборник представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области нанотехнологий, наноматериалов, наноэлектроники, микро- и наноситемной техники.

Как заказать наши книги?
По почте: 125319 Москва, а/я 91
По тел./факсу: (495) 956-3346, 234-0110
E-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru