

УДК 681.2

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ В БЕЛАРУСИ

С.А. Чижик

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) объединяет достаточно большой класс методов исследования поверхности с помощью сканирующего механического острия (зонда), начиная со сканирующей туннельной микроскопии, открытой в 1982 г. [1], и включая различные виды атомно-силовой микроскопии, возникшей в 1986 г. [2]. Эффективно дополняя современные подходы тонкого анализа материалов, сканирующая зондовая микроскопия открывает возможности, благодаря которым удалось по-новому «взглянуть» на традиционные технологии материаловедения, а также положить начало наноструктурному материаловедению и другим нанотехнологиям.

Такое востребование СЗМ-метода обусловлено следующими факторами:
высоким, вплоть до атомарного, пространственным разрешением поверхности;
комплексностью и доступностью интерпретации получаемой информации;
возможностями использования микрозонда СЗМ в качестве инструмента создания нанообъектов и манипуляции ими;
удобством компьютерной визуализации и широкими возможностями компьютерного анализа результатов.

Максимальный эффект от использования СЗМ обеспечивается при сочетании подходов формирования мультиизображений (топографии и изображения контрастов) и силовой спектроскопии.

Сканирующие зондовые микроскопы стали незаменимым исследовательским, а в ряде случаев и технологическим инструментом для разработок на наномасштабном уровне в лабораториях, занимающихся проблемами материаловедения, физикой, химией и механикой поверхности, микробиологией и другими вопросами в области нанотехнологий.

В Республике Беларусь история СЗМ началась в 1987 г. с приобретения первых, недостаточно еще совершенных, сканирующих туннельных микроскопов практически одновременно в двух институтах Академии наук БССР (ИММС и ИФТТП). Именно в этих организациях происходило углубленное освоение метода СЗМ, инициировано проведение семинара по сканирующей зондовой микроскопии (БелСЗМ). Активизация в использовании метода связана с исследованиями в области наноматериалов в рамках Государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «Наноматериалы и нанотехнологии» (2003–2010 гг.). Сегодня в республике используются десятки приборов, реализующих методики СЗМ. Метод внедрен в лабораториях институтов НАН Беларуси (ИТМО, ИФ, ИФТТП, ИММС, ИХНМ, ОИМ, НИЦПР, ИТМ, ФТИ); в высших учебных заведениях (БГУ, БГУИР, БНТУ, БелГУТ, МПУ, ГрГУ, ГМУ, ГТУ, ГГУ); в заводских лабораториях (НПО «Интеграл», ПО «Белкард»). В развитии метода и оборудования СЗМ активно участвуют белорусские предприятия: ОДО «Микротестмашины», НПО «Планар», НПО «Интеграл», НПРУП «ЛЭМТ», НПРУП «Эл-корм», НИИ РМ, БелГИМ. В большинстве случаев используются атомно-силовые микроскопы (АСМ) белорусского производства (ОДО «Микротестмашины»), хотя пред-

ставлены также приборы российской компании НТ МДТ и мирового лидера в области СЗМ – Veeco (DI) Co. (США).

Усилия белорусских ученых и инженеров, специалистов в области СЗМ направлены на разработку новых процедур СЗМ, теоретических моделей по интерпретации данных СЗМ, разработку и модифицирование приборов и микрозондов, создание комплексов для нанодиагностики, ориентированных на промышленный уровень, и их применение в современной индустрии.

Новые методики СЗМ

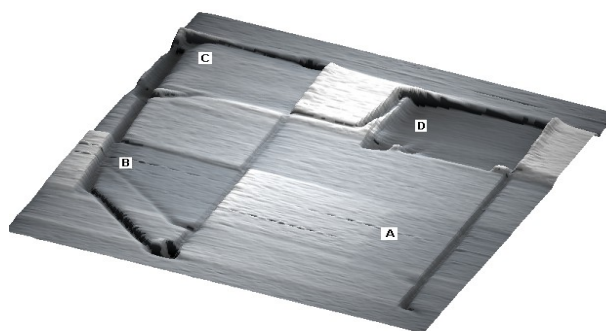
Проектирование микро- и нанoeлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС) и создание материаловедческих наноструктур требуют оценки локальных механических свойств тонких пленок и материалов в нанобъемах. Поведение материалов в сверхмалых объемах (наноразмерные кластеры, тонкие нанопокрyтия, нанокомпозиты) существенно отличается от привычного поведения конструкционных материалов в макробъемах.

Традиционно активно развивающимися в Беларуси являются методики, направленные на характеризацию локальных упругих, адгезионных и фрикционных свойств наноструктурированных материалов. Наряду с первичными для СЗМ изображениями топографии практически все модели современных сканирующих зондовых микроскопов позволяют получить дополнительно изображения контрастов на том же исследуемом участке. В зависимости от используемого режима сканирования это различные карты поверхности. Например, изображение латеральных сил для контактного режима, изображение сдвига фазы для полуконтактного динамического режима, изображение магнитных сил в магнитно-силовом микроскопе и др. Разнообразие получаемых изображений велико и, по-видимому, далеко не исчерпано. Во многих случаях можно отметить даже более высокое разрешение в детализации структуры поверхности по сравнению с пространственным изображением топографии. Оцифровка изображений, отражающих микромеханическую неоднородность поверхности, возможна с помощью дополнительных измерений, которые позволяют выполнить количественные оценки в областях с различными свойствами. Традиционно такими являются измерения зависимости силы взаимодействия острия зонда с поверхностью образца от расстояния между ними [3] (статическая силовая микроскопия). Следующий этап оценок – теоретическая интерпретация полученных изменений силы от расстояния и последующий расчет модуля упругости [4].

Важными являются исследования, реализующие разрушающие воздействия на образец в процессе сканирования. Разрушающие воздействия острием зонда АСМ могут быть использованы при оценке твердости и износостойкости материалов в поверхностных слоях. В этих случаях для твердых материалов обычно используется алмазное острие. При испытаниях на износостойкость оценивается толщина снимаемого материала при сканировании образца в зависимости от приложенной к зонду разрушающей нагрузки (рис. 1, а). Процесс наносверления заключается во вращательном движении наноиндентора с одновременной регистрацией латеральной силы, действующей на острие. Радиус вращения можно регулировать, уменьшая его вплоть до десятков нанометров с приближением площади перекрытия площадки контакта индентора и зоны трения на образце к полной. Метод позволяет изучать явления локального изменения материала в результате трибохимических реакций на пятнах контакта [5]. На рис. 1, б показан эффект локального окисления кремния под органическим мономолекулярным

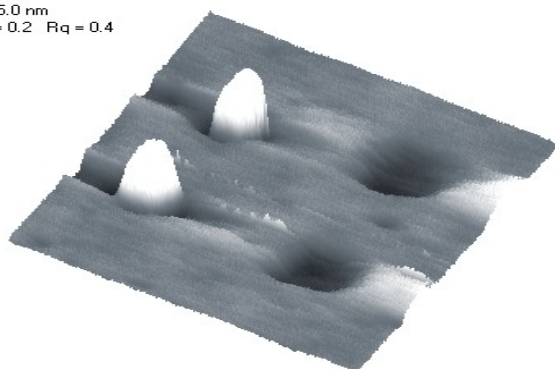
слоем при вращении острия по радиусу 100 нм.

14500.0 x 14500.0 nm
A = 34.1 nm
Rq = 3.2 nm



a)

2.2 x 2.2 μm
A = 5.0 nm
Ra = 0.2 Rq = 0.4



б)

Рис. 1. Результаты АСМ-испытаний материалов с помощью процедур наноизнашивания (а) и наносверления (б)

Теоретические модели в АСМ

В ИТМО НАН Беларуси разрабатываются теоретические модели динамической силовой спектроскопии [6], позволяющие оценивать вязкоупругие и адгезионные свойства материалов и нанопокровов [7], давать теоретическое обоснование перспективному, но пока недостаточно исследованному методу неразрушающей механической нанотомографии приповерхностных слоев [8]. Представляют интерес разработки алгоритмов и программ для АСМ-симулятора [9], с помощью которого можно, с одной стороны, предсказать результаты сканирования реального рельефа с учетом условий обратной связи прибора и локальных физико-механических свойств материала в поверхностном слое (рис. 2), а с другой – решить обратную задачу реконструкции реальных изображений поверхности по их АСМ-изображениям.

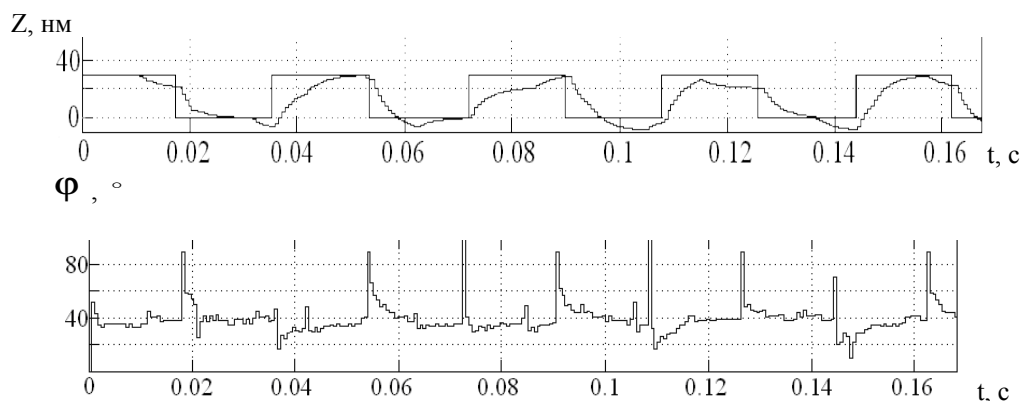


Рис. 2. Результат моделирования в пакете “MatLab” процесса сканирования в динамическом АСМ-режиме

Разработка сканирующих зондовых микроскопов и зондов СЗМ

Современные тенденции к совершенствованию методов контроля в нанометровом масштабе требуют адаптации СЗМ-оборудования в зависимости от областей приложения. НПО «Планар» совместно с ИТМО НАН Беларуси разрабатывает диагностический комплекс, совмещающий самые передовые методики оптической микроскопии и функции сканирующей зондовой микроскопии для измерений субмикронной структуры электроники. Комплекс позволит работать с кремниевыми пластинами диаметром 200 мм и будет включать их автоматический загрузчик.

Для работы с биологическими объектами ИТМО НАН Беларуси совместно с НПРУП «ЛЭМТ» и ОДО «Микротестмашины» в рамках задания 1.08 ГНТП РБ «Научные приборы» путем модифицирования АСМ НТ-206 создали экспериментальный комплекс с функциями сканирующей зондовой и оптической микроскопии [10]. Входящая в его комплектацию специализированная оптическая система дает возможность визуализировать биологические клетки, осуществлять их выбор для анализа и позиционирование зонда в микромасштабе (увеличение более $\times 500$), включая работу в жидкостной ячейке.

В рамках 1.09 ГНТП РБ «Научные приборы» в кооперации ИФ и ИТМО НАН Беларуси завершается разработка первого отечественного сканирующего ближнеполевого оптического микроскопа. В процессе разработки была создана модификация АСМ НТ-206, реализующая режим «shear force» сканирования и обеспечивающая достаточно высокое пространственное разрешение и упрощающая конструкцию [11].

Процесс совершенствования СЗМ-зондов включает в себя модифицирование кремниевых острий коммерческих АСМ-зондов единичной нанотрубкой [12] (рис. 3), в том числе моделирование процессов их контактирования с образцом численными методами молекулярной динамики [13]. Кроме того, проводятся работы по созданию острий зондов на базе природных и синтетических алмазов. Вполне успешно проводится комплекс исследований в кооперации НПО «Интеграл» и БГУИР по разработке зондов АСМ с использованием планарных технологий.

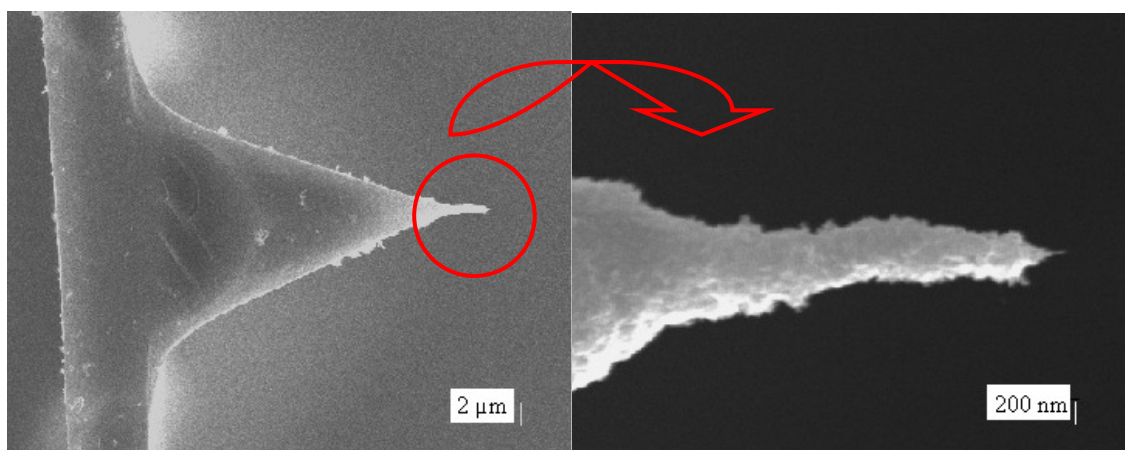


Рис. 3. Зонд АСМ, модифицированный единичной углеродной нанотрубкой

При использовании СЗМ в процедурах контроля промышленных изделий, например в субмикронной электронике, требуется разработка стандартов нанометрологии. В настоящее время в БелГИМ выполняется задание на эту тему в ГНТП «Эталоны и научные приборы».

СЗМ в образовательном процессе

Современные тенденции миниатюризации в технике и развитие нанотехнологий требуют подготовки специалистов по нанодиагностике. В 2007 г. на приборостроительном факультете БНТУ создана кафедра микро- и нанотехники (зав. кафедрой член-корр. НАН Беларуси Ю.М. Плескачевский) и открыта соответствующая специализация. В рамках кафедры завершается формирование учебной лаборатории, которая укомплектована рядом модификаций атомно-силовых микроскопов, пригодных в том числе и для научно-исследовательской работы студентов. Аналогичные лаборатории создаются в БГУИР и БГУ.

Работа частично финансировалась в рамках ГКПНИ «Нанотех», задание 1.02, и ГКПНИ «Механика», задание 2.19.

Литература

1. Binnig G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy // *Helvetica Physica Acta*. 1982. Vol. 55. Pp. 726.
2. Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic force microscopy // *Phys. Rev. Lett.* 1986. Vol. 56 (9). Pp. 930–933.
3. Burnham N, Colton R.J., Measuring the nanomechanical properties and surface forces of materials using an atomic force microscope // *J. Vac. Sci. Technol. A7*. 1989. 290613.
4. Chizhik S.A., Huang Z., Gorbunov V.V., Myshkin N.K. and Tsukruk V.V., Micromechanical properties of elastic polymeric materials as probed by scanning force microscopy // *Langmuir*. 1998. Vol. 14. 260609.
5. Chizhik S.A., Rymuza Z., Chikunov V.V., Kuznetsova T.A., Jarzabek D. Micro- and nanoscale testing of tribomechanical properties of surfaces // *Recent Advances in Mechatronics*. Springer. 2007. Pp. 541–545.
6. Абетковская С.О., Чижик С.А. Модель движения зонда в режиме полуконтактной

- атомно-силовой микроскопии // ИФЖ. 2007. Т. 80, № 2. С. 173–179.
7. Tsukruk V.V., Sidorenko A., Gorbunov V.V., Chizhik S. A. Surface Nanomechanical Properties of Polymer Nanocomposite Layers // *Langmuir*. 2001. Vol. 17. Pp. 6715–6719.
 8. Chizhik S.A., Shasholko D.I., Chikunov V.V. Nanotomography for surface layers by SPM // *Scanning Probe Microscopy*. 2003. Pp. 46–48.
 9. Abetkovskaia S.O., Pozdnyakov A.P., Siroezkin S.V., Chizhik S.A. Computer simulation of dynamic atomic force microscopy // *Recent advances in mechatronics*. Under eds. Jabłoński and etc. Berlin Heidelberg: Springer, 2007. Pp. 551–555.
 10. Чижи́к С.А., Чикунов В.В., Дрозд Е.С., Шкадаревич А.П., Курганович А.М., Суслов А.А. Экспериментальный комплекс, совмещающий функции сканирующей зондовой и оптической микроскопии, для микро-, наноанализа биологических объектов (в печати).
 11. Chizhik S.A., Vo Thanh Tung, Chikunov V.V., Nguyen Tho Vuong, Tran Xuan Hoai. Interactions of quartz tuning fork of atomic force microscope operating under shear-force and tapping modes // *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии*. Сб. докл. VII Междунар. семинара. Минск: ИТМО НАНБ. 2006. С. 88–92.
 12. Chizhik S.A., Abetkovskaya S.O., Zhukova I.A., Shashkov A.E., Zhdanok S.A. Comparative analysis of AFM probe tip modification with carbon nanotubes // *Nanomeeting 2005*. Minsk, 2005.
 13. Брич М.А., Чижи́к С.А. Моделирование взаимодействия углеродной нанотрубки как зонда атомно-силового микроскопа с кристаллом алмаза // *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии*. Сб. докл. VII Междунар. семинара. Минск: ИТМО НАНБ. 2006. С. 14–18.