

УДК 57.012.3+534.015.1+53.083.98

ВЛИЯНИЕ ЛАТЕРАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ СДВИГОВЫХ СИЛ

Д.В. Лебедев, А.П. Чукланов, А.А. Бухараев, Д.А. Бизяев

Аннотация

В работе исследовались латеральные (то есть параллельные поверхности) колебания зонда микроскопа сдвиговых сил (shear-force). Данный тип микроскопов широко используется в ближнеполевой оптике в качестве системы обратной связи для поддержания расстояния между зондом и образцом. Была разработана методика определения эффективного радиуса закругления shear-force зонда. Получена зависимость эффективного радиуса закругления зонда от амплитуды латеральных колебаний. В данной зависимости наблюдается минимум, соответствующий оптимальному режиму работы. Была также проведена серия экспериментов, направленных на определение формы колебаний зонда. В результате было выдвинуто предположение о том, что в колебаниях зонда имеются узловые точки, что требует дальнейшего теоретического исследования.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия, ближнее поле, сдвиговые силы, безапертурные зонды.

Введение

В последнее время вызывают все больший интерес технологии формирования наноструктур и их изучения оптическими методами. Эта возможность, еще недавно казавшаяся принципиально неосуществимой, появилась благодаря развитию ближнеполевой оптики – нового научно-технического направления. Два самых популярных и бурно развивающихся направления в этой области – сканирующая ближнеполевая оптическая микроскопия (Scanning Near-field Optical Microscopy, SNOM) и индуцированная рамановская спектроскопия (Tip Enhancement Raman Spectroscopy, TERS). В основе данных методов исследования лежат принципы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ).

На сегодняшний день установки SNOM и TERS используются для решения широкого круга проблем в области медицины, биологии, физики и химии поверхности, изучения различных квантовых эффектов. Однако существуют задачи, для решения которых недостаточно разрешающей способности современных SNOM и TERS систем, например, изучение флуоресценции от отдельных молекул. В связи с этим возникает необходимость улучшения разрешающей способности таких приборов. Широко известно, что разрешение описанных выше микроскопов зависит от многих факторов [1–3], при этом одним из ключевых параметров является форма зонда.

Важную роль в работе SNOM и TERS играет расстояние между зондом и образцом. Для корректной работы прибора это расстояние должно поддерживаться постоянным с высокой степенью точности и быть достаточно малым (порядка десятка нанометров). Таким образом, поддержание малого постоянного зазора между зондом и образцом является необходимым условием работы SNOM и TERS.

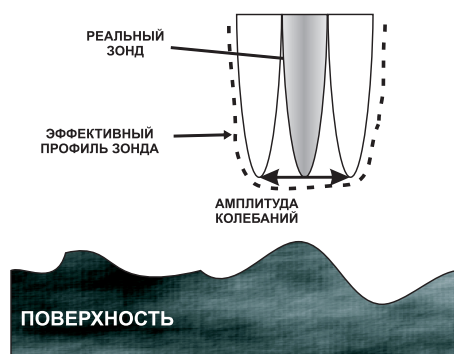


Рис. 1. Схема взаимодействия зонда «shear-force» с исследуемым образцом

В настоящее время наиболее распространен метод контроля расстояния на основе так называемых сдвиговых сил (shear-force) [4]. Принципиальным отличием метода shear-force от других зондовых методов является то, что зонд колеблется параллельно, а не перпендикулярно поверхности исследуемого образца. Поэтому за счет латеральных колебаний в процессе сканирования происходит увеличение эффективного профиля зонда (рис. 1), а следовательно, и ухудшение качества получаемого изображения.

Целью работы является изучение влияния латеральных (то есть параллельных поверхности) колебаний зонда на разрешающую способность микроскопов SNOM и TERS, использующих систему обратной связи «shear-force».

1. Результаты и обсуждение

Основным методом, использованным в данной работе, является метод определения формы зонда с помощью численной деконволюции на тестовых образцах, предложенный А.А. Бухараевым и др. в 1991 г. для атомно-силовых микроскопов (АСМ) [5, 6]. Для «shear-force» систем этот метод впервые был применен в работе [7].

В качестве тестовых образцов использовались две структуры. Тестовые структуры типа TGT01 (производства ЗАО «НТ-МДТ») представляли собой конусообразные кремниевые иглы с углом при вершине в 20° , радиусом закругления около 10 нм и высотой около 300 нм, выращенные на поверхности кремния в шахматном порядке. Другой тестовый образец, использовавшийся для восстановления формы зонда, представлял собой отдельно лежащие латексные шарики диаметром 200 нм.

Нами использовались «shear-force» зонды, изготовленные из вольфрамовой проволоки диаметром 80 мкм путем электрохимического травления в водном растворе NaOH или KOH переменным током [8]. Метод изготовления схематично показан на рис. 2. Очищенный конец вольфрамовой проволоки $R = 80$ мкм служил электродом и погружался в раствор, состоящий из двух несмешивающихся жидкостей: 1 М раствор NaOH (В), который является травителем для вольфрама, и жидкости с меньшей плотностью (А), например, толуола. В качестве второго электрода использовалась плоская медная пластина, погруженная на дно резервуара с раствором. Блок питания подавал переменное напряжение 6 В. Буферный раствор, находившийся поверх травителя, служил для формирования мениска смачивания (рис. 2) на границе буферный раствор – травитель – проволока. По мере травления толщина проволоки уменьшалась, что приводило к уменьшению высоты мениска. В результате в процессе травления на конце проволоки происходило формирование

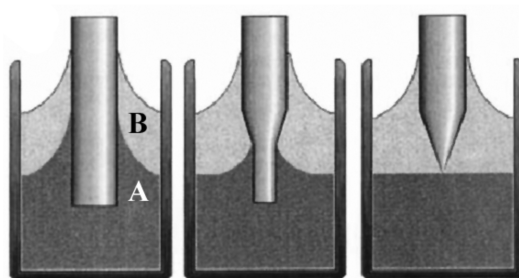


Рис. 2. Схема изготовления зонда методом химического травления: А – 50%-ный раствор плавиковой кислоты (HF), В – буферный раствор

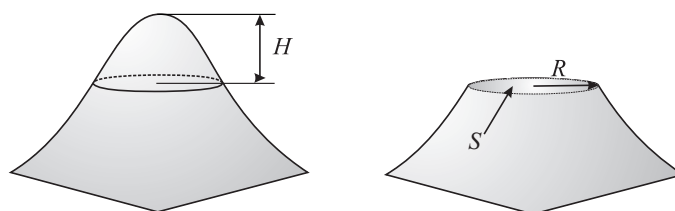


Рис. 3. Методика определения эффективного радиуса зонда

конусообразного острия с характерным радиусом закругления 100–200 нм.

Для оценки качества зонда в АСМ, как правило, используют понятие радиуса закругления. Однако для наших задач такой параметр малопригоден, так как с его помощью можно получить информацию лишь о вершине зонда, кроме того, зонды shear-force имеют, как правило, сложную геометрическую форму. В рамках данного исследования был разработан и применен более совершенный метод количественной оценки формы зонда. Суть его заключается в следующем: трехмерное изображение зонда рассекается плоскостью параллельной основанию (рис. 3) на определенной высоте (H) от максимума, после чего измеряется площадь сечения S . Эффективный радиус определяется формулой

$$R = \sqrt{S/\pi}.$$

Данный метод позволяет избавиться от ошибок, связанных с шумами и различными артефактами изображений.

Для оценки и минимизации вклада латеральных колебаний зонда в формирование топографического изображения поверхности в shear-force микроскопии был проведен следующий эксперимент: тестовая структура (использовались два тестовых образца: латексные шарики диаметром 200 нм и TGT01) сканировалась при различных напряжениях, подаваемых на пьезомодулятор, который возбуждает латеральные колебания зонда. Для исключения влияния деформации зонда во время сканирования, а также для уменьшения влияния шумов эксперимент повторялся два раза: сначала сканирование осуществлялось с последовательным увеличением напряжения подаваемого на пьезомодулятор от 0.1 до 0.5 В с шагом 0.1 В, а затем с уменьшением от 0.5 до 0.1 В с тем же шагом, то есть сначала амплитуда колебаний зонда последовательно увеличивалась, а затем уменьшалась.

Диапазон подаваемых напряжений (0.1 ÷ 0.5 В) обусловлен следующими соображениями: при меньших возбуждающих напряжениях амплитуда колебаний,

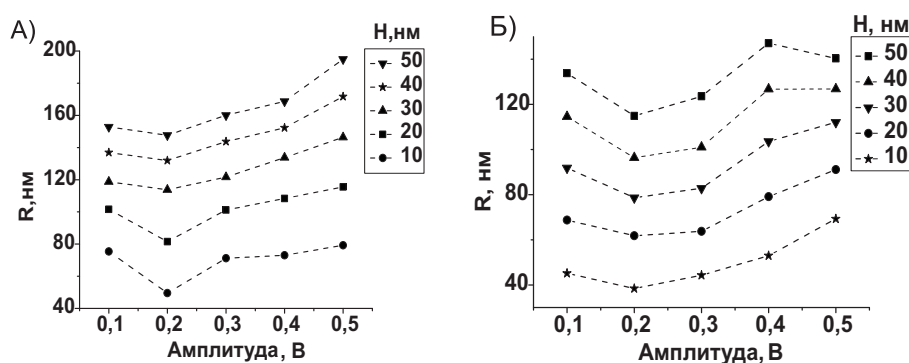


Рис. 4. Зависимость эффективного радиуса зонда от напряжения, подаваемого на возбуждающий пьезомодулятор. Форма зонда восстанавливалась методом численной деконволюции на тестовых образцах. В качестве тестового образца использовались: а) структура TGT01, б) латексные шарики

по-видимому, становится настолько малой, что зонд начинает периодически прилипать к поверхности образца, который на воздухе всегда покрыт тонкой водной пленкой и слоем адсорбатов. При напряжениях, превышающих 0.5 В, сила взаимодействия зонда с поверхностью становилась столь большой, что экспериментально наблюдалось разрушение зонда. Для каждого подаваемого на пьезомодулятор напряжения производилась процедура восстановления формы зонда методом численной деконволюции.

Наблюдаемые эффективные радиусы зонда при одном и том же напряжении подаваемом на пьезомодулятор, но при разных «направлениях» (то есть когда напряжение увеличивалось и когда оно уменьшалось) совпадали с точностью 8%. Для более детального рассмотрения процесса колебаний эффективные радиусы определялись на разных расстояниях (H) от вершины зонда. Полученные для двух серий экспериментов данные представлены на рис. 4.

Как видно на рис. 4, в области напряжений 0.2 ÷ 0.3 В существуют точки локального минимума, при которых вклад латеральных колебаний в уширение зонда является минимальным. Они соответствуют оптимальному режиму работы. Это говорит о нелинейной зависимости эффективного радиуса зонда от амплитуды возбуждающих колебаний, что еще раз подчеркивает сложность процесса взаимодействия между зондом и поверхностью в «shear-force» системах.

Еще одной интересной особенностью этих графиков является то, что при увеличении H наблюдается уменьшение эффективного радиуса. Можно сделать предположение о том, что в колебаниях зонда существуют узловые точки, что требует дальнейшего теоретического анализа.

2. Выводы

Нами исследовался процесс латеральных колебаний зонда в СЗМ «shear-force». При этом была разработана методика определения эффективного радиуса латерально колеблющегося зонда с учетом эффекта свертки игла-образец. Для этого был усовершенствован метод компьютерной деконволюции для восстановления формы вершины зонда по нескольким тестовым объектам; это позволило получить более достоверную информацию о реальной форме зонда. В работе была установлена зависимость эффективного радиуса зонда от амплитуды колебаний, которую можно объяснить наличием узловых точек в латеральных колебаниях

зонда. Были также определены оптимальные параметры латеральных колебаний зонда, позволяющие свести к минимуму искажения в экспериментально получаемых СЗМ изображениях.

Summary

D.V. Lebedev, A.P. Chuklanov, A.A. Bukharaev, D.A. Bizyaev. The Influence of Lateral Probe Oscillations on Shear-Force Images.

The paper regards the lateral (i.e. surface parallel) probe oscillations of shear-force microscope. This type of microscopes is widely applied in near-field optics. A method of probe curvature radii determination has been developed. The dependence of probe effective radii on lateral amplitude oscillation was obtained. This dependence has a local minimum that corresponds to optimal work regime. The experiments were carried out to determine probe oscillation shape. As a result, an idea about probe oscillation nodes was proposed.

Key words: scanning probe microscopy, near-field, shear-force, apertureless tips.

Литература

1. *Van der Sneppen L.* Looking at the sub-wavelength scale. – Amsterdam: Vrije Universiteit Amsterdam, 2004. – 102 p.
2. *Anderson N., Hartschuh A., Novotny L.* Near field Raman spectroscopy // *Materials today.* – 2005. – V. 8, No 5. – P. 50–54.
3. *Novotny L.* Forces in Optical Near-fields // *Near-field Optics and Surface Plasmon Polaritons: Topics in Applied Physics / S. Kawata (ed.).* – Berlin: Springer Verlag, 2000. – V. 81. – P. 123–141.
4. *Betzig E.,* Combined shear force and near-field scanning optical microscopy // *Appl. Phys. Lett.* – 1992. – V. 60. – P. 2484–2487.
5. *Губайдуллин Ф.Ф., Бухараев А.А., Назаров А.В.* Авторское свидетельство на изобретение № 4916118 с приоритетом от 05.03.1991. Способ исследования поверхности тела туннельным микроскопом // *Официальный Бюллетень Государственного Комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР «Открытия, Изобретения».* – 1992. – № 44. – С. 171. На основании этого авторского свидетельства получен патент № 1778820.
6. *Бухараев А.А., Бердунов Н.В., Овчинников Д.В., Салихов К.М.* ССМ-метрология микро- и наноструктур // *Микроэлектроника.* – 1997. – Т. 26, № 3. – С. 163–175.
7. *Чукланов А.П., Бухараев А.А., Бородин П.А.* Восстановление формы зонда микроскопа сканирующего ближнеполевого оптического микроскопа // *Микроэлектроника.* – 2005. – Т. 34, № 5. – С. 367–374.
8. *Lemke H., Goddenhenrich T., Vochem H.P., Hartmann U., Heiden C.* Improved microtips for scanning probe microscopy // *Rev. Sci. Instrum.* – 1990. – V. 61. – P. 2538–2541.

Поступила в редакцию
15.02.08

Лебедев Денис Владимирович – студент физического факультета Казанского государственного университета.

E-mail: *Denis.Lebedev@bk.ru*

Чукланов Антон Петрович – младший научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности отдела химической физики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: *achuklanov@kfti.knc.ru*

Бухараев Анастас Ахметович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики и нанофотоники Казанского государственного университета, заведующий лабораторией физики и химии поверхности отдела химической физики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

Бизяев Дмитрий Анатольевич – младший научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности отдела химической физики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: *dbiziaev@inbox.ru*