

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.

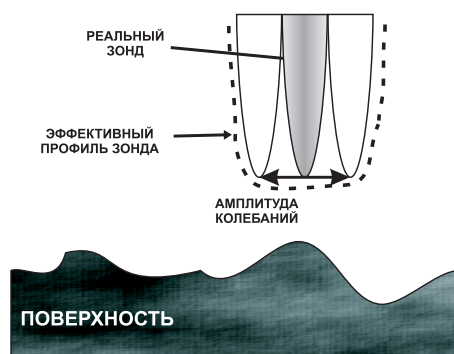


Рис. 1. Схема взаимодействия зонда «shear-force» с исследуемым образцом

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  $20^\circ$ , 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 (B), который является травителем для вольфрама, и жидкости с меньшей плотностью (A), 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

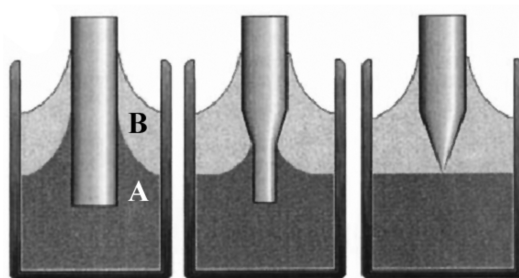


Рис. 2. Схема изготовления зонда методом химического травления: А – 50%-ный раствор плавиковой кислоты (HF), В – буферный раствор

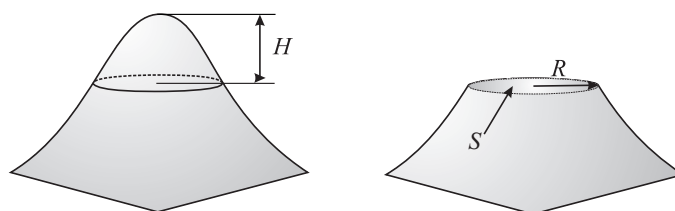


Рис. 3. Методика определения эффективного радиуса зонда

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,

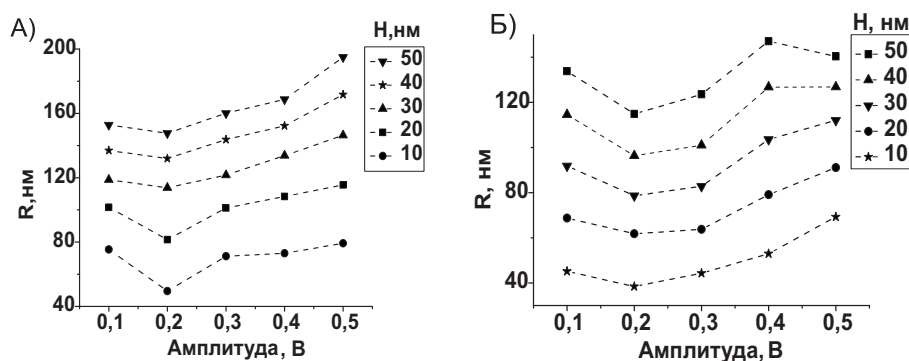


Рис. 4. Зависимость эффективного радиуса зонда от напряжения, подаваемого на возбуждающий пьезомодулятор. Форма зонда восстанавливалась методом численной деконволюции на тестовых образцах. В качестве тестового образца использовались: а) структура TGT01, б) латексные шарики

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*