

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗОНДА С ПОВЕРХНОСТЬЮ В "SHEAR FORCE" МИКРОСКОПЕ С РЕЗОНАНСНЫМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ СИЛЫ

Д. Г. Волгунов¹, А. В. Бирюков¹, С. В. Гапонов¹, В. Л. Миронов¹, С. А. Чижик²

¹ Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия.

² Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ, ул. Кирова 32А, 246050 г. Гомель, Беларусь.

Введение

Для контроля расстояния между зондом и поверхностью образца в ближнепольных оптических микроскопах широко применяется так называемый "shear force control" метод. В основе данного метода лежит явление уменьшения амплитуды вынужденных изгибных колебаний зонда при его сближении с образцом. Изменение амплитуды колебаний зонда регистрируется, как правило, либо оптическими методами [1–3], либо с использованием пьезоэлектрических датчиков [4–6]. Применение пьезоэлектрических датчиков часто оказывается более предпочтительным, поскольку в этом случае отсутствует паразитная засветка фотодетектора, регистрирующего полезный оптический сигнал, что особенно важно при исследовании фотоэлектрических свойств образцов. Однако, пьезоэлектрический датчик представляет собой сложную электромеханическую систему, поведение которой зависит как от параметров самого датчика, так и от характера взаимодействия зонда с поверхностью образца. Поэтому для выбора оптимального режима работы и адекватной интерпретации получаемых результатов необходимо учитывать особенности поведения системы "кварцевый резонатор – зонд – поверхность" при различных условиях силового взаимодействия и в различных режимах работы микроскопа.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В настоящей работе изучались особенности взаимодействия зонда с поверхностью в разработанном нами атомно-силовом "shear force" микроскопе с резонансным пьезоэлектрическим датчиком силы [7]. Схематичное изображение узла датчика силы и системы регистрации амплитуды колебаний зонда и тока через контакт приведено на рис. 1.

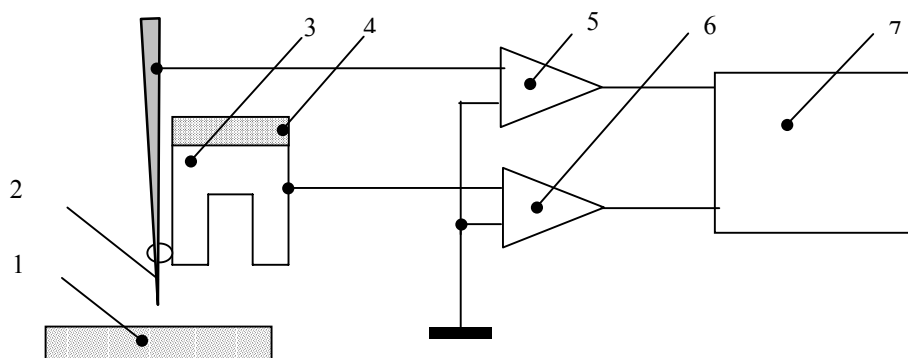


Рис. 1. Схематическое изображение "shear force" датчика силы взаимодействия зонда с поверхностью образца. 1 – образец; 2 – зонд; 3 – кварцевый резонатор камертонного типа; 4 – пьезокерамический вибратор; 5 – усилитель тока; 6 – усилитель сигнала резонатора; 7 – блок обратной связи и регистрации сигналов микроскопа

В качестве чувствительного элемента был использован кварцевый пьезорезонатор камертонного типа (3) с резонансной частотой 100 кГц и добротностью $Q \approx 10000$. Зонд (2) изготавливался из вольфрамовой проволоки методом электрохимического травления и приклеивался к одной из ножек камертона с помощью эпоксидного клея. Диаметр зонда составлял ~ 20 мкм. Вынужденные колебания системы "зонд-резонатор" возбуждались с помощью пьезокерамического вибратора (4). Измеренная с помощью волоконного оптического интерферометра амплитуда колебаний кончика вольфрамового зонда в свободном состоянии составляла ~ 10 нм. Измерение силы взаимодействия зонда с поверхностью образца производилось путем регистрации сигнала, пропорционального изменению амплитуды колебаний кварцевого резонатора на частоте, близкой к резонансной частоте системы "зонд-кварцевый резонатор".

На рис. 2 представлена зависимость амплитуды колебаний системы "зонд – кварцевый резонатор" (на частоте, соответствующей резонансу ненагруженного датчика) от расстояния между зондом и поверхностью пиролиитического графита. Добротность системы составляла ~ 1400 . Как видно из рисунка, кривые подвода-отвода демонстрируют сильную нелинейность и гистерезис, обусловленный как гистерезисом пьезокерамики Z-сканера, так и гистерезисом силы взаимодействия зонда с поверхностью.

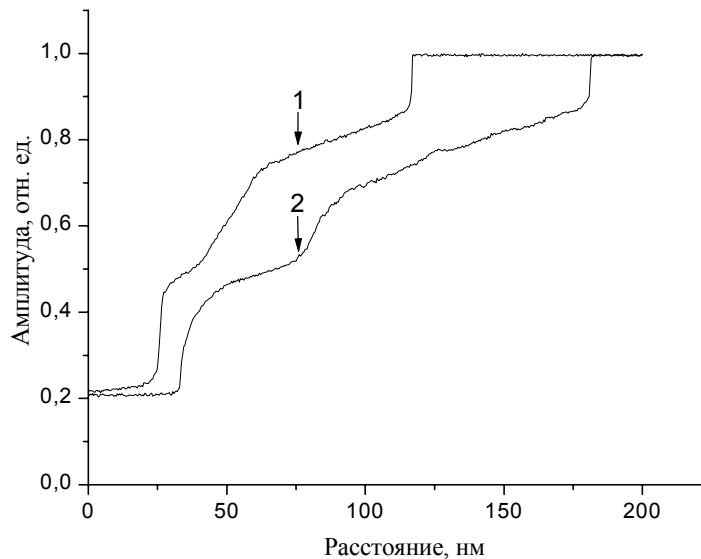


Рис. 2. Зависимость амплитуды колебаний системы "зонд – кварцевый резонатор" от относительного расстояния между зондом и поверхностью пиролиитического графита при подводе (1) и отводе (2) датчика от поверхности. За нулевое расстояние выбрана условная точка, соответствующая состоянию при котором зонд воткнут в поверхность. Исходная добротность системы "зонд – резонатор" ~ 1400

Такое поведение зависимостей амплитуды колебаний пьезодатчика во многом определяется трансформацией резонансных свойств системы "зонд – резонатор – поверхность" при сближении с поверхностью. Как показали исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) пьезодатчика в зависимости от расстояния зонд-поверхность пиролиитического графита (рис. 3), в области взаимодействия зонда с поверхностью вначале происходит уменьшение амплитуды резонанса и сдвиг его в сторону больших частот (кривые 1–5), а затем, по мере продвижения к поверхности, амплитуда резонанса вновь нарастает (кривые 6–8). Таким образом, при приближении к поверхности система "зонд – резонатор" переходит в систему "зонд – резонатор – поверхность", имеющую большую резонансную частоту. В промежуточном состоянии амплитуда колебаний уменьшается вследствие диссипации энергии при взаимодействии зонда с прослойкой воздуха и адсорбата на поверхности образца [8].

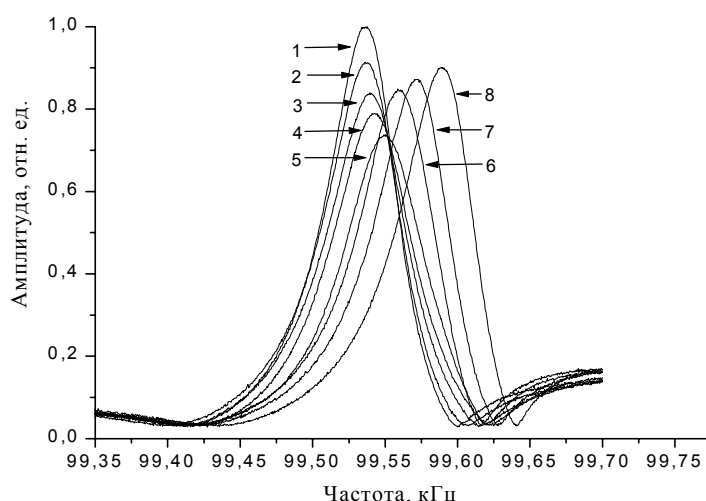


Рис. 3. Семейство амплитудно-частотных характеристик пьезодатчика в зависимости от расстояния зонд – поверхность пиролитического графита. Диапазон изменения расстояний, соответствующий кривым 1–8, составляет 0.2 мкм. Добротность датчика $Q = 1400$

Более ярко взаимодействие зонда со слоем адсорбата наблюдалось на поверхности неочищенного пиролитического графита (рис. 4). Как видно из рис. 4, на больших расстояниях от поверхности АЧХ имеет вид, близкий к лорентцовой форме линии. При уменьшении величины рабочего промежутка резонансная кривая изменяется за счет взаимодействия между зондом и поверхностью образца. Система становится менее добротной, форма линии резонанса становится асимметричной, величина амплитуды в резонансе уменьшается. При дальнейшем сближении зонда с поверхностью образца форма резонансной линии вновь приближается к лорентцовой, а резонансная частота оказывается сдвинутой в сторону больших частот. Можно предположить, что зонд протыкает тонкий адсорбированный слой и при касании поверхности графита система изменяет резонансную частоту и частично восстанавливает добротность и амплитуду резонанса.

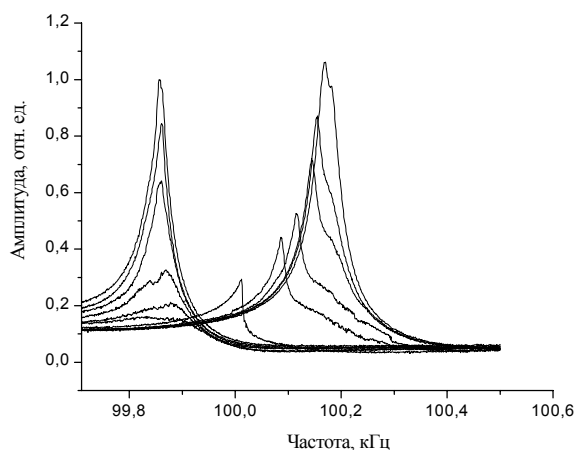


Рис. 4. Семейство АЧХ пьезодатчика при подводе к неочищенному пирографиту

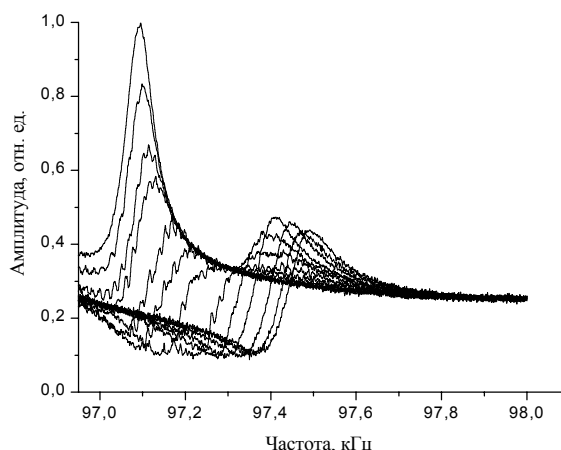


Рис. 5. Семейство АЧХ пьезодатчика при подводе к пленке фталоцианина меди

Несколько иное поведение зависимости АЧХ от расстояния наблюдалось при взаимодействии зонда с поверхностью тонких пленок органических материалов. На рис. 5 показано семейство АЧХ, полученное при приближении зонда к поверхности пленки фталоцианина меди толщиной ~1 мкм на подложке из поликора. Из рис. 5 видно, что по мере приближения к поверхности происходит уменьшение добротности системы, однако даже при существенных нагрузках резонансные свойства

системы (добротность и амплитуда резонанса) не восстанавливаются. По-видимому, это обусловлено интенсивной диссипацией энергии в рыхлом слое органического материала.

Большой интерес вызывает также вопрос о наличии механического контакта зонда с поверхностью в "shear force" режиме. Это важно как при изучении особенностей силового взаимодействия зонда с поверхностью, так и при определении области параметров бесконтактного режима работы микроскопа. Так контакт зонда с поверхностью на части периода латеральных колебаний рассматривается как один из возможных механизмов нелинейного поведения в системе "резонатор – зонд – поверхность" [6]. Нами были исследованы зависимости амплитуды вынужденных колебаний датчика силы от расстояния между зондом и образцом с одновременным контролем тока через рабочий промежуток. В качестве тестовой поверхности использовался свежий скол пиролиитического графита. Экспериментальные зависимости амплитуды колебаний датчика и тока через рабочий промежуток от расстояния между зондом и образцом для датчика с добротностью ~ 750 приведены на рис. 6.

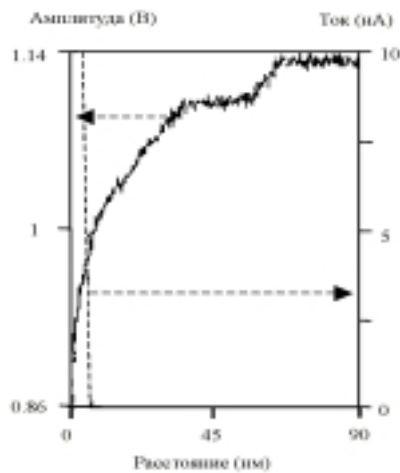


Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний пьезодатчика и тока через рабочий промежуток от расстояния между вольфрамовым зондом и образцом. Расстояние отсчитывалось от положения, в котором амплитуда выходного напряжения с кварцевого резонатора составляла 0,86 В. Напряжение на промежутке 0,1 В

Как видно из рис. 6, зависимость амплитуды колебаний пьезодатчика от величины рабочего промежутка имеет существенно нелинейный характер. При уменьшении промежутка сначала происходит резкое уменьшение амплитуды колебаний датчика, затем следует участок, на котором амплитуда меняется слабо и, наконец, происходит второй спад амплитуды и появление тока через контакт. Первый спад на зависимости амплитуды от расстояния и последующая "полка", возможно, обусловлены взаимодействием зонда и слоя адсорбата на поверхности образца [8]. Второй спад связан с увеличением взаимодействия кончика зонда непосредственно с поверхностью пиролиитического графита. Это подтверждается возникновением тока через контакт на этом участке. Для исследуемого датчика область бесконтактного режима работы микроскопа (без протекания тока) составляет ~ 60 нм. Наличие "полки" на зависимости амплитуды колебаний датчика при подводе зонда к поверхности и параметры бесконтактного режима работы микроскопа существенно зависят от величины добротности системы "зонд – кварцевый резонатор".

Проведенные эксперименты показали, что при добротности системы "зонд – кварцевый резонатор" $Q < 50$ датчик имеет слишком низкую чувствительность, и зона бесконтактного режима работы полностью отсутствует. Низкой чувствительностью системы также можно объяснить и слабое изменение амплитуды колебаний в начале кривой подвода зонда к поверхности образца, наблюдаемое в работе [5] для пьезодатчика с добротностью ~ 200 , а также отсутствие бесконтактного режима работы при использовании нерезонансного метода возбуждения пьезодатчика [9]. В качестве прямой иллюстрации бесконтактной работы микроскопа, на рис. 7 приведены изображения рельефа и распределения тока на поверхности пиролиитического графита, полученные с одного и того же места с помощью "shear force" датчика с добротностью ~ 250 .

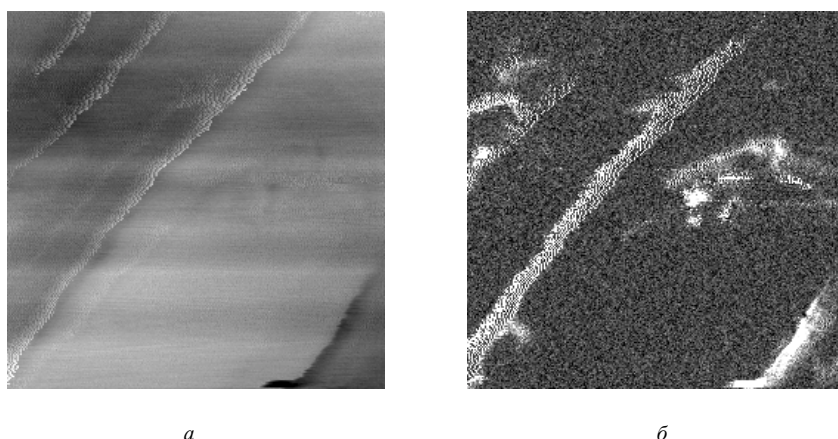


Рис. 7. Изображение рельефа (а) поверхности пиролитического графита и распределения тока (б) между зондом и образцом, полученное с одного и того же участка поверхности. Размер изображения $0,7 \times 0,7$ мкм. Добротность используемого пьезодатчика $Q \sim 250$

Как показывает анализ токового распределения, касание зонда поверхности при быстром сканировании происходит лишь вблизи резких ступеней на рельефе и вблизи дефектов поверхности, поскольку система обратной связи не успевает отвести зонд. Применение более высокодобротных датчиков силы и реализация медленных режимов сканирования устраняет эту проблему.

Заключение

Таким образом, проведенные в работе исследования показали, что характерное поведение амплитудно-частотных характеристик "shear force" пьезодатчика при сближении зонда и образца существенно зависит от добротности системы "зонд – кварцевый резонатор" и состояния поверхности, что накладывает ограничения на область устойчивой работы микроскопов на основе резонансных пьезоэлектрических датчиков силы. Установлено, что для надежной реализации бесконтактного режима работы "shear force" микроскопа необходимо применение пьезодатчиков с высокой ($Q > 500$) добротностью.

Работа выполнена в рамках совместного Российско-Белорусского проекта РФФИ-БФФИ № 00-02-81050.

Литература

1. Betzig E., Finn P.L., Weiner J.S. // Appl. Phys. Lett., v. 60, p. 2484, (1992).
2. Grober R.D., Harris T.D., Trautman J.K., Betzig E. // Rev. Sci. Instr., v. 65(3), p. 626, (1994).
3. Unlu M.S., Goldberg B.B., Herzog W.D. et al. // Appl. Phys. Lett., v. 67(13), p. 1862, (1995).
4. Karrai K., Grober R.D. // Appl. Phys. Lett., v. 66(14), p.1842, (1995).
5. Tsai D. P., Lu Y.Y. // Appl. Phys. Lett., v. 73(19), p. 2724, (1998).
6. Gregor M.J., Blome P.G., Schöfer J. et al. // Appl. Phys. Lett., v.68(3), p. 307, (1996).
7. Волгунов Д.Г., Бирюков А.В., Гапонов С.В. и др. // Труды Всероссийского рабочего совещания "Зондовая микроскопия–2000" (Н. Новгород, 2000), с. 347.
8. Davy S., Spajer M., Courjon D. // Appl. Phys. Lett., v. 73(18), p. 2594, (1998).
9. Лапшин Д.А., Кобылкин Е.Е., Летохов В.С. // Труды Всероссийского рабочего совещания "Зондовая микроскопия–99" (Н. Новгород, 1999), с. 113.