

## “SHEAR FORCE” МИКРОТРИБОМЕТРИЯ НА БАЗЕ АСМ НТ-206

В. В. Чикунов<sup>1</sup>, С. А. Чижик<sup>1</sup>, Х.-С. Ан<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь.

<sup>2</sup> Корейский институт науки и технологий, Сеул, Ю. Корея.

Проблема контактного и фрикционного взаимодействия гладких на молекулярном уровне поверхностей очень важна в микроэлектромеханических системах (МЭМС), особенно для обеспечения работоспособности их трущихся частей [1].

Практически все методики для характеристики трибологических свойств поверхностей МЭМС основаны на использовании АСМ, в частности латерально-силовой микроскопии и силовой спектроскопии. Эти методики позволяют измерять слабые фрикционные и адгезионные силы и обеспечивают высокое локальное разрешение полученных данных. Однако они существенно ограничены в быстродействии, так как пьезоэлектрические сканеры, обычно используемые для этих целей, могут обеспечить движение острия зонда со скоростью не более 1–10 мкм/с, в то время как реальные скорости относительного скольжения в МЭМС составляют около 1000–10000 мкм/с.

Кроме того, СЗМ и другие методы нанотрибологии используют внешние индентеры (СЗМ-зонды и специальные микрошарики) для измерения фрикционных свойств МЭМС поверхностей. Эти подходы не позволяют измерять трение напрямую в МЭМС-сборках.

Нами реализована процедура «shear force» микроскопии на базе АСМ НТ-206 (ОДО «Микротестмашины»), когда острие зонда осциллирует параллельно исследуемой поверхности, для характеристики трения. Этот метод оценки микроотрени основывается на изучении диссипации энергии колебаний зонда при его трении с исследуемой поверхностью. Подавление амплитуды и сдвиг частоты колебаний связано с латеральными силами, действующими на индентор (контртело) когда расстояние индентор–образец мало. Эти силы – «shear forces» есть комбинация некоторых различных по природе взаимодействий: электростатических, капиллярных, ван-дер-ваальсовых, вязкостных и деформационных.

Цель работы – развитие оригинальной методики, базирующейся на «shear force» микро- и нанотрибологии для точной оценки трибологических свойств поверхностей МЭМС с учетом трения внутри микросборок.

### Эксперимент

В качестве движущего устройства применялся камертон (tuning fork) из двух скрепленных пьезокерамических биморфов – двуслойных пластин со специальной системой электродов (рис. 1). На электроды одного из биморфов подается синусоидальный электрический сигнал постоянной амплитуды  $U_t$  и частоты  $f_t$ , являющейся его резонансной частотой. Выходной сигнал снимался с другого биморфа камертона. С помощью электроники АСМ задавался диапазон нагружения индентора и частота изменения входного сигнала. Амплитуда выходного сигнала

регистрировалась электронным блоком. Из выходных данных формировался файл для трехмерного изображения: амплитуда–частота–расстояние (или нагрузка, время): АЧР-спектр (рис. 2).

В работе [2] показано, что изменение резонансной частоты в «shear-force oscillation» обусловлено нормально действующими силами, в то время как изменение выходной амплитуды зависит от сил трения.

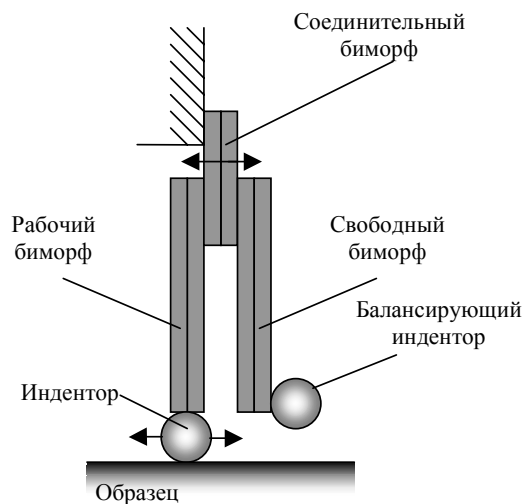


Рис. 1. Схема измерений

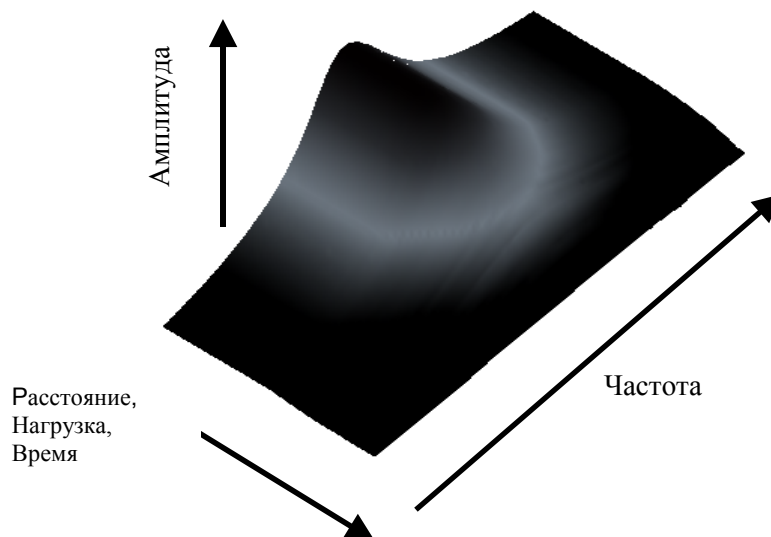


Рис. 2. Измеренные данные

### Расчетные зависимости

Сила трения может быть рассчитана на основании параметров колебаний измерительной системы:

$$F = \frac{\pi k}{4Q\omega_0^2} \left( -A\omega\omega_0 + Q\sqrt{a_{bm}^2\omega_0^4 - A^2(\omega^2 - \omega_0^2)^2} \right), \quad (1)$$

где  $k$  – жесткость колеблющейся консоли,  $A$  – амплитуда колебаний индентора,  $a_{bm}$  – амплитуда колебаний биморфа,  $\omega$  – частота колебаний,  $\omega_0$  – резонансная частота консоли,  $Q$  – добротность колеблющейся консоли. Амплитуда свободных колебаний консоли с индентором

$$A_0 = a_{bm}Q. \quad (2)$$

Если измерительную систему приводить в колебания на резонансной частоте  $\omega = \omega_0$ , то получим

$$F = \frac{\pi k}{4Q}(A_0 - A). \quad (3)$$

Из зависимости (3) следует, что сила трения зависит от изменения амплитуды пьезорезонатора и от его добротности. Теоретическое рассмотрение соответствует экспериментальным результатам.

### Результаты исследований

#### *Анализ гидрофильных и гидрофобных поверхностей*

Исследовались образцы с различной способностью адсорбции влаги. Для этих целей подложка полированного кремния была модифицирована химически.

Были рассмотрены три типа образцов – гидрофильный кремний, гидрофобный кремний, многослойное гидрофобное покрытие. На рис. 3 приведены результаты измерений: АЧР-спектры и рабочая дистанция (расстояние до полного подавления колебаний)

Резкое возрастание силы трения соответствует предельному фрикционному нагружению для измерительной системы.

Получено, что гидрофобные поверхности выдерживают большие внешние нагрузки (рабочая дистанция, которая соответствует силе прижатия индентора к образцу). Соответственно гидрофильный образец имеет больший коэффициент трения по сравнению с гидрофобными поверхностями. Для многослойного гидрофобного покрытия коэффициент трения меньший, чем для монослойного, однако при этом измерительная система выдерживает меньшую нагрузку (рабочую дистанцию). АЧР-спектры также имеют различия в скорости изменения частоты от расстояния.

Результаты расчета силы трения приведены на рис. 4.

Образец	АЧР - спектры	Рабочая дистанция, нм
Гидрофильный кремний		30
Однослойное гидрофобное покрытие		170
Многослойное гидрофобное покрытие		120

Рис. 3. Результаты «shear force» измерений для гидрофильных и гидрофобных поверхностей

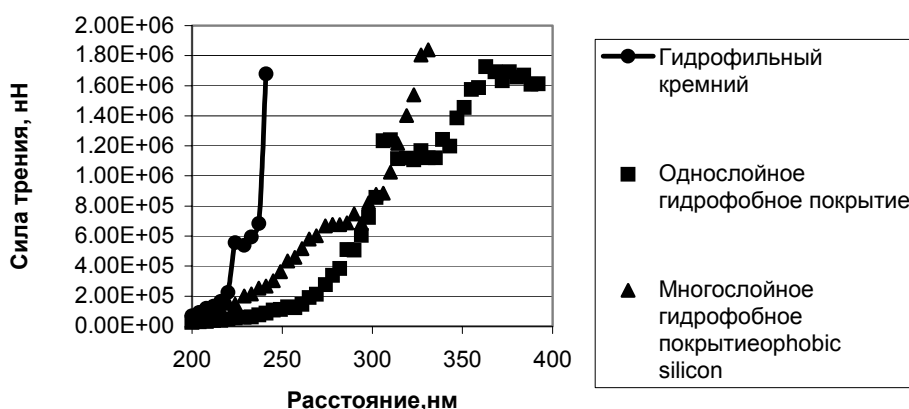


Рис. 4. Зависимость силы трения от расстояния для различных типов модификаций поверхности кремния

Таким образом, с помощью «shear force» АСМ процедуры, реализованной на базе пьезокерамического камертона, разработана методика анализа трения с отображением спектра фрикционного поведения исследуемой поверхности, который, по-видимому, может характеризовать механизм и природу сил трения.

### **Литература**

1. The MEMS Handbook. Ed. by M. Gad-el-Hak. CRC Press. 2002.
2. Karrai K., Grober R. D. Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes. Applied Physics Letters 66, 14 (1995) 1842–1844.