



# ТЕПЛОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ В МИКРО- И НАНОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

С.Смирнов\*, к.ф.-м.н., Г.Мешков\*, И.Яминский\*, д.ф.-м.н. / s.smirnov@nanoscopy.ru

**П**ри научных экспериментах чаще всего работе прибора мешают тепловые шумы (thermal noise). По этой причине, как правило, исследователи стараются минимизировать их влияние. Однако такие шумы могут нести и полезную информацию. Например, их правильное измерение полезно для методов сканирующей зондовой микроскопии и сенсорных систем типа "атомные весы".

Как известно, центральной частью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) является кантилевер – кремниевая микроконсоль толщиной в несколько микрометров, длиной от 5 до 500 мкм и шириной не более 40 мкм, одним концом закрепленная на макроскопической кремниевой пластине. На свободном конце консоли располагается острое в форме острого конуса или многогранной пирамиды с острым углом при вершине. Для точного измерения силы, действующей на кантилевер, или в атомных весах прикрепленной на него массы необходимо с высокой точностью определять его механические характеристики, одна из которых – константа жесткости. К сожалению, не всегда удается создать микроконсоли, для которых величина этого параметра задается с заранее известной точностью.

Цель настоящей работы – создание системы для определения константы жесткости кантилевера (рис.1). Существует ряд методик измерения этого параметра:

- Теоретическая оценка, требующая точного измерения геометрических размеров микроконсоли. Поскольку кантилевер имеет сложную форму, проведение подобных измерений – трудоемкий и длительный процесс [1].
- Статические экспериментальные методы, в основе которых – измерения отклонения "эталонного" кантилевера [2]. Возможный вариант – измерение такого отклонения при присоединении на свободный конец кантилевера известной массы [3]. Основная проблема

при применении этой методики – создание "эталонного" кантилевера и сфер известной массы, а также возможность манипулирования ими.

- Динамические экспериментальные методы, в основе которых – измерение резонансных пиков кантилевера. Среди таких методов можно выделить: наблюдение сдвигов резонансных пиков при присоединении добавочной массы известной величины [4], изучение спектров тепловых колебаний кантилеверов [5-8], исследование частоты и формы резонансных пиков (метод Садера) [9, 10].

Наиболее часто на практике используются метод тепловых колебаний и метод Садера.

Их основные преимущества:

- Получение на одном и том же оборудовании величины механической жесткости кантилевера непосредственно перед основным измерением.
- Применимость независимо от материала консоли или покрытия на ней.
- Отсутствие необходимости в изменении оборудования и сложного дополнительного программного обеспечения.
- Неразрушающие методы.
- Возможность одновременного применения.

## МЕТОД ТЕПЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Метод основан на теореме о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы, утверждающей, что при тепловом равновесии системы любая степень свободы, которая проявляется как квадратичная функция, обладает средней энергией, зависящей только от

\* Центр перспективных технологий, МГУ им. М.В.Ломоносова.



температуры [5-8]:  $\langle E \rangle = \frac{1}{2} k_b T$ , где  $k_b$  – постоянная

Больцмана,  $T$  – абсолютная температура. Такой степенью свободы будет отклонение конца кантилевера  $d_c$ . Для малых отклонений, где этот параметр и сила линейно связаны между собой, запасенная в рассматриваемой системе координат

энергия имеет вид:  $\langle E \rangle = \frac{1}{2} k \langle d_c^2 \rangle$ , что позволяет

определить жесткость кантилевера  $k = \frac{k_b T}{\langle d_c^2 \rangle}$ .

Первый шаг в реализации метода тепловых колебаний – запись зависимости перемещений кантилевера от времени. Для этого необходимо, чтобы он находился далеко от образца и мог свободно перемещаться при таких колебаниях. Сигнал системы, регистрирующей движение кантилевера, можно записать как зависимость  $V(t)$ . Затем нужно получить Фурье-образ – спектр плотности мощности сигнала тепловых колебаний  $P_v$ , который можно перевести в спектр отклонения кантилевера  $P_d$ , исходя из конструкционных особенностей системы регистрации.

Зная спектр  $P_d$ , можно найти общую энергию тепловых колебаний. Если бы он не содержал фонового шума и не имел ограничений по верхней частоте, можно было бы посчитать общую энергию  $\langle d_c^2 \rangle$ , проинтегрировав  $P_d$  по всем частотам. Тогда интеграл равен полной энергии всех резонансных пиков кантилевера. На практике эти условия никогда не выполняются. Обычно можно зарегистрировать только первый резонансный пик на низкой частоте. Тем не менее, даже его форма дает необходимую информацию о кантилевере, поскольку этот пик может быть хорошо

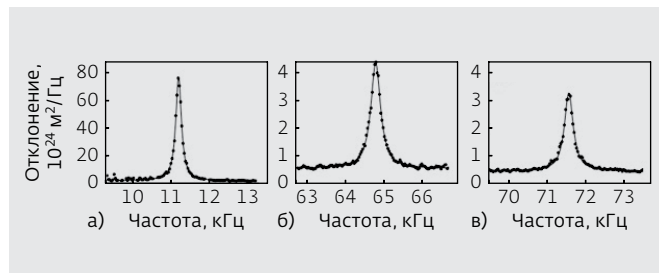


Рис.1. Первые резонансные пики трех кантилеверов (а,б,в), имеющих различные константы жесткости. Сплошными линиями показаны аппроксимации [11]

аппроксимирован функцией, описывающей его для простого гармонического осциллятора [9]:

$$R(f) = \frac{A_1 f_1^2}{(f^2 - f_1^2) + \left(\frac{ff_1}{Q_1}\right)^2},$$

где  $f_1$  – частота первого резонансного пика,  $Q_1$  – его добротность,  $A_1$  – амплитуда колебаний на нулевой частоте.

На рис.1 приведена аппроксимация первых резонансных пиков трех различных кантилеверов. Интегрируя функцию  $R(f)$  по всем частотам, можно узнать  $\langle d_c^2 \rangle$ , и из этой величины вычислить

константу жесткости:  $k = \frac{2k_b T}{\pi A_1 f_1 Q_1}$ .

### МЕТОД САДЕРА

Метод основан на теории движения кантилевера в среде с известными вязкостью и плотностью [9, 12]. Чаще всего такой средой является воздух. Постоянная жесткости кантилевера определяется по формуле [13]:

$$k = 7,524 \rho_f b^2 L Q_1 f_1^2 \Gamma_i (\rho_f, \eta_f, f_0, b),$$

где  $\rho_f$  – плотность воздуха,  $\eta_f$  – его вязкость,  $b$  – ширина кантилевера,  $L$  – его длина,  $Q_1$  – добротность колебаний кантилевера,  $f_1$  – частота первого резонансного пика,  $\Gamma_i$  – мнимая часть гидродинамической функции, описанной в [13].

Уравнение справедливо для прямоугольных кантилеверов при условии, что длина  $L$  значительно превышает ширину  $b$ , которая, в свою очередь, значительно больше толщины. Эти требования, как правило, выполняются для большинства кантилеверов. Для корректности уравнения также необходимо выполнение следующих условий:

- добротность  $Q_1$  значительно превышает единицу (обычно для кантилевера, колеблющегося в воздухе);
- микроконсоль однородна вдоль своей длины.

Резонансную частоту  $f_1$  и добротность  $Q_1$  кантилевера можно определить методом тепловых колебаний или напрямую, измерив амплитудно-частотную характеристику механических колебаний. Длина  $L$  и ширина  $b$  берется из значений, представляемых производителем для каждого типа кантилеверов. Для параметров вязкости  $\eta_f$  и плотности  $\rho_f$  можно использовать табличные значения.

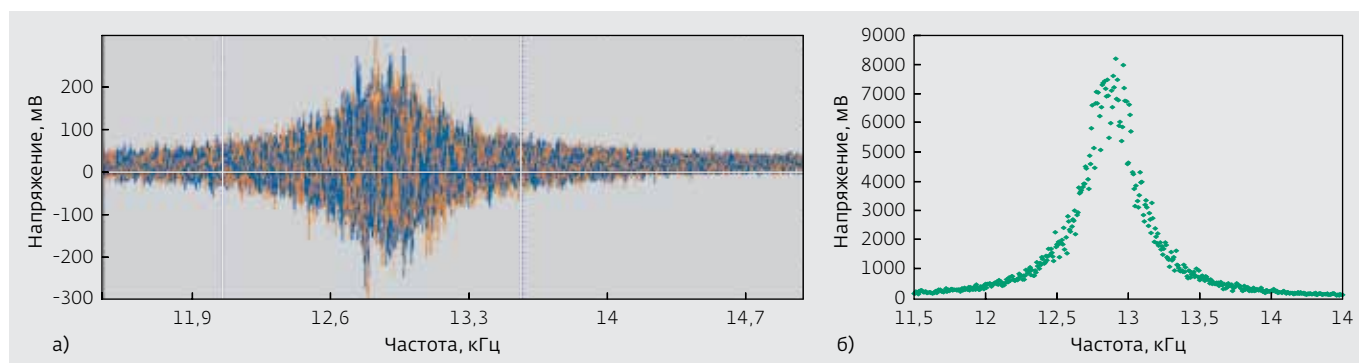


Рис.2. Данные ста измерений через синхронный детектор (а); спектр колебаний кантилевера  $\mu\text{rc01}$ , полученный с помощью синхронного детектора (б)

## ПОЛУЧЕНИЕ СПЕКТРА ТЕПЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

После получения зависимости сигнала системы, регистрирующей перемещение кантилевера от времени  $V(t)$ , создать Фурье-образ этого сигнала можно двумя методами:

- аналоговым, при котором Фурье-образ получается в результате прохождения сигнала через электронные схемы;
- цифровым, когда Фурье-образ рассчитывается из оцифрованного массива данных с помощью компьютерной программы.

## АНАЛОГОВЫЙ МЕТОД

В его основе лежит принцип синхронного детектирования, основанного на умножении сигналов. На входы умножителя подаются опорный и исследуемый гармонические сигналы. Когда частота исследуемого сигнала равна частоте опорного (на входах умножителя они синхронны), сигнал на выходе из синхронного детектора пропорционален амплитуде входного и зависит от фазового сдвига относительно опорного. Изменяя частоту опорного сигнала и измеряя квадратичную

амплитуду сигнала на выходе синхронного детектора, можно создать искомый спектр (рис.2).

## ЦИФРОВОЙ МЕТОД

Чтобы получить Фурье-образ сигнала цифровым методом, исходный сигнал оцифровывается. Для этого необходим модуль аналого-цифрового преобразователя (АЦП), преобразующий входной аналоговый сигнал в дискретный код. В силу специфики изучаемого спектра этот модуль должен удовлетворять следующим требованиям:

- Обладать частотой дискретизации  $R > 2f_{\text{max}}$ . Это связано с теоремой Котельникова или теоремой отсчетов (Найквиста-Шеннона): если аналоговый сигнал имеет ограниченный спектр, он может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой, строго большей удвоенной верхней частоты.
- Внутри модуля должен находиться встроенный фильтр низких частот, максимальная частота пропускания которого больше  $f_{\text{max}}$  и меньше  $R/2$ , поскольку спектр не является строго ограниченным по верхней частоте, причем частоты, большие дискретизации  $R$ , будут вносить

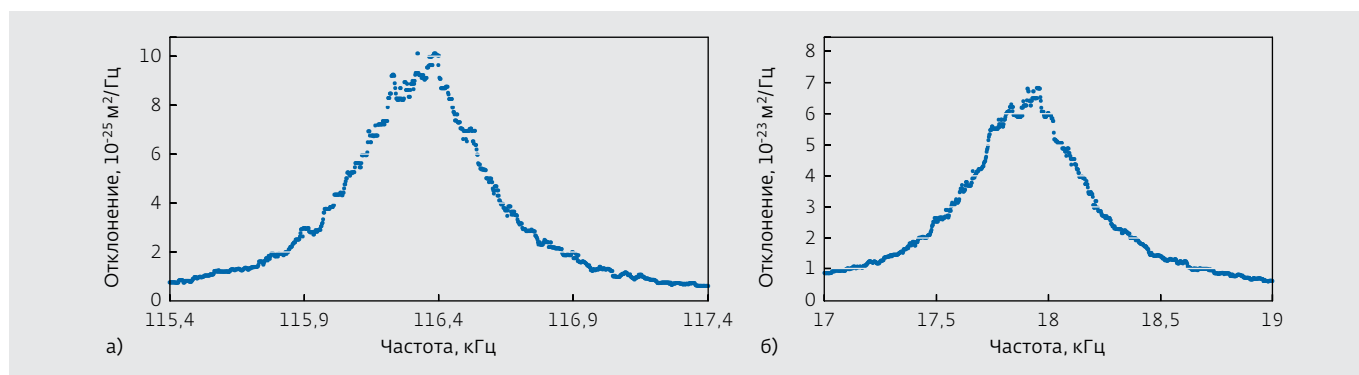


Рис.3. Первый резонансный пик кантилеверов: а –  $\mu\text{rn01}$ ; б –  $\mu\text{rc10}$



Параметры кантилеверов и коэффициенты жесткости

Кантилевер	Материал	Длина	Ширина	Жесткость по данным производителя, Н/м			Жесткость (метод тепловых колебаний)	Жесткость (метод Садера)
				мин.	тип.	макс.		
Fpn01	Si	130±5	35±5	2,6	5,3	9,8	4,2±0,8	3,7±0,6
Fpc10	Si	250±5	35±5	0,03	0,1	0,2	0,066±0,015	0,066±0,11

ошибку в измерениях. На практике для облегчения фильтрации желательно, чтобы  $R/2$  было много больше  $f_{\max}$ .

После оцифровки сигнала его Фурье-образ может быть получен стандартными средствами, например, с использованием программного обеспечения Matlab, позволяющего рассчитывать необходимые параметры.

### АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРА ТЕПЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

После выделения спектра тепловых колебаний полученный спектр необходимо проанализировать. Для определения жесткости кантилевера важно аппроксимировать первый резонансный пик его спектра:

- $f_1$  – резонансную частоту первого пика;
- $Q_1$  – добротность первого пика;
- $A_1$  – амплитуду колебаний на нулевой частоте.

Зная эти параметры и температуру  $T$  рядом с микроскопом, можно вычислить жесткость кантилевера  $k$ .

Примеры первых резонансных пиков спектров тепловых колебаний для кантилеверов fpN01 и fpC10 приведены на рис.3. При аппроксимации первого резонансного пика из спектра получается величина жесткости кантилевера  $k$ . Чтобы посчитать ее методом Садера, можно ввести в on-line калькулятор (<http://www.amrc.ms.unimelb.edu.au/afm>) значения параметров кантилевера, полученные при аппроксимации первого резонансного пика.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для измерения жесткости кантилевера использовались метод тепловых колебаний и метод Садера. Сравнивали кантилеверы fpn01 и fpc10. Эксперимент проводился на СЗМ ФемтоСкан. Для получения спектра использовался модуль АЦП Z210 с максимальной частотой дискретизации 500 кГц. Результаты приведены в таблице.

Вовремя эксперимента температура в помещении была 22°C, а давление  $P \approx 99700$  Па. Для вычисления

чувствительности использовались графики, приведенные на рис.3. Полученные спектры аппроксимировались с помощью специальной программы.

Из таблицы видно, что константы жесткости, измеренные по обоим методам, хорошо согласуются между собой. Полученные с их помощью величины постоянной жесткости кантилеверов лежат в сообщаемых производителем пределах. Таким образом эти два метода, основанные на разных физических принципах, дают очень близкие результаты, что позволяет использовать их для уточнения жесткости кантилеверов.

### Литература

1. Clifford C.A., Seah M.P. – Nanotechnology, 2005, v.16, p.1666.
2. Butt H-J., Cappella B., Kappl M. – Surf. Sci. Rep., 2005, v.59, p.1.
3. Rabinovich Ya.I., Yoon R-H. – Langmuir, 1994, v.10, p.1903.
4. Cleveland J.P., Manne S., Bocek D., Hansma P.K. – Rev. Sci. Instrum., 1993, v.64, p.403.
5. Walters D.A., Cleveland J.P., Thomson N.H., Hansma P.K., Wendman M.A., Gurley G., Elings V. – Rev. Sci. Instrum., 1996, v.67, p.3583.
6. L'evy R., Maaloum M. – Nanotechnology, 2002, 1333.
7. Burnham N.A., Chen X., Hodges C.S., Matei G.A., Thoreson E.J., Roberts C.J., Davies M.C., Tendler S.J.B. – Nanotechnology, 2003, v.14, p.1.
8. Proksch R., Schaffer T.E., Cleveland J.P., Callahan R.C., Viani M.B. – Nanotechnology, 2004, v.15, p.1344.
9. Sader J.E., Pacifico J., Green C.P., Mulvaney P. – J. Appl. Phys., 2005, v.97, p.124903.
10. Sader J.E. Encyclopedia of Surface and Colloid Science (New York: Dekker), 2002, p.846.
11. Cook S., Chynoweth K. – Nanotechnology, 2006, v.17, p.2135–2145.
12. Sader J.E. – J. Appl. Phys., 1998, v.84, p.64.
13. Sader J.E., Chon J.W.M., Mulvaney P. – Rev. Sci. Instrum., 1999, v.70, p.3967.