

УДК 53.086

К ВОПРОСУ ОБ АСМ-ИЗМЕРЕНИЯХ ВЕКТОРА СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОСРЕДСТВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ, ОПТИЧЕСКОГО РЫЧАГА И ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНОГО МЕТОДА

© 2022 г. А. В. Анкудинов*

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, 194021 Россия*

**e-mail: alexander.ankudinov@mail.ioffe.ru*

Поступила в редакцию 25.08.2021 г.

После доработки 22.09.2021 г.

Принята к публикации 30.09.2021 г.

В атомно-силовой микроскопии взаимодействие зонда с образцом, как правило, контролируют методом оптического рычага по углу изгиба кантилевера в выбранной на нем точке. Такой контроль не рассчитан на регистрацию всех трех компонент вектора силы взаимодействия. Выявить эти компоненты и результат действия силы – вектор смещения “недеформируемого” зонда “идеального” кантилевера – можно, проведя дополнительные измерения деформации (пьезорезистивным методом) или величины изгиба (методом интерферометрии) в выбранной точке, либо угла изгиба еще в одной точке на кантилевере. Представлены результаты аналитического расчета оптимального расположения этих точек на кантилевере для шести комбинаций трех названных методов, сводящего ошибку измерений компонент векторов силы и смещения к минимуму.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, кантилевер, пространственные компоненты силы взаимодействия, пьезорезистивный метод, интерферометрия, оптический рычаг.

DOI: 10.31857/S1028096022050028

ВВЕДЕНИЕ

В основе атомно-силовой микроскопии (АСМ) [1] лежит измерение силы взаимодействия зонд–образец. Когда зонд АСМ-кантилевера находится в контакте с образцом, можно, подняв образец на известную высоту, определить угол изгиба кантилевера, линейно связанный с вертикальной компонентой силы [2]. Часто важны все три компоненты силы, например, для манипуляций слабо закрепленными на подложке частицами [3, 4], измерений формы трехмерных объектов [5], исследований пьезоотклика сегнетоэлектрических образцов [6, 7], точных наномеханических экспериментов [8–10]. Приложенная к зонду сила вызывает реакцию кантилевера, которую можно контролировать, регистрируя в выбранной на нем точке механические напряжения пьезорезистивным методом [11–13], углы изгиба и кручения методом оптического рычага [14], вертикальное смещение методом интерферометрии [15]. Комбинируя методы интерферометрии и оптического рычага, можно по смещению и углу изгиба кантилевера определить компоненты силы в плоскости изгиба, а по углу кручения – компо-

ненту, перпендикулярную этой плоскости. Все проекции силы поддаются измерению также при помощи комбинации метода оптического рычага и пьезорезистивного метода.

Метод интерферометрии и пьезорезистивный метод не чувствительны к компоненте силы, перпендикулярной плоскости изгиба. Автономно определить вектор силы целиком позволяет только метод оптического рычага, примененный в двух точках на кантилевере. В [16, 17] обсуждали оптимальное положение этих точек для минимальной ошибки измерений. Было доказано [17], что первое положение совпадает с проекцией вершины зонда на консоль, другое зависит от направления и амплитуды проекции силы на плоскость изгиба консоли и рассчитывается аналитически.

Для практики важно существование зафиксированных на кантилевере оптимальных положений точек для определения компонент произвольно направленной силы. В этой связи в настоящем исследовании при использовании подхода [17] сопоставлены разные комбинации методов пьезорезистивного, оптического рычага, интерферо-

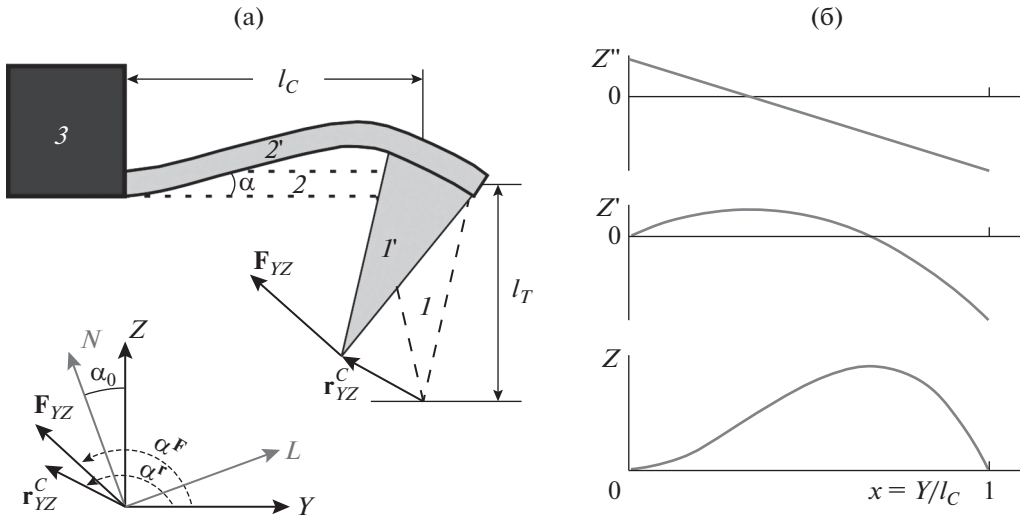


Рис. 1. Изгиб “идеального” кантилевера (а): “недеформируемый” зонд (I), высота l_T ; консоль (2), длина l_C ; держатель (3); сила F_{YZ} , изгибающая консоль ($2'$), смещает на r_{YZ}^C зонд (I'). Системы координат кантилевера XYZ , сканера XLN (ось N соответствует вертикали, ось X направлена на читателя); угол установки держателя кантилевера $\alpha_0 \approx 20^\circ$ в приборах НТ-МДТ СИ (Россия) и $\approx 10^\circ$ в Bruker (США); α – локальный угол изгиба; α^F и α^r – полярные углы векторов F_{YZ} и r_{YZ}^C . Пример профилей (эпюр) Z'' (кривизны), Z' (угла изгиба), Z (смещения, изгиба консоли), связанных параметрами a и b из соотношений (2), (3а) и (3б) (б).

метрии. Специально для этого рассчитаны и проанализированы положения оптимальных точек на кантилевере – одной при сочетании двух методов и двух при использовании одного метода – как функции направления и амплитуды приложенной к зонду силы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

АСМ-кантилевер – это консоль длиной l_C с зондом высотой l_T (рис. 1а). Если к кончику зонда приложить силу F , то ее компоненты F_Y и F_Z изогнут, а компонента F_X закрутит консоль [18]. Форма слабого изгиба [19] консоли в плоскости YZ подчиняется уравнению Эйлера–Бернулли:

$$EIZ''(Y) = F_Y l_T + F_Z (l_C - Y). \tag{1}$$

Левая часть (1) – это произведение модуля Юнга E материала консоли, момента инерции $I = wt^3/12$ ее прямоугольного сечения шириной w и толщиной t , локальной кривизны $Z''(Y)$; правая часть – распределение момента сил, линейная функция координаты Y вдоль консоли (рис. 1а).

Пьезорезистивным методом (ПР) регистрируется связанная с механическим напряжением локальная деформация консоли, следовательно, ее кривизна, пропорциональная моменту сил и при малых изгибах приближенно равная второй производной смещения; методом оптического рыча-

га (ОР) – первообразная кривизны, угол изгиба α ; методом интерферометрии (И) – первообразная угла, смещение (величина изгиба) консоли (рис. 1б). Можно записать:

$$\begin{cases} z''(x) = \Pi^{-1}(\Delta R_0(x)/R_0)(wt^2/2k_C l_C^2), & \text{ПР} \\ z'(x) = \text{tg}(\alpha(x)) \cong \alpha(x), & \text{ОР} \\ z(x) = Z(x)/l_C, & \text{И.} \end{cases} \tag{2}$$

Переменная z и координата $x = Y/l_C$, $x \in [0; 1]$, безразмерны. Использованы жесткость $k_C = Ewt^3/(4l_C^3)$ прямоугольной консоли, пьезорезистивный коэффициент Π , вариация $\Delta R_0(x)/R_0$ сопротивления пьезодатчика [11].

Из (1) и (2), также из рис. 1, следует:

$$\begin{cases} z''(x) = a^F - b^F x \\ z'(x) = a^F x - (b^F/2)x^2 \\ z(x) = (a^F/2)x^2 - (b^F/6)x^3 \\ a^F = (3F_Z + 3\lambda F_Y)/(k_C l_C) = \\ = 3|F_{YZ}|(\sin \alpha^F + \lambda \cos \alpha^F)/(k_C l_C) \\ b^F = 3F_Z/(k_C l_C) = 3|F_{YZ}|\sin \alpha^F/(k_C l_C) \\ \lambda = l_T/l_C. \end{cases} \tag{3а}$$

$|F_{YZ}|$ и α^F – это амплитуда и полярный угол проекции приложенной силы в плоскости изгиба консоли YZ . Если пренебречь деформацией зонда,

можно в (3а) заменить F_Y и F_Z на Y^C и Z^C , компоненты смещения “идеального” кантилевера \mathbf{r}^C [20]:

$$\begin{cases} z''(x) = a^r - b^r x \\ z'(x) = a^r x - (b^r/2)x^2 \\ z(x) = (a^r/2)x^2 - (b^r/6)x^3 \\ a^r = 6Z^C/l_c - 2Y^C/l_T = \\ = 2|\mathbf{r}_{YZ}^C|(3\lambda \sin \alpha^r - \cos \alpha^r)/l_T \\ b^r = 12Z^C/l_c - 6Y^C/l_T = \\ = 6|\mathbf{r}_{YZ}^C|(2\lambda \sin \alpha^r - \cos \alpha^r)/l_T, \end{cases} \quad (36)$$

где $|\mathbf{r}_{YZ}^C|$ и α^r – это амплитуда и полярный угол проекции вектора смещения “идеального” кантилевера на плоскость изгиба консоли (рис. 1а).

В (3а) a^F и b^F зависят от силы, а в (3б) a^r и b^r – от смещения, но $a = a^F = a^r$ и $b = b^F = b^r$. Чтобы рассчитать a и b , достаточно из трех величин z , z' , z'' определить две в одной точке либо одну в двух точках на консоли. Положения таких точек можно выбрать оптимальным образом.

Найдем в качестве примера две оптимальные точки определения z'' пьезорезистивным методом. Обозначив $z''(x) = p$, выразим параметры a и b через измеряемые величины x_i и p_i :

$$\begin{cases} p_1 = a - bx_1 \\ p_2 = a - bx_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a = (x_2 p_1 - x_1 p_2)/(x_2 - x_1) \\ b = (p_1 - p_2)/(x_2 - x_1). \end{cases} \quad (4)$$

Ошибки определения, дисперсии a и b , σ_a^2 и σ_b^2 , зависят от дисперсий x_i и p_i . Используя (4), минимизируем линейную комбинацию σ_a^2 и σ_b^2 в области $x_1, x_2 \in [0; 1]$:

$$\begin{aligned} M(x_1, x_2) &= \sigma_a^2 \cos^2 \theta + \sigma_b^2 \sin^2 \theta = \\ &= \left[(a_{x_1}^2 + a_{x_2}^2) \cos^2 \theta + (b_{x_1}^2 + b_{x_2}^2) \sin^2 \theta \right] + \\ &+ k^2 \left[(a_{p_1}^2 + a_{p_2}^2) \cos^2 \theta + (b_{p_1}^2 + b_{p_2}^2) \sin^2 \theta \right] \sigma_x^2, \quad (5) \\ a_{x_i}^2 &= (da/dx_i)^2 \quad \text{и} \quad b_{x_i}^2 = (db/dx_i)^2, \\ a_{p_i}^2 &= (da/dp_i)^2 \quad \text{и} \quad b_{p_i}^2 = (db/dp_i)^2, \\ \sigma_{x_i}^2 &= \sigma_x^2 \quad \text{и} \quad \sigma_{p_i}^2 = \sigma_p^2. \end{aligned}$$

Введены $k = \sigma_p/\sigma_x$ – отношение ошибок измерений нормированных локальной кривизны консоли $p = z''$ и координаты x (рис. 1а), служебный параметр θ . В зависимости от величины θ значимы, например, только σ_a^2 при $\cos \theta = 1$, только σ_b^2 при $\sin \theta = 1$, обе ошибки при $\cos \theta = \sin \theta$ [17].

Из (4) и (5) получаем:

$$M(x_1, x_2) = (b^2 + k^2) \left(\frac{(x_2^2 + x_1^2) \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}{(x_2 - x_1)^2} \right) \sigma_x^2. \quad (6)$$

Введя переменные $g, h \in [0; 1]$, $g = (2x_1 x_2)^{1/2}$ и $h = x_1 - x_2$, перепишем (6):

$$\frac{M(g, h)}{\sigma_x^2} = (b^2 + k^2) \frac{(g^2 + h^2) \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}{h^2}. \quad (7)$$

$M(g, h)$ для любого фиксированного $h \in (0; 1]$ как возрастающая функция g минимальна при $g = 0$. $M(g, h)$ для любого фиксированного $g \in [0; 1]$ как убывающая функция h минимальна при $h = 1$. Поэтому $M(g, h)$ имеет минимум в точке $g = 0, h = 1$, а $M(x_1, x_2)$ – в $x_1 = 1, x_2 = 0$. Важно, что решение не зависит от k, b, a, θ . С учетом (3а) и (3б) это означает независимость от направления, амплитуды силы (или вектора смещения) и точности измерений x и z'' .

Стоит подчеркнуть, что приведенный выше результат строго обоснован: точнее всего коэффициенты зависимости $p = a - bx$ определяются, если измерить p на краях отрезка $[0; 1]$. Благодаря этому для оптимизации пьезорезистивного метода есть универсальное решение: один пьезодатчик следует расположить там, где консоль закреплена, а другой – на свободном конце, т.е. в $x_{2\text{extr}} = 0$ и $x_{1\text{extr}} = 1$ (рис. 2г, 3г).

В [17] для метода оптического рычага было доказано: при любых k, b, a, θ одна из координат минимума $M(x_1, x_2)$ – это $x_{1\text{extr}} = 1$. Это верно также для метода интерферометрии, что доказывается аналогично [17]. Вторая координата $x_{2\text{extr}}$ в случае методов интерферометрии и оптического рычага и координата x_{extr} для комбинаций И + ОР, И + ПР, ОР + ПР определяется по корню полинома из табл. 1. В [17] представлен подробный аналитический вывод коэффициентов такого полинома и продемонстрировано согласие результатов расчетов для метода оптического рычага с АСМ-измерениями.

На рис. 2 для различных комбинаций методов показаны угловые диаграммы оптимальных точек минимума ошибки измерений компонент \mathbf{F} . В отличие от диаграммы $x_{1\text{extr}}(\alpha^F) = 1$ форма диаграмм $x_{2\text{extr}}(\alpha^F)$ и $x_{\text{extr}}(\alpha^F)$ зависит от безразмерного параметра $C^F = k k_{dC}/|F_{YZ}|$ (подробно о параметре написано в [17]).

Рассмотрим на рис. 2а диаграммы метода интерферометрии. Две концентрические окружности $x_{1\text{extr}} = 1, 3$, и $x_{2\text{extr}} \approx 0.63$ с $C^F \rightarrow \infty$ (кривая 2) –

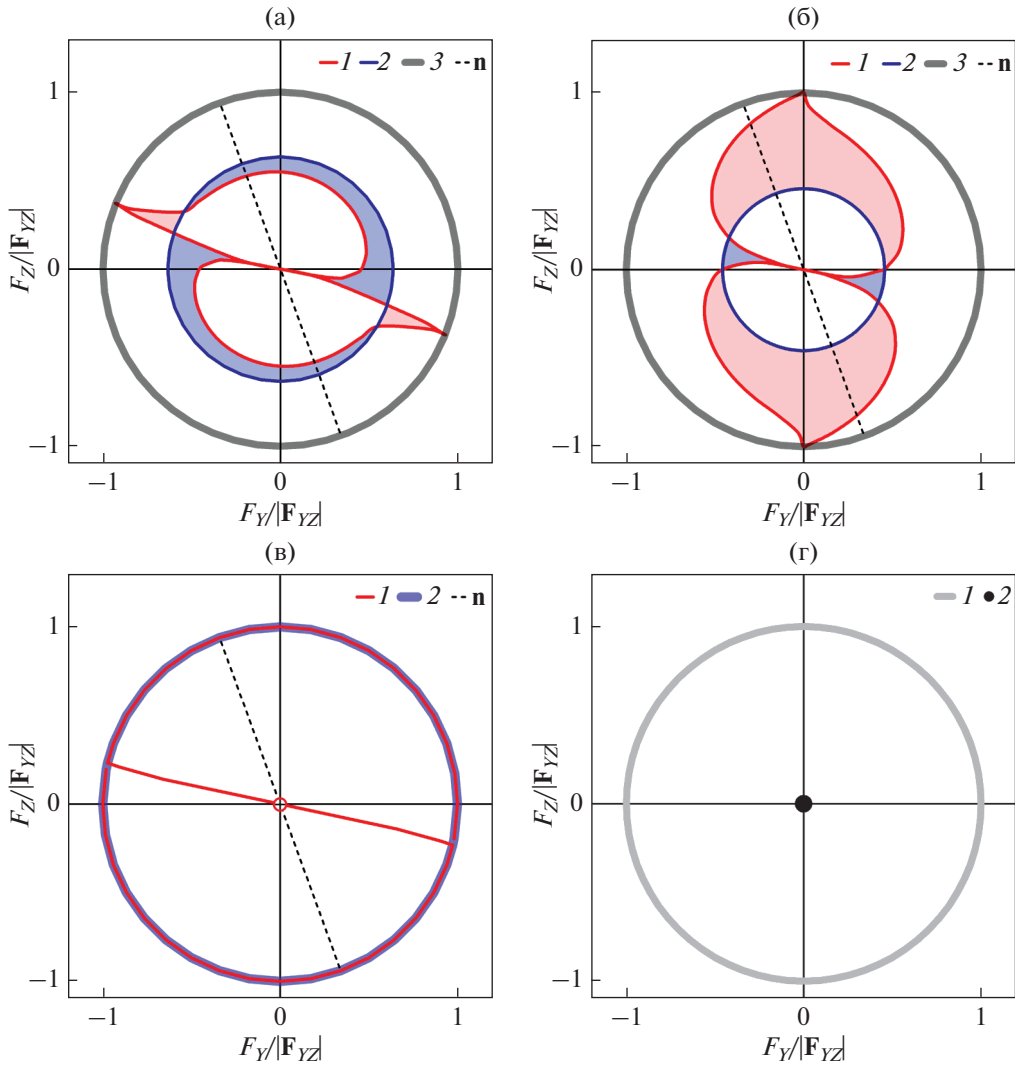


Рис. 2. Оптимизация измерений F_y , F_z методы интерферометрии (а) и оптического рычага (б): диаграммы $x_{2\text{extr}}(\alpha^F)$ с $C^F = 0$ (1); окружности $x_{2\text{extr}} \approx 0.63$ и 0.46 с $1/C^F = 0$ (2), $x_{1\text{extr}} = 1$ (3); в – диаграмма $x_{\text{extr}}(\alpha^F)$ с $C^F = 0$ (1) и окружность $x_{\text{extr}} = 1$ с $1/C^F = 0$ (2) для комбинаций методов И + ПР, И + ОР, ОР + ПР; г – пьезорезистивный метод: окружность $x_{1\text{extr}} = 1$ (1), точка $x_{2\text{extr}} = 0$ (2). На (а–в) пунктирные диаметры n под углом 110° к горизонтальной оси обозначают вертикальное направление. Расчеты для прямоугольного кантилевера с $\lambda = 0.2$ проводили в Mathcad 15 (PТС, США).

это изотропные диаграммы, а диаграмма $x_{2\text{extr}}(\alpha^F)$ (кривая 1) рассчитана для $C^F = 0$ и анизотропна. Так как в эксперименте $C^F \sim 1$ [17], диаграмма $x_{2\text{extr}}$ для оптимизации АСМ-измерений лежит в закрашенных областях между 1 и 2 и тоже будет анизотропной. Пунктирный диаметр на рис. 2а под углом $\alpha^F = 110^\circ$ соответствует вертикальной оси N на рис. 1а, вдоль которой реакция опоры (т.е. сила со стороны плоского образца в отсутствие трения) действует на зонд. В этом случае оптимальные измерения будут в $x_{1\text{extr}} = 1$ и $x_{2\text{extr}} \in [0.56; 0.63]$ (рис. 2а, участки диаметра n в закрашенных обла-

стях между анизотропной и изотропной диаграммами 2 и 1).

Таким же путем по пересечениям диаметра n с диаграммами 2 и 1 на рис. 2б для метода оптического рычага получим более широкий диапазон $x_{2\text{extr}} \in [0.46; 0.88]$, а диаграмма для комбинаций методов (рис. 2в) в случае реакции опоры дает не зависящее от C^F , фиксированное значение $x_{\text{extr}} = 1$. Аналогично ищутся оптимальные точки измерений для других направлений силы.

На практике измерять вектор произвольно направленной силы удобней, имея изотропные диа-

Таблица 1. Оптимальные точки на прямоугольной консоли для измерений вектора силы взаимодействия АСМ-зонд—образец и соответствующего вектора смещения “идеального” кантилевера

Способ измерения	Полином, по корню которого на отрезке $x \in [0; 1]$ определяется положение оптимальной точки измерений на консоли
И в двух точках	$[(b - 2a)^2 + 4k^2]\cos^2\theta x^6 + \{[(b - 2a)^2 + 4k^2]\sin^2\theta + b^2\}x^5 - 6abx^4 + 2a(4a + b)x^3 - 4a^2x^2 + 12k^2x - 8k^2; k = \sigma_z/\sigma_x$
ОР в двух точках	$[k^2 + (b - a)^2]\cos^2\theta x^4 + \{[k^2 + (b - a)^2]\sin^2\theta + b^2\}x^3 - 3abx^2 + (2k^2 + ab + 2a^2)x - (k^2 + a^2); k = \sigma_z/\sigma_x$
И + ОР в одной точке	$ab\cos^2\theta x^5 - (k^2 + 4a^2)\cos^2\theta x^4 - 2[(k^2 + a^2)\sin^2\theta - 9k^2\cos^2\theta]x^2 - 12k^2\sin^2\theta; k = \sigma_z/\sigma_x, \sigma_z = \sigma_x$
И + ПР в одной точке	$12ab\cos^2\theta x^5 - [36a^2\cos^2\theta + k^2\sin^2\theta]x^4 - 8[a^2\sin^2\theta + 9k^2\cos^2\theta]x^2 - 12k^2\sin^2\theta; k = \sigma_z/\sigma_x, \sigma_z = \sigma_x$
ОР + ПР в одной точке	$2ab\cos^2\theta x^3 - [4(k^2 + a^2)\cos^2\theta + k^2\sin^2\theta]x^2 - 2(k^2 + a^2)\sin^2\theta; k = \sigma_z/\sigma_x, \sigma_z = \sigma_x$

Примечание. И – метод интерферометрии, ОР – метод оптического рычага, ПР – пьезорезистивный метод.

$$a: = a^F = 3|F_{YZ}|(\sin\alpha^F + \lambda \cos\alpha^F)/(k_C l_C), b: = b^F = 3|F_{YZ}|\sin\alpha^F/(k_C l_C), \theta: = \theta^F \text{ и } \cos^2\theta^F = 1/(2 + \lambda^2); a: = a^r = 2|F_{YZ}^C|(3\lambda \sin\alpha^r - \cos\alpha^r)/l_T, b: = b^r = 6|F_{YZ}^C|(2\lambda \sin\alpha^r - \cos\alpha^r)/l_T, \theta: = \theta^r \text{ и } \cos^2\theta^r = (36 + 9\lambda^2)/(45 + 10\lambda^2) \text{ (выражения (3а) и (3б), [17]).}$$

граммы оптимальных точек, как на рис. 2г в пьезорезистивном методе. На рис. 2в диаграмма 2 с $C^F \rightarrow \infty$ – это окружность $x_{extr} = 1$. Диаграмма с конечным $C^F \geq 0$ отличается от этой окружности только в двух диаметрально противоположных узких диапазонах α^F шириной $\approx 0.5^\circ$ (ОР + ПР), 1.3° (И + ПР), 2.1° (И + ОР). Общие границы диапазонов дает условие $a = 0$ в (3а) ($F_Z = -\lambda F_Y$): $\alpha^F \approx -11.3^\circ$ и 168.7° для $\lambda = 0.2$. На границе $x_{extr} = 1$, если $C^F > 0$, и x_{extr} не определено, если $C^F = 0$ (выколотая точка в центре координат на рис. 2в). Комбинации методов упорядочиваются с учетом широты угловых диапазонов, где x_{extr} зависит от C^F , и площади областей между диаграммами на рис. 2а, 2б, где от C^F зависит x_{2extr} . В итоге имеем: ПР, И + ОР, И + ПР, ОР + ПР, И, ОР.

На рис. 3 показаны диаграммы оптимизации измерений компонент вектора смещения r^C “идеального” кантилевера. В соответствующих друг другу случаях на рис. 2 и 3 отличия формы диаграмм объясняются несовпадением углов α^r и α^F . Из выражений (3а) и (3б) следует связь между этими углами [17]:

$$\text{tg}\alpha^r = (3\lambda + 2\text{tg}\alpha^F)/(6\lambda^2 + 3\lambda\text{tg}\alpha^F). \quad (8)$$

Например, диаметры \mathbf{n} на рис. 2а–2в соответствуют диаметрам \mathbf{s} на рис. 3а–3в. Вертикаль \mathbf{n} идет под углом $\alpha^F \approx 110^\circ$ к горизонтальной оси, а направление скольжения \mathbf{s} согласно (8) для $\lambda = 0.2$ – под углом $\alpha^r \approx 74^\circ$.

Диаграммы с конечным $C^r \geq 0$ будут отличаться от окружности $x_{extr} = 1$ с $C^r \rightarrow \infty$ (рис. 3в) в диаметрально противоположных диапазонах углов α^r : $\approx 7^\circ$ (ОР + ПР), $\approx 23^\circ$ (И + ПР), $\approx 117^\circ$ (И + ОР). Общие границы диапазонов дает условие $a = 0$ в системе (3б): $\alpha^r \approx 59^\circ$ и $\approx 239^\circ$ для $\lambda = 0.2$. Эти диапазоны шире своих аналогов, рассмотренных при обсуждении рис. 2в, но три пары методов упорядочиваются так же, как в случае измерений вектора силы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинируя методы пьезорезистивный, оптического рычага и интерферометрии попарно в одной точке либо любой из них в двух точках на консоли, можно измерять компоненты силы взаимодействия АСМ-зонд—образец в плоскости изгиба консоли, а в трех комбинациях с методом оптического рычага – вектор силы целиком. В пяти комбинациях методов, соответствующих минимуму ошибки измерений, оптимальные положения таких точек меняются с направлением силы

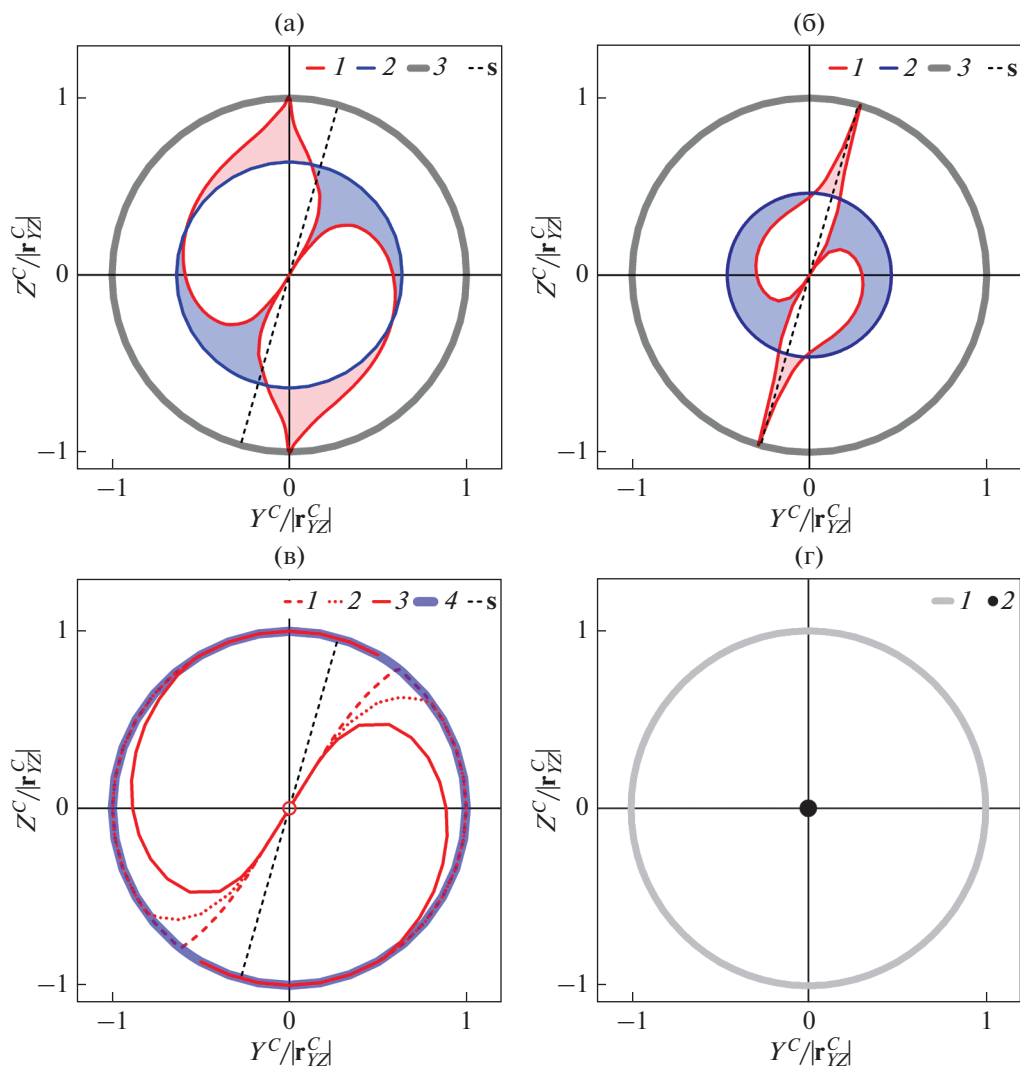


Рис. 3. Оптимизация измерений Y^C, Z^C : методы интерферометрии (а) и оптического рычага (б): диаграммы $x_{2extr}(\alpha^r)$ с $C^r = 0$ (1); окружности $x_{2extr} \approx 0.64$ и 0.46 с $1/C^r = 0$ (2), $x_{1extr} = 1$ (3); в – окружность $x_{extr} = 1$ с $1/C^r = 0$ (4) и диаграммы $x_{extr}(\alpha^r)$ с $C^r = 0$ для комбинаций методов: ОР + ПР (1), И + ПР (2), И + ОР (3); г – метод ПР: окружность $x_{1extr} = 1$ (1), точка $x_{2extr} = 0$ (2). На (а)–(в) пунктирные диаметры s под углом $\approx 74^\circ$ к горизонтальной оси обозначают направление скольжения зонда; $C^r = kl_T / |r_{YZ}^C|$.

и, соответственно, смещением “идеального” кантилевера с “недеформируемым” зондом [17, 20]. Можно выстроить эти комбинации по возрастанию изменчивости положений оптимальных точек: И + ОР, И + ПР, ОР + ПР, И, ОР. У пьезорезистивного метода оптимальные точки, не зависящие от амплитуды и направления как приложенной к зонду силы, так и смещения “идеального” кантилевера, зафиксированы в месте крепления и на свободном конце консоли. Однако по сравнению с пьезорезистивным методом, методы оптического рычага и интерферометрии чувствительны к меньшим силам [13]. Поэтому при реализа-

ции измерений в АСМ векторов силы и смещения зонда выбор может быть сделан в пользу комбинаций И + ОР в одной точке [21] и оптического рычага в двух точках [16, 17].

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при частичной поддержке Российского научного фонда (грант № 19-13-00151). Автор благодарит за интерес к теме работы А.М. Минарского (СПбАУ им. Ж.И. Алферова РАН) и за помощь в подготовке рукописи М.М. Халисова (ИФ им. И.П. Павлова РАН).

Конфликт интересов: Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Binnig G., Quate C.F., Gerber C.* // *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 56. № 9. P. 930.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
2. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005. 144 с.
3. *Bolopion A., Xie H., Haliyo D.S., Régnier S.* // *IEEE/ASME Transac. Mechatronics.* 2012. V. 17. № 1. P. 116.
<https://doi.org/10.1109/TMECH.2010.2090892>
4. *Няпшаев И.А., Анкудинов А.В., Стояняга А.В., Трофимова Е.Ю., Еропкин М.Ю.* // *ЖТФ.* 2012. Т. 82. № 10. С. 109.
5. *Dai G., Hahm K., Scholze F., Henn M.-A., Gross H., Fluegge J., Bosse H.* // *Meas. Sci. Technol.* 2014. V. 25. P. 044002.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/4/044002>
6. *Soergel E.* // *J. Phys. D.* 2011. V. 44. P. 464003.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/46/464003>
7. *Alikin D.O., Gimadeeva L.V., Ankudinov A.V., Hu Q., Shur V.Ya., Kholkin A.L.* // *Appl. Surf. Sci.* 2021. V. 543. P. 148808.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148808>
8. *Kis A.* Mechanical Properties of Mesoscopic Objects, Thesis. Lausanne: EPFL, 2003. 166 p.
9. *Ankudinov A.V.* // *Semiconductors.* 2019. V. 53. № 14. P. 1891.
<https://doi.org/10.1134/S1063782619140021>
10. *Khalisov M.M., Lebedev V.A., Poluboyarinov A.S., Garshchik A.V., Khrapova E.K., Krasilnik A.A., Ankudinov A.V.* // *Nanosyst. Phys. Chem. Math.* 2021. V. 12. № 1. P. 118.
<https://doi.org/10.17586/2220-8054-2021-12-1-118-127>
11. *Tortonose M., Barrett R.C., Quate C.F.* // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 62. № 8. P. 834.
<https://doi.org/10.1063/1.108593>
12. *Thaysen J., Boisen A., Hansen O., Bouwstra S.* // *Sensors and Actuators A.* 2000. V. 83. № 1–3. P. 47.
[https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(00\)00299-5](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(00)00299-5)
13. *Nanotribology and Nanomechanics. An Introduction.* / Ed. Bhushan B. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 1516 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-77608-6>
14. *Alexander S., Hellemans L., Marti O., Schneir J., Elings V., Hansma P.K.J.* // *J. Appl. Phys.* 1989. V. 65. № 1. P. 164.
<https://doi.org/10.1063/1.342563>
15. *Rugar D., Mamin H.J., Guethner P.* // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 55. № 25. P. 2588.
<https://doi.org/10.1063/1.101987>
16. *Mrinalini R.S.M., Sriramshankar R., Jayanth G.R.* // *IEEE/ASME Transac. Mechatronics.* 2015. V. 20. № 5. P. 2184.
<https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2366794>
17. *Анкудинов А.В., Минарский А.М.* // *ЖТФ.* 2021. Т. 91. № 6. С. 1045.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2021.06.50877.303-20>
18. *Sarid D.* Exploring Scanning Probe Microscopy with Mathematica. Weinheim: WILEY–VCH Verlag GmbH & Co, 2007. 310 p.
19. *Landau L.D., Lifshitz E.M.* Theory of Elasticity. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1970. 165 p.
20. *Ankudinov A.V.* // *Nanosystems: Phys., Chem., Math.* 2019. V. 10. № 6. P. 642.
<https://doi.org/10.17586/2220-8054-2019-10-6-642-653>
21. *Labuda A., Proksch R.* // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 106. № 25. P. 253103.
<https://doi.org/10.1063/1.4922210>

AFM Measurements of the Interaction Force Vector by Means of Interferometry, Optical Beam Deflection and Piezoresistive Method

A. V. Ankudinov*

Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021 Russia

*e-mail: alexander.ankudinov@mail.ioffe.ru

In atomic force microscopy, the probe–sample interaction, as a rule, is controlled using the optical beam deflection method by the angle of cantilever bending at a selected point on it. Such control is not designed to register all three components of the interaction force vector. It is possible to reveal these components and the result of the force action – the displacement vector of the “non-deformable” probe of the “ideal” cantilever – by additionally measuring the deformation (using the piezoresistive method) or the bending value (by the interferometry method) at a selected point, or the bending angle at another point on the cantilever. The results of an analytical calculation of the optimal location of these points on the cantilever for six combinations of the three named methods, which minimize the measurement error of the components of the force and displacement vectors, are presented.

Keywords: atomic force microscopy, cantilever, spatial components of the interaction force, piezoresistive method, interferometry, optical beam deflection.