

УДК 621.315

ПОНДЕРОМОТОРНЫЙ СЕНСОР НАНОМАСШТАБНЫХ СИЛ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

М.Г. АЗАРЯН, В.М. АРУТЮНЯН, Г.А. МНАЦАКАНЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 10 июня 2005 г.)

С использованием изготовленного нами коромыслового кантилевера проведены экспериментальные исследования особенностей пондеромоторной регистрации наномасштабных сил и перемещений. Изменения динамического пондеромоторного взаимодействия регистрировались пьезорезонансными устройствами. С применением контактной регистрации наличия/отсутствия колебаний коромысла в системе с отрицательной обратной связью получена линейная зависимость регистрируемого сигнала от перемещения коромысла. Работающий по предложенному принципу кантилевер зарегистрировал силу $\approx 2,3 \cdot 10^{-9}$ Н с чувствительностью $\approx 0,23 \cdot 10^{-9}$ Н/мВ.

1. Введение

Бурно развивающаяся физика наномерных объектов требует разработки и создания методов и инструментов исследования реальной картины физических процессов наномира. Огромным прорывом в этом направлении стало создание Бинингом и Рорером туннельного микроскопа [1], ставшего основой принципиально новой микроскопии [2]. Именно эти микроскопы (помимо рекордного трехмерного пространственного разрешения) обеспечили уникальную возможность активного "вмешательства" в наномир. Недаром их называют "глазами и руками" нанотехнологии [3].

В зондовых силовых микроскопах в качестве сенсора наномасштабных сил используются кантилеверы, для регистрации сигнала с которых применяются разнообразные принципы [4]. В работе [5] предложена коромысловая конструкция кантилевера и емкостной способ регистрации смещения коромысла. В работе [6] выдвинута идея повышения чувствительности устройства за счет использования регистрации пондеромоторного взаимодействия, которое возможно реализовать в большинстве известных конструкций кантилеверов (см., например, [2,4,5]). В [6] приведены результаты предварительных экспериментов, которые подтвердили обоснованность предложенной идеи.

Предлагаемая работа ставит целью осуществить следующий этап исследования систем, в основе функционирования которых лежит вышеописанная идея.

2. Основа метода

Чувствительность любого сенсора формулируется как производная регистрируемого сигнала по измеряемому параметру. Для динамически емкость-образующих систем (как и в [4,5]) изменение межэлектродного зазора h за счет перемещения подвижного электрода вызывает изменение величины емкости C_d и, в случае обеспечения соответствующих условий, пондеромоторной силы F_n . Отсюда для чувствительностей (γ_C и γ_F , соответственно) относительного смещения δ подвижного электрода из исходного положения h_0 между электродами можно записать [7,8]

$$\gamma_C = \frac{\Delta C}{C} = \frac{\delta}{h_0} \frac{2}{1 - \left(\frac{\delta}{h_0}\right)^2}, \quad (1)$$

$$\gamma_F = \frac{\Delta F}{F} = \frac{\delta}{h_0} \frac{4}{\left[1 - \left(\frac{\delta}{h_0}\right)^2\right]^2}. \quad (2)$$

Из сравнения (1) и (2) видно, что $\gamma_F = \gamma_C^2 \cdot h_0 / \delta$. Следовательно, если удастся предложить такое решение, которое позволило бы проконтролировать изменение пондеромоторной силы, то мы получим возможность создать более высокочувствительный датчик.

Если использовать синусоидальное напряжение $U_S = U_0 \sin(\omega t + \varphi)$, то нетрудно убедиться, что переменная сила $\tilde{F}_n$ описывается следующим выражением:

$$\tilde{F}_n = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{U_0^2 S}{4h^2} (1 - \cos 2(\omega t + \varphi)). \quad (3)$$

Здесь U_0 – амплитудное значение инициирующего напряжения, φ – фаза, $\omega = 2\pi T$ – угловая частота и T – период сигнала. Помимо прочего, переменная сила уменьшает то минимальное расстояние между электродами динамического конденсатора, после которого проявляется эффект слипания [5].

Из (3), в частности, следует, что изменяющаяся по гармоническому закону с удвоенной частотой сила взаимного притяжения электродов спадает до нулевого значения и достигает максимального ($\tilde{F}_n = \varepsilon_0 \varepsilon U_0^2 S / 4h^2$). При этом, $\tilde{F}_n$ вдвое меньше, чем статическая ($\tilde{F}_{cm} = \varepsilon_0 \varepsilon U_0^2 S / 2h^2$). Так как требуется регистрация и измерение изменения динамической пондеромоторной силы, то желательно использовать технику синхронного детектирования, предполагающую наличие синхронного сигнала той же частоты, что и у регистрируемого, т.е. 2ω .

3. Описание и обсуждение экспериментов

Нами проведены исследования поведения пондеромоторной силы (F_n)

емкостей коромысло/неподвижные электроды с изменением положения коромысла относительно электродов 1 и 2. Цель таких исследований – выявить всевозможные особенности работы реального устройства, основанного на предложенном способе регистрации силы [6], действующей на коромысловый кантилевер – сенсор атомно-силового микроскопа (или перемещения) [5]. Для отслеживания поведения F_n использовались пьезорезонансные датчики (ПРД) [9]. Откорректировав по результатам отмеченных исследований условия, был поставлен конечный эксперимент, который, по возможности, максимально близко реализовал алгоритм регистрации, предложенный в [6]. Испытуемый кантилевер аналогичен описанному в работе [5]. На рис.1 схематически представлена его конструкция. Пусть по какой-то причине коромысло отклонится из первоначального положения, где зазоры обеих емкостей равны h_0 . При этом, благодаря торсионной подвеске, зазоры емкостей, к которым приложено напряжение, изменятся, т.е. зазор C_1 уменьшается до $h_0 - \Delta$, а зазор C_2 увеличивается до $h_0 + \Delta$. Приложив напряжение к паре электродов (электрод 1/коромысло и электрод 2/коромысло), можно обеспечить силы электростатического взаимодействия – пондеромоторные силы. Возможность непосредственного сравнения, относительная простота этой конструкции и удобство для осуществления пондеромоторной регистрации отклонения коромысла предопределили именно ее использование в наших исследованиях.

КОРОМЫСЛОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ КАНТИЛЕВЕРА



Рис.1. 1 и 2 – неподвижные электроды емкостей C_1 и C_2 , сформированные на фольгированном стеклотекстолите; h_0 – задаваемый слюдяной прокладкой зазор между плоскостью коромысла-электрода и электродами 1,2; O – ось качания коромысла.

Очевидно, что такой элемент должен обладать резонансной частотой "качания на торсионах" ω_t , которая зависит от габаритов самого элемента и от жесткости торсионной подвески (ω_t можно варьировать толщиной, длиной и шириной торсиона). Понятно, что используемые ПРД также обладают собственной частотой резонанса – ω_d . Как отмечено в [6], следует "разнести" как можно дальше друг от друга ω_t и ω_d .

С этой целью были сняты их амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), согласно которым $\omega_d = 954$ Гц, а $\omega_t = 1520$ Гц. С применением ПРД проведены эксперименты бесконтактной регистрации наличия/отсутствия колебаний коромысла, инициированных $\tilde{F}_n$ при наличии отрицательной об-

ратной связи (ООС). Помимо прочего, они продемонстрировали нелинейную зависимость между напряжением U_w , инициирующим смещение одного из плеч коромысла, и сигналом $U_{сд}$ отработки ООС, создающим необходимую силу для восстановления бесколебательного состояния коромысла.

В связи с этим была опробована схема эксперимента представленной на рис.2 конфигурации. Здесь создана возможность приложения к левому крылу коромысла двух противоположенных друг к другу переменных сил $\tilde{F}_{nz}$ и $\tilde{F}_{n1}$. Независимым прецизионным варьированием зазора Z между внешней стороной коромысла и дополнительного электрода 3 и величиной гармонически меняющегося потенциала электрода 1 (переменное сопротивление r_n) равнодействующая $\tilde{F}_\Sigma = \tilde{F}_{nz} - \tilde{F}_{n1}$ этих сил может быть сведена к нулю. Благодаря блокирующей емкости C к электроду 1 можно приложить и смещение $U_{исп}$, задаваемое источником статического питания (ИСП). На электрод 2 поступает сигнал $U_{сд}$ отработки ООС с синхронного детектора (СД). Как только ПРД зарегистрирует колебания коромысла на частоте 2ω , появляющееся $U_{сд}$ (пропорциональное амплитуде колебаний) формирует статическую пондеромоторную силу притяжения $F_{сд}$ правого плеча коромысла к электроду 2. Из-за этого (в этой конфигурации) для осуществления ООС требуется, чтобы возникновение колебаний сопровождалось уменьшением h_1 . В противном случае реализуется положительная обратная связь. Учет этого продиктовал алгоритм проведения измерений.

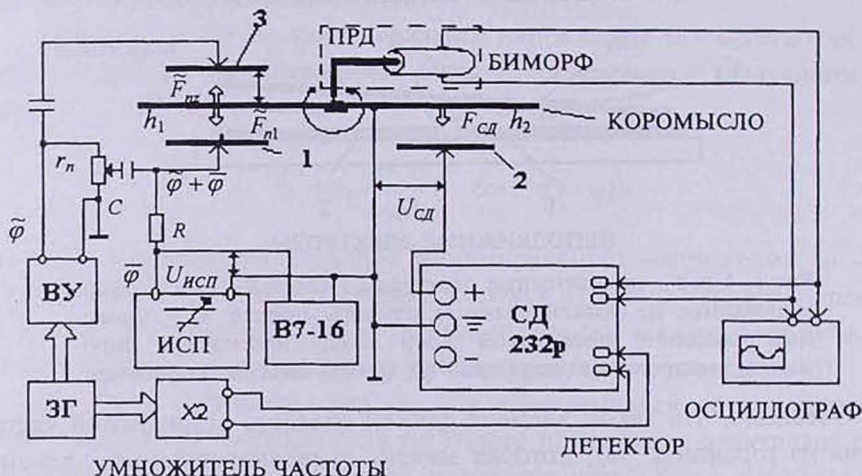


Рис.2. Схематическое представление эксперимента. К левому крылу коромысла приложены две противоположенные переменные силы $\tilde{F}_{nz}$ и $\tilde{F}_{n1}$. Они формируются усиленным с помощью высоковольтного усилителя (ВУ) гармоническим сигналом с звукового генератора (ЗГ). Удвоенный умножителем частоты (УЧ) сигнал ЗГ служит синхросигналом для синхронного детектора (СД). Емкости C обеспечивают развязку переменного и постоянного сигнала $U_{исп}$ с источника статического питания (ИСП). На электрод 2 поступает сигнал $U_{сд}$ отработки ООС с СД. Колебание коромысла линейно преобразуется посредством ПРД и СД в $U_{сд}$, которое формирует статическую пондеромоторную силу притяжения $F_{сд}$ правого плеча коромысла к электроду 2.

Подачей на электрод 1 некоторого промежуточного значения $U_{исп}$ создается статическая сила $F_{исп}$, что несколько уменьшает h_1 (т.е. $h_1 - \Delta$) и увеличивает h_2 (т.е. $h_2 + \Delta$). Регулировкой переменных сигналов необходимо добиться равенства нулю F_{Σ} (т.е. колебания отсутствуют и сигнал с $U_{сд} \approx 0$) и подключить сигнал к СД, тем самым, замкнув цепь обратной связи, и снять зависимость $U_{сд}$ от возрастания $U_{исп}$. График зависимости $U_{сд}(U_{исп})$ представлен на рис.3. Можно убедиться, что зависимость линейная. Такой ход зависимости можно объяснить следующим образом. В бесколебательном состоянии на левое крыло действуют следующие силы: равные и противоположно направленные переменные (синфазные) F_{n1} и F_{n2} с результирующей $F_{\Sigma} = 0$, и сила $F_{исп}$, уравновешенная силой упругости коромысла F_{η} ($F_{\eta} = \Delta \cdot \eta$, где η – жесткость), т.е. $F_{исп} = F_{\eta}$. Это равенство диктует и величину наклона коромысла. Из-за равенства нулю $U_{сд}$ в правом крыле отсутствует внешняя сила, действующая на это крыло коромысла. Когда $F_{исп}$ возрастает на величину $\delta F_{исп}$ (в данном случае за счет “прибавки” $\delta U_{исп}$), нарушается равенство F_{n1} с F_{n2} , что должно приводить к $F_{\Sigma} \neq 0$ и, как следствие этого, появлению колебаний коромысла. Это порождает отличную от нуля величину $\delta U_{сд}$, которая создает силу $\delta F_{сд}$ взаимного пондеромоторного притяжения правого крыла с электродом 2. Эта сила из-за коромысловой конструкции возвращает систему в исходное равновесное бесколебательное состояние, которое теперь определяется следующим равенством: $F_{исп} + \delta F_{n1} = F_{\eta} + \delta F_{сд}$. Бесколебательное пространственное положение коромысла диктуется обязательностью условия $F_{\Sigma} = 0$, что означает неизменность F_{η} . Можно утверждать, что $F_{исп} + \delta F_{n1} - \delta F_{сд} = F_{\eta} \equiv \text{const}$. Это выражение показывает, что с возрастанием $F_{исп} + \delta F_{n1}$ (т.е. $\delta U_{исп}$) должно падать $\delta F_{сд}$ (т.е. $\delta U_{сд}$). Собственно именно такой ход кривой и представлен на рис.3.

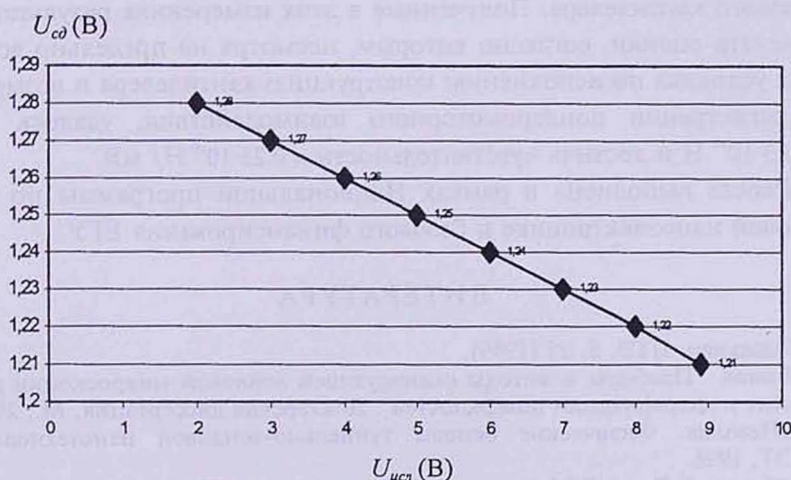


Рис.3. Линейная зависимость сигнала $U_{сд}$, восстанавливающего исходное бесколебательное состояние от возмущения $U_{исп}$, нарушающего это состояние.

На основании полученной экспериментальной зависимости можно сделать оценки величины силы, которую удалось зарегистрировать.

Площади S электродов емкостей C_1 и C_2 были около $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Величина зазора h (толщина прокладки из мусковита) равна приблизительно 50 мкм. Согласно приведенной линейной зависимости можно утверждать, что при изменении $U_{\text{исп}}$ на величину $\Delta U_{\text{исп}} = 1 \text{ В}$ сила, действующая на коромысло, изменяется на величину $\Delta f = \epsilon_0 \epsilon \Delta U_{\text{исп}}^2 S / 2h^2 = 8,85 \cdot 10^{-12} [\text{Ф/м}] \cdot 1 [\text{В}]^2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} [\text{м}]^2 / 5000 \cdot 10^{-12} [\text{м}]^2 = 2,3 \cdot 10^{-9} \text{ Н}$. Этой силе (с учетом того, что в применяемой конструкции $\eta \approx 15 \text{ Н/м}$ [5]) соответствует перемещение $\Delta \approx 0,15 \text{ нм}$. Отсюда легко оценить и величину чувствительности (размерную) $\gamma_F = \Delta f / \Delta U_{\text{исп}} \approx 0,23 \cdot 10^{-9} \text{ Н/мВ}$ (или $\gamma_z = \Delta Z / \Delta U_{\text{исп}} \approx 0,15 \text{ нм/мВ}$).

Заметим, что на кантилевере, изготовленном в [5] особенно тщательным образом с привлечением (труднодостижимых в наших условиях) технологий, продемонстрирован порог детектирования 10 нН по силе и $\sim 0,5 \text{ нм}$ по расстоянию. Если принять во внимание также и факт отслеживания поведения пондеромоторной силы контактным возмущающим способом, безусловно, ухудшающим чувствительность коромысловой конструкции, то станет очевидным, что применение бесконтактной регистрации наличия/отсутствия колебаний (например, оптическим или емкостным способом) еще более улучшит достигнутые параметры, приблизив их значения к ожидаемым.

4. Выводы

Предложенная идея повысить чувствительность к перемещению сенсоров пространственного перемещения путем регистрации пондеромоторных сил получила экспериментальное подтверждение. Нами реализована схема измерений, когда ООС ориентирована на наличие/отсутствие колебаний коромыслового кантилевера. Полученные в этих измерениях результаты позволили сделать оценки, согласно которым, несмотря на предельно возможную в наших условиях по исполнению конструкцию кантилевера и возмущающий метод регистрации пондеромоторного взаимодействия, удалось измерить силу $\approx 2,3 \cdot 10^{-9} \text{ Н}$ и достичь чувствительности $\approx 0,23 \cdot 10^{-9} \text{ Н/мВ}$.

Работа выполнена в рамках Национальной программы по полупроводниковой наноэлектронике и базового финансирования ЕГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С.Эдельман. ПТЭ, 5, 25 (1989).
2. В.А.Быков. "Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования и модификации поверхностей". Докторская диссертация, М., 2000.
3. В.К.Неволин. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии, М., МИЭТ, 1996.
4. Г.Нойбауэр, С.Коэн, Г.Макклеланд, Д.Хорн, К.Мейт. Приборы для научных иссл., № 9, 22 (1990).
5. S.A.Joyce, J.E.Hoyston. Rev. Sci. Instrum., 62, 710 (1991).
6. М.Г.Азарян. Изв. НАН РА, сер. Технические науки, 2, 16 (2005).

7. Л.А.Осипович. Датчики физических величин. М., Машиностроение, 1979.
8. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин. Под ред. Е.С.Полищука. Киев, Вища школа, 1984.
9. В.В.Малов. Пьезорезонансные датчики. М., Энергия, 1978.

ՆԱՆՈՍԱՍԵՏԱԲԱՅԻՆ ՈՒԺԵՐ ԵՎ ՏԵՂԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ ԳՐԱՆՅՈՂ ՊՈՆԴԵՐՈՄՏՈՐԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐ

Մ.Հ. ԱԶԱՐՅԱՆ, Վ.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Գ.Ա. ՄՆԱՏԱԿԱՆՅԱՆ

Մեր կողմից նախագծված նմարավոր կանտիլեվերով կատարված են մանոմասշտաբային ուժերի և տեղափոխությունների պոնդերոմոտոր զրանցման առանձնահատկությունների էքսպերիմենտալ հետազոտություններ: Դիմամիկ պոնդերոմոտոր փոխազդեցության փոփոխությունները չափվել են պինդոռնեզոմանսային սարքերով: Բացասական հակադարձ կապով սխեմանում լծակի տատանումների առկայության/բացակայության կոն-տակտային զրանցման եղանակի կիրառումով ստացվել է զրանցվող ազդանշանի զծային կախվածություն լծակի տեղափոխությունից: Նշված սկզբունքով աշխատող կանտիլեվերը զրանցել է $\approx 2,3 \cdot 10^{-9}$ Ն ուժ, իսկ զգայունությունը՝ $0,23 \cdot 10^{-9}$ Ն/մՎ կարգի մեծություն է:

PONDEROMOTOR SENSOR FOR REGISTRATION OF NANOSCALE FORCES AND DISPLACEMENTS

M.H. AZARYAN, V.M. HAROUTIOUNIAN, G.A. MNATSAKANYAN

Features of the ponderomotor registration of nanoscale forces and displacements are studied by a cantilever developed by us. Variations of dynamic ponderomotor interactions are registered by the piezoresonance equipment. The application of contact technique in the reverse feedback system for detection of the cantilever vibration presence/absence enables us to obtain the linear dependence of a signal on the cantilever displacement. The sensitivity of the order $\approx 0,23 \cdot 10^{-9}$ N/mV as well as the registration of force of the order $\approx 2,3 \cdot 10^{-9}$ N are achieved with the use of the advanced sensor.