

УДК 534.32:531

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ КОНСОЛИ ЗОНДА АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА В ПОЛЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ СИЛ

А. М. ДУБРАВИН, О. Ю. КОМКОВ⁺

Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

Разработана методика определения жесткости консоли зондов СЗМ, базирующаяся на измерении электростатических сил. Полученные результаты согласуются с данными производителя зондов.

Введение

Определение реальных сил, действующих на зонд сканирующего зондового микроскопа (СЗМ), является актуальной задачей. Это связано с использованием СЗМ в качестве метрологического инструмента при определении величин нормальной нагрузки во время проведения трибологических испытаний, при исследовании поверхностных сил, наноиндентировании, изучении свойств живых клеток и пр. Жесткость консоли зондов, указываемая производителем, является в большинстве случаев ориентировочной, что требует проведения дополнительной калибровки зондов с целью обеспечения требуемой точности измерений.

Реализация предлагаемых методик [1, 2, 3] связана с проведением экспериментов, достаточно сложных для пользователей СЗМ. При расчете параметров зондов с использованием аналитических моделей [4, 5] необходимо определить с высокой точностью геометрические параметры консоли, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала зонда. К усложнению модели приводит наличие слоя металлизации, служащего для придания консоли высоких светоотражающих свойств. При толщине консоли в несколько микрон, возрастает влияние неоднородности свойств материала, и их отличие от объемных свойств. Определение толщины консоли в целом, а также слоев металлизации и окисной пленки в отдельности, представляет собой наиболее сложную и трудоемкую задачу. Эти обстоятельства не позволяют определять жесткость консоли зонда исходя из ее геометрических размеров.

Предлагаемый подход основан на регистрации изгиба консоли зонда под действием электро-

статической силы, возникающей при создании разности потенциалов между токопроводящим покрытием зонда и металлической подложкой. Известно, что зонд СЗМ является достаточно чувствительным для регистрации электрических полей низкой напряженности, благодаря чему метод СЗМ успешно применяется для контроля параметров легированных областей в производстве полупроводниковых приборов [6]. Существует ряд аналитических моделей для определения реальных сил, действующих на зонд в электростатическом поле [7]. В нашем случае система зонд–образец рассматривается как набор конденсаторов, емкость которых, а следовательно, и величина электростатической силы, могут быть достаточно просто рассчитаны.

Оборудование, материалы. Экспериментальная часть производилась с использованием СЗМ «Нанотоп-205», разработанного в ИММС НАНБ. Исследовалось поведение зонда NSC14 с платиновым покрытием фирмы MicroMash, диапазон жесткости $k = 1,8–12,5$ Н/м.

С помощью конфокального микроскопа Nanofocus были определены геометрические параметры зонда: длина консоли $L = 123$ мкм; ширина $B = 39$ мкм; высота острия $l = 16$ мкм. В качестве диэлектрика, служащего для предотвращения электрического контакта зонда и металлической подложки, использовалась слюда «Pelco mica» компании «Ted Pella Inc». Приводимое производителем значение относительной диэлектрической проницаемости материала $\epsilon = 7,0–7,1$. Толщина слюды, измеренная с помощью цифрового микрометра, составила 205 микрон.

Определение жесткости зонда. Экспериментальные кривые изгиба зонда получены при на-

⁺ Автор, с которым следует вести переписку.

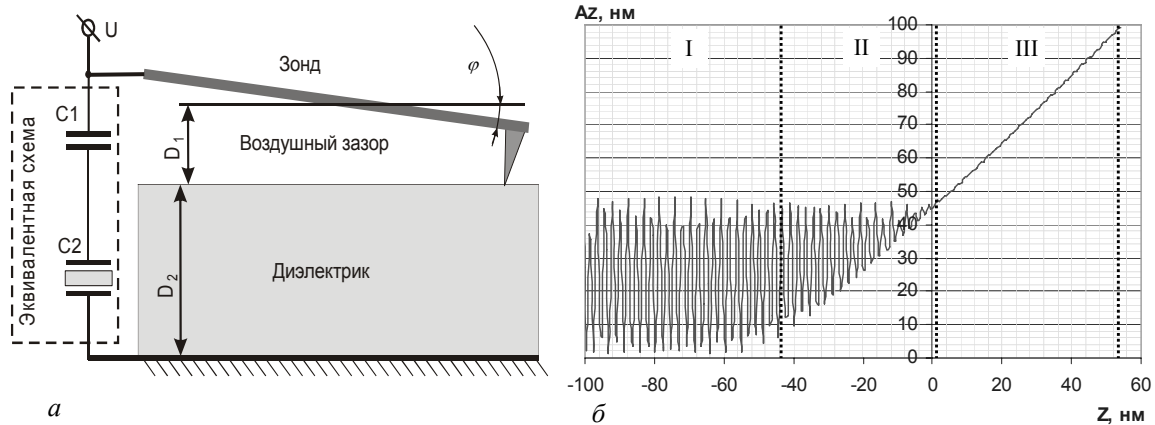


Рис. 1. Экспериментальная схема (а) и результат измерений (б). Обозначения расшифрованы в тексте

пряжении между зондом и подложкой $U = 300$ В, частота 100 Гц. Схема измерений приведена на рис. 1, а. Электрическим эквивалентом системы зонд–диэлектрик–подложка являются два последовательно соединенных конденсатора, имеющих емкости:

$$C1 = \frac{\varepsilon_0 S}{D_1} \text{ и } C2 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{D_2}, \quad (1)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); $S = BL$ – площадь консоли. Емкость системы равна

$$C = \frac{(C1C2)}{(C1 + C2)}. \quad (2)$$

Действующая на зонд электростатическая сила [8] определяется как

$$P = \frac{U^2 C}{2D}, \quad (3)$$

где $D = D_1 + D_2$ – расстояние зонд–подложка.

При расчете расстояния зонд–подложка учитывается толщина диэлектрика и величина воздушного зазора между диэлектриком и зондом. В связи с тем, что зонд АСМ наклонен под небольшим углом относительно горизонтали (как правило, величина угла φ составляет 10–13°; в нашем случае – 12°), рассматриваем зонд расположенным параллельно поверхности диэлектрика на расстоянии:

$$D_1 = l + \frac{L \sin \varphi}{2}. \quad (4)$$

Возникающая при подаче напряжения, электростатическая сила является равномерно распределенной по длине зонда. Для калибровки АСМ и расчета жесткости консоли, необходимо определить эквивалентную силу P' , которая будучи приложенной к острию зонда, приведет к появлению равного по величине изгиба консоли. Вычисление перемещения незакрепленного конца балки с ис-

пользованием метода Верещагина [9] дает следующие результаты.

В случае, когда сила P приложена к концу консоли, перемещение острия составит

$$Z_1 = \frac{PL^3}{3EJ_z} \quad (5)$$

В случае равномерно распределенной нагрузки

$$Z_2 = \frac{PL^3}{8EJ_z}, \quad (6)$$

где E – модуль упругости материала (для кремния $E = 1,89 \cdot 10^{10}$ Н/м²); J_z – момент инерции балки в вертикальной плоскости. Таким образом, распределенная сила вызывает меньшее смещение конца кантилевера, чем сосредоточенная нагрузка. Отношение перемещений равно 3/8 и эквивалентная сила равна:

$$P' = \frac{3U^2 C}{16D}. \quad (7)$$

Жесткость консоли k определяется согласно соотношению:

$$P' = -kA_z, \quad (8)$$

где A_z – изгиб консоли под действием приложенной силы:

$$k = \frac{3U^2 C}{16DA_z}. \quad (9)$$

Результаты измерений

На рис. 1, б приведена зависимость величины изгиба консоли в зависимости от расстояния зонд–поверхность. Перемещение зонда осуществлялось с помощью пьезоэлектрического преобразователя СЗМ. Поскольку приложенное напряжение является переменным, острие зонда совершает колебания под действием электрического

поля. На этапе *I* зонд находится на достаточно большом расстоянии от поверхности диэлектрика и амплитуда колебаний консоли остается неизменной. На этапе *II* острие зонда находится в зоне действия поверхностных сил и амплитуда колебаний уменьшается. Точка $z = 0$ соответствует прижатию зонда к поверхности при $A_z = 0$. На этапе *III* изгиб консоли зонда принимается равным перемещению пьезоэлектрического преобразователя СЗМ, что дает возможность определить амплитуду колебаний зонда на этапе *I*. Собственная резонансная частота зонда на три порядка выше частоты возбуждающего сигнала, что позволяет принять регистрируемую амплитуду колебаний консоли равной изгибу под действием постоянного поля.

Таким образом, амплитуда колебаний консоли составила 38–40 нм в момент касания острия поверхности диэлектрика. Ошибка при определении расстояния D_1 не превышает 50 нм (рис. 1, б, этап *II*) и составляет $\approx 0,3\%$. Емкость системы зонд–диэлектрик–подложка определена равной $7,0\text{--}7,4 \cdot 10^{-4}$ пФ, и рассчитанная величина жесткости зонда составила 1,3–1,4 Н/м. Для оценки толщины консоли зонда H можно воспользоваться уравнением [9]:

$$k = \frac{EBH^3}{4L^3} \quad (10)$$

Полученное расчетное значение $H = 2,2\text{--}2,3$ мкм достаточно хорошо согласуется с данными производителя ($H = 1,5\text{--}2,5$ мкм).

Применение предложенной методики возможно при отсутствии дополнительного проводящего покрытия зонда. В этом случае, если металлическое светоотражающее покрытие электрически соединено с корпусом СЗМ, разность потенциалов создается между корпусом АСМ и проводящей подложкой, электрически изолированной от корпуса. В этом случае эквивалентная электрическая схема системы зонд–диэлектрик–подложка изменится, что связано с необходимостью учета диэлектрической проницаемости материала консоли. Последовательно с конденсаторами C_1 и C_2 необходимо включить конденсатор C_3 . Суммарная емкость в этом случае определяется с помощью выражения:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (11)$$

Поскольку кремний является токопроводящим материалом с проводимостью 10–14 Ом·см [10], емкость C_3 зависит в основном от толщины оксида кремния толщиной около 2 нм, образующегося под действием кислорода воздуха:

$$C_3 = \frac{\varepsilon_c \varepsilon_0 S}{h}, \quad (12)$$

где $\varepsilon_c = 3,9$ – диэлектрическая проницаемость ок-

сида кремния, h – толщина оксида.

Емкость слоя оксида составляет $C_3 = 82,8$ пФ, расчетное значение C уменьшается до $6,5\text{--}6,8 \cdot 10^{-4}$ пФ.

Выводы

Разработана методика определения жесткости зондов СЗМ, основанная на использовании контролируемого сверхмалого силового электростатического воздействия. При расчетах не требуется учитывать свойства материала зонда и нанесенных покрытий, количество высокоточных измерений минимально. Погрешность измерений может быть уменьшена при экспериментальном определении диэлектрической проницаемости используемого диэлектрика, уменьшении его толщины. Для расчетов может быть использована более точная аналитическая модель.

Применение предложенной методики возможно при отсутствии дополнительного проводящего покрытия зонда. В этом случае, если металлическое светоотражающее покрытие электрически соединено с корпусом СЗМ, разность потенциалов создается между корпусом АСМ и проводящей подложкой, электрически изолированной от корпуса.

Не следует исключать из схемы диэлектрик при комнатной температуре и относительной влажности свыше 30%, так как при наличии на поверхности подложки адсорбированного слоя воды, вероятно протекание электрохимической реакции [11, 12], ведущей к окислению, либо разрушению острия зонда. При повышении температуры подложки и десорбции жидкости, возможно проведение измерений без использования диэлектрика. В этом случае из схемы исключается элемент C_2 и уменьшается погрешность измерений.

Обозначения

k – жесткость зонда; L – длина консоли зонда; l – длина острия зонда; B – ширина консоли зонда; H – толщина консоли; ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; U – напряжение между зондом и подложкой; C_1 – емкость зонд–диэлектрик; C_2 – емкость диэлектрик–подложка; S – площадь консоли; P – электростатическая сила; P^* – эквивалентная сила, вызывающая перемещение острия зонда равное перемещению под действием равномерно распределенной нагрузки; D_1 – расстояние зонд–диэлектрик; D_2 – расстояние диэлектрик–подложка; D – расстояние зонд–подложка; φ – угол наклона зонда; Z_1 и Z_2 – перемещение острия зонда в случае равномерно рассредоточенной и сосредоточенной на острие зонда нагрузки; J_z – момент инерции балки в вертикальной плоскости; A_z – изгиб консоли под действием приложенной силы.

Литература

1. **R. Levy, M. Maaloum.** Measuring the spring constant of atomic-force microscope cantilevers: thermal fluctuations and other methods // *Nanotechnology*. – 2002 (13), 33–37
2. **N. A. Burnham, X. Chen, C. S. Hodges, G. A. Matei, E. J. Thoreson, C. J. Roberts, M. C. Davies, S. J. B. Tendler.** Comparison of calibration methods for atomic - force microscopy cantilevers // *Nanotechnology*. – 2003 (14), 1–6
3. **Akihiro Torii, Minoru Sasaki, Kazuhiro Hane, Shigeru Okuma.** A method for determining the spring constant of cantilevers for atomic force microscopy // *Meas. Sci. Technol.* – 1996 (7), 179–184
4. **Robert W. Stark, Tanja Drobek, Wolfgang M. Heckl.** Thermomechanical noise of a free v-shaped cantilever for atomic-force microscopy // *Ultramicroscopy*. – 2001 (86), 207–215
5. **John L. Hazel, Vladimir V. Tsukruk.** Spring constants of composite ceramic/gold cantilevers for scanning probe microscopy // *Thin Solid Films*. – 1999 (339), 249–257
6. **M. S. Crosser, S. H. Tessmer, Ruby N. Ghosh.** Scanning electric field sensing for semiconductor dopant profiling // *Appl. Surf. Sci.* – 2002 (195), 146–154
7. **S. Belaidi, P. Girard, G. Leveque.** Electrostatic forces acting on the tip in atomic force microscopy: Modelization and comparison with analytic expressions // *J. Appl. Phys.* – 1997, 81 (3), 1023–1030
8. **Oksana Cherniavskaya, Liwei Chen, Vivian Weng, Leonid Yuditsky, et al.** Quantitative noncontact electrostatic force imaging of nanocrystal polarizability // *J. Phys. Chem.* – 2003, (107), 1525–1531
9. **Феодосьев В. И.** Сопротивление материалов. – М.: Наука. – 1970
10. **M. Calleja, R. Garcia.** Nano-oxidation of silicon surfaces by noncontact atomic-force microscopy: Size dependence on voltage and pulse duration // *Appl. Phys. Lett.* – 2000, 76 (23), 3427–3429
11. **Sergei F Lyukyutov, Pavel Paramonov, et al.** Peculiarities of anomalous electronic current during atomic force microscopy assisted nanolithography on n-type silicon // *Nanotechnology* – 2003 (14), 716–721
12. **S. Gwo.** Scanning probe oxidation of Si₃N₄ masks for nanoscale lithography, micromachining, and selective epitaxial growth on silicon // *Journal of Physics and Chemistry of Solids* – 2001 (62), 1673–1687

A. M. Dubravин, O. Yu. Komkov

Determination of stiffness of atomic-force microscope cantilever in electrostatic force field

A technique of determining the SPM cantilever stiffness based on the measurement of electrostatic forces is developed. The results agree with the data of the cantilever manufacturer.

Поступила в редакцию 07.04.2005.

© А. М. Дубравин, О. Ю. Комков, 2006.