

АНАЛІЗ МОДУЛЯЦІЙНОГО РЕЖИМУ В АТОМНО-СИЛОВІЙ МІКРОСКОПІ НА ОСНОВІ КАНТЕЛІВЕРА МЕХАНІЧНОГО ТИПУ

© Б. Дупак, Р. Іванців, П. Кособуцький, 2013

Розглянуто та проаналізовано модуляційний режим під час сканування поверхні атомно-силовим мікроскопом на основі кантелівера механічного типу. Розвинений метод розрахунку сил Ван-дер-Ваальса для конфігурування взаємодії тіл.

Ключові слова: кантелівер, атомно-силовий мікроскоп, зонд, мікроскоп.

This paper is considered and analyzes the modulation mode by scanning the surface of an atomic force microscope based cantilever mechanical type. The developed method for calculating the forces Van der Vals to configure the interaction of bodies.

Key words: cantilever, atomic force microscope, probe, microscope.

Вступ

Одним з найсучасніших приладів, в якому широко використовуються різні мікросистеми, є атомно-силовий мікроскоп (АСМ) [1]. Атомно-силовий мікроскоп – прилад, що дає змогу за допомогою кантелівера отримувати зображення і досліджувати різні властивості поверхонь твердих тіл з атомарним рівнем роздільної здатності. Сьогодні АСМ став незамінним інструментом для досліджень у багатьох галузях науки і техніки. Передусім, це фізика і хімія поверхні, біологія і медицина, машинобудування та мікроелектроніка. Атомно-силовий мікроскоп зондує поверхню зразка за допомогою гострого зонда, який розташовується на вільному кінці консолі кантелівера.

Сили, що виникають між голкою і поверхнею зразка, спричиняють деформацію консолі, яка під час сканування детектується оптичною системою. Сигнал з оптичної системи використовується для побудови зображення досліджуваної поверхні. Залежно від відстані сканування розрізняють три основні режими (моди) функціонування АСМ : контактний режим, безконтактний режим, напівконтактний режим (вертикальна відстань сканування може змінюватися в широких межах). Для всіх режимів можливі два способи реєстрації сигналу: безпосередні вимірювання відхилення консолі кантелівера (режим топографії і режим бічних сил) і модуляційні виміру (реєстрація амплітуди , частоти або фази коливань консолі кантелівера, а також двопрхідний режим).

Інтерес становить розрахунок траєкторій руху зондових сенсорів АСМ. Цей інтерес зумовлений переважно двома причинами. По-перше, розрахунки забезпечують коректнішу інтерпретацію експериментальних даних, одержуваних за допомогою АСМ. По-друге, розрахунки дозволяють глибше зрозуміти особливості взаємодії зонд - поверхня в сучасних мікросистемах запису і зчитування інформації. Проводяться розрахунки нормальної і латеральної траєкторій руху консолі кантелівера АСМ у наближенні ефективної маси осцилятора. Розраховані сили взаємодії (тяжіння і відштовхування) для зондів різної форми.

Розрахунок сил взаємодії

Для розрахунку потенціалу міжатомної взаємодії використовується стандартна апроксимація:

$$U(r) = U_0(X^2 - 2X), \quad (1)$$

де перший доданок в дужках враховує відштовхування, а другий – притягування атомів; r – відстань між атомами; U_0 – глибина потенційної ями; X – деяка функція, що залежить від відстані.

Якщо припустити, що атоми зонда мають характерну для Ван-дер-Ваальсових сил ступеневу залежність вигляду $X = \left(\frac{r_0}{r}\right)^6$, де r_0 – рівноважна відстань у відсутність хімічної взаємодії, то отримаємо потенціал Леннарда-Джонса:

$$U(r) = U_0 \left[\left(\frac{r_0}{r}\right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r}\right)^6 \right] \quad (2)$$

Атоми зонда і зразка рівномірно розподілені за своїми обсягами. З урахуванням (2) для зондів різної форми завдання розрахунку сили зводиться до обчислення такого інтеграла:

$$F = -\frac{A}{2p} \int_0^\infty \left[(h+x)^{-4} - \frac{r_0^6}{5} (h+x)^{-10} \right] \Omega(x) dx; \quad (3)$$

$$A = 2p^2 n_1 n_2 U_0 r_0^6 = p^2 n_1 n_2 C_6,$$

де A – константа Гамакера; n_1, n_2 – об'ємні щільності атомів зонда і зразка; $C_6 = 2U_0 r_0^6$ – константа Ван-дер-Ваальса; Ω – площа поперечного перерізу голки, що залежить від вертикальної координати.

Величина взаємодії макроскопічних тіл, що отримується в адитивному наближенні, може мати похибку 20–30 % при загальній правильній асимптотиці функції на великих відстанях [3]. Для усунення цього недоліку запропоновано правило “перенормування” константи взаємодії. Застосування цього правила дає таку формулу:

$$A = \frac{4h\bar{w}}{4p} = 6pC \quad (4)$$

де C – константа Ліпшиця; \bar{w} – характерна частота спектра поглинання

Для типових поєднань матеріалів зонда і зразка C знаходиться у вузькому інтервалі від 0,01 до 0,1 еВ

Після обчислення інтеграла (3) і подальшої заміни константи A на константу C отримуємо такий вираз сили взаємодії:

$$F = -a \left(\frac{1}{h^n} - \frac{b}{h^{n+6}} \right) \quad (5)$$

де a, b, n – параметри апроксимації, що залежать від форми голки і властивостей матеріалів зразка і зонда.

Результатами форми голки для піраміди і конуса, в якій використані такі позначення: q – кут при вершині конуса і кут між протилежними гранями чотирикутної піраміди.

Для голки в вигляді конуса формули будуть такими:

$$a = p C t g^2 \left(\frac{q}{2} \right)$$

$$b = \frac{r_0^6}{56}$$

$$F_0 = -\frac{6}{49} a \left(\frac{7^5}{b} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (6)$$

$$h_0 = 7^{\frac{1}{6}} b^{\frac{1}{6}}$$

Для голки в вигляді піраміди формули будуть такими:

$$a = C t g^2 \left(\frac{q}{2} \right) \quad (7)$$

b, F_0, h_0 – будуть формули такі самі як в голці в вигляді конуса.

Модуляційний режим

Коливання балки кантелівера описуються диференціальним рівнянням в частинах похідних четвертого порядку, аналітичне рішення якого отримати не вдається. Можна, однак, знайти рішення, відповідне до основного тону (гармоніці) коливань. Йому відповідає наближення ефективної маси осцилятора. Ефективна маса вводиться за допомогою співвідношення

$$m = \frac{k_n}{(2p f_0)^2}, \text{ де } k_n \text{ і } f_0 - \text{ жорсткість і резонансна частота балки в відсутність взаємодії.}$$

Запишемо основних балок кантелівера розрахунок власної частоти і жорсткості кантелівера отриманої при зближенні методом Релея Рітца:

Для прямокутної балки резонансна частота буде визначатись за формулою:

$$f_0 = 0,162 \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E}{r}} \quad (8)$$

а також жорсткість балки кантелівера:

$$k_n = \frac{EB}{4} \left(\frac{d}{L} \right)^3 \quad (9)$$

Для трикутної балки резонансна частота буде визначатись за формулою:

$$f_0 = 0,648 \frac{dtg^2 \left(\frac{u}{2} \right)}{H^2} \sqrt{\frac{E}{r}} \quad (10)$$

жорсткість балки кантелівера:

$$k_n = 4EB \left(\frac{dtg \left(\frac{u}{2} \right)}{H} \right)^3 \quad (11)$$

Для циліндричної балки резонансна частота буде визначатись за формулою:

$$f_0 = 0,14 \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E}{r}} \quad (12)$$

жорсткість балки:

$$k_n = \frac{3pd^4 E}{64L^3} \quad (13)$$

де L – довжина прямокутної і циліндричної консолей; d – товщина і діаметр консолей; B – ширина консолей, H і u – відстань і кут між балками; E і r – модуль пружності і щільність матеріалу.

Отже, коливання балки кантелівера розглядаються як коливання гіпотетичного точкового осцилятора з ефективною масою m . Рух такого осцилятора описується класичним рівнянням руху, яке в нашому випадку приймає вигляд:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 2g \frac{dz}{dt} + \frac{1}{m} \left(k_n - \frac{dF}{dh} \right) z + \frac{F}{m} = \frac{F_u}{m} e^{-i w_{gen} t}, \quad (14)$$

де F – визначається формулою (3); g – коефіцієнт загасання осцилятора у вертикальному напрямку; F_u – амплітуда зовнішньої сили (її величина залежить від модулюючої напруги і властивостей п'єзокераміки); w_{gen} – частота, на якій порушуються коливання кантелівера.

Розв'язання рівняння (14) має вигляд

$$z = A e^{i(w_{gen}^t + j)} - \frac{F}{k_n} \quad (15)$$

де A і j – амплітуда і фаза коливань, що залежать від відстані сканування.

Другий доданок у правій частині (15) описує початкове зміщення консолі кантелівера.

Висновки

Проаналізовано модуляційний режим під час сканування поверхні атомно-силовим мікроскопом на основі кантелівера механічного типу. Розвинений метод розрахунку сил Ван-дер-Ваальса для конфігурування взаємодії тіл. За допомогою цього методу знайдено залежність сили від відстані. Визначено основні формули розрахунку власної частоти і жорсткості кантелівера для прямокутної, трикутної і циліндричної балки.

1. Быков В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // Микросистемная техника. – 2000. – № 1. – С. 2. Моисеев Ю.Н., Мостепаненко В.М., Панов В.И. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование сил и пространственного разрешения в атомно-силовом микроскопе // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 1. – С. 141–148. 3. Binnig G., Rohrer H., Gerber C., Weibel E., Tunneling through a controllable vacuum gap // Appl. Phys. Lett., – 1982. – v. 40. – pp. 178–180 4. Weaver J. M. R., Abraham D. W., High resolution atomic force microscopy potentiometry // J. Vac. Sci., Technol. B 9, 2004. 5. Bhushan B. Springer Handbook of Nanotechnology, apr. 2007. 6. Albrecht T. R., Akamine S., Carver T. E., Quate C. F. Microfabrication of cantilever styli for the force microscope // J. Vac. Sci. Technol., 2006. 7. Linnemann R., Gotszalk T., Rangelow I. W., Dumania P., Oesterschulze E. Atomic force microscopy and lateral force microscopy using piezoresistive cantilevers. 2000. 21.

УДК 004.4'232

Я. Драган¹, С. Кулик², В. Овсяк³, О. Овсяк⁴

¹Національний університет Львівська політехніка,

²Латвійська філія Accenture;

³Українська академія друкарства,

⁴Київський національний університет культури і мистецтв

МОДЕЛІ СХЕМ РЕЛЯЦІЙНИХ БАЗ ДАНИХ, ПОДАНИХ МОДИФІКОВАНОЮ АЛГЕБРОЮ АЛГОРИТМІВ

© Драган Я., Кулик С., Овсяк В., Овсяк О., 2013

Обґрунтовано використання модифікованої алгебри алгоритмів для побудови математичних моделей схем реляційних баз даних. Побудовані математичні моделі схем абстрактних баз даних з одним і багатьма відношеннями та абстрактної схеми сховища даних.

Ключові слова: алгебра, модель, схема, база даних.

There is the use of the modified algorithms algebra for constructing mathematical models of patterns of relational databases is grounded. Mathematical models of abstract database schemes with one or many relations and abstract schema data warehouse are constructed.

Key words: algebra, model, diagram, database.

Вступ і формулювання задачі

Моделювання процесів з використанням баз даних реалізується побудовою схеми бази даних, яка визначає склад таблиць (відношень) та зв'язків між ними (обмеження цілісності). Схема даних на технічному рівні сервера алгоритмічно описується сценарієм засобами мови запитів SQL як завдання на генерування баз даних. На сучасному етапі схеми баз даних наочніше, ніж кодом мовою запитів SQL, подаються графічними схемами та діаграмами графічного інтерфейсу спеціального програмного забезпечення для розробників – CASE засобами. Графічні схеми є наочними та зрозумілими для проектувальників БД, однак код мовою запитів SQL є фактично