

С.О. Білоконь, асистент

В.О. Андрієнко, старший викладач

Черкаський державний технологічний університет

В.С. Антонюк., доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

С.В. Храпатий, кандидат фізико-математичних наук, доцент

Інститут біології Київського національного університету імені Тараса Шевченка

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЗОНДА АТОМНО-СИЛОВОГО МІКРОСКОПУ З ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Наведено результати аналізу руйнівних факторів електростатичної взаємодії між кремнієвим зондом та діелектричною поверхнею. Представлено експериментально-статистичну модель такої взаємодії. Встановлено, що така взаємодія зводиться до мінімуму при збільшенні вологості навколишнього середовища до $RH \leq 85\%$ або збільшенні рухливості носіїв заряду до $\mu = 0,12 \dots 0,14 \text{ см}^2/(\text{Вт} \cdot \text{с})$. Показано, що збільшення рухливості носіїв заряду зменшує похибки сканування, внаслідок чого точність результатів збільшується на 20...22%.

Ключові слова: атомно-силовий мікроскоп, трибоелектричний заряд, рухливість заряду, електростатична взаємодія, діелектрик.

Вступ. В останнє десятиріччя новий напрямок науки і техніки «нанотехнології» набуває все більш стрімкого розвитку. Так, науковці різних галузей від машинобудування до фармакології прагнуть до мініатюризації систем та компонентів, що ними використовуються. Це дозволяє використовувати принципово нові властивості матеріалів, які починають проявлятися на нанометричному рівні. Проте, використання нанометричних об'єктів неможливе без застосування і вдосконалення методів їх дослідження.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Найбільш популярним на сьогоднішній день є метод атомно-силової мікроскопії, що проявляється в його високій роздільній здатності, простоті використання, а також універсальності (метод має можливість досліджувати не тільки рельєф нанооб'єктів, але й їх фізико-механічні властивості (мікротвердість, зносостійкість, локальні термічні властивості, електропровідність тощо) [1].

Проте, у даного методу є й недоліки, внаслідок адгезійної взаємодії між досліджуваною поверхнею і поверхнею зонда може відбуватись «затуплення» або руйнація вимірювального елемента – зонду мікроскопа, що приводить до хибності результатів сканування [2].

Окрім того, що часта заміна зонду (термін надійної експлуатації складає 40-60 хвилин) є економічно не вигідною, а у деяких випадках така процедура не є можливою через необхідність проведення довготривалої серії експериментів.

Як встановлено в роботах [3, 4], на якість сканування впливають сили пружної взаємодії та капілярні сили, а також визначені шляхи підвищення такої якості.

Постановка завдання. Метою роботи є побудова експериментально-статистичної моделі електростатичної взаємодії між кремнієвим зондом та діелектричною поверхнею внаслідок аналізу результатів дослідження руйнівних факторів цієї взаємодії.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Як відомо [5, 6], при контакті кремнієвого зонду з досліджуваним діелектричним об'єктом відбувається перерозподіл зарядів на їх поверхнях, тоді, як при відведенні зонда, нерівність розподілу зарядів зберігається (рис. 1).

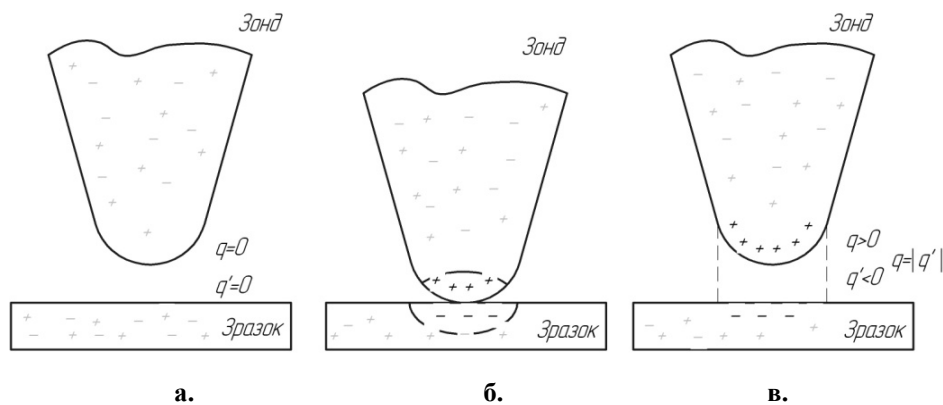


Рис.1. Схема утворення електростатичного заряду при взаємодії кремнієвого зонду з діелектричною поверхнею на різних етапах: а – підведення зонда до поверхні (зонд і поверхня електростатично нейтральні); б – контакт зонда з поверхнею (утворення зони формування вільного заряду); в – відведення зонда від поверхні (розподіл заряду по поверхні)

При кожному подальшому механічному контакті зонда з поверхнею відбувається накопичення заряду, як на зонді, так і на ділянці поверхні, яка сканується. З часом зонд накопичує критичний заряд, що приводить до спотворення результатів сканування внаслідок зсуву зонда під дією електростатичних сил, а в окремих випадках – до електростатичного пробую (рис. 2).

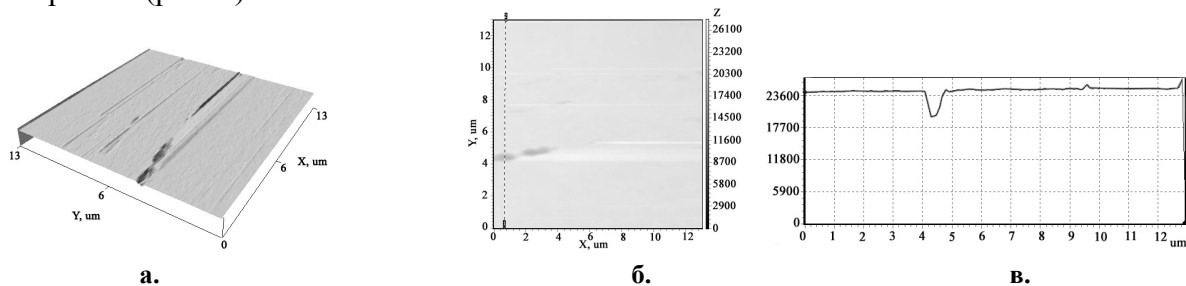


Рис.2. Поверхня діелектричного зразка (наноструктуроване покриття SiO_2 на кремнієвій підкладинці) із слідами електростатичного пробую при його скануванні кремнієвим зондом: а – тривимірне зображення рельєфу, б – топограма поверхні, в – профіль поверхні зразка з місцем електростатичного пробую

Виходячи з теорії електростатичної взаємодії діелектриків, основною величиною, що визначає обмін зарядами, є робота виходу електрона з середовища, що накопичує заряд. Конденсуючий матеріал, робота виходу у якого менша, втрачає електрони легше, а його поверхня заряджається позитивно. Відповідно, поверхня з більшою роботою виходу заряджається негативно. При цьому, чим більша різниця робіт виходу, тим сильніше заряджається границя розділу. Тертя матеріалів різної електричної природи приводить до виникнення трибоелектричного ефекту, який здійснюється за такими фізичними механізмами: перехід електронів з металу в діелектрик; заряд двох діелектриків при дифузії електронів та іонів.

Істотну роль в появі трибоелектричного заряду може грати різний ступінь нагрівання тіл при їх терті, що викликано переходом носіїв заряду з локальних неоднорідностей більш нагрітої поверхні («дійсна» трибоелектрика). Причиною трибоелектрики також може служити механічне видалення ділянок поверхні піроелектриків або п'єзоелектриків.

Аналіз літературних джерел показав, що в більшості робіт накопичення заряду на зонді не розглядається [7], а роботи, присвячені опису електризації діелектричних поверхонь при дії на них зондів АСМ не приводять якісних способів їх зменшення. Тому, в роботі розглянуто механізм такої взаємодії та приведені рекомендації для її усунення.

Постановка завдання. Задача експериментально-статистичного моделювання проводилась виходячи зі стандартної методології із застосування методу планування експери-

менту [8-9]. Для вибору оптимальних технологічних та зовнішніх чинників, що впливають на приведений термін експлуатації зондів АСМ та точність діагностування нанорельєфу поверхонь і механічних характеристик була використана методика в основі якої лежить метод планування багатофакторного експерименту.

Основний матеріал і результати. За параметр оптимізації було обрано силу електростатичної взаємодії за умови, що її значення має прагнути до нуля. Незалежними змінними (факторами оптимізації) було обрано: X_1 – вологість (RH), X_2 – тиск зонда на зразок (p), X_3 – рухливість носіїв заряду (μ), табл. 1.

Таблиця 1. Експериментальні рівні варіювання

Фактори оптимізації	Кодоване значення факторів	Інтервал варіювання	Рівні факторів		
			верхній	основний	нижній
Вологість, RH, %	X_1	50	100	50	0
Тиск зонда на зразок, p, ГПа	X_2	19,5	39	19,5	0
Рухливість носіїв заряду, μ , м ² /В·с	X_3	0,0705	0,14	0,0705	10 ⁻³
Сила електростатичної взаємодії, $F_{ес}$, нН	Y	6000,125	12000	6000,125	0,25

При цьому враховувалися фізична незалежність вхідних та вихідних параметрів, нормальність розподілу ймовірних вимірів, стійкість експерименту до перешкод, порядок виконання вимірів не порушуючи ортогональність планування.

В даній роботі використовувався план трьохфакторного експерименту. Використовуючи методи статистичного планування n -го порядку, математична модель була отримана у вигляді нелінійного рівняння регресії квадратичної форми для трьох факторів оптимізації:

$$C_m = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2,$$

де x – безрозмірна змінна ($x_i = \frac{X_i - X_i^{(0)}}{\Delta X_i}$); b – коефіцієнт регресії.

Для виключення систематичної похибки досліди рандомізовано за допомогою таблиці випадкових чисел. На основному рівні проведено чотири паралельних експерименти, на основі яких встановлено дисперсію досліду при двох ступенях свободи та 5%-вому рівні значущості $S_c^2 = 18936,54$.

За даними експерименту розраховано коефіцієнти регресії представлені в таблиці 2:

Таблиця 2. Коефіцієнти регресії (у кодованому масштабі)

$b_0 = 2168,31$	$b_{11} = 351,39$	$b_{22} = 594,76$	$b_{33} = 87,11$
$b_1 = -1290,98$	$b_{12} = -1273,04$	$b_{23} = -2789,95$	
$b_2 = 2937,28$	$b_{13} = 942,08$		
$b_3 = -2479,99$			

За цими даними, табличне значення t-критерію при 15 дослідах та рівні значимості 0,05 складає 4,3. Довірчі інтервали при розрахунку коефіцієнтів регресії: $b_0 = 341,63$; $b_i = 209,21$; $b_{ii} = 307,94$; $b_{ij} = 295,86$.

Отримана модель залежності сили електростатичної взаємодії від трьох визначених факторів має вигляд:

$$F_{кап} = 2168,31 - 1290,98 \cdot RH + 2937,28 \cdot p - 2479,99 \cdot \mu - 1273,04 \cdot RH \cdot p - 2789,95 \cdot p \cdot \mu + 942,08 \cdot RH \cdot \mu + 351,39 \cdot RH^2 + 594,76 \cdot p^2 + 87,11 \cdot \mu^2$$

В результаті дослідження роботи отриманої моделі були встановлені залежності сили електростатичної взаємодії F_{ec} від тиску зонда на зразок p та рухливості носіїв заряду μ (рис. 3) для граничних значень вологості оточуючого середовища.

Як можна побачити із цих залежностей, із збільшенням вологості оточуючого середовища до 100%, зменшення тиску зонда на зразок до 0 Па (зонд не торкається поверхні при динамічному скануванні) та збільшенням рухливості носіїв заряду до $0,14 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, сила електростатичної взаємодії між зондом і поверхнею досягає мінімальних значень $F_{ec} \leq 1 \cdot 10^{-12} \text{ Н}$, що усуває руйнування поверхні зонда та досліджуваної поверхні.

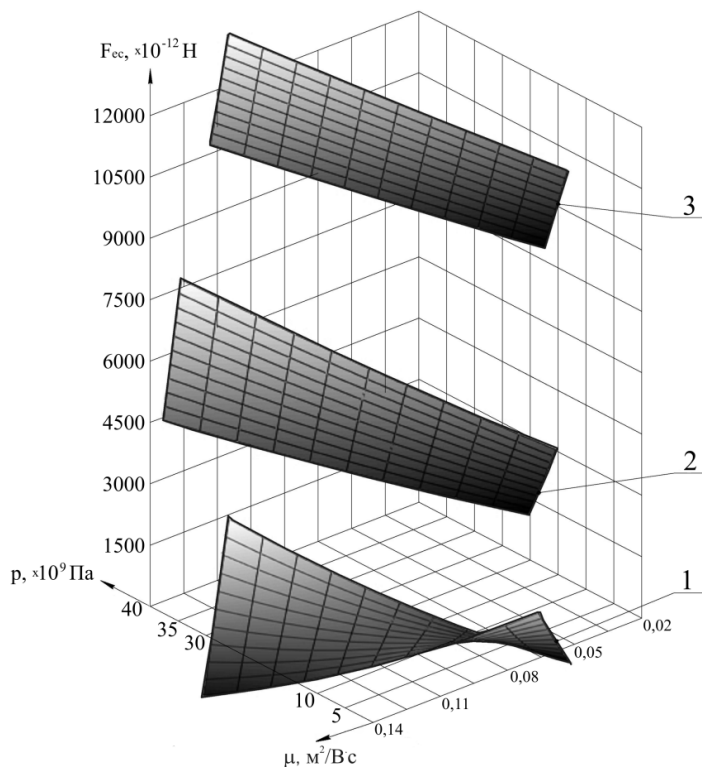


Рис.3. Залежність сили електростатичної взаємодії F_{ec} від тиску зонда на зразок p та рухливості носіїв заряду μ для граничних значень вологості оточуючого середовища: 1 - $RH = 100\%$; 2 - $RH = 50\%$; 3 - $RH = 0\%$

Таким чином, встановлено чинники, які найбільшим чином впливають на мінімізацію сил електростатичної взаємодії, а саме: вологість оточуючого середовища ($RH \leq 85\%$) та рухливість носіїв заряду μ . Проте збільшення вологості оточуючого середовища зменшує точність й достовірність результатів сканування, що пов'язано з підвищенням ступеня впливу капілярних сил. Тому переважним чинником оптимізації залишається рухливість носіїв заряду ($\mu = 0,12 \dots 0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$)

Висновки. При скануванні кремнієвим зондом діелектричної поверхні, на зонді АСМ можливе накопичення трибоелектричного заряду, що необхідно враховувати при обробці результатів сканування.

Встановлено, що чинники, які мають найбільший вплив на мінімізацію сил електростатичної взаємодії є вологість оточуючого середовища ($RH \leq 85\%$) та рухливість носіїв заряду μ . Проте збільшення вологості оточуючого середовища зменшує точність й достовірність результатів сканування, тому переважним чинником оптимізації залишається рухливість носіїв заряду.

Збільшення рухливості носіїв заряду до $\mu = 0,12 \dots 0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ зменшує похибки сканування, пов'язані з накопиченням залишкового трибоелектричного заряду на поверхнях діелектриків збільшується на $20 \dots 22\%$.

Література

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. / В.Л. Миронов // Российская академия наук. Институт физики микроструктур г. Нижний Новгород, 2004 г. - 110 с.
2. Толстихина А.Л. Артефакты при АСМ-измерениях в воздушной среде: их источники и способы устранения / А.Л.Толстихина // Сборник докладов IX Международной конференции «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии», г.Минск, 12-15 октября 2010 г. – С. 46 – 49.
3. Билоконь С.А. Влияние сил адгезии между исследуемой поверхностью и зондом для атомно-силовой микроскопии / С.А. Билоконь, М.А. Бондаренко, В.С. Антонюк. – Наноинженерия. – 2012. - №6 (12). – С. 41-45.
4. Билоконь С.А. Повышение точности и срока эксплуатации зондов для атомно-силовой микроскопии / С.А. Билоконь, О.В. Свиридова, В.С. Антонюк, М.А. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, И.А. Рева – Наноинженерия. – 2013. - №1 (19). - С. 10-13.
5. Рехвиашвили С.Ш. Проводящие кронштейны для атомно-силового микроскопа / С.Ш. Рехвиашвили // Физика и химия перспективных материалов. Сборник научных трудов. Начальник: КГБУ. – 1998. – С. 103-107.
6. Bharat Bhushan. Handbook of Nanotechnology. / Bharat Bhushan. – New York. Springer, 2004. – 1258 p.
7. Лысова О.А. Атомно-силовая микроскопия сегнетоэлектрических микро- и нанодоменных структур : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ольга Александровна Лысова. – Москва, 2011.
8. Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: монографія / С.П. Вислоух. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 488 с.
9. Душинський В.В. Основи наукових досліджень. Теорія та практикум з програмним забезпеченням / В.В. Душинський. – К.: НТУУ «КПІ», 1998. – 408 с.

©С.О. Білоконь, В.О. Андрієнко, В.С. Антонюк., С.В. Храпатий

УДК 519.252:537.24

С.А. Билоконь, асистент

В.А. Андрієнко, старший преподаватель

Черкасский государственный технологический университет

В.С. Антонюк., доктор технических наук, профессор

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

С.В. Храпатый, кандидат физико-математических наук, доцент

Институт биологии Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗОНДА АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Приведены результаты анализа разрушительных факторов электростатического взаимодействия между кремниевым зондом и диэлектрической поверхностью. Представлена экспериментально-статистическая модель такого взаимодействия. Установлено, что такое взаимодействие сводится к минимуму при увеличении влажности окружающей среды до $RH \leq 85\%$ или увеличении подвижности носителей заряда до $\mu = 0,12 \dots 0,14 \text{ см}^2/(\text{Вт} \cdot \text{с})$. Показано, что увеличение подвижности носителей заряда уменьшает погрешности сканирования, в результате чего точность результатов увеличивается на 20...22%.

Ключевые слова: атомно-силовой микроскоп, трибоэлектрический заряд, подвижность заряда, электростатическое взаимодействие, диэлектрик.

S.A. Bilokon, graduate student

V.A. Andrienko, senior teacher

Cherkasy state technological university

V.S. Antonyuk., doctor of engineering sciences, professor

National technical university of Ukraine «Kyiv polytechnic institute»

S.V. Khrapatiy, candidate of physics and mathematical sciences, associate professor

Institute of biology of the Kyiv national university of the name of Taras Shevchenko

DESIGN OF ELECTROSTATIC CO-OPERATION OF PROBE OF ATOMIC-FORCE MICROSCOPE WITH DIELECTRIC SURFACE

Results over of analysis of destructive factors of electrostatic co-operation between a silicic probe and dielectric surface were brought. An experimentally-statistical model over is brought such co-operation. Co-operation is taken to the minimum at the increase of humidity of environment to $RH \leq 85\%$ or increase of mobility of carriers of charge to $\mu = 0,12 \dots 0,14 \text{ cm}^2/(\text{Bm} \cdot \text{c})$. The increase of mobility of carriers of charge diminishes the errors of scan-out. As a result of it exactness of results increases on 20...22%.

Keywords: *atomic-force microscope, tribology electricity, mobility of charge, electrostatic co-operation, dielectric.*