

Механізм виникнення та нейтралізація залишкової трибоелектрики при скануванні кремнієвим зондом атомно-силового мікроскопу діелектричних поверхонь

М.О. Бондаренко^{1*}, С.О. Білокін¹, В.С. Антонюк², Ю.Ю. Бондаренко¹

¹ Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка, 460, 18006 Черкаси, Україна

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, 03056 Київ-56, Україна

(Одержано 16.03.2014; опубліковано online 20.06.2014)

В статті встановлені причини та наведений механізм руйнівної дії сил електростатичної взаємодії кремнієвого зонду з діелектричними поверхнями при дослідженні їх мікрогеометрії та механічних характеристик методом атомно-силової мікроскопії. Проведений розрахунок сил електростатичної взаємодії двох кремнієвих поверхонь та визначена руйнівна дія електростатичного розряду, що виникає внаслідок трибоелектричного ефекту. Запропонований модуль зняття електростатичного заряду, принцип роботи якого полягає у формуванні зони провідності в місці контакту двох діелектриків шляхом багатофотонної іонізації. Показано, що застосування такого способу нейтралізації залишкової трибоелектрики підвищує точність, надійність та відтворюваність результатів сканування.

Ключові слова: Атомно-силова мікроскопія, Трибоелектрика, Діелектрична поверхня, Кремнієвий зонд, Багатофотонна іонізація.

PACS numbers: 07.79.Lh, 41.20.Cv, 81.05. – t, 34.35. + a

1. ВСТУП

За останні десятиліття нанотехнології зайняли ключові позиції в сучасних галузях науки та техніки. Це пов'язано з необхідністю до підвищення швидкості, працездатності, мініатюризацією різноманітних систем та їх компонентів, що знайшли широке застосування в сучасній мікрооптиці, наноелектроніці, біомедичних дослідженнях, енергетиці тощо. Проте, такі удосконалення, особливо мініатюризація неможлива без подальшого розвитку методів та засобів їх дослідження. Серед таких методів дослідження слід відзначити метод атомно-силової мікроскопії (АСМ) [1], як одного з найбільш популярних і універсальних методів дослідження наноггеометрії і поверхневих механічних властивостей, як провідників, так і діелектриків. Основним недоліком АСМ є швидка руйнація його чутливого елемента – зонда. Причиною його зношування і руйнування є критичні значення сил взаємодії між зондом та досліджуваною

поверхнею. Раніше, в роботах [2-4] колективом авторів були розглянуті сили пружної взаємодії, сила Ван-дер-Ваальса, сила капілярної взаємодії, та їх вплив на зонд. У той же час слід відзначити ще одну силу, яка може нести руйнівний ефект, а саме – електростатичну силу, що виникає при дослідженні діелектричним (кремнієвим) зондом діелектричного зразка в контактному режимі. У роботах [5, 6] авторами розглядалися випадки дослідження провідної поверхні діелектричним зондом. При цьому вважається, що електростатичний заряд, який виникає в результаті сканування стікає через провідну поверхню і його накопичення на зонді не відбувається.

Метою статті є вивчення механізму накопичення електростатичного заряду на поверхні кремнієвого зонда в результаті його тертя об діелектричну поверхню в процесі сканування (трибоелектричний ефект), який обумовлений перерозподілом зарядів на них при контакті та збереженні розподілу при відведенні зонда, рис. 1.

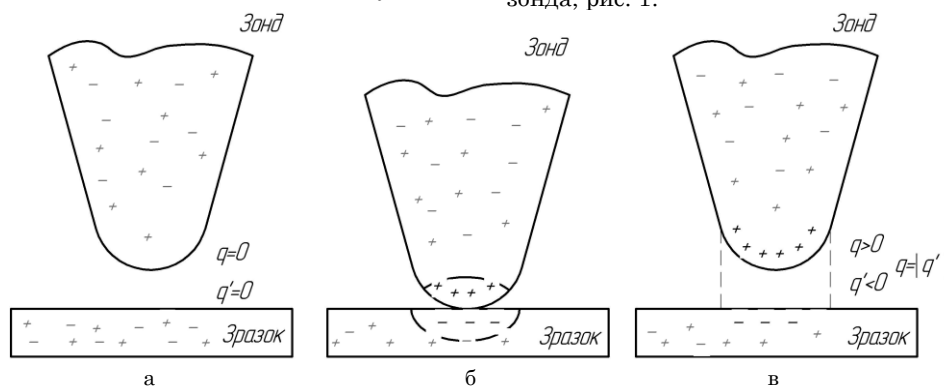


Рис. 1 – Схема утворення електростатичного заряду при взаємодії кремнієвого зонду з діелектричною поверхнею: а – підведення зонда до поверхні (зонд і поверхня електростатично нейтральні); б – контакт зонда із поверхнею (утворення зони формування вільного заряду); в – відведення зонда від поверхні (розподіл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

* maxxiu@rambler.ru

2. МЕХАНІЗМ ВИНИКНЕННЯ ТРИБОЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ

При кожному дотиканні кремнієвого зонда з діелектричною поверхнею під час сканування в контакт

тному режимі відбувається накопичення заряду, як на зонді, так і на ділянці поверхні, яка сканується. З часом зонд накопичує достатній заряд, що приводить до спотворення результатів сканування, а в окремих випадках – до електростатичного пробую, рис. 2.

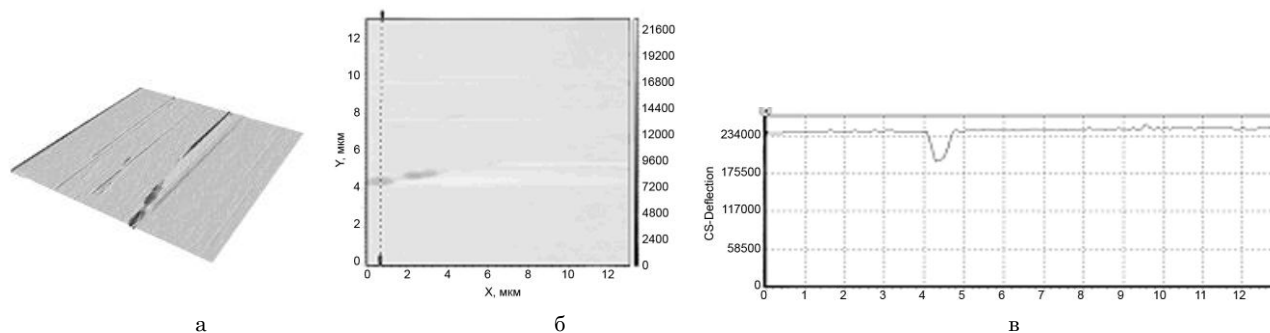


Рис. 2 – Поверхня діелектричного зразка (скло К8) із слідами електростатичного пробую при його скануванні кремнієвим зондом: а – тривимірне зображення рельєфу, б – топограма поверхні, в – профіль поверхні зразка з місцем електростатичного пробую

Виходячи з теорії електростатичної взаємодії діелектриків, основною величиною, що визначає обмін зарядами, є робота виходу електрона із середовища, що конденсує. Конденсуючий матеріал, робота виходу у якого менша, втрачає електрони легше, а його поверхня заряджається позитивно, відповідно поверхня з більшою роботою виходу заряджає негативно. При цьому, чим більше 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.

визначається умовами контакту і тертя між зондом та досліджуваною поверхнею, а швидкість сканування складає n кроків за одиницю часу. Це відповідає наступній величині струму заряджання:

$$i_c = n \cdot \Delta q \tag{1}$$

Прийmemo, що Δq_{max} – максимальне значення заряду на визначеному кроці, яке може бути оцінене так:

$$\Delta q_{max} = \epsilon_0 \cdot E_0 \cdot S \tag{2}$$

де E_0 – напруженість поля пробую в повітрі між електродами, $E_0 = 3 \cdot 10^6$ В/м; S – площа зони контакту діелектрика із зондом, для обраного зонду CSC-18, $S = 6,28 \cdot 10^{-16}$ м².

За законом Кулона сила взаємодії двох діелектриків:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \left(\frac{\epsilon_S - \epsilon_m}{\epsilon_S + \epsilon_m} \right) \tag{3}$$

де ϵ_m – діелектрична проникність середовища (для повітря $\epsilon_m = 1$ Кл²/нм²); ϵ_0 – діелектрична постійна, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/нм²; ϵ_s – діелектрична проникність зразка; q_1, q_2 – заряди, накопичені на зонді та зразку відповідно.

Використаємо дану залежність для ілюстрації руйнівного ефекту електростатичних сил, рис. 4.

У реальності накопичений заряд на зонді більший, оскільки при проникненні зонда в зразок, відбувається нерівномірне руйнування диполів в поверхнях зонда та досліджуваного зразка, що приводить до вивільнення різної концентрації вільних зарядів на контактуючих поверхнях. Результати розрахунку електростатичної взаємодії на прикладі різних матеріалів (як діелектриків, так і провідників) при скануванні кремнієвим зондом наведено в таблиці 1.

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

Розглянемо спрощену схему розподілу електричного поля між кремнієвим зондом та діелектричною поверхнею, рис. 3.

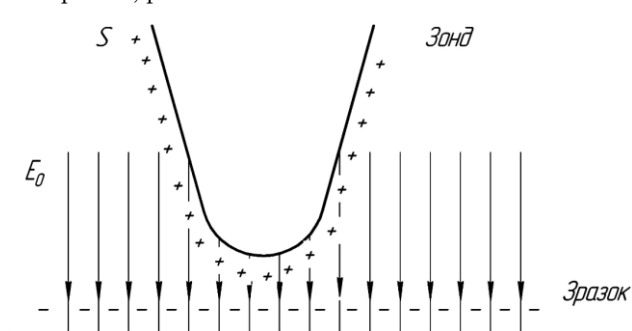


Рис. 3 – Схема розподілу електростатичного поля між кремнієвим зондом і діелектричною поверхнею; S – площа зони контакту діелектрика із зондом; E_0 – напруженість поля пробую

Прийmemo, що значення заряду Δq , який набуває зонд і поверхня після кожного кроку сканування,

3. НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ЗАРЯДУ НА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПОВЕРХНЯХ

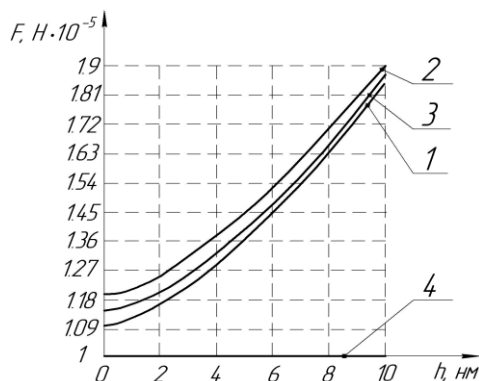


Рис. 4 – Залежність сили взаємодії між зондом CSC-18 і досліджуваною поверхнею від глибини проникнення зонда в зразок: 1 – кремній Кр0; 2 – п'єзоелектрична кераміка ЦТС-19; 3 – оптичне скло К8; 4 – поверхня золота Au-995

Таблиця 1 – Значення сили електростатичної взаємодії при скануванні поверхонь в контактному режимі

Досліджуваний матеріал	Сила, що діє на зонд, Н, $\times 10^{-9}$	
	Максимальне значення	Мінімальне значення
Кремній Кр0	10110	0,253
П'єзоелектрична кераміка ЦТС-19	11980	0,299
Оптичне скло К8	10810	0,270

Найбільш поширеним способом усунення електростатичного заряду на діелектричних поверхнях є підвищення вологості повітря. Рядом авторів [7, 8] доведена ефективність цього способу та показане підвищення якості сканування. Проте, спосіб доречний для дослідження крупних тріщин (порядку десятків нанометрів) та нерівностей на поверхні, а при дослідженні наноструктур та наночасток, точність й достовірність результатів сканування залишається низькою. Це пов'язано з тим, що, підвищення вологості повітря приводить до підвищення ступеня впливу капілярної взаємодії [3]. Виходячи з таких недоліків існуючих методів зняття електростатичного заряду була поставлена мета розробки більш ефективного та надійного засобу видалення залишкового заряду, що виникає на поверхні діелектричного матеріалу внаслідок тертя кремнієвого зонду об досліджувану поверхню, що дозволяє уникнути електростатичного розряду, зменшити кількість артефактів сканування та збільшити точність отриманих результатів.

Для рішення поставленої мети в місці контакту зонду з діелектричною поверхнею формують зону провідності шляхом генерування висококогерентного електромагнітного випромінювання лазерним діодом системи позиціонування зонду, яке за допомогою призми розділяють на два однакових за інтенсивністю пучка, причому один з яких направляють до фотодетектора відхилення консолі, а інший направляють на еліптичне дзеркало, де він розсіюється і утворює вузьку смугу висококогерентного випромінювання вздовж усього зразка, який сканують, і при цьому

охоплюють як поверхню зразка, так і кремнієвий зонд атомно-силового мікроскопу [9].

На рис. 5 зображена схема оптичної системи підведення зонду атомно-силового мікроскопу до досліджуваної поверхні (рис. 5а) та схема модуля видалення залишкового трибоелектричного заряду, що реалізується на базі існуючої системи підведення (рис. 5б).

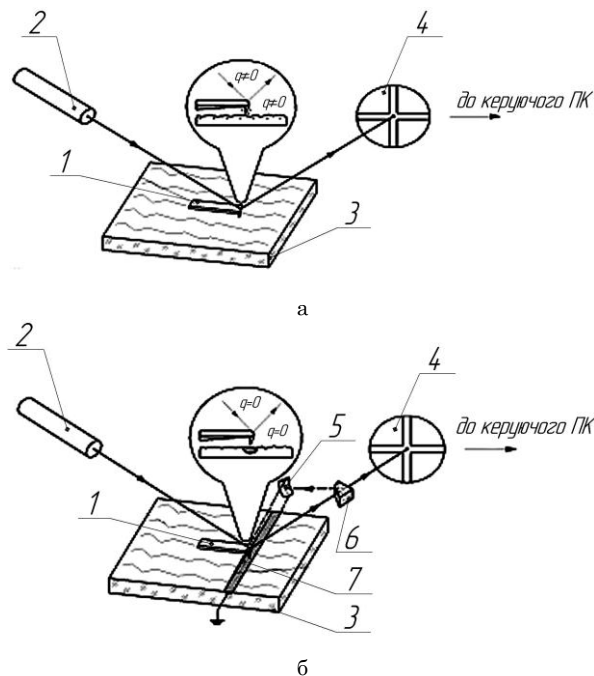


Рис. 5 – Схема усунення залишкового заряду із зонду АСМ та з досліджуваної поверхні: 1 – кремнієвий кантилевер із зондом; 2 – джерело лазерного випромінювання; 3 – досліджуваний зразок; 4 – фотодетектор відхилення кантилеверу; 5 – еліптичне дзеркало; 6 – призма розділення променів; 7 – зона провідності

В систему підведення зонду атомно-силового мікроскопу до досліджуваної поверхні вбудовується модуль видалення залишкового трибоелектричного заряду який складається з призми розділення променя та еліптичного дзеркала.

Спосіб працює наступним чином. Висококогерентне електромагнітне випромінювання, що генерується лазерним діодом системи позиціонування зонду фокусується на міродзеркало, яке знаходиться на торці консолі кремнієвого зонду атомно-силового мікроскопу. Віддзеркалюючись від цього дзеркала, промінь потрапляє на призму розділення, що розділяє лазерний промінь системи підведення на два однакових за інтенсивністю пучка, один з яких розповсюджується в тому ж напрямку – до фотодетектора відхилення консолі. Інший промінь, що заломлюється в призмі – відхиляється від прямолінійного розповсюдження і потрапляє на еліптичне дзеркало, призначення якого – сформувати вузьку смугу висококогерентного випромінювання вздовж усього зразка, що сканується, охоплюючи при цьому, як поверхню зразка, так і кремнієвий зонд атомно-силового мікроскопу.

Внаслідок опромінення зарядженої поверхні досліджуваного зразка та зонду когерентним електромагнітним випромінюванням (лазером) відбувається процес

багатофотонної іонізації вузької ділянки цієї поверхні, в результаті чого підвищується рухливість носіїв заряду, що призводить до їх «стікання» на заземлений елемент утримувача зразка. Тим самим накопичення електростатичного трибоелектричного заряду не відбувається.

Проведемо розрахунок рухливості поверхневих носіїв заряду при використанні запропонованого методу багатофотонної іонізації.

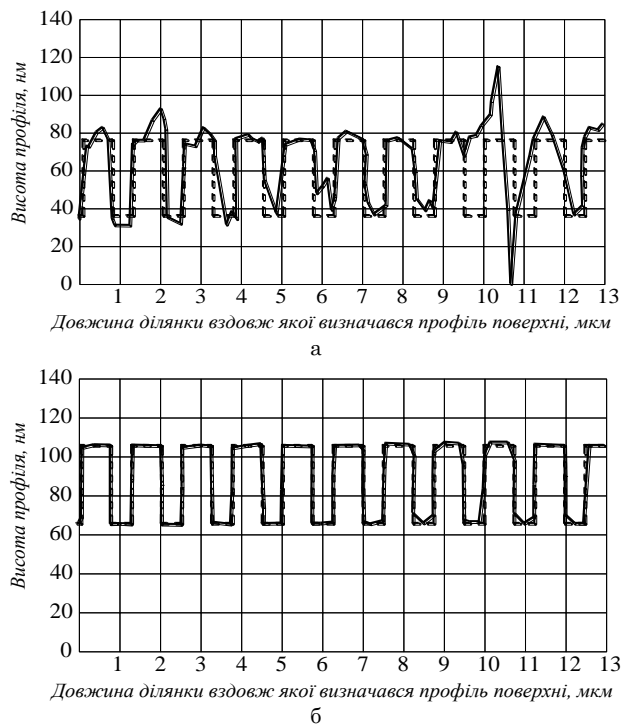


Рис. 6 – Профілограма сканування дифракційної решітки: а – з виникненням трибоелектричного заряду; б – з використанням способу нейтралізації залишкового заряду на зонді АСМ та досліджуваній поверхні. Суцільною лінією позначена профілограма отримана методом АСМ, а штриховою лінією – реальний рельєф

Рухливість по фотопровідності – це рухливість, яка обчислюється зі швидкістю фотовідгуку, зазвичай за умови, що провідність зразка обумовлена носіями певного типу (у нашому випадку – електрона-

ми). Оскільки процес багатофотонної іонізації проводиться при досить високій інтенсивності світла, тому рухливість по фотопровідності співпадає з мікроскопічною рухливістю по провідності.

Визначимо поверхневу рухливість носіїв заряду по провідності досліджуваного матеріалу:

$$\mu = \frac{\sigma}{n \cdot e} = \frac{1}{n \cdot e \cdot \rho},$$

де σ – питома провідність поверхні досліджуваного матеріалу, См·м; n – концентрація носіїв заряду, м⁻³; e – величина носіїв заряду (в якості основних носіїв заряду в кремнії Кр0 приймаємо електрони, концентрація яких у 16...18 разів більша за концентрацію дірок), Кл; ρ – питомий опір кремнію, $\rho = 0,1$ Ом·м.

Результати випробувань показали, що використання способу видалення залишкового трибоелектричного заряду (рис. 6), яким оснащується система підведення зонду атомно-силового мікроскопу, дозволяє провести більш точне та надійне визначення мікрогеометрії діелектричних поверхонь при їх скануванні кремнієвим зондом в контактному режимі.

4. ВИСНОВКИ

Розглянута схема розподілу електричного поля між кремнієвим зондом та діелектричною поверхнею, проведені розрахунки та отримана залежність сили взаємодії між кремнієвим зондом атомно-силового мікроскопу марки CSC-18 і досліджуваною поверхнею від глибини проникнення зонда в зразок. Така залежність була використана для ілюстрації руйнівного ефекту електростатичних сил.

Показано, що сили електростатичної взаємодії при скануванні поверхонь в контактному режимі мають максимальні значення 10,11...11,98 мкН, тоді, як сили електростатичної взаємодії при проникненні кремнієвого зонду в поверхню на глибину до 10 нм збільшуються до значень 18,32...19,01 мкН.

Запропонований новий спосіб усунення електростатичного заряду із зонда і зразка шляхом застосування висококогерентного електромагнітного випромінювання. Показано, що застосування такого способу підвищує точність, надійність та відтворюваність отримуваних результатів.

Mechanism of Origin and Neutralization of Residual Triboelectricity at Scanning of Dielectric Surfaces by a Silicon Probe of the Atomic-force Microscope

M.A. Bondarenko¹, S.A. Bilokon¹, V.S. Antonyuk², Iu.Iu. Bondarenko¹

¹ Cherkassy State Technological University, 460, Shevchenko Boul., 18006 Cherkassy, Ukraine

² National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy Ave., 37, 03056 Kyiv-56, Ukraine

The reasons and mechanism of the destructive effect of the electrostatic interaction forces of silicon probe and dielectric surfaces are established in the paper at the investigation of the surface microgeometry and mechanical characteristics by the atomic-force microscopy method. Calculation of the electrostatic interaction forces of two silicon surfaces is carried out and the destructive effect of electrostatic discharge appearing as a result of triboelectric effect is determined. The module of removal of electrostatic charge is proposed. Its principle of operation consists in the formation of the conduction band in the place of contact of two dielectrics by the multiphoton ionization. It is shown that application of such method of neutralization of residual triboelectricity improves accuracy, reliability, and reproducibility of the scanning results.

Keywords: Atomic-force microscopy, Triboelectricity, Dielectric surface, Silicon probe, Multiphoton ionization.

Механизм возникновения и нейтрализация остаточного трибоэлектричества при сканировании кремниевым зондом атомно-силового микроскопа диэлектрических поверхностей

М.А. Бондаренко¹, С.А. Билоконь¹, В.С. Антонюк², Ю.Ю. Бондаренко¹

¹ Черкасский государственный технологический университет, бул. Шевченко, 460, 18006 Черкассы, Украина

² Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, 03056 Киев-56, Украина

В статье установлены причины и приведен механизм разрушительного действия сил электростатического взаимодействия кремниевого зонда с диэлектрическими поверхностями при исследовании их микрогеометрии и механических характеристик методом атомно-силовой микроскопии. Проведен расчет сил электростатического взаимодействия двух кремниевых поверхностей и определено разрушительное действие электростатического разряда, который возникает в результате трибоэлектричного эффекта. Предложен модуль снятия электростатического заряда, принцип работы которого заключается в формировании зоны проводимости в месте контакта двух диэлектриков путем многофотонной ионизации. Показано, что применение такого способа нейтрализации остаточного трибоэлектричества повышает точность, надежность и воспроизводимость результатов сканирования.

Ключевые слова: Атомно-силовая микроскопия, Трибоэлектричество, Диэлектрическая поверхность, Кремниевый зонд, Многофотонная ионизация.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. М.Л. Занавескин, *Атомно-силовая микроскопия в исследовании шероховатости наноструктурированных поверхностей* (Москва: ИК РАН: 2008).
2. С.А. Билоконь, О.В. Свиридова, В.С. Антонюк, М.А. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, И.А. Рева, *Наноинженерия* **19** №1 (2013).
3. С.А. Билоконь, И.А. Рева, М.А. Бондаренко, И.В. Яценко, *II Всеукр. наук.-практ. конф. молодых ученых та студентів «Фізика і хімія твердого тіла. Стан, досягнення і перспективи»* (Луцьк, 2012).
4. С.А. Билоконь, М.А. Бондаренко, В.С. Антонюк, *Наноинженерия* **12** №6 (2012).
5. С.Ш. Рехвиашвили, *Новые аспекты в моделировании физических процессов в атомно-силовом микроскопе* (Тольяти: ГОУ ВПО Тольяттинский государственный университет: 2009).
6. Г.В. Дедков, А.А. Канаметов, Е.Г. Дедкова, *ЖТФ* **79**, 12 (2009) (А.А. Kanametov, E.G. Dedkova, *Tech. Phys.* **54**, 1801 (2009)).
7. А.Л. Толстихина, *Атомно-силовая микроскопия кристаллов и пленок со сложной морфологией поверхности* (Москва: Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН: 2013).
8. А.Л. Толстихина, Р.В. Гайнутдинов, М.Л. Занавескин, К.Л. Сорокина, Н.В. Белугина, Ю.В. Грищенко, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* №9 (2008).
9. С.О. Білокін, В.С. Антонюк, М.О. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, Пат. 23790, Україна, МПК(2014): H05F 3/06.