

ПРОБЛЕМИ РОЗРОБКИ ЕТАЛОННОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОБ'ЄКТІВ В НАНОМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

Задорожній Р.О.

Національний авіаційний університет, м. Київ

Кафедра інформаційних технологій

E-mail: ur3cjr@ukr.net

Abstract

Zadorogniy R.O. Problems of development of etalon informative-measuring system of geometrical sizes object in nanometers range. Problems and tasks of nanomeasuring technique are formulated in this article, the ways of their decision are considered there too. The bases of metrological providing of measurings and methods and facilities of recreation and transmission of unit size of length in a nanometre range with absolute attachment to the State standard of unit length - meter are represented in the article.

Вступ

Створення нової техніки, наукоємких технологій і нових матеріалів, які забезпечують розвиток структури і технічного рівня виробництва, багато в чому, визначається рівнем метрологічного забезпечення вимірювань. Однією з найважливіших задач розвитку наукоємких технологій є розробка нових методів і високоточних засобів лінійних вимірювань, що розширюють діапазон вимірювань довжини аж до атомарних розмірів.

На сьогодні технологія мікроелектроніки перетворюється в нанотехнологію, тобто технологію де необхідно використання техніки нанометрових вимірювань – нанометрії. Важливі напрямки державної політики по розробці принципово нових технічних рішень при створенні мікроелектронних приладів та мікро системної техніки різного призначення визначають основні задачі по метрологічному забезпеченні лінійних вимірювань, розробки нових методів та високо прецизійних засобів вимірювань довжини в нанометровому діапазоні.

Достовірність і точність вимірювальної інформації, що отримується від робочих приладів, в значній мірі визначається рівнем їх метрологічного забезпечення. Відсутність відповідної системи метрологічного забезпечення стримує ефективне використання приладобудування та впровадження нових високопрецизійних засобів вимірювань.

Постановка задачі

Значний парк засобів вимірювань довжини в мікро- і нанометровому діапазонах, а також інтенсивний розвиток нанометрії в провідних країнах світу [1] представляє необхідність проведення робіт по створенню еталонної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) та метрологічного забезпечення для вимірювань довжини в нанометровому діапазоні та збільшення діапазону Державного первинного еталона одиниці довжини до 10^{-10} м. Розробка системи метрологічного забезпечення нанометрії дозволить:

- а) підвищити точність і розширити діапазон лінійних вимірювань в перспективних технологіях мікро-, опто-, акусто- і наноелектроніки прецизійного машинобудування і приладобудування, мікротехніки і робототехніки, генної інженерії і молекулярної біології, екології, медицини і інших базових галузях економіки;
- б) забезпечити сучасні технології методами і засобами прецизійних вимірювань поверхні твердотільних наноструктур;
- в) забезпечити новим поколінням мір малої довжини і державних стандартних зразків складу і властивостей поверхні твердих тіл на атомному і молекулярному рівнях;
- г) забезпечити органи державної метрологічної служби початковими еталонами в області нанометрії.

Мета Державної програми розвитку еталонної бази на 2006 - 2010 роки полягає у забезпеченні задоволення потреб споживачів метрологічних послуг, а також захисту споживачів і національної економіки від наслідків недостовірних результатів вимірювання.

Результати аналізу свідчать, що для забезпечення єдності вимірювання у машинобудівній, авіаційній та приладобудівній галузях необхідно створити додаткові і удосконалити існуючі державні первинні та вторинні еталони.

Розв'язання задачі

Відомо, що основою системи метрологічного забезпечення лінійних вимірювань являється структура передачі розміру одиниці довжини від Державного еталону одиниці довжини робочим засобам вимірювань, яка регламентована відповідною повірочною схемою. Практична реалізація структури передачі розміру одиниці довжини в нанометровому діапазоні залежить від наявності відповідних еталонних засобів вимірювань на кожному етапі передачі.

Перехід до лінійних вимірювань в нанометровому діапазоні пов'язаний з труднощами інтерферометричних вимірювань малих переміщень на відстані, багато менші довжини хвилі світла лазерного джерела, при збереженні можливості абсолютної прив'язки до державного первинного еталона метра. Одним з перспективних рішень в цьому напрямі є створення і впровадження в практику лінійних вимірювань методів і засобів лазерної фазометрії, що дозволяють визначити зміну різниці фаз – кута фазового зсуву в інтерференційному полі між вимірювальним і опорним пучками світла [2].

Спеціальна еталонна ІВС одиниці довжини в діапазоні 10^{-9} – $5 \cdot 10^{-6}$ м повинна представляти собою інтерференційний компаратор на основі скануючого зондового мікроскопа, що забезпечує тривимірне вимірювання лінійних розмірів зі стандартною невизначеністю 0,1 нм.

Відтворення та передача розміру одиниці довжини в нанометровому діапазоні в відповідності з визначенням метра повинні здійснюватись інтерференційним методом з використанням довжини хвилі високостабілізованого He–Ne-лазера. В якості пристроїв передачі розміру одиниці довжини по координатах (X,Y,Z) необхідно використовувати: а) еталонні лазерні інтерферометри, які забезпечують вимірювання малих лінійних переміщень в реальному масштабі часу в діапазоні від 10^{-9} до 10^{-3} м з стандартною невизначеністю не більше (0,5–1) нм; б) спеціальні періодичні (крокові) міри і стандартні зразки нанорельєфа поверхні – еталони порівняння.

У зв'язку з цим, однією з найважливіших задач розробки еталонної ІВС лінійних вимірювань в нанометровому (1...1000 нм) діапазоні є задача створення високоточного лазерного вимірювача лінійних переміщень, в якому ці переміщення вимірюються методом їх порівняння з довжиною хвилі He–Ne-лазера з використанням еталонних засобів вимірювання кута фазового зсуву.

Вже зазначено, що визнаний в міжнародній практиці спосіб передачі одиниці довжини заснований на лазерній інтерферометрії. Якщо за еталонний тест-об'єкт вибрати крокову структуру, то за допомогою лазерної інтерферометрії можна відкалібрувати крок цієї структури в одиницях (або частках) довжини хвилі еталонного лазерного випромінювання та використати цю структуру як вторинний еталон для калібрування збільшення засобів вимірювань.

Існує клас матеріалів – шарові напівпровідники і в особливості високо орієнтований піролітичний графіт (high oriented pyrolytic graphite – HOPG), на якому атомну роздільну здатність можна одержувати і на повітрі [3]. Якщо отримання атомарного дозволу на кремнії, інших напівпровідниках та металах вимагає спеціальних умов, то у разі HOPG атомна роздільна здатність легко спостерігається на повітрі, в рідинах та надвисокому вакуумі після тривіальної процедури очищення. Через те, що HOPG має таку шарувату структуру, що хімічні зв'язки є тільки усередині однотомного шару, а між шарами діють лише Ван-дер-Ваальсові сили, HOPG легко відшаровується з використанням, наприклад, липкої стрічки (скотча), а

свіжа поверхня не має розірваних хімічних зв'язків і стабільна в перебігу довгого часу. Крім всього іншого, технологія отримання НОРГ добре відпрацьована, матеріал відтворюємий і легко доступний, а отже може бути використаний як природний еталон при калібруванні приладів в діапазоні атомарних розмірів. На НОРГ можна легко спостерігати окремі атоми (рис.1).

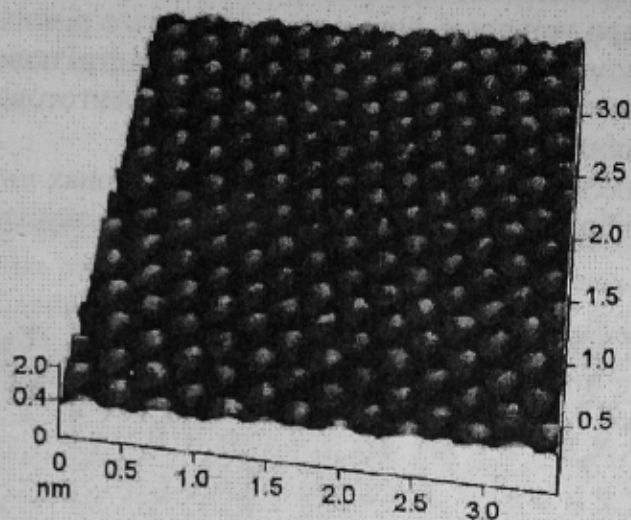


Рисунок.1 - Зображення поверхні НОРГ, отримані за допомогою скануючого тунельного мікроскопа Солвер-Р47.

У задачі вимірювання малих довжин є два принципово різних випадки. Перший випадок (найбільш простий) відповідає вимірюванню відстані (довжини) між двома еквівалентними сторонами сусідніх елементів, яка визначає крок в кроковій (періодичній) структурі. В цьому випадку геометрія зонда не робить істотного впливу на результат вимірювання. Тут потрібне тільки калібрування збільшення приладу. Другий випадок (найважливіший для промислових технологій) відповідає вимірюванню відстані (довжини) між протилежними сторонами одного елемента рельєфу. Цей випадок вимагає ще і обліку геометричної форми зонда приладу. Тому для вирішення задачі вимірювання розміру окремих елементів інтегральних схем необхідне створення спеціальних еталонних засобів відтворення одиниці довжини і способів її передачі до робочих засобів вимірювань.

Основна проблема вимірювань довжини в нанометровому діапазоні пов'язана з недостатньо дослідженими співвідношеннями між об'єктом вимірювань і його зображенням в вимірювальних мікроскопах[2]. Ця проблема має фундаментальний характер і усугубляється складною природою взаємодії вимірювального інструменту з об'єктом вимірювань. На шляхах рішення цієї проблеми немає єдності і до цього дня. Відсутнє навіть строге визначення поняття розміру елемента. В технології виробництва інтегральних схем елементи формованої на напівпровідниковій пластині мікросхеми мають, як правило, профіль, близький до трапецієвидної форми. В цьому випадку слід говорити про розміри верхнього і нижнього основ такого елемента рельєфу.

Тому у всіх випадках використання скануючих зондових мікроскопів постає задача побудови моделі формування реєстрованого сигналу відгуку, адекватно тієї, що відображає реальну форму рельєфу поверхні вимірюваного об'єкту.

Аналіз вітчизняних і зарубіжних еталонних зразків (мір) показав, що до 2000 р. не існувало еталонної структури, що дозволяє одночасно відкалібрувати засіб вимірювань малих довжин і визначити геометричні розміри його зонда. Вперше на можливість створення такої структури було вказано в роботі [4], де було продемонстровано калібрування збільшення РЕМ з одночасним вимірюванням діаметра зонда по зареєстрованих кривих відеосигналу.

Реальна роздільна здатність скануючого зондового мікроскопа залежить від ряду чинників, основними з яких є зовнішні вібрації, акустичні шуми, лінійність переміщення, що задаються сканерами, термокомпенсація конструкції, якості виготовлення зондів,

На рис. 2 приведена структура свіжого сколу по кристаллографічній площині (0001) високоорієнтованого піролітичного графіту (НОРГ), одержана за допомогою скануючого зондового мікроскопа, при установці його в приміщеннях з різними рівнями зовнішніх дій. В цьому випадку був використаний графіт, оскільки на повітрі поверхню без оксидних плівок і адсорбованих шарів можливо отримати тільки для свіжовиготовленого зразку з інертних матеріалів. Поле сканування складало $(2,5 \times 2)$ нм.

Зображення структур на рис. 2, а, б, в одержані в умовах низького, середнього і високого рівнів перешкод з вібраціями приблизно 40, 60 і 80 дБ і акустичними шумами в 20, 40 і 60 дБ відповідно.

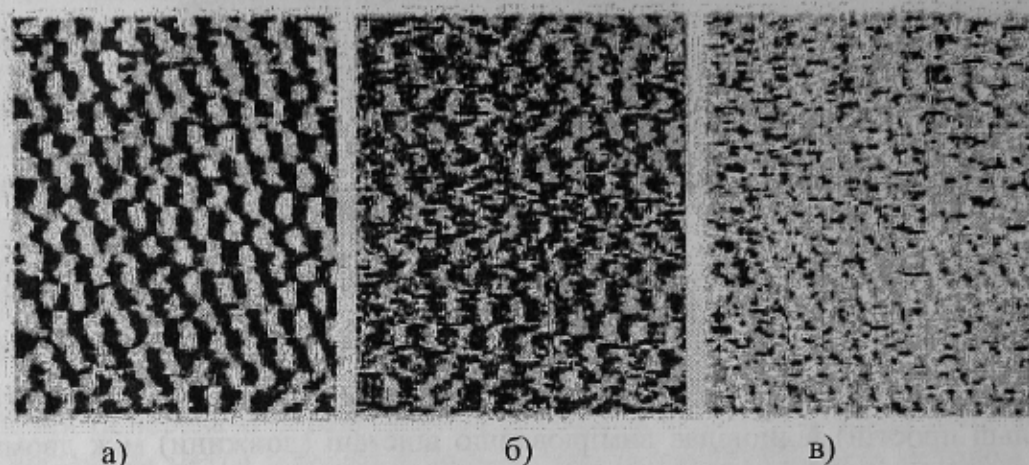


Рисунок. 2 - Зображення структури поверхні свіжого сколу по кристаллографічній площині (0001) високоорієнтованого піролітичного графіту при різних рівнях перешкод а, б, в.

Зображення структури на рис. 2,а одержано в умовах, коли на триметрових віброгасячих пружинах підвішена плита масою в 50 кг, на якій стоїть головка мікроскопа, закрита спеціальною кришкою для гасіння зовнішніх акустичних шумів і електромагнітних наведень, а також для пасивної стабілізації температури головки, що знаходиться усередині неї. Роздільна здатність в цьому випадку складала 0,03 нм в площині XU і 0,02 нм по осі Z .

Зображення структури на рис. 2,б зафіксовано в умовах лабораторії для проведення голографічних експериментів з наявністю віброізолюючого голографічного столу. Було досягнуто роздільної здатності 0,1 нм по осях X , Y і Z .

Зображення структури на рис. 2,в одержано в звичайних лабораторних умовах, тобто при високих рівнях перешкод. Досягнута роздільна здатність має мінімальні значення: 0,8 нм в площині XU і 0,3 нм по нормалі до неї (вісь Z).

З отриманих результатів видно, що вібрації та акустичні шуми значно погіршують роздільну здатність і точність вимірювань проведених на скануючому зондовому мікроскопі. Тому постає задача в вібро- та акустоізоляції еталонної установки.

Основним елементом ІВС який і забезпечує можливість вимірювання в нанометровому діапазоні є сканер. Поглиблене вивчення п'езосканерів необхідно для розробки методів прецизійних вимірювань та їх метрологічної атестації і корекції.

В роботі сканерів спостерігаються такі дефекти: гістерезис, старіння, кріп, різні відхилення. Спотворення зображення виникає і через неортогональності сканера, так як будь який реальний сканер має деяку неортогональність, і при прикладанні напруги до Z -приводу сканер не тільки зжимається чи розтягується в Z - напрямку, але і коливається в площині XU . Неортогональність зумовлена недосконалістю технологічного виготовлення, неоднорідністю

матеріалу та поляризації п'єзокераміки, впливом пайки. Тому необхідно визначити дефект неортогональності сканера та знешкодити його.

В якості величини, що характеризує неортогональність сканера, можна ввести такий параметр як кут неортогональності сканера α . Який можна представити слідуочим чином. Якщо вважати, що нахил сканера відбувається по координаті X , то відхилення в напрямку X можна позначити як δx . Далі будемо рахувати, що при прикладенні напруги до Z -приводу сканер подовжиться. Деформацію по осі Z позначимо як δz . Розглянемо трикутник, що представлений рис. 3. Звідки:

$$\alpha = \arctg \frac{\delta x}{\delta z}.$$

Розробка методики та стенда кількісної діагностики характеристик параметрів неортогональності сканерів дозволить вимірювати їх основні характеристики. На основі яких за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення та відповідних розрахунків отримаємо числові значення параметра неортогональності по Z , та також параметри, що характеризують ортогональність в площині XY .

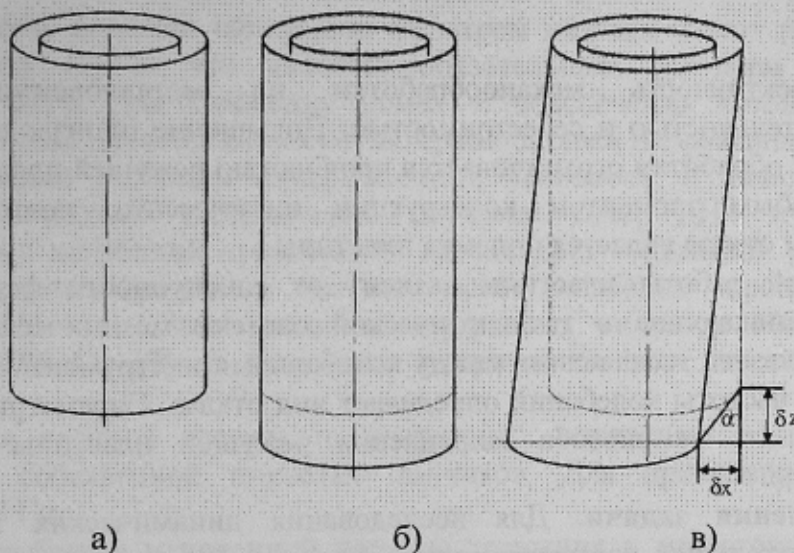


Рисунок. 3 - Сканер та його робота: а) загальний вид сканера до прикладання напруги, б) – ідеальна робота сканера, в) – реальна робота сканера.

Висновок

Таким чином обґрунтована необхідність створення Державного еталона нанометра та сформульовані проблеми та задачі техніки нановимірювань, які основані на методах скануючої зондової мікроскопії і лазерної інтерферометрії-фазометрії.

Література

1. Быков В.А., Рябоконт В.Н. Инструменты нанотехнологии: состояние и перспективы развития // Автометрия. – 2004. – том.40. – №2. – С. 37-45.
2. Календин В.В. Нанометрия: проблемы и решения // Автометрия. – 2004. – том.40. – №2. – С. 20-36.
3. Адамчук В.К., Ермаков А.В. Любинецкий И.В. Сканирующий туннельный микроскоп с атомарным разрешением на воздухе // Письма в ЖТФ. – 1988. – том.14. – №8. – С. 692-695.
4. Волк Ч. П., Новиков Ю. А., Раков А. В. Калибровка РЭМ с помощью периодической линейной меры микронного и субметрового диапазонов // Измерительная техника. – 2000. – № 4. – С. 48-52.