

ВПЛИВ ПОВЕРХНІ ОБ'ЄКТА НА ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ЦИФРОВОЮ ОПТИЧНОЮ МІКРОСКОПІЄЮ

О. М. Маркіна

Старший викладач

Кафедра наукових, аналітичних
та екологічних приладів і систем

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

E-mail: o.n.markina@gmail.com

О. І. Сингаївська

Інженер*

E-mail: plyt2007@gmail.com

В. П. Маслов

Доктор технічних наук, завідуючий відділом, старший
науковий співробітник**

E-mail: vladmaslov@mail.ru

Н. В. Качур

Молодший науковий співробітник**

E-mail: natalykachur@gmail.com

*Відділ електроннозондових методів
структурного і елементного аналізу
напівпровідникових матеріалів і систем***

**Відділ фізико-технологічних основ сенсорного
матеріалознавства***

***Інститут фізики напівпровідників

ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
пр. Науки, 41, м. Київ, Україна, 03028

Наведені результати експериментальних досліджень впливу субмікронного рельєфу мір на результати калібрування. Технологія виготовлення об'єкт-мікрометра відбитого світла металічного дзеркального покриття створює крайові навали матеріалу покриття. Зроблено висновки, що для зменшення невизначеності вимірювань, зумовлених точністю калібрування, перевагу слід надавати мірам із плоскою поверхнею та мірам на просвіт при роботі на великих збільшеннях

Ключові слова: об'єкт-мікрометр, цифрова оптична мікроскопія, геометричні розміри

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния субмикронного рельефа мир на результаты калибровки. Технология изготовления объект-микрометра отраженного света металлического зеркального покрытия создает краевые наплывы материала покрытия. Сделан вывод, что для уменьшения неопределенности измерений, обусловленных точностью калибровки, предпочтение следует отдавать мирам с плоской поверхностью и мирам на просвет при работе на больших увеличениях

Ключевые слова: объект-микрометр, цифровая оптическая микроскопия, геометрические размеры

1. Вступ

Прості і відносно дешеві методи оптичної мікроскопії для прямого спостереження і вимірювання геометричних розмірів об'єктів широко використовуються в різних галузях. Технології виготовлення оптичних елементів сучасних мікроскопів дозволяють компенсувати аберації та дифракційні ефекти і забезпечити максимально досягну фізичну роздільну здатність. У свою чергу цифрові системи реєстрації зображень та комп'ютерні алгоритми оптимізації і аналізу зображень здатні забезпечити точність вимірювань на рівні 50 нм [1].

Для безконтактних кількісних вимірювань геометричних розмірів об'єктів у мікронному діапазоні засобами оптичної цифрової мікроскопії виникає необхідність калібрування програмного забезпечен-

ня аналізу зображень за допомогою відповідних тестових об'єктів. Так, в телевізійній вимірювальній системі (ТВС) [2] штрихові об'єкт-мікрометри (міри) використовуються як еталони. При цьому мікроскоп у ТВС може проводити вимірювання як на відбиття, так і на просвіт і, тоді, в якості еталонів необхідно використовувати штрихові міри як на відбиття, так і на просвіт відповідно.

При виборі еталонів на просвіт та на відбиття виникає необхідність аналізу впливу технології їх виготовлення на метрологічні характеристики в цифрових вимірювальних системах. Для порівняння було вибрано стандартні штрихові міри на проходження і відбивання для калібрування оптичних мікроскопів виробництва ЛОМО (Росія) та 3D міру для калібрування скануючих зондових мікроскопів фірми Bruker (США). Технологія виготовлення штрихових мір

ЛОМО на відбивання передбачає механічне прорізання металічного дзеркального покриття на скляній пластині, що створює крайові «навали» матеріалу покриття. Еталон Bruker та ЛОМО на просвіт виготовляється за іншою технологією – не механічною обробкою, а літографією, тому крайові «навали» при виготовленні цих мір не створюються. Такі «навали» створюють неоднозначність, пов'язану зі зміною фокусування для визначення місця встановлення маркера при вимірюванні геометричних розмірів об'єкту. Тому необхідно оцінити величину похибки вимірювань, яка вноситься такою мірою.

2. Аналіз літературних відомостей та постановка проблеми

Є кілька шляхів підвищення точності вимірювань геометричних розмірів за допомогою телевізійної системи: покращення характеристик камери, розроблення нових алгоритмів обробки отриманих даних, покращення метрологічних характеристик еталонів для фокусування (мір).

У патенті [3] наведено спосіб підвищення чутливості вимірювання мікропереміщень за рахунок технології обробки оптичних елементів системи.

Так у статті [4] розглянуто методи лінійної фільтрації для збільшення контрастності зображення та метод градієнту для кращого виявлення границь ліній. Іншим підходом є створення додаткового каналу [5] для дублювання інформації та заміщення втрачених у одному з каналів даних. Такі методи дозволяють до деякої міри підвищити точність вимірювання, але величина зменшення похибки незначна.

Значного підвищення точності вимірювань можливо досягти завдяки використанню нових методик. Так у роботі [6] точність вимірювання підвищена завдяки застосуванню розробленого алгоритму пошуку фокусу замість автофокусування та використанню некогерентного випромінювання замість когерентного.

Проблемі визначення метрологічних характеристик тест-об'єктів для калібрування мікроскопів присвячено кілька досліджень закордонних вчених. Зокрема, в роботі [7] розглянуто геометричні параметри мір прямокутного та трапецієвидного профілю та методи їх атестації. Також розглянуто переваги та недоліки таких еталонів з погляду атестації растрових електронних та атомно-силових мікроскопів. В роботі [8] визначено критичну ширину лінії міри на відбиття, але не проаналізовано вплив технологічних процесів виготовлення та обробки поверхні міри на точність калібрування за такою мірою. Робота позиціонується як перший крок у дослідженні впливу виробничих процесів на точнісні характеристики еталону. В статті [9] розглянуто вплив нерівномірності профілю решітки міри на відбиття на нерівномірність коефіцієнту відбиття. Але не наведено причини такої нерівномірності решітки міри і розглянуто лише один еталон.

Тому актуальним завданням є визначення впливу технології виготовлення найбільш поширених мір на їх профіль та, відповідно, на точність фокусування мікроскопу.

3. Мета роботи та задачі дослідження

Метою роботи було дослідження впливу особливостей профілю штрихових мір на відбиття та просвіт при застосуванні їх у безконтактних цифрових вимірюваннях геометричних розмірів об'єктів в мікронному діапазоні.

Для досягнення мети роботи було досліджено топологію мір найбільш поширених у виробництві та дослідних установах.

4. Методика дослідження профілю штрихових мір

Дослідження рельєфу поверхні мір проводили методом атомно-силової мікроскопії (АСМ) на зондовому мікроскопі NanoScope IIIa Dimension 3000™ в лабораторії вимірювань геометричних параметрів поверхні Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України (лабораторія атестована відповідно до вимог Правил уповноваження та атестації в державній метрологічній системі) [10]. Перевірка ефективності калібрування програмного забезпечення аналізу зображень за різними мірами здійснювалась на оптичному мікроскопі Zeiss NU-2E, оснащеного цифровою камерою із CCD 8 Мпікс. Для вимірювань використовувались об'єктиви збільшеннями 25 (N.A. 0,5) та 100 (N.A. 1,3), які забезпечували роздільну здатність 0,55 та 0,21 мкм, відповідно. Якість юстування оптичної системи мікроскопу контролювалась за величиною спотворень зображення 3D міри Bruker. Відхилення у визначенні розмірів комірки на периферії зображення не перевищувало 300 нм для об'єктива 25x.

Оскільки основною похибкою при калібруванні оптичних мікроскопів за об'єкт-мікрометрами є оптимальність фокусування, то міри порівнювались за точністю дотримання періодичності оптичного контрасту при однаковому значенні відведення об'єктиву мікроскопу з фокусного положення при дослідженні різних мір.

5. Результати дослідження та їх обговорення

АСМ зображення поверхонь мір ЛОМО і Bruker та відповідні їх цифрові зображення показані на рис. 1, а, б. Видно, що при виготовленні міри ЛОМО, а саме при механічному прорізання штрихів, створюється більший навал матеріалу з однієї сторони штрихової міри ніж з іншої. Міра Bruker є плоско-паралельною комірчастою структурою з чіткими краями довкола заглибин. Кількісні характеристики цих мір показані на рис. 2. Як впливає з представлених профілів (рис. 2, а), амплітуда рельєфу мір є співмірною, однак неконтрольовані навали на мірі ЛОМО можуть перевищувати третину глибини штриха. Гістограми висот фрагментів мір розміром 30x30 мкм показані на рис. 2, б. Міра Bruker характеризується двома вузькими максимумами рознесеними на 180 нм, які відповідають дну комірки та рівню основної поверхні. Міра ЛОМО на відбивання має чотири максимуми і три з них знаходяться на рівні 120–160 нм, що відображає характерну висоту асиметричних навалів та рівень поверхні.

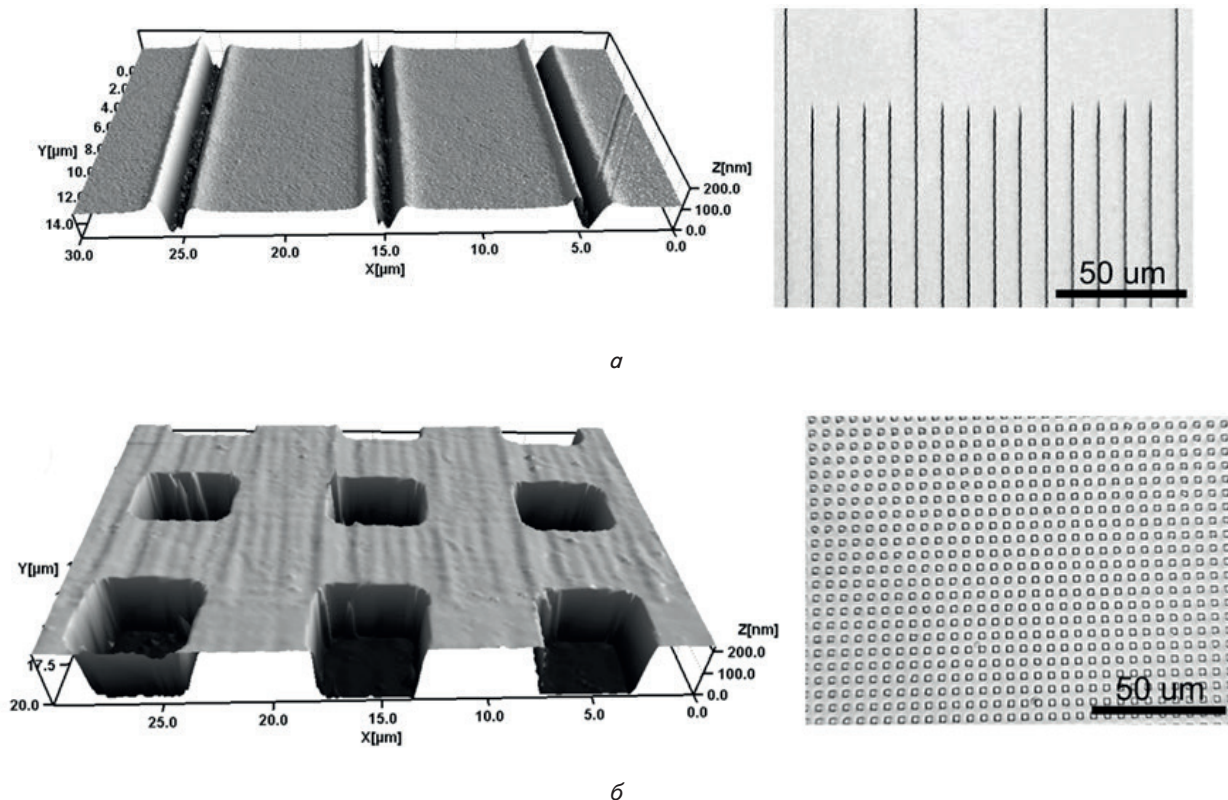


Рис. 1. Тривимірне АСМ зображення фрагменту поверхні і оптичне цифрове зображення штрихових мір, що досліджувались: *а* – об’єкт-мікроскоп ЛОМО та *б* – міра для калібрування сканера зондового мікроскопу фірми Bruker. Ціна пікселя оптичних зображень 220 нм

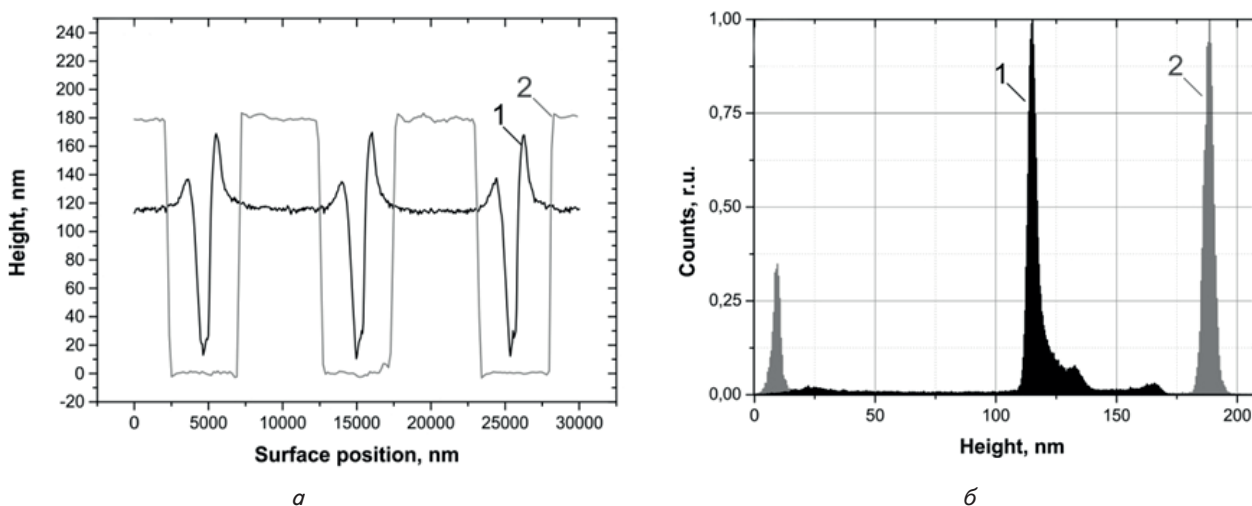


Рис. 2. Профілі рельєфу штрихів та гістограми висот міри на відбивання ЛОМО та міри Bruker: *а* – профілі рельєфу штрихів міри ЛОМО на відбивання (крива 1) та міри Bruker (крива 2); *б* – відповідні гістограми висот поверхонь

Точність процедури калібрування є суттєво вищою, якщо використовувати не вимірювання лінійних відстаней між штрихами (відривків), а задіяти інструменти статистичного аналізу, наприклад, вимірювати період структур за спектральними характеристиками просторової зміни контрасту з використанням алгоритмів швидкого Фур’є перетворення. При такому підході аналізується вся площа зображення, а не його окремі точки.

Приклад результатів аналізу періодичності контрасту оптичних цифрових зображень досліджуваних мір на відбивання наведено на рис. 3. Для штрихової міри періодичність штрихів визначалася з профілю інтенсивності, знятого в центрі зображення у перпендикулярному напрямі (рис. 3, *а*). Фур’є перетворення цього профілю дає чіткі максимуми аж до дев’ятого порядку, які відповідають просторовій частоті 10,00 мкм (рис. 3, *б*). Двовимірне Фур’є перетворення цифрово-

го зображення міри Bruker, каліброваного за мірою ЛОМО показане на рис. 3, в. Видно систему максимумів до дванадцятого порядку, які відповідають періоду 5,040 мкм. Відхилення величиною 40 нм відповідає допустимій неточності оптичних вимірювань з об'єктивами середнього збільшення. Зауважимо, що для даного об'єктиву розрахункова фізична роздільна здатність складає 550 нм. Мале відхилення вимірювань досягається за рахунок цифрової обробки і аналізу періодичної структури.

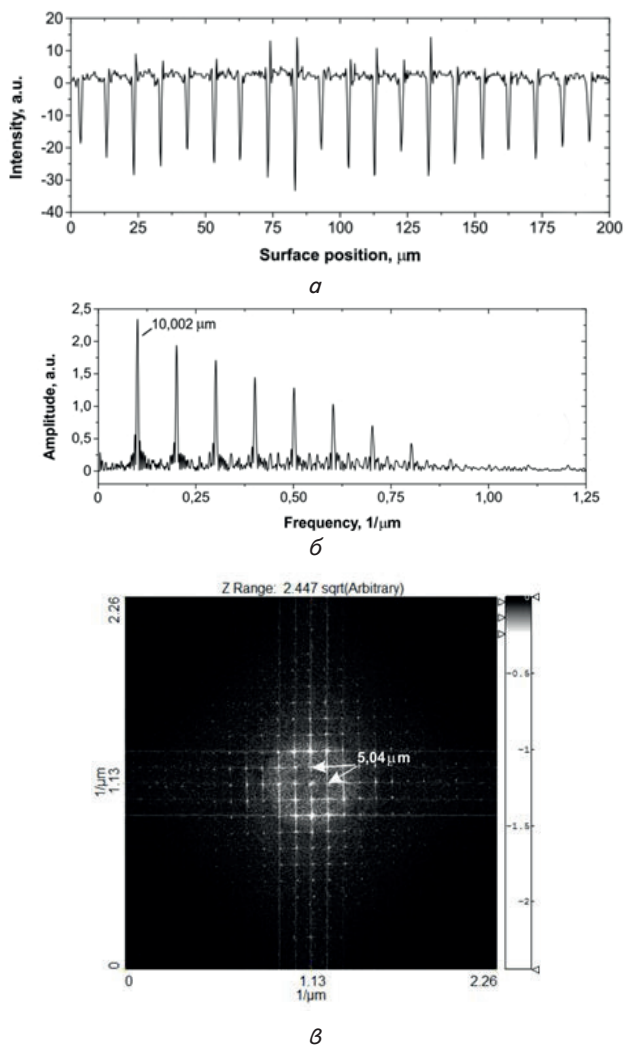


Рис. 3. Аналіз періодичності контрасту оптичних цифрових зображень рис. 1: а – профіль інтенсивності зображення знятий перпендикулярно штрихам об'єкт-мікрометра ЛОМО; б – відповідний Фур'є аналіз періодичності профілю; в – двовимірний Фур'є аналіз періодичності контрасту цифрового зображення об'єкт-мікрометра Bruker

З використанням даного підходу був виміряний період досліджуваних мір при оптимальному фокусуванні та фіксованому збільшенні фокусної відстані. Оскільки зображення формується не у паралельних пучках, то при розфокусуванні спостерігається незначне збільшення чи зменшення періоду в залежності від того сходяться чи розходяться промені, які формують зображення. Величина цієї зміни, при од-

накових налаштуваннях оптичної системи, в значній мірі визначається характером рельєфу відбиваючої поверхні.

Як слідує з представлених даних (табл. 1), при використанні об'єктиву середнього збільшення найбільшу зміну періоду та найнижчу точність визначення періоду має штрихова міра ЛОМО на відбивання світла.

Таблиця 1

Результати аналізу періодичності контрасту досліджуваних об'єкт-мікрометрів при оптимальній фокусній відстані та при фіксованому збільшенні фокусної відстані

Об'єкт-мікрометр	період при об'єктиві 25х, мкм	
	у фокусі	не у фокусі
ЛОМО відбивання	10,002±0,008	9,942±0,053
Bruker відбивання	5,045±0,009	5,051±0,010
ЛОМО проходження	10,007±0,006	10,011±0,012

Однак в загальному, навіть такі відхилення є значно нижчими за межу фізичної роздільної здатності цього об'єктиву і забезпечують прийнятну точність калібрування з використанням підходу, який базується на аналізі періодичності.

Причина значної похибки міри ЛОМО на відбивання у неоднорідності її рельєфу. На гістограмі рис. 2, б видно, що у розподілі її висот присутні 4-и максимуми (гістограма № 1): дно штриха, рівень поверхні та навали різної висоти ліворуч і праворуч штриха (див. відповідні профілі рельєфу рис. 2, а).

Розмах висот міри Bruker практично такий же, однак для неї є характерним наявність тільки двох чітких максимумів на гістограмі висот, які відповідають рівню дна квадратних заглибин та рівню основної поверхні (гістограма № 2).

Об'єкт-мікрометр ЛОМО на проходження показує малу похибку при незначному розфокусуванні в силу особливостей геометрії ходу променів.

Ситуація погіршується при роботі із об'єктивом великого збільшення, коли неточності фокусування є більш критичними через малу величину фокусної відстані (кілька мікрон), а також у поле зображення потрапляє мале число періодичних елементів міри, що не дозволяє застосовувати алгоритми аналізу спектральних частот в розподілі контрасту зображення. Тому тут слід використовувати тестові об'єкти із прийнятною періодичністю. Такими можуть виступати, наприклад, матриці CD-диска. Стандартом відстані між доріжками є $1,6 \pm 0,1$ мкм. Точність дотримання періоду у двічі перевищує роздільну здатність імерсійного об'єктиву з апертурою 1.3. На рис. 4, а приведене зображення поверхні CD-диска та його Фур'є перетворення, де система максимумів відповідає періоду 1,632 мкм.

Зображення штрихової міри ЛОМО та профілі інтенсивності впоперек 4-х штрихів міри ЛОМО на відбивання при ідеальному та зміщеному фокусуванні показані на рис. 4, б, в. Видно, що вибір точок відліку положення штриха є утрудненим через суттєву розмитість та асиметричність контрасту. В кінцевому випадку це та вищі вимоги до точності фокусування приводять до неточності калібрувань 150–250 нм, що є гіршим за цифрову точність калібрування об'єктивів середнього збільшення. У той же час, калібрування

за матрицею CD диска забезпечує цифрову точність в кілька десятків нм.

на точність процедури калібрування, яка базується на вимірюваннях просторових частот періодичності зміни контрасту зображення. При роботі із великими збільшеннями з об'єктивами, які забезпечують роздільну здатність близьку до фізичної межі оптичних вимірювань перевагу слід надавати плоско-паралельним об'єкт-мікрометрам із малим періодом шкали чи іншим об'єктам із точно визначеними розмірами.

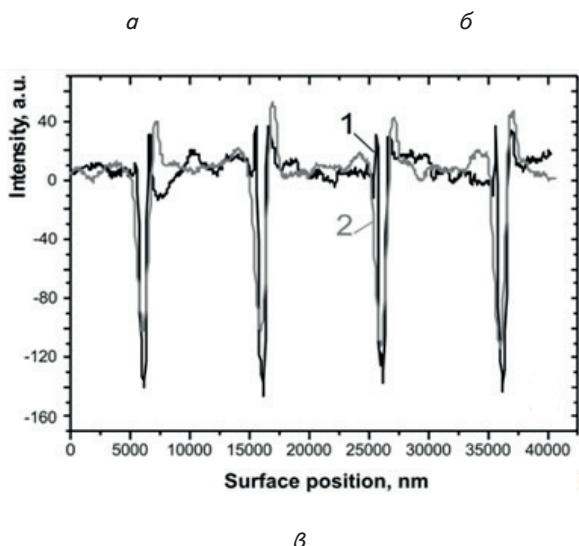
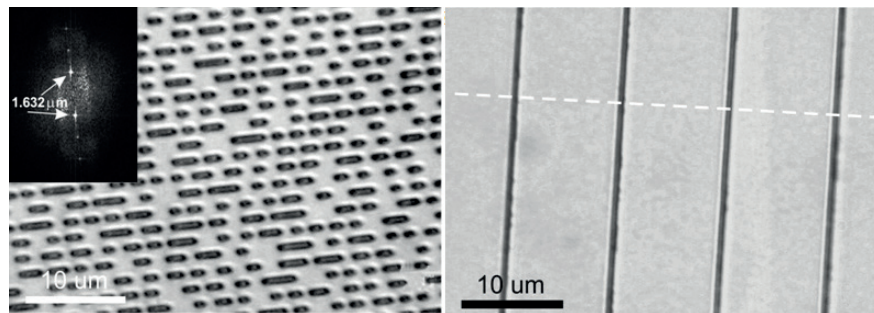


Рис. 4. Зображення та профілі інтенсивності поверхонь CD – диску та міри ЛОМО: а – зображення та Фур'є перетворення поверхні CD-диску; б – зображення об'єкт-мікрометра відбитого світла ЛОМО; в – профілі інтенсивності штрихів ЛОМО вздовж штрихової лінії при точному фокусуванні (крива 1) та при незначному відхиленні від фокусу. Ціна пікселя – 55 нм

Використання об'єкт-мікрометра проходного світла ЛОМО для калібрування зображень при таких збільшеннях є неможливим через те, що пластинка зі шкалою (штрихами) заклеєна покривним склом товщиною 170 мкм, що суттєво перевищує величину фокусної відстані імерсійних об'єктивів великого збільшення.

Таким чином, проведені експериментальні оцінки показали, що для цифрових вимірювань геометричних розмірів об'єктів в мікронному діапазоні з використанням об'єктивів малого і середнього збільшення характер рельєфу об'єкт-мікрометрів мало впливає

на точність процедури калібрування міра на проходження ЛОМО (технологія фотолітографії) та 2D міра на відбиття фірми Bruker, яка виготовлена за технологією електронної літографії.

3. В конструкції та методиці вимірювань геометричних розмірів об'єктів в мікронному діапазоні з використанням телевізійних вимірювальних систем (ТВС) існує можливість застосування мікроскопу як на відбиття, так і на просвіт, результати досліджень дозволяють надавати перевагу мірам на просвіт ЛОМО як найбільш дешевим та доступним.

6. Висновки

1. В роботі методом атомно-силової мікроскопії досліджено особливості профілю штрихового об'єкт-мікрометра відбитого світла (виробництво ЛОМО, Росія). Технологія виготовлення цих мір передбачає механічне прорізання штрихів в металевому шарі, що призводить до формування «навалів» по краях штриха. Крім цього, «навали» не є симетричними до осі штриха. Така форма профілю призводить до неоднозначності встановлення маркерів при визначенні геометричних розмірів штриха при великих збільшеннях та, відповідно, вносить похибку у визначення розмірів об'єкта, що контролюється.

2. Визначено, що при однакових величинах відхилення від фокусного положення найбільша неточність вимірювань отримана при використанні міри ЛОМО на відбиття. Практично не має похибки при таких самих умовах експерименту міра на проходження ЛОМО (технологія фотолітографії) та 2D міра на відбиття фірми Bruker, яка виготовлена за технологією електронної літографії.

Література

1. Горелик, С. Л. Телевизионные измерительные системы [Текст] / С. Л. Горелик, Б. М. Кац, В. И. Киврин. – М.: Связь, 1980. – 168 с.
2. Порев, В. Вимірювання лінійних розмірів за допомогою телевізійних інформаційно-вимірювальних систем [Текст] / В. Порев, О. Маркіна, Ю. Агінський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 2, № 10 (62). – С. 59–62. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/12757/10630>
3. Пат. 89021 України, МПК (2006.01) G01B 11/04. Спосіб Маркіної вимірювання мікропереміщень [Текст] / Маркіна О. М. – заявник НТУУ «КПІ». – № у 2013 12405, подано 22.10.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. – 4 с.

4. Якимець, С. Н. Повышение точности измерения диаметра слитка кремния телевизионным методом [Текст] / С. Н. Якимець, С. С. Тибин // Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 1/2010 (60), Ч. 1 – С. 66–69.
5. Lvov, V. Quasiinvariant Automatic Control Digital Systems of Inertia Objects [Text] : матер. міжн. конф. // TCSET'2010 Львів-Славськo, Україна V. Lvov, A. Andrieiev. – Л.: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – С. 79
6. Введенский, С. Измерние субмикронных размеров. Оптический микроскоп с некогерентным освещением [Текст] / С. Введенский, А. Захарченко, В. Троицкий // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – № 1. – С. 59–61.
7. Гавриленко, В. Тест-объекты с прямоугольным и трапециевидным профилями рельефа для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии [Текст] / В. Гавриленко, Ю. Новиков, А. Раков, П. Тодуа // Наноиндустрия. – 2008. – № 4. – С. 24–30.
8. Heather, P. Modeling and Analysis of Scatterometry Signatures for Optical Critical Dimension Reference Material Applications [Text]: Proceedings of the 2007 International Conference / P. Heather, T. Germer, M. Cresswell, R. Allen, R. Dixon, M. Bishop // Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics. – American Institute of Physics, 2007. – P. 392–396.
9. Germer, T. Effect of line profile variation on specular and diffuse reflectance from a periodic structure [Text] / T. Germer // Journal of the Optical Society of America A. – 2007. – Vol. 24, Issue 3. – P. 696–701. doi: 10.1364/josaa.24.000696
10. Lytvyn, P. Scanning Probe Microscopy in Practical Diagnostic: 3D Topography Imaging and Nanometrology in book Functional Nanomaterials and Devices for Electronics, Sensors and Energy Harvesting [Text] / P. Lytvyn. – Springer International Publishing, Switzerland, 2014. – P. 179–219. doi: 10.1007/978-3-319-08804-4_10