

УДК 621.762

МЕТОДИ КОНТРОЛЮ СТРУКТУР ТОПОЛОГІЇ ПОВЕРХОНЬ МАТЕРІАЛІВ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ, МЕМС ТА МОЕМС

Д.т.н. О.І. Филипенко, О.О. Чала, Ю.В. Бондаренко, Харківський національний університет радіоелектроніки

У статті розглядаються методи контролю якості поверхонь виробів електронної техніки, МЕМС та МОЕМС для реалізації задачі технологічного забезпечення контролю якості та для подальшого удосконалення на етапі готової продукції. За проведеними дослідженнями обирається метод неруйнівного контролю якості, а саме інтерференційний метод контролю.

В статье рассматриваются методы контроля качества поверхностей изделий электронной техники, МЭМС и МОЕМС для реализации задачи технологического обеспечения контроля качества и для дальнейшего совершенствования на этапе готовой продукции. По проведенным исследованиям выбирается метод неразрушающего контроля качества, а именно интерференционный метод контроля.

The article deals with methods of quality control of surfaces of electronic products, MEMS and MOEMS for the implementation of the task of technological quality control and for further improvement at the stage of finished products. According to the conducted research, the method of non-destructive quality control is chosen, namely the interference method of control.

Ключові слова: *якість, контроль, функціональні поверхні, електронна техніка, МЕМС, МОЕМС, інтерферометр.*

Постановка проблеми

Вивчення структурних характеристик матеріалів – одна з ключових задач стрімкого розвитку матеріалознавства, на основі якої базується процес створення нових та покращення властивостей вже існуючих матеріалів, що використовуються в електронній техніці, МЕМС (мікроелектромеханічні системи), МОЕМС (мікроелектрооптомеханічні системи) та взагалі мікроелектроніці. Поряд з класичними контактними методами, які раніше були основними для визначення параметрів топології мікроповерхонь, відносяться численні методи з області оптичної мікроскопії.

Шорсткість поверхні при обробці компонентів залежить від багатьох технологічних факторів: режимів обробки (швидкості різання, подачі); геометрії (переднього і заднього кутів), матеріалу і якості поверхні інструменту; механічних властивостей, хімічного складу і структури матеріалу заготовок; складу змашувально-охолоджувальної рідини та ін.

У той же час шорсткість поверхонь в значній мірі визначає основні експлуатаційні властивості компонентів і вузлів: опір втоми, надійність, контактну жорсткість і теплопровідність, відбиваючу та поглинаючу здатність

поверхонь та ін. Тому характеристики шорсткості поверхні нормуються і піддаються постійному аналізу в технологічних дослідженнях і контролю в процесі виробництва

Особливо в МЕМС та МОЕМС факт того, що перемикання променя здійснюється без перетворення світло-електричний сигнал-світло накладає додаткові, чіткі обмеження та вимоги до якості функціональних поверхонь.

Метою статті є аналіз методів контролю якості структури, топології та характеристик (шорсткості та інших мікрохарактеристик) поверхонь матеріалів електронної техніки МЕМС та МОЕМС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як відомо авторам оцінка точності результатів вимірювань мікронерівностей поверхонь проводиться загальноприйнятими в метрології методами. Однак при оцінці шорсткості поверхні виникають і деякі специфічні метрологічні проблеми [1-5]. Використання декількох технологічних режимів призводить до різного роду неминучих дефектів, що вносяться самою технологією виготовлення компонентів.

Оптичні безконтактні методи є найбільш перспективними як найбільш прості і найменш матеріальнозатратні.

Сучасні методи дослідження 3D-геометрії об'єктів (рис.1) можна розділити на два великих класи методи дослідження 3D-геометрії об'єктів – контактні (координатно-вимірювальні машини, щупові прилади, контактні профілометри) і безконтактні, серед яких найбільш поширеними є методи світлового перерізу, стереоскопічні, інтерференційні і растрові методи. До безконтактних методів належать також і фотограмметричні методи [6].

У зв'язку з малими розмірами підкладок та різноманітними фізико-хімічними властивостями матеріалів підкладок, для контролю параметрів, доцільно використовувати неруйнівні види контролю.

Методи оптичного неруйнівного контролю застосовують для виявлення мікронеоднорідностей і шорсткості поверхні, для вимірювання товщини плівок.

В процедуру неруйнівного контролю, як правило, включені як мінімум 2 методи: один поверхневий і один об'ємний. Поверхневі методи більш прості у виконанні, тому їх проводять перед об'ємними, а об'ємні проводять при відсутності показань на неприпустимі дефекти за результатами поверхневих.

Такі прилади мають ряд переваг: незалежність результатів вимірювання від матеріалу об'єкта контролю,

можливістю зміщення контрольованого об'єкту в поле зору прибору; високою точністю, швидкодією, можливістю автоматизації [6].

Розрізняють три класи приладів для контролю топографії поверхонь і об'ємних поверхневих дефектів:

- прилади для контролю шорсткості поверхонь;
- прилади для контролю і виміру дефектів і мікрогеометрії (при цьому контролюються окремі дефекти у виробках і вимірюється глибина дефекту);
- прилади для контролю площинності високоякісних поверхонь і вимірювання товщини прозорих плівок (цими приладами виявляються дефекти типу однорідного вигину, завалів, складного вигину (викривлення), зколів та виколів).

Згідно [8] неруйнівний контроль (НК) поділяють на дев'ять видів:

- магнітний;
- електричний;
- вихрострумний;
- радіохвильовий;
- тепловий;
- оптичний;
- радіаційний;
- акустичний;
- з проникаючими речовинами.

Кожний вид неруйнівного контролю здійснюють методами, які класифікують за наступними ознаками:

- характером взаємодії фізичних полів або речовин з контрольованим об'єктом;
- первинними інформативними параметрами;
- способом отримання первинної інформації;

Вибір методу неруйнівного контролю залежить від параметрів контрольованого об'єкту та його умов дослідження [10]. Методи дослідження 3D-геометрії об'єктів представлено на рис 1.

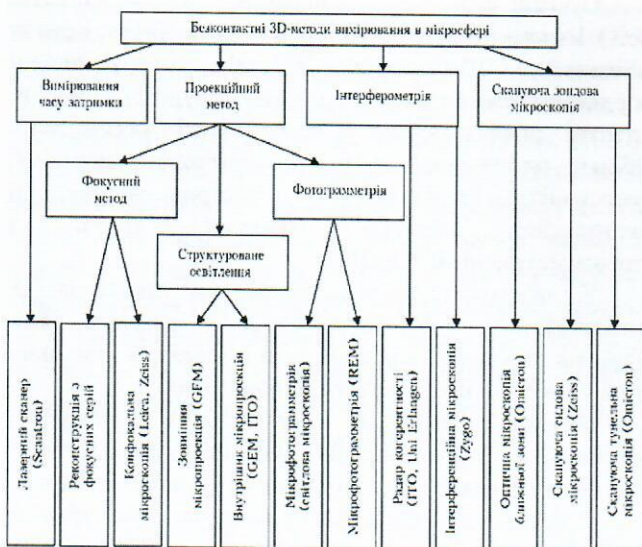


Рис. 1. Методи дослідження 3D-геометрії об'єктів

Для якісної оцінки шорсткості в цілому використовується близько 30 параметрів. Однак, як правило, число таких параметрів зведено до шести. Їх поділяють на дві групи – вертикальні (їх називають також

висотні) і горизонтальні (крокові).

До першої відносяться середнє арифметичнє відхилення профілю Ra , висота нерівностей профілю по десяти точках Rz і найбільша висота нерівностей профілю $Rmax$: до другої – середній крок нерівностей.

Для досягнення якості обробки поверхонь підкладок необхідно технологічно забезпечити і контролювати нерівності поверхні. Інформація про якість поверхонь може бути отримана на основі застосування наступних оптичних методів неруйнівного контролю:

- метод світлового перерізу;
- растровий метод;
- інтерференційний метод [9-15].

Метод світлового перетину полягає в тому, що одним мікроскопом (проєкційним) на поверхню, що досліджується, направляється під певним кутом вузький пучок світла, при цьому на ній з'являється межа тіні від непрозорої щілини, введеної в частину світлового пучка, що падає на поверхню. Межа світла та тіні (світловий переріз) подібна профілю в перерізі поверхні площини, і по її конфігурації можна дати оцінку про розташування, форму та розміри нерівностей на поверхні, що досліджується.

Другий мікроскоп (наглядний), розташований під кутом ($2\alpha=90^\circ$) відносно першого, служить для спостереження отриманого світлового перерізу поверхні.

Величина зміщення пропорційна висоті сходинки (H), що розглядається, і висоті нерівностей в поверхні, що досліджується, в загальному випадку.

Метод світлового перерізу відноситься до профільних методів вимірювання нерівностей поверхні.

Пристрої, в яких реалізується метод світлового перерізу, дозволяють виміряти нерівності поверхні висотою від 0,8 до 63 мм з допустимими похибками показників.

Нерівність поверхні кромки шторки, що прикривають щілину діафрагми, повинна бути в декілька разів менше величини ($0,8/35 \approx 0,02$ мкм), інакше щілини будуть вносити значне викривлення світлового перерізу профілю. Досягнення цього представляє собою певні технологічні та метрологічні труднощі.

Растровий метод.

Якщо на випробовувану поверхню накласти скляну пластинку, на яку нанесені з малим кроком штрихи (растрова сітка), при похилому падінні променів відображена растрова сітка накладається на штрихи самої сітки і спостерігаються муарові смуги. На основі цього явища запропонована методика вимірювання висот нерівностей поверхонь за допомогою растрового мікроскопа. Растрові вимірювальні мікроскопи призначені для вимірювання висоти нерівностей (від 0,4 до 40 мкм) зовнішніх поверхонь деталей із слідами обробки, що мають певний напрям.

Растровий метод відноситься до профільних методів вимірювання шорсткостей поверхні.

Принцип дії растрового мікроскопа ґрунтується на використанні деяких ефектів, що виникають при опромінюванні поверхні об'єктів тонкосфокусованим пучком електронів – зондом. Як показано на рис. 2, унаслідок взаємодії електронів (1) із зразком (речовиною)

(2) генерується низка сигналів. Основними з них є потік електронів: відбитих (3), вторинних (4), Оже-електронів (5), поглинених (6), тих, що пройшли через зразок (7), а також випромінювань: катодолюмінесцентного (8) і рентгенівського (9).

Для отримання зображення поверхні зразка використовуються вторинні, відбиті та поглинені електрони. Решта компонентів віддачі застосовується як додаткові джерела інформації.

Найважливішою характеристикою будь-якого мікроскопа є його роздільна здатність. Вона визначається:

- 1) площею перетину (діаметром) зонда на поверхні;
- 2) контрастом, який утворюється зразком і детекторною системою;
- 3) областю генерації сигналу в зразку [9-17].

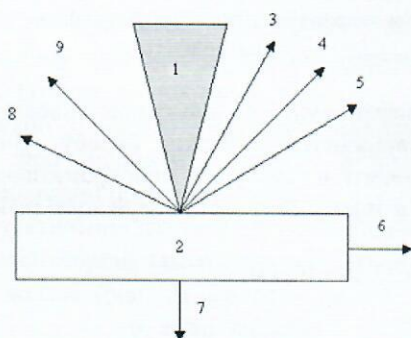


Рис. 2. Ефекти взаємодії електронного променя з об'єктом у растровій мікроскопії

Діаметр зонда переважно залежить від конструктивних особливостей і якості вузлів мікроскопа та, перш за все, електронної оптики. У сучасних растрових електронних мікроскопах досягнуто високої досконалості компонентів конструкції, що дозволило зменшити діаметр зонда до 5–10 нм.

Недосконалість електронної оптики впливає на роздільну здатність мікроскопа. Недосконалість оптики характеризують хроматична та сферична аберації й астигматизм.

Хроматична аберація виникає через різну швидкість (довжину хвилі) електронів і зміну її з часом, що призводить до нестабільності фокусних віддалей лінз. Хроматичну аберацію зменшують шляхом стабілізації прискорюючої напруги та електричного струму в лінзах.

Сферична аберація є наслідком того, що електрони проходять на різних кутових відстанях від оптичної осі лінзи й тому фокусуються по-різному.

Сферичну аберацію зменшують накладанням жорстких обмежень на геометрію полюсних наконечників лінз, збільшенням прискорюючої напруги та зменшенням отвору діафрагми. У такому випадку потік формується електронами, що менше відхиляються від оптичної осі лінзи.

Виникнення астигматизму пов'язане з порушенням магнітної чи геометричної симетрії лінзи. Асиметрія усувається забезпеченням високої геометричної точності

виготовлення полюсного наконечника лінзи та введенням спеціальної системи (стигматора), який коригує магнітне поле лінзи, відновлюючи його симетрію.

Інтерференційний метод.

Сучасна інтерференційна профілометрія широко застосовується в метрології, промисловості і наукових дослідженнях. Інтерференційні методи дають можливість вимірювати рельєф поверхонь з роздільною здатністю менше 0,2 мкм, похибкою менше 0,1 мкм і високою продуктивністю (більше 100 точок вимірювання в секунду).

Широке застосування нанотехнологій і наноматеріалів в світовому та вітчизняному промисловому виробництві, постійно зростаючі вимоги до контролю якості промислових виробів машинобудування, електроніки і точної механіки роблять оптичну низькокогерентну інтерферометрію одним із найбільш перспективних напрямків сучасного приладобудування.

У інтерференційних засобах вимірювання шорсткості поверхні використовується інтерференція двох або більшого числа когерентних пучків променів (що вийшли з однієї точки джерела світла, що мають однаковий напрямок коливань, однакові частоти і постійну різницю фаз).

Явище інтерференції виникає, зокрема, в повітряному проміжку між двома напівпрозорими пластинами. Падаючий на верхню пластину пучок променів розділяється її внутрішньою поверхнею на два когерентних пучка, один з яких відображається у зворотному напрямку, а інший також у зворотному напрямку, інтерферуючи з першим пучком.

Більшість відомих у даний час інтерферометрів побудовано на класичних інтерференційних схемах Релея, Майкельсона, Фізо, Маха-Цендера і Фабрі-Перо.

Залежно від призначення існують різні конструкції інтерферометрів, однак, принцип їх дії в основному один і той же. Світлові хвилі від кожної крапки, що світиться, джерела світла поділяються в приладі на дві або декілька частин, які проходять шляхи різної довжини і знову з'єднуються в один. Завдяки цьому світлові хвилі, що накладаються, набувають певної оптичної різниці ходу Δ , є когерентними і інтерферуються.

У інтерферометрах, що застосовують для контролю топографії поверхні, один з інтерферуючих променів відбивається від еталонної поверхні, а інший - від контрольованої.

Мікроінтерферометрія.

Інтерферометри, призначені для вимірювання висоти мікронерівностей або мікрообробки на поверхнях малої шорсткості, називають мікроінтерферометрами.

Вимірювання висоти мікронерівностей здійснюється за викривлення смуг рівної товщини. Але оптичний прилад, призначений для спостережень мікронерівностей, повинен мати велике збільшення і високу роздільну здатність. Тому мікроінтерферометри є поєднанням інтерферометра типу Майкельсона (рідше Фізо) і мікроскопу. За чутливість приладу прийнятий

вигин інтерференційної смуги на ступінь, напилення на скляній плоскій пластині, виражений в частках смуги, яка може бути видима в полі зору приладу і виміряна за допомогою відлікового пристрою [12].

Основні характеристики мікроінтерферометрів наведені в таблиці 1

Таблиця 1

Основні характеристики мікроінтерферометрів

Параметри	МІІ-4	МІІ-9	МІІ-10
R_a , мкм	0,16 - 0,02	0,16 - 0,02	2,5 - 0,04
R_z , мкм	0,1 - 0,25	0,1 - 0,25	
при візуальному спостереженні	490	500 та 700	375 та 500
при фотографуванні	260	125	200
Поле зору, мм	0,32	0,35 та 0,25	0,48 та 0,36

На рис. 3 показана схема двопроменевого інтерферометра Лінніка. В її основу покладено принцип дії інтерферометра Майкельсона.

Світловий пучок, що йде від джерела світла 1 (лампа розжарювання), проходить через конденсор 2 і діафрагму 3 з напівпрозорим дзеркалом 4, ділиться на два когерентних пучка, які фокусуються об'єктивами 5 і 5' на еталонне дзеркало 6 і контрольовану поверхню 7, відповідно. Після відбиття від еталона і виробу пучок проходить через ті ж елементи схеми і фокусується лінзою 8 в площині діафрагми 9, в якій за допомогою окуляра 10 спостерігають інтерференційну картину взаємодії еталонного і робочого пучків світла. Спостерігається інтерференційна картина, яка відповідає інтерференції в повітряному шарі, утвореному дзеркалом 7 і уявним зображенням (6, пунктирна лінія) еталонного дзеркала 6 в діляльній пластині 4. Дзеркало 6 розташоване так, що дзеркала 7 і 6 утворюють повітряний клин, тому виникають смуги рівної товщини, локалізовані в площині клина і представляють собою паралельні лінії. Для їх спостереження використовують об'єктив, що можна переміщувати, 10, фокальна площина якого поєднана з поверхнею дзеркала 7.

Ширину і напрямок інтерференційних смуг можна регулювати нахилом дзеркал.

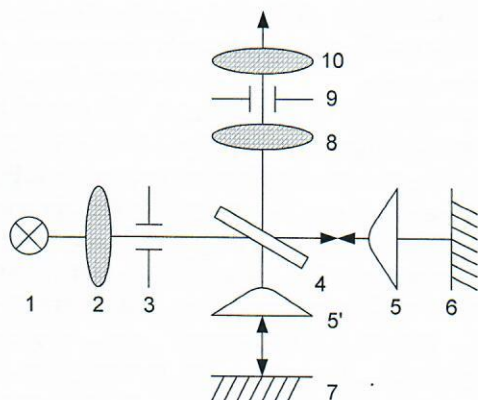
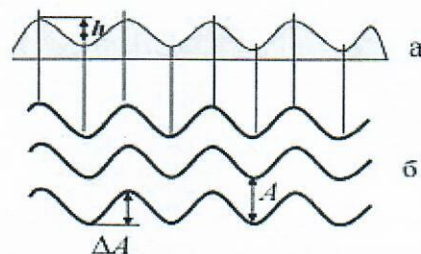


Рис. 3. Схема двопроменевого інтерферометра

Смуги викривлені відповідно до профілю поверхні, що контролюється (рис. 4). Форма інтерференційних смуг відтворює у масштабі профіль контрольованої ділянки поверхні. Кривизну смуг (величину вигину ΔA) вимірюють за допомогою окулярного мікрометра.



а - профіль поповерхні;

б - вид інтерференційної картини

Рис. 4. Смуги викривлені відповідно до профілю поверхні, що контролюється

Кривизна смуг є кількісною характеристикою мікронеоднорідностей поверхні виробу. Вимірювання можна проводити в білому або монохроматичному світлі. При роботі в білому світлі висота нерівності рівна:

$$h = 0,27 \Delta A / A (\text{мкм}),$$

де ΔA – величина вигину інтерференційної смуги; A – величина інтервалу між смугами. При роботі в монохроматичному світлі:

$$h = \lambda \Delta A / 2A (\text{мкм}),$$

де λ – довжина хвилі.

Мікроінтерферометри МІІ-4,5,9,10 призначені для визначення висоти нерівностей поверхонь в межах від 1 - 0,03 мкм. Оптичні системи інтерферометрів мають збільшення 490 раз і полі зору 0,32 мм. Для розширення верхньої межі виміру інтерферометрів використовують різні пристрої. Мікроінтерферометри МІІ-4 і МІІ-5, забезпечені інтерференційним клиновим компенсатором Карташова, що дозволяє вимірювати нерівності від 4 до 30 мкм.

На рисунку 5 представлено фото, поверхні, що контролюється, зроблене за допомогою інтерферометру МІІ-4.

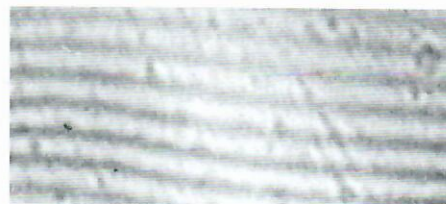


Рис. 5. Фото, поверхні, що контролюється, зроблене за допомогою інтерферометру МІІ-4

Якщо ризики і сходинки на поверхні об'єкту, що контролюється, мають на верхньому і нижньому краях достатню відбивну здатність, застосовують інтерференційно-індикаторний метод: інтерференційні смуги наводять на різкість спочатку на дно ризики, а потім на її край. Глибина ризики визначається величиною переміщення мікрооб'єктиву. Цим методом можна визначити глибину нерівностей від 20 до 100 мкм [8, 17-19].

Висновки

Проаналізувавши найбільш поширені методи вимірювань та контролю структур топології і шорсткості поверхонь підкладок для виробів електронної техніки та матеріалів МЕМС, МОЕМС виявлені основні особливості, проаналізовані переваги і недоліки даних методів, а також зроблено висновок про необхідність удосконалення розглянутих методів контролю.

В умовах розвитку інформаційних і інтелектуальних технологій та впровадження систем управління в виробничі процеси, особливої актуальності набуває можливість розробки таких методів, які б мали можливість удосконалення функцією автоматизації розрахунків, контролю і управління якістю продукції. Контрольовані величини в сучасній електроніці та МЕМС лежать в субмікронних областях, що робить операції контролю технологічного процесу виготовлення підкладок з заданою топологією досить трудомісткими та ресурсозатратними.

Таким чином, можна зробити висновок про необхідність автоматизації операції контролю топології поверхонь, які дозволяють оперативно і достовірно отримувати інформацію про об'єкт контролю та ефективно керувати технологічним процесом виготовлення підкладок для приладів електронної техніки.

Подальші дослідження будуть базуватися на досить зручному та ефективному, малозатратному, неруйнівному методі інтерференційного контролю та спрямовані на розробку методів розпізнавання, фільтрації та отримання 3-D зображень при проведенні контролю з використанням обраних компонентів, а також створення математичних моделей для оцінки топологій та шорсткості поверхні

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Аналіз сучасних методів визначення структури та топології поверхонь матеріалів / О.Ю. Повстяной, В.Д. Рудь, Ю.А. Мельник, Н.Ю. Імбірович // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. - 2014. - № 2. - С. 37-42.
2. Кожан В. П., Корній В. В., Русин Б. П. Реконструкція форми поверхні матеріалів за їх зображеннями // *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». «Автоматика, вимірювання та керування»*. - 2005. - № 530. - С. 116-120.
3. Zheltov S. Yu., Knyaz V. A., Stepanyants D. G. Automated photogrammetric system for photorealistic skull 3'D reconstruction: Videometrics and Optical Methods for 3'D Shape Measurements // *Proceeding of SPIE*. - 2001. - 4309. P. 336-345.
4. Степаненко В. А. Метод та практичне застосування стереоскопічної фрактографії // *Металознавство та обробка металів*. - 1995. - № 1 - С.51-54.
5. Serra J. *Image Analysis and*

Mathematical Morphology. - London: Academic Press., 1992. - P. 329.

5. Дорожжінський О. Л., Тукай Р. *Фотограмметрія*. - Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. - 330 с.

6. MEMS in Optical Networks [Electronic resource] www.allaboutmems.com Режим доступу: <http://www.allaboutmems.com/memsapplications-optical.html>. Title screen.2.

7. Технологічні фактори виробництва, що впливають на якість покриттів дзеркальних поверхонь МОЕМС-перемикачів / О. І. Філіпенко, О. О. Чала, М. І. Відешин // *Наукові нотатки*. - 2017. - Вип. 57. - С. 178-183.

8. І.І.Ш. Невлюдов, А.А. Андрусевич., М.А. Омаров, И.Д. Перепелица. Автоматизированный контроль шероховатости функциональной поверхности подложек приборов электронной техники. Навчальний посібник. Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2014. - 156 с.

9. Артюхина, Н. К. Интерферометр для оперативного контроля качества поверхностей зеркал / Н. К. Артюхина, В. А. Марчик, А. А. Самусенко // *Приборостроение-2016 : материалы 9-й международной научно-технической конференции, Минск, 23-25 ноября 2016 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]*. - Минск, 2016. - С. 256-257.

10. Тимчик Г.С., Філіппова М.В., Маркін М.О. *Технологія оптичного виробництва*. Навчальний посібник для студентів ВНЗ / Під заг. ред. Г. С. Тимчика - К.: НТУУ «КПІ», 2016. - 168 с.

11. Егоров В.А. *Оптические и щуповые приборы для измерения шероховатости поверхности* - М.: Машиностроение, 1965. - 222 с.

12. Приходько В.М. *Метрология, стандартизация и сертификация*. Учебник для студентов вузов, изд. 3-е, перераб. / В.М. Приходько, Л.И. Карпов, А.И. Аристов. - М.: ИЦ Академия, - 2008. - 384 с. 8. Кучин А.А. *Оптические приборы для измерения шероховатости поверхности* / Кучин А.А., Обрадович К.А. - Л.: Машиностроение, 1981. - 198 с.

13. Аналіз сучасних методів визначення структури та топології поверхонь матеріалів / О.Ю. Повстяной, В.Д. Рудь, Ю.А. Мельник, Н.Ю. Імбірович // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. - 2014. - № 2. - С. 37-42.

14. Зенкін М. А. Сучасні оптичні методи контролю шорсткості відповідальних деталей машин / М. А. Зенкін, А. С. Назаренко // *Вісник Інженерної Академії України* / М. А. Зенкін, А. С. Назаренко. - Київ, 2014. - С. 220-224.

15. Бондаренко Ю. В. Аналіз методів контролю параметрів функціональних поверхонь підкладок / Ю. В. Бондаренко // *збірник студентських наукових статей «Автоматизація Та Приладобудування»* / Ю. В. Бондаренко. - Харків: АПР-2017, 2017. - С. 96-101.

16. Зырин, И. Д. Обзор возможностей математического моделирования шероховатости поверхности низкотемпературной керамики [Текст] : матер.23-ей Международн. конф. / И. Д. Зырин, В. М. Карабан, С. Б. Сунцов // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2013)*, 8-13 сентября 2013, Севастополь. - С.181-182.

17. Rebeiz G. *RF MEMS: Theory, Design and Technology* [Text]. - Wiley/IEEE Press, 2003, p. 202-211.

18. Аваев Н.А., Шишкин Г.Г. *Электронные приборы* [Текст]: Учебник для вузов/ Под ред. проф. Г.Г.Шишкина. - М.: Изд-во МАИ, 2005 г. -102с

Н.И. Мухуров *Электро-механические микро-устройства*/ Н.И. Мухуров, Г.И. Ефремов. Минск «Беларусская наука», 2012. - 259с.