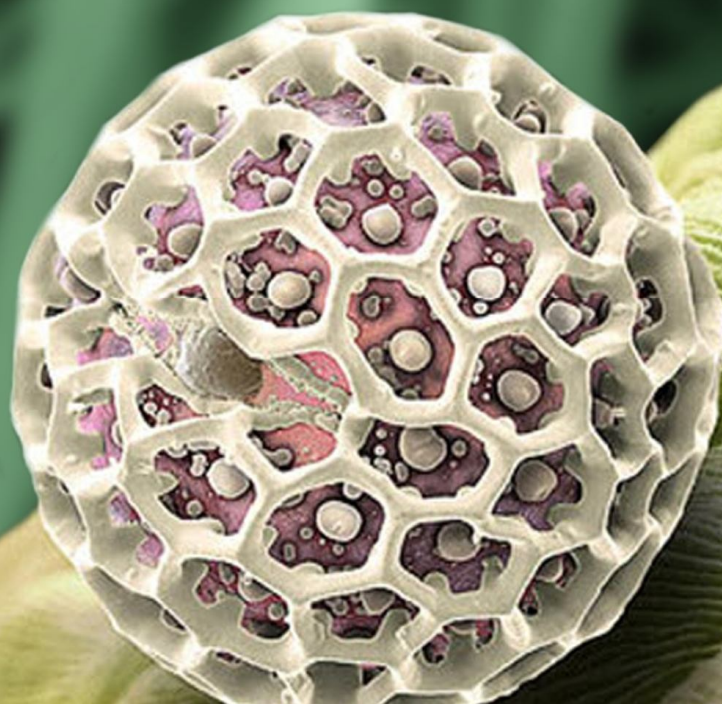


Мікроскопія в нанотехнологіях

Мікроскопія в нанотехнологіях



Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

*В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, О. В. Верцанова,
Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко*

Мікроскопія в нанотехнологіях

*Київ
НТУУ «КПІ»
2014*

УДК 681.72:620.3
ББК 22.34
М 59

Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут»
(Протокол № 2 від 10 лютого 2014 р.)

Автори: В. С. АНТОНЮК, д.т.н., професор,
Г. С. ТИМЧИК, д.т.н., професор
О. В. ВЕРЦАНОВА, к.т.н., доцент,
Ю. Ю. БОНДАРЕНКО, к.т.н., доцент,
С. О. БЛОКІНЬ
М. О. БОНДАРЕНКО, к.т.н., доцент,

Рецензенти:

М.Д. Гераїмчук, д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Ю.Д. Філіпов, д-р техн. наук, проф.,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля
Національної академії наук України

М 59 Мікроскопія в нанотехнологіях [Текст]: / В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик,
О.В. Верцанова [та ін.] //– К. : НТТУ «КПІ», 2014. – 258 с. : іл.– 157. Бібліогр. :
С.245-258.

ISBN № 978-966-622-621-4

Систематизовано матеріали з використання мікроскопії в нанотехнологіях. Наведено основні відомості про засоби інструментальної мікроскопії від оптичної до найбільш сучасної – зондової. Розглянуто перспективи розвитку методів та засобів мікроскопії в прикладних додатках наноінженерії.

Наводиться сучасне програмне забезпечення для отримання та обробки результатів мікроскопічних досліджень, а також методологія вимірювань за допомогою мікроскопічної техніки, що розглядає основні методики дослідження мікрорельєфу, поверхневих фізико-механічних та техніко-експлуатаційних властивостей матеріалів та нанометричних структур на таких поверхнях, а також їхні оптичні, електричні та феромагнітні властивості

Для студентів, магістрів та аспірантів вищих технічних навчальних закладів України, що спеціалізуються за напрямком підготовки «Приладобудування», а також може бути корисною викладачам вищих навчальних закладів, науковим співробітникам та фахівцям у сфері оптичного приладобудування та мікроскопічного дослідження поверхонь функціональних матеріалів та нанорозмірних структур.

УДК 681.72:620.3
ББК 22.34

ISBN № 978-966-622-621-4

© Колектив авторів, 2014

З М І С Т

	Вступ	6
Розділ 1	МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МІКРОСКОПІЇ В НАНОТЕХНОЛОГІЯХ	8
	1.1. Лазерна скануюча конфокальна мікроскопія	8
	1.2. Близньопольна оптична мікроскопія	15
	1.3. Іонно-польна мікроскопія	23
	1.4. Електронна мікроскопія високої роздільної здатності, що працює на просвітлення	29
	1.5. Скануюча тунельна мікроскопія	41
	1.6. Атомно-силова мікроскопія	45
	1.7. Магнітно-силова мікроскопія	55
	1.8. Електросилова мікроскопія	59
	1.9. Вимоги до підготовки та проведення мікроскопічних досліджень	66
	1.9.1. Підготовка зразків до мікроскопічних досліджень	66
	1.9.2. Підготовка приладу до проведення мікроскопічних вимірювань	69
	1.9.3. Вимоги до умов навколишнього середовища при проведенні мікроскопічних досліджень	73
	1.9.4. Основні етапи проведення мікроскопічних досліджень	77
	1.9.5. Математичний аналіз результатів мікроскопічних досліджень ...	82
Розділ 2	МЕТОДОЛОГІЯ МІКРОСКОПІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В НАНОТЕХНОЛОГІЯХ	91
	2.1. Визначення розмірів наночасток та вивчення наноstrukturованих поверхонь	91
	2.1.1. Вивчення мікрогеометрії поверхні композиційних матеріалів методом атомно-силової мікроскопії	91
	2.1.2. Дослідження параметрів біологічних об'єктів методом атомно- силової мікроскопії	98

2.2.	Визначення пружних характеристик плівок Ленгмюра-Блоджет методом статистичної силової спектроскопії	108
2.3.	Кількісний мікроаналіз нанорозмірних матеріалів високопросторовим електронним потоком	113
2.4.	Електронна нанокристалографія матеріалів методом електронної зворотнорозсіюваної дифракції в скануючому електронному мікроскопі	127
2.5.	Вивчення поверхневих електромагнітних властивостей наноматеріалів та структур	143
2.5.1.	Дослідження поверхонь накопичувачів інформації та відновлення даних методом скануючої зондової мікроскопії	143
2.5.2.	Дослідження феромагнітних властивостей напівпровідникових шарів методом магніто-силової мікроскопії	148
2.6.	Чотирьохвимірна електронна томографія	153
Розділ 3	ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ МІКРОСКОПІЇ	160
3.1.	Оптичні інструментальні мікроскопи	160
3.2.	Фотонні мікролітографи	167
3.3.	Електронні нанолітографи	173
3.4.	Зондові наноскани та нанолітографи	176
3.5.	Тривимірні нанолітографи	186
Розділ 4	ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МІКРОСКОПІЇ В НАНОТЕХНОЛОГІЯХ	198
4.1.	Основні ознаки нового покоління мікроскопів	198
4.2.	Оптична ультраскопія	201
4.3.	Голографічна мікроскопія	205
4.4.	Сучасні методи електронної мікроскопії	216
4.5.	Акустична мікроскопія	219

4.6. Маніпуляція окремими атомами та просторове копіювання нанометричних структур	223
4.7. Принципи та засоби самоорганізації та самоскладання в нанотехнологіях	230
4.8. Застосування атомно-силової мікроскопії для знаходження техногенних наночасток в біологічних зразках	237
Список літературних джерел	245

ВСТУП

Розвиток сучасного приладобудування спрямований на збільшення швидкодії, надійності, розширення функціональних можливостей та економічної привабливості елементів систем нанoeлектроніки, мікрооптики, мікропотомеханіки тощо з поступовим зменшенням їх розмірів до нанометричного та далі – до атомарного рівнів. Сучасні теоретичні, а незабаром і практичні здобутки у прикладній нанотехнології дозволять створювати пристрої, елементи яких будуть збиратися із окремих атомів та молекул – шар за шаром. Це, в свою чергу, дозволить значно покращити техніко-експлуатаційні характеристики цих пристроїв та розширити їх функціональні можливості [1-8].

Проте розвиток елементної бази нанотехнологій неможливий без контролю та діагностики техніко-експлуатаційних характеристик цих елементів. Без сумніву найперспективнішими серед таких методів контролю є методи мікроскопії, які здобули лідерство в напрямку неруйнуючого контролю та діагностики нанометричних матеріалів і дозволяють найбільш точно описати фундаментальне розуміння явищ та механізмів наномасштабних елементів та структур [9-11].

Таким чином, довідникове видання присвячене узагальненню і систематизації існуючих на сьогодні методів та засобів мікроскопії, що знайшли прикладне застосування в сучасних нанотехнологіях, є актуальним і в першу чергу адресується студентам, магістрам та аспірантам вищих технічних закладів освіти України, що спеціалізуються за напрямком підготовки «Приладобудування», а також може бути корисним для викладачів вищих навчальних закладів, наукових співробітників та фахівців, що спеціалізуються в областях оптичного приладобудування та мікроскопічного дослідження матеріалів.

В розділі 1 даного видання наведено методи та засоби мікроскопічних вимірювань, які знайшли застосування в нанотехнологіях, а саме: оптичних,

електронних та зондових; та алгоритм проведення досліджень за допомогою цих приладів. Також в даному розділі розглядається сучасне програмне забезпечення для отримання та обробки результатів мікроскопічних досліджень.

Розділ 2 довідника присвячено методології вимірювань за допомогою мікроскопічної техніки, що розглядає основні методики дослідження мікрорельєфу, поверхневих фізико-механічних та техніко-експлуатаційних властивостей матеріалів та нанометричних структур на таких поверхнях, а також їхні оптичні, електричні та феромагнітні властивості.

В розділах 3-4 розглянуто питання розвитку методів та засобів інструментальної мікроскопії, а також подальші перспективи їх використання.

Автори висловлюють подяку науковцям – фахівцям в області прикладних нанотехнологій та мікроскопічних досліджень, а саме: директору навчально-наукового Центру «Мікронанотехнології та обладнання», д.т.н., професору Ващенко В.А., академіку Національної академії наук Білорусі, завідувачу лабораторії нанопроцесів та технологій Інституту тепло- та масообміну ім. О.В.Ликова НАН Білорусі, д.т.н., професору Чижику С.А., провідному науковому співробітнику відділу магнітних наноструктур Інституту фізики мікроструктур РАН, д.ф.-м.н. Міронову В.Л., завідуючій сектором скануючої зондової мікроскопії Інституту кристалографії РАН ім. О.В.Шубнікова, д.ф.-м.н. Толстихіній А.Л., директору ТДВ «Мікротестмашини» (м. Гомель, Білорусь), к.т.н. Суслову А.А. за допомогу у підготовці матеріалів довідникового видання, а також багаторічну плідну співпрацю в області нанотехнологій та наноструктурного дослідження матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андриевский Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Р.А. Андриевский // Российский химический журнал. – 2002. – т. XLVI, № 5. – С. 50-56.
2. Андриевский Р. А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля – М.: Академия, 2005. – 117 с.
3. Балабанов В.И. Нанотехнологии. Наука будущего / В.И. Балабанов. – М.: Эксмо, 2009. – 256 с.
4. Головин Ю. И. Введение в нанотехнологию / Ю.И. Головин. – М.: Машиностр. – 1, 2003. – 112 с.
5. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
6. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси: пер. с японск. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 134 с.
7. Нанотехнологии в ближайшем десятилетии. Прогноз направления развития / под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса: пер. с англ. – М.: Мир, 2002. – 292 с.
8. Пул Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.
9. Старостин В.В. Материалы и методы нанотехнологии: учеб. пособие / В.В. Старостин; под общ. ред. Л.Н. Патрикеева. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 431 с.
10. Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. – New York: American Scientific Publishers, 2004.
11. Рыков С.А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур / С.А. Рыбаков. – СПб, Наука, 2001 – 53 с.
12. Minsky M. Memoir on inventing the confocal scanning microscope [Электронный ресурс] / Scanning. – 1988. – Vol.10. – P.128-138. Режим

доступу: <http://web.media.mit.edu/~minsky/papers/ConfocalMemoir.html/>
(25.11.13). – Назва з екрану.

13. 3-д микроскопия [Электронный ресурс] / Междисциплинарный биологический онлайн-журнал «Zbio». Режим доступа: <http://phys.web.ru/db/msg/1182209/> (25.11.13). – Назва з екрану.
14. LSM 510 and LSM 510 META. Laser Scanning Microscopes. Operating Manual. Release 3.2. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ncxt.lbl.gov/files/lab/LSMmanual.pdf> (26.11.13). – Назва з екрану.
15. Nakano A. Spinning-disk confocal microscopy – a cutting-edge tool for imaging of membrane traffic / A. Nakano // Cell. Struct. Funct. – 2002. – Vol.27, №5. – P. 349-55.
16. Inoue S. Direct-view high-speed confocal scanner: the CSU-10 / S. Inoue, T. Inoue // Methods in Cell Biology. – 2002. – Vol.70. – P. 87-127.
17. High-speed 1-frame/ms scanning confocal microscope with a microlens and Nipkow disks" / T. Tanaami, [etc.] // Applied Optics. – 2002. – Vol.41. – P. 4704-4708.
18. Optimizing low-light microscopy with back-illuminated electron multiplying charge-coupled device: enhanced sensitivity, speed, and resolution / C.G. Coates, [etc.] // J. Biomed. Opt. – 2004. – Vol., 9, №6. – P. 1244-1252.
19. Multiphoton Excitation Microscopy / Electron Multiplying CCD technology [Электронный ресурс]: http://www.emccd.com/MPE_EMCCD.pdf (26.11.13). – Назва з екрану.
20. Multiphoton Excitation Microscopy MPE Tutorial / Copyright 2000 Coherent, Inc. Coherent laser group [Электронный ресурс]: <http://www.coherentinc.com> (26.11.13). – Назва з екрану.
21. Nipkow-disc / Electron Multiplying CCD technology [Электронный ресурс]: http://www.emccd.com/Nipkow_EMCCD.pdf (26.11.13). – Назва з екрану.
22. Egner A. Comparison of the axial resolution of practical Nipkow-disk confocal fluorescence microscopy with that of multifocal multiphoton microscopy: theory

- and experiment / A. Egner, V. Andersen, S.W. Hell // J. Microscopy. – 2002. – Vol. 206, Pt 1. – P. 24-32.
23. Сулабе Е.А. Конфокальный лазерный сканирующий микроскоп / Е.А. Сулабе, М.М. Иванов, Ю.В. Ченцов // РЭМ-99: XI Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел: тезисы докл.
 24. Сайт федерального государственного унитарного предприятия «Специальное конструкторское бюро института радиотехники и электроники Российской академии наук». Режим доступа: <http://sdb.ire.rssi.ru/about.php> (12.12.13). – Назва з екрану.
 25. Сайт Новосибирского Государственного Технического Университета. Режим доступа: <http://ref.nstu.ru/electron2.htm> (12.12.13). – Назва з екрану.
 26. Либенсон М. Н. Преодоление дифракционного предела в оптике [Электронный ресурс] / Журнал «Физика», 2000. Режим доступа: http://www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/0003_099.pdf. (27.11.13). – Назва з екрану.
 27. Active bimorph-based tapping-mode distance control for scanning near-field optical microscopy of biological samples in liquid /F. H. Lei [et al.] //Journal of Applied Physics.-2006.-Vol. TOO. – P. 084317.
 28. Synge E.H. A suggested method for extending the microscopic resolution into the ultramicroscopic region / E.H. Synge // Phil. Mag., 1928. – № 6. – 356p.
 29. Ash E. A. Super-resolution Aperture Scanning Microscope / Ash E. A., Nichols // Nature Publishing Group, 1972. – № 237 – P. 510-512.
 30. Rutgers Specialty Fiber Optics Group / The State University of New Jersey. Режим доступа: http://irfibers.rutgers.edu/pdf_files/ir_fiber_review.pdf. (21.12.13). – Назва з екрану.
 31. Double-resonance probe for near-field scanning optical microscopy / A.P.Cherkun [etc.] // Review of Scientific Instruments. – 2006. –V. 77. – P. 703.
 32. Karrai K. Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes / K.Karrai, R.D.Grober // Appl.Phys.Lett. – 1995. – v.66. – P. 1842.

33. Fischer U. Near-field optics-light microscopy for nanoscience / U. Fischer, A. Naber // Photo-nik international. – 2006. – № 5. – P. 82-85.
34. Дряхлушин В.Ф. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия и ближнепольные оптические зонды: свойства, изготовление и контроль параметров» / В.Ф. Дряхлушин, В. П. Вейко, Н. Б. Вознесенский // Квантовая электроника. – 2007. – № 37 (2). – С. 193-203.
35. Портал по популярной механике. Режим доступа: <http://www.popmech.ru>. (23.12.13). – Назва з екрану.
36. Betzig E. Combined shear force and near-field scanning optical microscopy / E. Betzig, P. L. Finn, J. S. Weiner // Appl.Phys.Lett. – 1992. #60. – P. 2484-2486.
37. Мюллер Э. Полевая ионная микроскопия. Полевая ионизация и полевое испарение / Мюллер Э., Цонь Т. // Пер. с англ. – М., 1980.
38. Введение в физику поверхности / Оура К., [и др.] // Под ред. В.И. Сергиенко. – М.: Наука, 2006. – 490 с.
39. Tsong T.T. Dynamics and diffusion of atoms at stepped surfaces / Tsong T. T., Chen C. // The chemical physics of solid surfaces. – Amsterdam: Elsevier, 1997. – V. 8. – P. 102-148.
40. Tsong T. T. Direct observation of the atomic structure of W(100) surface / T. T. Tsong, J. Sweeney // Solid State Commun.– 1979.– V.30, №7.– P. 767-770.
41. Marton L. Early History of the Electron Microscope. / L. Marton, San Francisco: San Francisco Press, 1994.
42. Electron Microscopy of Thin Crystals / Hirsch P. [etc.], Krieger, Huntington, New York, 1977.
43. Williams D. B., Carter C. B. Transmission Electron Microscopy / D. B. Williams, C. B. Carter, N.Y.: Plenum Press, 1996.
44. Shindo D. High-Resolution Electron Microscopy for Materials Science / D. Shindo, K. Hiraga, Tokyo: Springer. – 1998. – 190 p.
45. Андриевский Р.А. Прочность наноструктур / Р.А. Андриевский, А.А.Глезер // Физика металлов и металловедение.– 1999. – т.88, №1. – С. 50.

46. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения: учеб. пособие / Балоян Б.М. [и др]. – М.: АгроПрессДизайн, 2007. – 102 с.
47. Нанослоистые композиционные материалы и покрытия / Шпак А.П. [и др.]. – К.: Академперіодика, 2004. – 164 с.
48. Нанотехнологія та її інноваційний розвиток / Пономаренко В.С. [та ін.]. – Х.: ВД «ІНЖЕК», 2008. – 280 с.
49. Хилл А. Наноструктурные материалы / А. Хилл. под ред. Р. Ханнинка.– М.: Техносфера, 2009. – 448 с.
50. Штанский Д.В. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения в нанотехнологических исследованиях / Д.В. Штанский // Рос. хим. ж., 2002, т. XLVI, №5. – С.81-89.
51. Graczyk J. F. A Scanning Electron Diffraction Study of Vapor-Deposited and Ion Implanted Thin Films of Ge (I) / Graczyk J. F. Chaudhari P. // Phys. Status Solidi B. – 1973. – V. 58. – P. 163-179.
52. Shtansky D. V. Characterization of Nanostructured Multiphase Ti-Al-B-N Thin Films with Extremely Small Grain Size / D. V. Shtansky, K. Kaneko, Y. Ikuhara, E. Levashov. // A.Surf. Coat. Technol. – 2001. – P. 148-206.
53. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon / S. Iijima // Nature (London). – 1991. – P. 56-58.
54. Chopra N.G. Boron-Nitride nanotubes / N.G. Chopra [etc.] // Science. – 269. – P.966-967 (1995).
55. Polyhedral and cylindrical structures of tungsten disulphide / R. Tenne [etc.] // Nature (London). – 1992. – V. 360. – P. 444-446.
56. Ajayan P. M. Nanotubes from Carbon / P. M. Ajayan // Chem. Rev. – 1999. – V. 99. – P. 1787-1800.
57. Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load / Yu M.F. [etc.] // Science. – 2000. – V. 287 – P. 637-640.
58. Heterostructures of Single-Walled Carbon Nanotubes and Carbide Nanorods / Zhang Y., [etc.] // Science. – 1999. – V. 285. – P. 1719-1722.

59. Parilla P.A., Dillon A.C., Jones K.M., Riker G., Schulz D.L., Ginley D.S., Heben
60. The first true inorganic fullerenes? / P.A. Parilla, [etc.] // *Nature*, – 1999. – V. 397. – P. 114-114.
61. Vanadium Oxide Nanotubes – a New Flexible Vanadate Nanophase / Muhr H-J., [etc.] // *Adv. Mater.* – 2000. – V. 12. – P. 231-234.
62. Golberg D. Unique morphologies of boron nitride nanotubes / D.Golberg, Y.Bando // *Appl.Phys.Lett.* – v.79. – P.415-417.
63. Supervisor K. Maruyama. Practical Electron Microscopy and Its Application to Materials / Supervisor K. Maruyama, Editor-in-chief K. Nakai // Iron Steel Institute of Japan and Japan Institute of Metals, 2002.
64. Shatansky D.V. Crystallography and Structural Evolution of Cubic Boron Nitride Films During Bias Sputter Deposition / D.V.Shatansky, O.Tsuda, Y.Ikuhara [etc.] // *Acta.mater.*, 48: 3745-3759 (2000).
65. Bernhard J.M. The Santa Barbara Basin is a symbiosis oasis / Bernhard J.M. [etc.] // *Nature*. – 2000. – V. 403. – P. 77-80.
66. Helical Crystallization of Proteins on Carbon Nanotubes: A First Step towards the Development of New Biosensors / Balavoine F., [etc.] // *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* – 1999. – V. 38. – P. 1912-1915.
67. Sleytr U.B. Crystalline bacterial cell surface layers (5-layers): from supramolecular cell structure to biomimetics and nanotechnology / U.B.Sleytr, P.Messner, D.Pum [etc.] // *Angew. Chem. Int. Ed.* – v.38. – P.1034-1054 (1999).
68. Ikuhara Y. High Resolution Transmission Electron Microscopy Studies of Metal/Ceramics Interfaces / Ikuhara Y., Pirouz P. // *Microscopy Res. and Techn.* – 1998. – V. 40. – P. 206-241.
69. Veprék S. A concept for the design of novel superhard coatings / Veprék S., Reiprich S. // *Thin Solid Films.* – 1995. – V. 268. – P. 64-71.
70. Size effects of dislocation stability in nanocrystals / V. G Gryaznov, [etc.] // *Phys. Rev. B.* – 1991. – Vol. 44, №1. – P. 42—46.
71. Андриевский Р.А. Высокораesрешающая просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия наноструктурных боридонитридных пленок /

- Р.А. Андриевский, Г.В. Калинин, Д.В. Штанский // Физ. тверд. тела. – 2000. – Т. 42, №4. – С. 741-746.
72. Alexandrov I. V. Computer simulation of X-ray diffraction patterns of nanocrystalline materials / I. V. Alexandrov, R. Z. Valiev // Philos. Mag. B. – 1996. – V. 73, №6. – P. 861-872.
73. Microstructure of superhard (Ti,Al)N/Mo multilayers / C. J. Tavares, [etc.] // Thin Solid Films. – 2001. – V. 398–399. – P. 397-404.
74. Synthesis and structure of smooth, superhard TiN/SiN_x multilayer coatings with an equiaxed microstructure / Y. Chen, [etc.] // Surf. Coat. Technol. – 2001. – V. 146–147. – P. 209-214.
75. Crystallography and structural evolution of LiNbO₃ and LiNb_{1-x}Ta_xO₃ films on sapphire prepared by high-rate thermal plasma spray CVD / D. V. Shtansky, [etc.] // J. Mater. Res. – 2001. – V. 16, №8. – P. 2271-2279.
76. Langford R.M. Preparation of transmission electron microscopy cross-section specimens using focused ion beam milling / R.M. Langford, A. K. Petford-Long // J. Vac. Sci. Technol., A. – 2001. – V. 19(5). – P. 2186-2193.
77. Mechanism of nucleation and growth of cubic boron nitride thin films / Shtansky D. V. [etc.] // Sci. Technol. Adv. Mater. – 2000. – V. 1. – P. 219-225.
78. Lee S.Y. Reduced optical losses in MOCVD grown lithium niobate thin films on sapphire by controlling nucleation density / S.Y. Lee, R.S. Feigelson // J. Crystal Growth. – 1998. – V. 186. – P. 594-606.
79. Lee G.H. Laser-induced thermal degradation and ablation of polymers: Bulk model / G.H.Lee, M.Yoshimoto, H.Koinuma // Appl.Surf.Sci. – 1998. – V.127-129. – P.393–397.
80. Belson J. On the surface stress and plastic deformation on ion-bombarded conical microcrystals / J.Belson, I.H.Wilson // Phil. Mag. A. – 1982. – v.45, № 6. – P.1003 - 1013.
81. Cowley J.M. Ultramicroscopy. – New York, 1992. – v.41. – 335 p.

82. Yagi K. Reflection High-Energy Electron Diffraction and Reflection Electron Imaging of Surfaces / K. Yagi, S. Ogawa, Y. Tanishiro Eds. P.K. Larsen, P. J. Dobson, N.Y.: Plenum Press. – 1987. – 285 p.
83. Панов В.И. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия поверхности / В.И. Панов // УФН. – 1988. – Т.155, № 1. – С.155-158.
84. Эдельман В.С. Сканирующая туннельная микроскопия / В.С. Эдельман // Приборы и техника эксперимента – 1989. – № 5. – С. 25-49.
85. Эдельман В.С. Развитие сканирующей туннельной и силовой микроскопии / В.С. Эдельман // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – № 1. – С.24-42.
86. Неволин В.К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии: Учебное пособие / В.К. Неволин, Москва, МГИЭТ (ТУ). – 1996. – 91 с.
87. Binnig G. Scanning tunneling microscopy / G. Binnig, H. Rohrer // Helv. Phys. Acta. – 1982. – V.55, № 6. – P. 726-735.
88. Tunneling through a controllable vacuum gap / G. Binnig, [etc.] // Appl. Phys. Lett. – 1982. – V.40. – P. 178.
89. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л. Миронов, Российская академия наук, г. Нижний Новгород. – 2004.
90. Суслов А. А. Сканирующие зондовые микроскопы (обзор) / А. А. Суслов, С. А. Чижик // Материалы, Технологии, Инструменты. – 1997. – Т. 2, № 3.
91. Быков В.А. Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности / В.А.Быков, М.И.Лазарев, С.А.Саунин // Электроника: наука, технология, бизнес. – 1997. – № 5. – С. 7-14.
92. Володин А.П. Новое в сканирующей микроскопии / А.П. Володин // Приборы и техника эксперимента. – 1998. – № 6. – С. 3-42.
93. Бахтизин Р.З. Физические основы сканирующей зондовой микроскопии / Р.З. Бахтизин, Р.Р. Галлямов. – Уфа: РИО БашГУ, 2003. – 82 с.
94. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / Гусев А.И. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
95. Сканирующая зондовая микроскопия биополимеров / Под ред. И.В. Яминского. – М.: Научный мир, 1997. – 86 с.

96. Учебно-научный центр Бионаноскопия [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.nanoscopy.org/> (27.11.13). – Назва з екрану.
97. Van der Waals and capacitive forces in atomic force microscopies / M. Saint Jean // J. Appl. Phys. – 1999. – V. 86 (9). – P. 5245-5248.
98. Martin Y. Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution / Y. Martin and H. K. Wickramasinghe // Appl. Phys. Lett. – 1987. – V. 50, № 20. – P. 1455-1457.
99. Magnetic force microscopy: General principles and application to longitudinal recording media / D. Rugar, [etc.] // J. Appl. Phys. – 1990. – V. 68, №3. – P. 1169-1182.
100. Наблюдение лазерно-индуцированных локальных модификаций магнитного порядка в слоях переходных металлов / А.М. Алексеев // Письма в ЖЭТФ. – 2001. – №73. – С. 214.
101. J.R.Matey, J.Blanc – Scanning capacitance microscopy. // J. Appl. Phys., v. 57, № 5, p. 1437 – 1444 (1985).
102. Nonnenmacher M. Kelvin probe force microscopy / M. Nonnenmacher, M.P. O'Boyle, H.K. Wikramasinghe // Appl. Phys. Lett. – 1991. – №58 (25). – P. 2921-2923.
103. Scanning Kelvin microscopy as a tool for visualization of optically induced molecular switching in azobenzene self assembling films / B. Stiller, [etc.] // Surf. Interface Anal. – 2000. – № 30. – P. 549-551.
104. Sarid D. Exploring scanning probe microscopy with "Mathematica" / Sarid D. – New York: John Wiley& Sons, Inc., 1997. – 262 p.
105. Мансури Г.Али. Принципы нанотехнологии. Исследование конденсированных веществ малых систем на молекулярном уровне / Г.Али Мансури: пер. с англ. – М.: Научный мир, 2008. – 320 с.
106. Бахтизин Р. З. Сканирующая туннельная микроскопия – новый метод изучения поверхности твердых тел / Р.З. Бахтизин // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – № 11. – С.83-89.

107. Валиев Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
108. Козлов В.В. Системы рентгеноспектрального микроанализа Inca Energy и Inca Wave / В.В.Козлов // Перспективные технологии, оборудование и системы для материаловедения и наноматериалов: Материалы конференции и семинара / под ред. проф. Л.В.Кожитова. – М.: Интерконтакт Наука; Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2008. – С.106-122.
109. Методика ПЭМ-31 // БРНПО Порошковой металлургии. – Минск, 1988. – 21 с.
110. Лаборатория металлографии / Е.В. Панченко [и др.]. – М.: Металлургия, 1965.
111. ГОСТ Р 8.697-2010 ГСИ. Издания. Межплоскостные расстояния в кристаллах. Методика выполнения измерений с помощью просвечивающего электронного микроскопа; введ. 2010-10-01. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, сор. 2010. – 10 с.
112. Эндрих К. Электронограммы и их интерпретация / К. Эндрих, Д. Дайсок, С. Клоди. – М.: Мир, 1971.
113. Утневский М.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении / Утневский М.М. – М.: Металлургия, 1973.
114. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хириш [и др.]. – М.: Мир, 1968.
115. The Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) project at ITL/NIST [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://math.nist.gov/oommf/> (27.11.13). – Назва з екрану.
116. Russ J.C. Fractal Dimension Measurement of Engineering Surface / Russ J.C. // International Journal of Machine Tools and Manufacturing. – 1998. – V. 38, № 5-6. – P. 567-571.

117. Biomedical Science / Edited by Prof. Dhanjoo N. Ghista. – Engineering and Technology, 2012. – 902 p.
118. Frank J. Electron Tomography Methods for Three-Dimensional Visualization of Structures in the Cell / J. Frank // New York: Springer, 2005. – 455 p.
119. Nonchaotic Nonlinear Motion Visualized in Complex Nanostructures by Stereographic 4D Electron Microscopy / Oh-Hoon Kwon, [etc.] // NanoLetters. – 2010. – 10(8). – P. 3190-3198.
120. Oh-Hoon Kwon. 4D Electron Tomography / Oh-Hoon Kwon, Ahmed H. Zewail. // Science. – 2010. – № 328. – P. 1668.
121. Анчуткин В. EUV-нанолиитография. Проблемы и перспективы развития / В. Анчуткин, А.Бельский, О. Гущин // Фотоника. – 2010. – №1. – С.10-15.
122. Wilson R. Fujitsu uses TSMC for 40 nm and maybe 28 nm [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.electronicweekly.com>. (29.11.13). – Назва з екрану.
123. Rothschild M. Projection optical lithography / M. Rothschild // Materials Today. – 2005. – V.8. №2.
124. Пахомов С. Второе дыхание 193-нм литографии, или Особенности 32-нм техпроцесса / С. Пахомов [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.compress.ru/article.aspx?id=20185&iid=924>
125. Sanghee Nah. Metal-Enhanced Multiphoton Absorption Polymerization with Gold Nanowires / Sanghee Nah, [etc.] // J. Phys. Chem. – 2010. – № 114. – P. 7774-7779.
126. Lu Y. Vacuum-Free Self-Powered Parallel Electron Lithography with Sub-35-nm Resolution / Y.Lu, A.Lal // Nano Lett. – 2010 – 10 (6). – P. 2197-2201
127. Свириденко А.И. Место сканирующей зондовой микроскопии в нанонауке и нанотехнологиях / Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии : сб. докл. IX Междунар. конф., Минск, 12–15 окт. 2010 г. – Минск : Беларус. навука, 2010. – С. 3-8.
128. Blind reconstruction of scanning probe image data / P.M. Williams [etc.] // J. Vac. Sci. Technol. B. – 1996. – 14 (2). – P. 1557-1562.

129. Ближнепольные оптические зонды: методы изготовления, основные характеристики и контроль аппаратуры / В.П. Вейко, [и др.] // Проблемы когерентной и нелинейной оптики: Сборник статей. – СПб: ИТМО, 2004. – С. 31-57.
130. Large-area flexible 3D optical negative index metamaterial formed by nanotransfer printing / Debashis Chanda, [etc.] // Nature Nanotechnology. – 2011. – №6. – P. 402-407.
131. Создан оптический микроскоп с рекордной разрешающей способностью [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://pavlonews.info/news/categ_4/83930.html (29.11.13). – Назва з екрану.
132. Johnston S.F. Holographic Visions: A History of New Science. – Oxford: Oxford University Press. – 318 p (2006).
133. Kemper B. Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection / B. Kemper and G. von Bally // Appl. Opt. – 2008. – №47. – P. A52-A61.
134. Imaging analysis of digital holography / L. Xu, [etc.] // Opt.Express. – 2005. – №13. – P. 2444-2452.
135. Carl D. Digital holographic microscope for living cell analysis / D. Carl, B. Kemper, G. von Bally // BMT 49 Extension Part 2. – 2004. – P. 978-979.
136. Laurent Sache. Massively Parallel Scanning Probes Microscope with Digital Holographic Readout / Laurent Sache, Hannes Bleuler // Materials Research Society Symp. Proc. – 2007. – V. 961.
137. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI / Edited by Peter H. Lehmann. – Proc. of SPIE, 2009. – Vol. 7389.
138. Microfluidic system based on the digital holography microscope for analysis of motile sperm / G. Di Caprio, [etc.] // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI, Proc. of SPIE. – 2009. – Vol. 7389.
139. Безлинзовая цифровая микроскопия / С.Г. Каленков, [и др.] // Естественные и технические науки. – 2004. – Т. 3, № 12. – С. 117-120.

140. Kemper B. Digital Holographic Microscopy, A New Method for Surface Analysis and Marker-Free Dynamic Life Cell Imaging / B. Kemper, P. Langehanenberg, G.V. Bally // *Optik&Photonik*. – 2007. – № 2.
141. Compensation of the inherent wave front curvature in Digital Holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging / P. Ferraro, [etc.] // *Appl. Opt.* – 2003. – № 42. – P. 1938-1946.
142. Попов А.Ю. Перспективы применения голографических методов в медицине / А.Ю. Попов, А.В. Тюрин, В.Я. Гоцульский // *Новости медицины и фармации – Офтальмология*. – 2011. – № 363.
143. Тишко Т.В. Применение цифрового голографического микроскопа для исследования трехмерной морфологии красных клеток крови человека / Т.В.Тишко, В.П.Титарь, Д.Н.Тишко // *Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Радиофизика и электроника*. – 2006. – Вып. 10, № 712. – С.52-56.
144. Фазово-чутливий спекл-інтерферометричний мікроскоп для аналізу варіацій коефіцієнту заломлення у біологічних об'єктах / А.Ю. Попов [др.] // *V International Conference on Optoelectronic Information Technologies PHOTONICS-ODS 2010, abstracts*. – P. 129 (231).
145. Романова М.П. Проектирование и технология микросхем: учебное пособие/М.П. Романова. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 83 с.
146. Implications of Nanoscience and Nanotechnology / Eds. M. C.Roco. – Bainbridge: Kluwer Acad.Publ., 2001.
147. Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия. Концепции и перспективы. – Новосибирск: Наука, 1998. – 334 с.
148. Leo Gross, Fabian Mohn, Nikolaj Moll Organic structure determination using atomic-resolution scanning probe microscopy // *Nature Chemistry*. – 2010. – №2. – С. 821-825.



Антонюк Віктор Степанович

Доктор технічних наук, професор кафедри виробництва приладів НТУУ “КПІ”, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки. Основними науковими інтересами є розвиток теорії і методів інженерії поверхні, наукове обґрунтування формування топографії функціональних поверхонь і конструювання зносостійких покриттів, технологічне забезпечення якості та експлуатаційних характеристик деталей машин та приладів. Наукові та практичні результати надруковані в 450 наукових працях серед яких 12 монографій та підручників і 52 винаходи. Підготував 3 кандидатів наук.



Тимчик Григорій Семенович

Доктор технічних наук, професор, декан приладобудівного факультету НТУУ “КПІ”, завідувач кафедри виробництва приладів. Під науковим керівництвом професора Тимчика Г. С. та за його участю виконано 37 науково-дослідних робіт зі створення спеціалізованих лазерних інформаційно-вимірювальних систем для контролю технічного стану і параметрів динамічних об’єктів. Створив новий клас лазерних спектрально-кореляційних систем на базі пасивних резонаторів Фабрі-П’єро для оперативного контролю параметрів якості деталей і стану технологічного обладнання в прецизійному приладобудуванні. Наукові і практичні результати робіт надруковано в 394 працях та 25 монографіях і підручниках, серед яких 69 винаходів з них 7 запатентовані в 17 провідних країнах світу, підготував 11 кандидатів технічних наук.



Верцанова Олена Вікторівна

Кандидат технічних наук, доцент кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", генеральний директор ТОВ "Мелітек-Україна". Сфера наукових інтересів: фотоакустика, неруйнівний контроль, дефектоскопія, контроль якості матеріалів та електронних виробів. Автор понад 70 публікацій.



Бондаренко Юлія Юріївна

Кандидат технічних наук, доцент кафедри комп’ютеризованих та інформаційних технологій у приладобудуванні ЧДТУ. Основними науковими інтересами є перетворювачі інформації для точного та медичного приладобудування, застосування нанотехнологій в техніці та медицині, застосування новітніх інформаційних технологій у телемедицині, медична діагностика за допомогою методів газорозрядної візуалізації. Автор понад 100 публікацій.



Білокінь Світлана Олександрівна

Асистент кафедри фізики ЧДТУ, стипендіат Кабінету Міністрів України. Основними науковими інтересами є діагностика мікрогеометрії та механічних властивостей поверхонь матеріалів в нанометричному діапазоні. Автор понад 30 публікацій.



Бондаренко Максим Олексійович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики ЧДТУ, член-кореспондент Академії інженерних наук України та Міжнародної Академії наук екології та безпеки життєдіяльності. Основними науковими інтересами є отримання мікроелементів та функціональних шарів на діелектричних матеріалах електронними технологіями, інженерні нанотехнології, атомно-силова мікроскопія. Автор понад 150 публікацій.