

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ НАНОТЕХНОЛОГІЙ В РЕНТГЕНІВСЬКИХ МІКРОСКОПАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація.

Проведено аналіз використання нанотехнологій в рентгенівських мікроскопах. Проаналізовано будову та принцип роботи скануючого рентгенівського мікроскопа. Зокрема, було розглянуто роль зональної пластини та її виробництво за допомогою прогресивних нанотехнологій. Було проаналізовано використання комбінованого рішення - складена нанопластина на основі пластин Френеля та кіноформи.

Ключові слова: Зональна пластина, рентгенівський мікроскоп, рентгенівське випромінювання, пластина Френеля, кіноформа.

Abstract.

An analysis of the use of nanotechnology in X-ray microscopes was carried out. The assembly and principle of operation of the scanning X-ray microscope were analyzed. Also, the role of the zonal plate and its production with the help of advanced nanotechnologies took place. It was analyzed using a combined solution - a composite nanoplate based on Fresnel plates and kinoform.

Keywords: Zonal plate, X-ray microscope, X-ray radiation, Fresnel plate, film form.

Вступ

Сучасний світ неможливо уявити без нанотехнологій. Вони все більше впроваджуються в різноманітних галузях науки та техніки. Для звичайного користувача, найяскравішим і популярним прикладом використання наночастинок і нанотехнологій є смартфони, планшети і різні кишенькові комп'ютери. [1]

Іншими відомими прикладами використання нанотехнологій є: фарба, здатна змінювати свій колір; зубна паста з ефектом відновлення зубної емалі; лейкопластир з найтоншим срібним покриттям для кращого і швидшого загоєння ран і багато інших. Також нанотехнології мають своє впровадження і в медицині. Зокрема, розробка мікророботів для доставки лікарських речовин, використання наноконтейнерів для перенесення елементів в організмах. [2]

Одним з останніх відкриттів в наносфері є створення мініатюрного пристрою для передачі голографічного зображення, створення наноплівки для використання в гнучких сонячних батареях і в якості провідника електрики.

Нанотехнології використовуються також і в рентгенівській мікроскопії. Використання нанотехнологій в сфері рентгенівської мікроскопії є великим кроком у розвитку цієї сфери. Нанотехнології відкривають перед рентгенівськими мікроскопами нові можливості, підвищуючи їхню роздільну здатність, чутливість та унікальність застосувань. Використання цих технологій в рентгенівській мікроскопії розширює горизонти для дослідження і розробки в різних сферах, починаючи від матеріалознавства і закінчуючи біологією та медициною. [1]

Одним із найважливіших елементів рентгенівських мікроскопів є лінза. Використання у її виробництві наноструктур значно підвищують роздільну здатність рентгенівських мікроскопів. Вивчення структури матеріалів на атомному рівні завдяки нанолінзам допомагає розробляти нові композитні матеріали, покращувати їхні властивості та ефективність в різних галузях, включаючи авіацію, автомобільну промисловість та будівництво. [3]

Таким чином, рентгенівські мікроскопи займають важливе місце в наукових дослідженнях. Також рентгеноскопія має технологічний потенціал та впливає на вивчення структур матеріалів на атомному та молекулярному рівні, що є важливим для розробки нових матеріалів з покращеними властивостями та вдосконалення існуючих.

Аналіз використання нанотехнологій

В основу роботи рентгенівського мікроскопу покладено принцип взаємодії рентгенівських

променів з атомами та молекулами досліджуваного об'єкту. За рахунок вимірюваного розсіяного та поглинутого рентгенівського випромінювання, створюються деталізовані зображення структури об'єкта. Однією з ключових характеристик рентгенівських мікроскопів є енергія рентгенівських променів, яку вони використовують. В залежності від цієї енергії виділяють два основних види рентгенівської мікроскопії: м'яку та жорстку.[4]

М'яка рентгенівська мікроскопія використовує низькоенергетичне рентгенівське випромінювання з енергією в діапазоні 0,2-2 кеВ. Низькоенергетичне випромінювання має досить м'яку природу, що дозволяє проникати в об'єкти без значного пошкодження їхньої структури. Такий вид рентгенівської мікроскопії надає дуже високу роздільну здатність та високу точність відтворення об'єктів в 2D та 3D вимірах. М'яка рентгенівська мікроскопія використовується для аналізу наноматеріалів і біологічних об'єктів.[5]

Аналіз принципу роботи рентгенівського мікроскопу показав, що в м'якому діапазоні він потребує локалізованого, інтенсивного та когерентного рентгенівського випромінювання, що може створювати ідеальну платформу для реалізації методів обчислювальної візуалізації на основі когерентного розсіявання. Наприклад, птихографія обчислює зображення високої роздільної здатності з набору локалізованих шаблонів когерентного розсіявання. [4]

М'яка рентгенівська мікроскопія використовує рентгенівське випромінювання у так званому «водяному вікні», є унікальною технологією, яка може відобразити цілі неушкоджені клітини в 3D у нормальних і патологічних умовах без маркування або фіксації з високою пропускну здатністю та просторовою роздільною здатністю. [6]

Жорстка рентгенівська мікроскопія - це спеціалізований метод дослідження, який використовує високоенергетичне (більше 2 кеВ) жорстке рентгенівське випромінювання для отримання деталізованих зображень об'єктів в наномасштабах. Це дозволяє глибоко проникати в матеріали та отримувати детальні зображення об'єктів, включаючи метали та інші важкі матеріали. [7]

Аналіз скануючого рентгенівського мікроскопу показав, що основними його елементами є джерело рентгенівського випромінювання, оптика для створення плями високої інтенсивності на зразку, скануюча поверхня, яка утримує зразок, детектор, який вимірює вхідний потік фотонів. Схематично це показано на рис. 1.

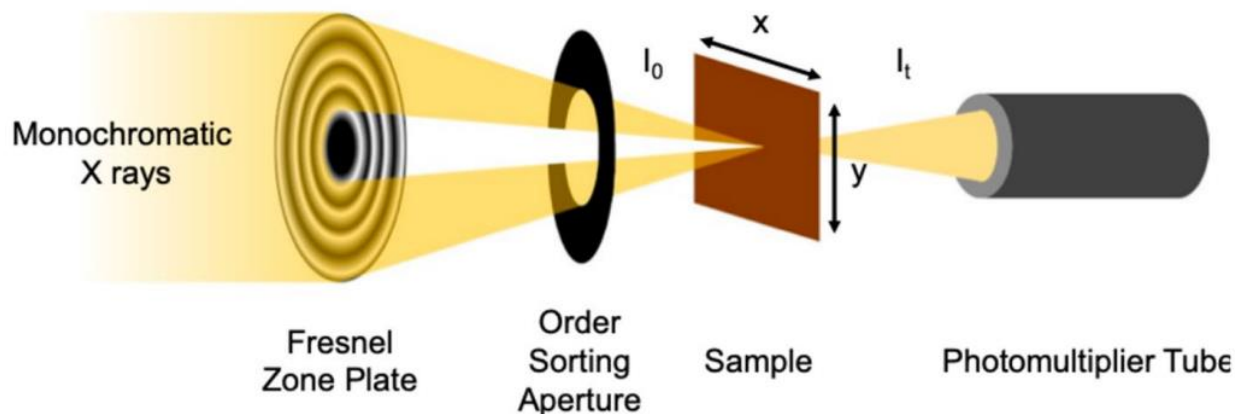


Рис. 1. Ескіз установки скануючого рентгенівського мікроскопа

Оптика, яка генерує фокусну пляму, може бути, наприклад, капілярною оптикою, зонною пластиною Френеля, складною заломлюючою лінзою або дзеркальною оптикою. Основна вимога до цієї оптики полягає в тому, щоб навести максимальну кількість фотонів у мінімальний розмір плями на зразку. Якщо зразок досить товстий, оптика повинна генерувати сфокусований промінь з довгим звуженням вздовж оптичної осі. Якщо пояс подвійного конусоподібного променя дуже короткий, якість отриманого зображення буде зниженою.

На етапі сканування зразок переміщується через промінь крок за кроком, доки не буде охоплено все поле зору. Зображення з низькими дозами вимагає максимізації виявлених сигналів для заданої кількості енергії, яка переданься зразку. У водяному вікні це досягається шляхом вимірювання ослаблення променя, де сигнал прямо пропорційний енергії, яка передається зразку. [5]

Необхідний розмір кроку сцени залежить від бажаної роздільної здатності зображення. Аналіз

показав, що для більшості випадків, розмір кроку має становити приблизно половину розміру фокусної плями, щоб досягти максимально можливої якості зображення.

В якості детектора рентгенівського випромінювання, можна використовувати детектор з просторовою інтеграцією, наприклад, штифтовий діод або сцинтиляційний детектор. Повнопольні мікроскопи потребують дорожчого детектора зображення з просторовою роздільною здатністю. В досліджуваному випадку, між зразком і детектором відсутній об'єктив. Тому доза радіації, яка використовується для зразку, може бути нижчою. Це критична точка для матеріалів, які є чутливими до радіаційного випромінювання. [3]

Найважливішим елементом, що забезпечує високу роздільну здатність зображення рентгенівських мікроскопів, є зональна пластина. Вона відіграє найбільшу роль в дослідженнях. Правильний її вибір і розміщення дають можливість підвищувати роздільну здатність та точність відображення. Аналіз показав, що ефективність існуючих зональних пластин з високою роздільною здатністю здебільшого становить близько 5% у м'якому рентгенівському випромінюванні та швидко падає до 1–2%, коли роздільна здатність наближається до 10 нм. Дослідження показують, що прямокутна форма зони, блокування променя, обмежене співвідношення висоти/ширини, поглинання світла матеріалом і структурні дефекти, є причиною обмеженої ефективності такої пластини. [1]

Використання зональних пластин Френеля є стандартним рішенням в рентгенівських мікроскопах. Набагато рідше рішення – це використання пластин кіноформа з параболічним профілем зони, які дають можливість реалізувати високоефективне фокусування шляхом маніпулювання безперервним зсувом фази. [3]

Аналіз комбінованого рішення використання складеної нанопластини на основі пластин Френеля та кіноформа показав, що в такому випадку можливо проводити дослідження з роздільною здатністю 15 нм. Така зональна пластина може бути створена за допомогою електронно-променевої літографії і поділена на три області з відповідними нахилами реплікантних хребтів. Саму пластину та поширення хвильового поля на ній продемонстровано на рис. 2.

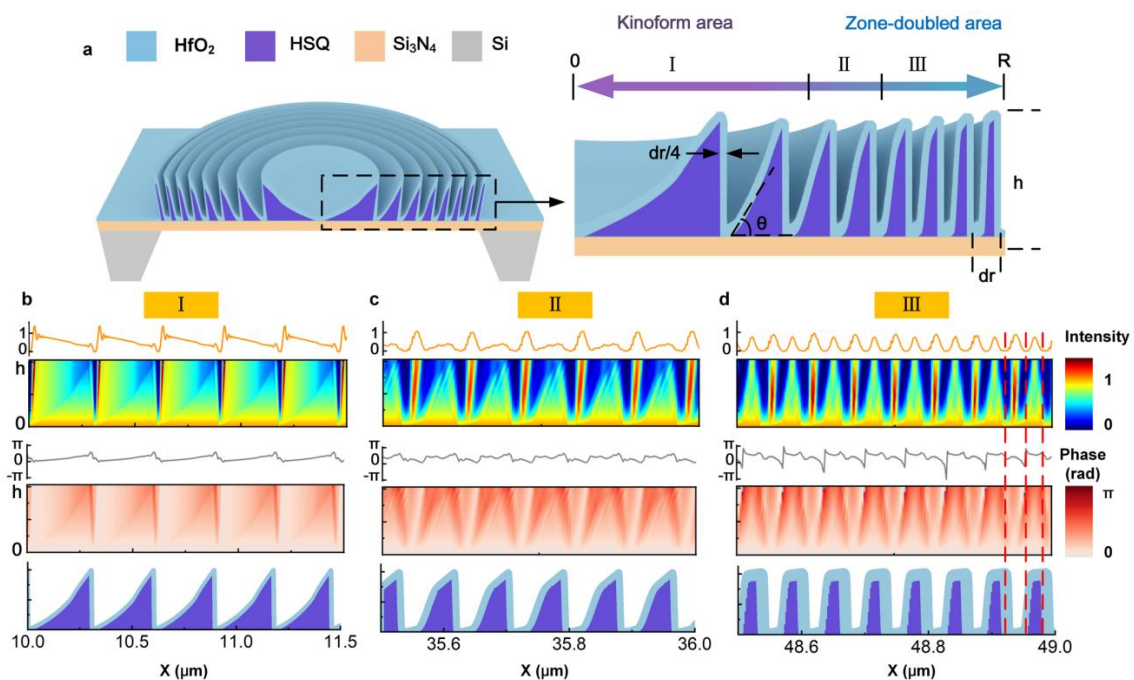


Рис. 2. Складена зональна пластина Френеля/кіноформа у м'якому рентгенівському випромінюванні та поширення хвильового поля

Аналіз показав, що процес виготовлення комбінованих зональних пластин проводиться в два етапи. На першому етапі HSQ товщиною 350 нм наноситься центрифугуванням на мембрану Si₃N₄ товщиною 100 нм, після чого проводиться м'яке нагрівання в дифузійній печі при температурі 180°C протягом 2 хв. Потім зразок промивається в деіонізованій воді протягом 30 с і обережно сушиться стисненим газоподібним азотом. На другому етапі HfO₂ товщиною 15 нм наноситься на поверхні зон HSQ-Kinoform методом осадження атомарного шару. Мікрофотографія складу областей

зональної пластини зображена на рис. 3(а). На рис. 3(б) зображено огляд структури пластини та кутів нахилу [1]. На рисунку можна побачити, що структура побудована відповідно і рівномірно, а її кути правильно розподілені щодо джерела випромінювання.

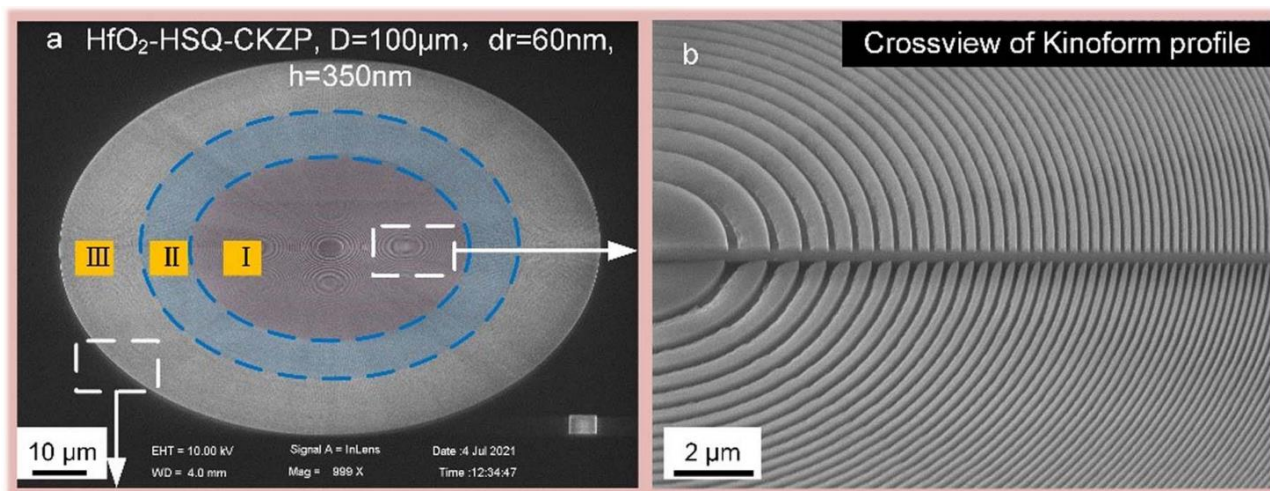


Рис. 3. а) Фото поділу та складу областей зонної пластини
б) Структура пластини та кути її нахилу

Таким чином, проаналізована комбінована зональна пластинка Френеля/кіноформа здатна забезпечити зображення з роздільною здатністю 15 нм та з точністю зображення 7,8% при м'якому рентгенівському випромінюванні на енергетичному рівні 1200 еВ.

Проаналізована комбінована зональна пластинка Френеля/кіноформа може бути використана в рентгенівських мікроскопах для проведення наукових досліджень в багатьох областях науки та техніки.

Висновки

Отже, рентгенівський мікроскоп є потужним інструментом для дослідження об'єктів на атомному та молекулярному рівнях. Цей інструмент дає можливість виконувати обширний список досліджень, надаючи високу роздільну здатність та точність відтворення об'єктів. Ключовими характеристиками рентгенівського мікроскопа є режим енергетичного рівня випромінювання та якість використаної зональної пластини.

Дослідження в області використання нанотехнологій вказує на можливості покращення ефективності зональних пластин і застосування нових підходів, таких як виробництво та використання комбінованих зональних пластин Френеля/кіноформа з роздільною здатністю на рівні 15 нм.

Аналіз показав, що комбінована зональна пластинка Френеля/кіноформа має переваг:

1. Ефективність передачі випромінювання: зональна пластинка Френеля/кіноформа спроектована так, щоб максимально ефективно фокусувати випромінювання на задану площину виявлення. Це зменшує втрати випромінювання і дозволяє отримати яскравіше зображення.

2. Компактність та легкість: зональна пластинка Френеля/кіноформа може бути спроектована так, щоб бути більш компактною та легкою в порівнянні з іншими системами, що особливо важливо при роботі з рентгенівським випромінюванням.

3. Мінімізація аберацій: зональна пластинка Френеля/кіноформа може бути оптимізована для мінімізації аберацій, таких як хроматична аберація та сферична аберація, що в свою чергу покращує якість зображень.

4. Багатофункціональність: зональна пластинка Френеля/кіноформа може бути розроблена для різних програм, включаючи фокусування та генерацію пучків випромінювання, багатопробневі інтерференції та інші оптичні функції.

5. Простота виробництва: зональна пластинка Френеля/кіноформа може бути виготовлена з використанням сучасних методів мікрофабрикації, таких як лазерна обробка або електронно-променева літографія, що робить її відносно простим та економічно вигідним для виробництва.

6. Низькі втрати через дифракцію: зональна пластина Френеля/кіноформа зазвичай має менші дифракційні втрати порівняно з традиційними лінзами, що підвищує ефективність передачі випромінювання.

Таким чином, використання зональної пластини Френеля/кіноформа в рентгенівських мікроскопах дає значні переваги. Рентгенівський мікроскоп, завдяки своїм можливостям і постійному розвитку в галузі нанотехнологій, є і буде ставати ще важливішим інструментом для наукових досліджень та досліджень в різних областях, включаючи матеріалознавство, біологію і багато інших.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Xujie Tong, Yifang Chen, Chengyang Mu. A compound Kinoform/Fresnel zone plate lens with 15 nm resolution and high efficiency in soft x-ray. Scientific journal Nanotechnology. Volume 34, Number 21, 2023. – pp. 1-9. ISSN: 1361-6528. DOI 10.1088/1361-6528/acb946.

2. Haeyeon Jun, Hee Ryung Lee, Denis Tondelier. Soft X-ray characterization of halide perovskite film by scanning transmission X-ray microscopy. Scientific journal Scientific reports. Volume 12, Number 4520, 2022. – pp 1-12. ISSN: 2045-2322. DOI 10.1038/s41598-022-08256-3.

3. Peter Guttmann, Carla Bittencourt, Stephan Werner. Nanoscale spectromicroscopy with the full-field X-ray microscope at the BESSY II electron storage ring in the soft and tender X-ray range. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. Volume 266, 2023. – pp. 1-24. DOI 10.1016/j.elspec.2023.147344.

4. Thomas Feggeler, Abraham Levitan, Matthew A. Marcus. Scanning transmission X-ray microscopy at the Advanced Light Source. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, Volume 267, 2023. – pp. 1-9 DOI 10.1016/j.elspec.2023.147381

5. Tang Li, J. Lukas Dresselhaus, Nikolay Ivanov. Dose-efficient scanning Compton X-ray microscopy. Scientific journal Light: Science & Applications. Volume 12, Article number: 130, 2023. – pp. 1-12. ISSN: 2047-7538. DOI 10.1038/s41377-023-01176-5.

6. Kenneth Fahy, Paul Sheridan, Sergey Kapishnikov. A Laboratory Based Soft X-ray Microscope for 3D Imaging of Whole Cells. Scientific journal Microscopy and Microanalysis. Volume 29, Issue Supplement_1, 2023. – pp. 1-3. ISSN: 1435-8115. DOI 10.1093/micmic/ozad067.601.

7. Michael C. A. Dyhr, Mohsen Sadeghi, Ralitsa Moynova. 3D surface reconstruction of cellular cryo-soft X-ray microscopy tomograms using semisupervised deep learning. Volume 120, Number 24, 2023. – pp. 1-10. ISSN: 1091-6490. DOI 10.1073/pnas.2209938120.

Притула Максим Олександрович – к.т.н., старший викладач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: pritulamo@ukr.net

Кочмала Владислав Богданович – студент групи МНТ-20б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: fomkalokky@gmail.com

Prytula Maksym Oleksandrovych - Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Information Radio Electronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: pritulamo@ukr.net

Kochmala Vladyslav Bogdanovych – student, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: fomkalokky@gmail.com