



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **71633** (13) **U**
(51) МПК (2012.01)
C23C 28/00
G02B 1/10 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2011 14437</p> <p>(22) Дата подання заявки: 06.12.2011</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.07.2012</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.07.2012, Бюл.№ 14</p>	<p>(72) Винахідник(и): Першин Юрій Павлович (UA), Севрюкова Вікторія Анатоліївна (UA), Зубарев Євгеній Миколайович (UA), Кондратенко Валерій Володимирович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ", вул. Фрунзе, 21, м. харків, 61002 (UA)</p>
--	---

(54) СПОСІБ ОЦІНКИ МІЖФАЗНОЇ ШОРСТКОСТІ БАГАТОШАРОВИХ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ДЗЕРКАЛ

(57) Реферат:

Спосіб оцінки міжфазної шорсткості багат шарових рентгенівських дзеркал полягає в малокутовій зйомці кривої відбиття в жорсткому рентгенівському випромінюванні та ідентифікації головних дифракційних максимумів. Вимірюють кутове положення останнього спостережуваного дифракційного максимуму, і міжфазну шорсткість визначають з умови $\sigma \leq \lambda / (4 \times \sin \theta_{\text{MAX}})$, де σ - міжфазна шорсткість, λ - довжина хвилі рентгенівського випромінювання, θ_{MAX} - останній спостережуваний дифракційний максимум.

UA 71633 U

Корисна модель належить до галузі приладобудування, зокрема до відлагодження технології виготовлення багат шарових рентгенівських дзеркал (БРД), що працюють в діапазоні довжин хвиль м'якого рентгенівського випромінювання 0,3-70,0 нм.

Відомий спосіб оцінки міжфазної (МФ) шорсткості [1], згідно з яким вимірюють шорсткість поверхні виготовленого БРД і за нею роблять висновок про МФ шорсткості БРД. Недоліком методу є невисока точність вимірювання, оскільки, як правило, поверхня БРД окислюється [2] і знайдена шорсткість може істотно відрізнятись від шуканої. Крім того, виміряні значення істотно залежать від поверхневих забруднень і по суті від умов зберігання і поводження з БРД.

Відомий інший спосіб оцінки міжфазної шорсткості [3], згідно з яким записують криву відбиття від БРД в рентгенівській області (наприклад, на довжині хвилі $\lambda=0,154$ нм), а потім визначають МФ шорсткість шляхом підгонки теоретичної кривої відбиття до 1-ого виміряного дифракційного максимуму. Оскільки точна будова БРД (товщина шарів, наявність і товщина МФ перемішаних прошарків і так далі) як правило заздалегідь невідома, величина шорсткості завищується [4]. Крім того, наростання шорсткості від підкладки до поверхні, характерне для процесу росту БРД, при динамічних ефектах відбиття рентгенівського випромінювання в 1-му максимумі також призводить до завищення визначуваної величини шорсткості, оскільки фактично аналізується лише верхня, найменш гладка частина БРД.

Використання повнопрофільної підгонки малокутової дифракційної картини відбиття від БРД значно покращує ситуацію [5]. Проте, не дивлячись на істотне поліпшення достовірності отриманих даних, зберігається неоднозначність у визначенні шорсткості із-за невизначеності будови БРД (товщина шарів, їх густина, склад тощо), яка в цьому випадку також є підгинним параметром. Тому для підвищення достовірності підгонки часто використовують дані електронної просвічувальної мікроскопії поперечних зрізів БРД, що істотно ускладнює процес отримання даних. Крім того, сам процес підгонки вимагає наявності відповідного програмного забезпечення, трудомісткий і забирає багато часу (як правило години), оскільки не є прямим методом визначення параметрів БРД.

Задачею корисної моделі є спрощення способу оцінки МФ шорсткості БРД шляхом зниження трудомісткості, заощадження часу і відмови від складних програмних продуктів.

Поставлена задача вирішується тим, що у відомому способі оцінки міжфазної шорсткості багат шарових рентгенівських дзеркал, який полягає в малокутовій зйомці кривої відбиття в жорсткому рентгенівському випромінюванні та ідентифікації головних дифракційних максимумів, вимірюють кутове положення останнього спостережаного дифракційного максимуму, і міжфазну шорсткість визначають з умови $\sigma \leq \lambda / (4 \times \sin \theta_{\text{MAX}})$, де σ - міжфазна шорсткість, λ - довжина хвилі рентгенівського випромінювання, θ_{MAX} - останній спостережуваний дифракційний максимум.

Суть корисної моделі полягає в наступному. Для спостереження дифракційного максимуму відбиття від будь-якої періодичної шаруватої системи під певним кутом (θ), необхідно, щоб шорсткість (σ) міжфазних меж була меншою величини періоду (d) цієї шаруватої системи, тобто $\sigma < d$, інакше в межах одного періоду дзеркальне відбиття відбуватиметься в протифазі на виступах і западинах нерівності. Якщо переписати рівняння Вульфа-Брега у вигляді:

$$2(d/n)\sin \theta_n = \lambda, \quad (1)$$

то спостереження n -го порядку відбиття під кутом Брега θ_n еквівалентно спостереженню першого максимуму для БРД з періодом d/n на тому ж кулі.

Згідно з оптичною теорією відбиття рентгенівських променів від періодичної шаруватої системи [6] дифракційний максимум виникає як результат складання амплітуд відбиття від всіх міжфазних меж, які йдуть з кроком $t_s \sim d/2$ (континуальна теорія відбиття). Крім того, в теорії розсіяння рентгенівських променів на БРД [7] остаточне відбиття розглядається як сума амплітуд розсіяння кожним шаром, кожна з яких є сумою амплітуд розсіяння всіх атомів у відповідному шарі (дискретна теорія відбиття). В цьому випадку розсіюючі центри також чергуються з кроком $t_s = d/2$. Обидві теорії дають однакові результати і призводять до однакового висновку. Іншими словами міжфазна шорсткість має бути меншою t_s , а не періоду d . Тоді для оцінки верхньої межі шорсткості цю умову можна записати, як

$$\sigma_{\text{max}} \leq d/(2n), \quad (2)$$

і з врахуванням рівняння (1) переписати у вигляді:

$$\sigma \leq \lambda / (4 \times \sin \theta_{\text{MAX}}). \quad (3)$$

Формула (3) дає верхню межу МФ шорсткості в тому сенсі, що співвідношення шарів в БРД може привести до згасання $(n+1)$ -го максимуму на кривій відбиття, і ми завищимо шорсткість, оцінюючи її по n -му максимуму. Крім того, виявлення далеких максимумів може бути обмежене можливостями вимірального устаткування. Стандартне устаткування (наприклад,

рентгенівські дифрактометри типу ДРОН-3М, ДРОН-4 і так далі) дозволяє охопити діапазон відбивної здатності близько 7 порядків, що за нашим досвідом цілком достатньо для запису всієї кривої відбиття.

5 На фіг. 1 та 2 наведено два приклади, які ілюструють можливості пропонованого способу на багатошарових рентгенівських дзеркалах Mo/Si і Sc/Si.

10 На фіг. 1 кружечками показана експериментальна малокутова крива відбиття від БРД Mo/Si на скляній підкладці, знята на рентгенівському дифрактометрі у випромінюванні $\text{CuK}\alpha_1$, ($\lambda=0,154$ нм). При підгонці, згідно з [5, 8], було враховано, що на міжфазних межах Mo-Si і Si-Mo можуть утворюватися перемішані шари, склад яких має силіцидний характер. В результаті підгонки теоретичної кривої (на фіг. 1 позначена лінією) до експериментальної (кружечки) з урахуванням даних електронної мікроскопії найкращий збіг був отриманий для чотиришарової моделі $\text{MoSi}_2/\text{Mo}/\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{Si}$ і міжфазних шорсткостей 0,42/0,42/0,52/0,335 нм, відповідно. Останній максимум (на фіг. 1 позначений стрілкою) спостерігається на куті $2\theta_{\text{MAX}} \approx 12,6^\circ$, звідки за формулою (3) отримуємо, що $\sigma_{\text{max}} \leq 0,154/[4 \times \sin(6,3^\circ)] = 0,351$ нм. Для того, щоб провести формальне порівняння двох способів, ми врахували, що вплив кожної міжфазної межі на загальне відбиття різний, і найбільший вклад дають межі Si-Mo-Si₂ ($\sigma=0,42$ нм) і Mo₅Si₃-на-Si ($\sigma=0,335$ нм), оскільки під час переходу через ці межі спостерігається максимальний стрибок оптичних постійних сусідніх шарів, тобто ці межі мають найбільшу відбивну здатність. Усереднювання, проведене по цих двох межах, дає значення шорсткості 0,378 нм, що досить близький до величини 0,351 нм, знайдене відповідно до пропонованого способу.

20 Фіг. 2 показує малокутову дифрактограму для БРД Sc/Si (кружечки) і підгонку (суцільна лінія), виконану для моделі чотиришарового БРД ScSi/Sc/ScSi/Si/100 на кремнієвій підкладці. За рахунок невеликого вигину тонкої підкладки кремнію експериментальна дифрактограма в області кутів $2\theta < 1,5^\circ$ спотворена (інтенсивність відбиття помітно нижче за теорію). Шорсткості, отримані в результаті підгонки, дорівнюють 0,5/0,65/0,65/0,45 нм, відповідно. В середньому шорсткість складає 0,475 нм. Шорсткість, оцінена за пропонованим способом, становить $\sigma \leq 0,154/[4 \times \sin(4,3^\circ)] = 0,513$ нм, що дещо вище за результат повнопрофільної підгонки.

30 Як можна бачити з наведених прикладів, оцінка, зроблена відповідно до пропонованого способу, досить близька до підігнаних даних, які зроблені із застосуванням розрахунків на основі динамічної теорії відбиття від багатошарових покриттів і даних просвічувальної електронної мікроскопії. Відмінність в отриманих даних складає менше 10 %.

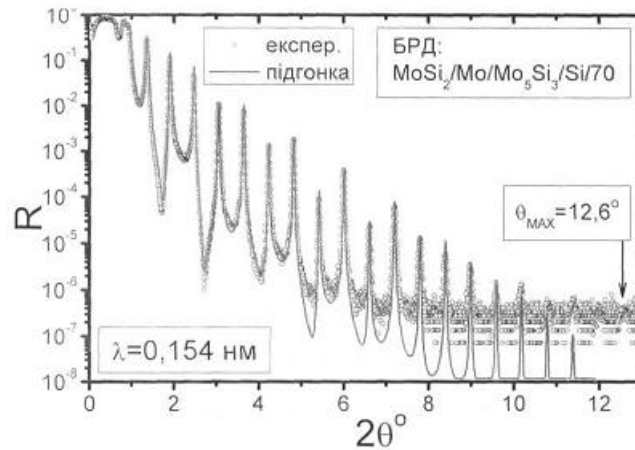
35 Не дивлячись на оцінний характер виміру шорсткості, цей метод також є корисним для випадків, коли підкладка має фігурну форму (циліндричну, сферичну тощо) або викривлена (наприклад, за рахунок механічної напруги [9]). В цьому випадку повнопрофільна підгонка неможлива із-за сильного спотворення кривої відбиття. Крім того, для пропонованого способу немає необхідності знати точне співвідношення товщини шарів в періоді.

Джерела інформації:

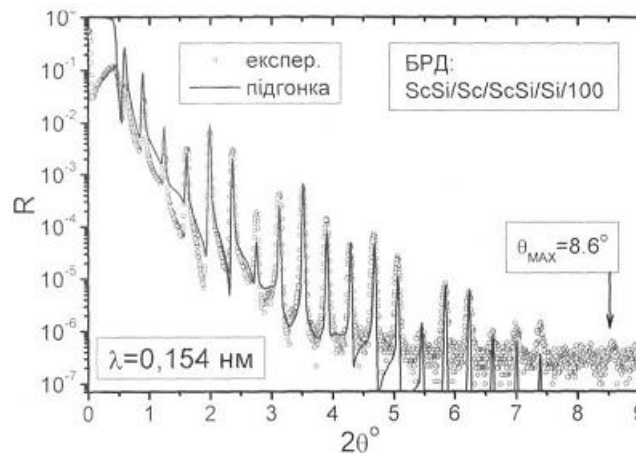
1. Eberhard Spiller, Sherry L. Baker, Paul B. Mirkarimi, Victor Sperry, Eric M. Gullikson, and Daniel G. Stearns, "High-performance Mo-Si multilayer coatings for extreme-ultraviolet lithography by ion-beam deposition," *Appl. Opt.*, vol. 42 (2003), p. 4049-4058.
2. J. H. Underwood, E. M. Gullikson, and Khanh Nguyen, "Tarnishing of Mo/Si multilayer x-ray mirrors," *Appl. Opt.*, vol. 32 (1993), p. 6985-6990.
3. Т. Барби. Многослойные структуры в рентгеновской оптике, в книге "Рентгеновская оптика и микроскопия", под ред. Г Шмаля и Д. Рудольфа. М.: Мир, 1987. - С. 196-221.
4. D. E. Savage, J. Kleiner, N. Schimke, Y.-H. Phang, T. Jankowski, J. Jacobs, R. Kariotis, and M. G. Lagally, "Determination of roughness correlations in multilayer films for x-ray mirrors", *J. Appl. Phys.*, vol. 69 (1991), p. 1411-1424.
5. Sasa Bajt, Daniel G. Stearns, Patrick A. Kearney, "Investigation of the amorphous-to-crystalline transition in Mo/Si multilayers", *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 90, #2, p. 1017-1025.
6. E. Spiller and A.E. Rosenbluth, "Determination of thickness errors and boundary roughness from the measured performance of a multilayer coating," *Opt. Eng.*, vol. 25(1986), p. 954-963.
7. B.L. Henke, J.Y. Uejio, H.T. Yamada, R.E. Tackaberry, "Characterization of Multilayer X-Ray Analyzers: Models and Measurements," *Opt. Eng.*, vol. 25 (1986), p. 937-947.
8. David L. Windt, "IMD-Software for modeling the optical properties of multilayer films", *Computers in physics*, 1998, Vol. 12, # 4, p. 360-370.
9. David L. Windt, "Stress, microstructure, and stability of Mo/Si, W/Si, and Mo/C multilayer films", *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 18 (2000), p. 980-991.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 Спосіб оцінки міжфазної шорсткості багат шарових рентгенівських дзеркал, який полягає в малокутовій зйомці кривої відбиття в жорсткому рентгенівському випромінюванні та ідентифікації головних дифракційних максимумів, який **відрізняється** тим, що вимірюють кутове положення останнього спостережуваного дифракційного максимуму, і міжфазну шорсткість визначають з умови $\sigma \leq \lambda / (4 \times \sin \theta_{\text{MAX}})$, де σ - міжфазна шорсткість, λ - довжина хвилі рентгенівського випромінювання, θ_{MAX} - останній спостережуваний дифракційний максимум.



Фіг. 1



Фіг. 2

Комп'ютерна верстка Л. Купенко

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601