

Original article

In print article

<https://doi.org/10.26565/2222-5617-2022-37-02>

UDC 681.7.062(062)+681.7.013.6(062)

ОДНОВИМІРНЕ МАСШТАБУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІДБИВАЮЧОЇ РЕНТГЕНІВСЬКОЇ МАСКИ

В.С. Чумак

chumak.vytalyi@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7268-1103>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Україна, 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

С. Передков

<https://orcid.org/0000-0002-5816-9015>

Max-Planck-Institute Für Chemische Energiekonversion; Stiftstrasse 34 – 36, 45470 Mülheim an der Ruhr; Germany, Nordrhein-Westfalen

В.В. Кондратенко

<https://orcid.org/0000-0002-9194-9304>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Україна, 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

І.А. Копилець

<https://orcid.org/0000-0002-8906-5155>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Україна, 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Ю.П. Першин

<https://orcid.org/0000-0001-9092-0078>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Україна, 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Надійшла до редакції 08 вересня 2022 р. Переглянуто 19 жовтня 2022 р.

Прийнято до друку 21 жовтня 2022 р.

У роботі розглянуто питання мініатюризації шаблонних зображень з використанням рентгенівського випромінювання. Метод зменшення оснований на тому, що рентгенівське випромінювання направляють на певний шаблон, що відбиває рентгенівське випромінювання, під гострим кутом та ресструють одновимірно стиснене зображення на площині, не паралельній площині шаблону. Перевагою такого методу стиснення зображень є відносна простота в його реалізації. В роботі запропоновано застосування рентгенівських багат шарових дзеркал як відбиваючих рентгенівських масок (ВРМ) для одновимірного стиснення зображень. Контроль структурних параметрів багат шарових дзеркал проводився на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3М. Шаблон ВРМ було сформовано методом наплення поглинаючого шару WС товщиною ~0,2 мкм через певний трафарет на поверхню багат шарового дзеркала. Проведено випробування ВРМ із дзеркалами на основі пари матеріалів WС/Si у синхротронному випромінюванні (1~3,5 нм). Отримано 14-кратне стиснення відбивних сегментів ВРМ розміром ~50 мкм. Теоретично показана принципова можливість отримання стиснення відбиваючих сегментів до субмікронних розмірів.

Ключові слова: рентгенівське багат шарове дзеркало, відбивна рентгенівська маска, стиснення зображення.

Як цитувати: Чумак В.С., Передков С., Копилець І.А., Кондратенко В.В., Першин Ю.П. Одновимірне масштабування зображення за допомогою відбиваючої рентгенівської маски. Вісник ХНУ імені В.Н. Каразіна, серія «Фізика». Вип. 37, 2022; 21-29. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2022-37-02>

©Чумак В.С., Передков С., Копилець І.А., Кондратенко В.В., Першин Ю.П., 2022

Open Access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

In cites: Chumak V.S., Peredkov S., Kopylets I.A., Kondratenko V.V., Pershin Yu.P. One-dimensional image scaling with a reflecting X-ray mask. The Journal of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Physics" Iss. 37, 2022; 21-29. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2022-37-02> (in Ukrainian)

ВСТУП

Використання екстремального ультра-фіолетового (ЕУФ) випромінювання (λ : 10-124 нм) є актуальним методом отримання зображень, оскільки можна отримати вищу роздільну здатність порівняно з УФ. В даний час ЕУФ-літографія стає альтернативним методом створення інтегральних мікросхем, власне інтегральних наносхем, оскільки з її допомогою можна отримати розміри окремих елементів ~ 10 нм і навіть менше [1, 2]. Рентгенівське випромінювання (як м'яке: $\lambda < 10$ нм, так і жорстке: $\lambda < 0,2$ нм) має ще коротшу довжину хвилі, і його також можна використовувати для отримання зображень [3,4] і для подальшого розвитку техніки рентгенівської літографії.

Багатошарові дзеркала є ключовими оптичними елементами в багатьох застосуваннях ЕУФ та рентгенівських променів для їх відбиття, поляризації, колімації, дисперсії та контролю з високою ефективністю [5,6]. В даний час технологія їх виготовлення досить добре відпрацьована як на плоских, так і на фігурних підкладках з коефіцієнтами відбиття в десятки відсотків, включаючи нормальне падіння рентгенівського випромінювання.

Раніше для проєкційної ЕУФ-літографії ($\lambda \sim 12,4$ нм) були виготовлені та випробувані плоскі відбиваючі маски [7] на основі багатошарового ЕУФ дзеркала Mo/Si ($d \sim 7,5$ нм, $R \sim 54\%$). Вони були виготовлені за допомогою реактивного іонного травлення. Маски опромінювали несфокусованим білим синхротронним випромінюванням при майже нормальному падінні (кут нахилу $\theta \approx 60^\circ$). Найменший розмір отриманих елементів у фоторезисті, розташованому на відстані ~ 7 мм від маски, становив ~ 8 мкм. Недоліком методики є відносно велика довжина хвилі, що призводить до помітних дифракційних ефектів навіть на невеликих відстанях від маски, а також необхідність використання вакуумної камери, оскільки випромінювання з такою довжиною хвилі поглинається в повітрі.

У літературі також описано отримання одновимірного масштабування зображення для золотої сітки (прозора комірка розміром 25×25 мкм) у жорсткому рентгенівському діапазоні (випромінювання $\text{NiK}\alpha_1$ та $\text{CuK}\alpha_1$) [8] з використанням асиметричного Бреґівського відбиття кристалом. Для цього використовувалася монокристал алмазу з відбивними площинами (220), розташованими під кутом $\alpha \approx 35,3^\circ$ до поверхні. Стиснене зображення записувалося на фотопластинку, розташовану на відстані ~ 2 мм. Цим методом було отримано зображення з субмікронною роздільною здатністю. Основним недоліком цього методу є низька інтегральна відбивна здатність

монокристалів (повна ширина на половині максимуму $\Delta\theta \leq 0,01^\circ$ [9]) порівняно з багатошаровими дзеркалами ($\Delta\theta \leq 1^\circ$ [9]); в результаті для запису зображення потрібна була тривала витримка.

У цій роботі використано переваги обох схем: багатошарова маска з високою інтегральною відбивною здатністю, аналогічною [7], і короткохвильове рентгенівське випромінювання ($\lambda < 0,4$ нм), щоб зменшити вплив дифракційних ефектів і отримати розміри елементів зображення якомога ближче до 1 мікрона.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для виготовлення відбиваючих рентгенівських масок використовували підкладки з термopolірованого скла із середньоквадратичною шорсткістю 0,3-0,5 нм. WC/Si багатошарові рентгенівські дзеркала (БРД) були нанесені на підкладки методом магнетронного розпилення. Такі БРД мають відносно гладкі межі розділу [10] і, отже, мають невелику частку недзеркального компонента розсіювання. Крім того, їх можна виготовити за допомогою стандартної процедури травлення. Період БРД становив $d \sim 2,5$ нм, а кількість бі-шарів становила 201, щоб отримати помірну ширину першого Бреґівського піку. Співвідношення товщин шарів у періоді БРД було близьким до 1 для подавлення другої гармоніки БРД.

Структурні параметри багатошарових дзеркал атестовано на рентгенівському дифрактометрі (ДРОН-3М). Кремнієвий монохроматор [(110) Si] був встановлений перед дзеркалом для виокремлення випромінювання $\text{CuK}\alpha_1$ ($\lambda = 0,154$ нм) з безперервного рентгенівського спектру рентгенівської трубки.

Невідбиваючий шаблонна поверхні багатошарового дзеркала був сформований за допомогою поглинаючого шару вольфраму товщиною $\sim 0,2$ мкм, нанесеного через певний трафарет, покритого тонким шаром кремнію зверху для захисту шару вольфраму від окислення.

Як джерело рентгенівського випромінювання в експериментах використовувалася синхротрон. На маску направлялося «біле» випромінювання від синхротрона MAX II (Лунд, Швеція). Розбіжність променю в горизонтальній площині становила $\sim 0,2$ мрад ($\sim 0,01^\circ$), у вертикальній площині ~ 6 мрад ($\sim 0,3^\circ$).

Для фіксації зображень використовували фоторезист SU-8. Отримані зображення досліджували на скануючому електронному мікроскопі PEMMA-101A (Суми, Україна).

ТЕОРЕТИЧНИЙ ВСТУП

Ідея використання відбиваючої рентгенівської

маски (ВРМ) для масштабування зображення базується на тому факті, що один із видимих розмірів (t_v) будь-якого плоского об'єкта менший за його вихідний розмір (t_r) під будь-яким кутом огляду, крім нормальних (θ) (рис. 1). Ці параметри взаємопов'язані: чим менше кут огляду, тим менше видимий розмір плоского предмета. Якщо нанести на поверхню такого об'єкта нанорозмірне багат шарове дзеркало і нанести на нього візерунок, то воно буде здатне відбивати рентгенівські промені і являти собою відбиваючу рентгенівську маску. Отже, якщо ми направимо рентгенівське випромінювання на відбиваючу візерункову поверхню під певним кутом нахилу, ми завжди отримаємо візерунок, стиснутий в одному вимірі у відбитому промені.

Креслення конструкції ВРМ і схема його застосування показані на рис. 2. Відбиваюча рентгенівська маска являє собою багат шарове дзеркало на гладкій підкладці, частина якого може відбивати вибірково за заданим візерунком. Наприклад, маска на рис. 2 має смугасту або ґратчасту структуру.

У процесі освітлення рентгенівський пучок направляється на маску і відбивається тільки вільною поверхнею багат шарового дзеркала. Якщо площина реєструючого середовища (РС) не паралельна площині ВРМ, то матиме місце одновимірне стиснення. При лінійному розмірі, t_r відбиваючого сегмента, на поверхні ВРМ, максимальне стиснення, S , сегментів маски спостерігається в площині, перпендикулярній до

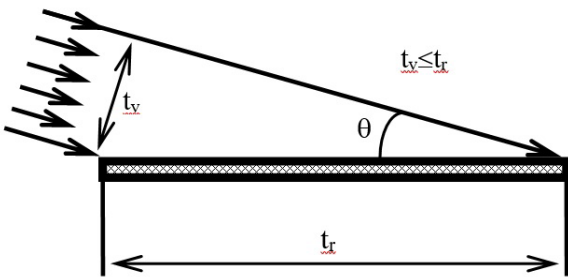


Рис. 1. Макет, що демонструє принцип одновимірного стиснення.

Fig. 1. Layout showing the principle of one-dimensional compression.

відбитого променя рентгенівського випромінювання і дорівнює:

$$C = \frac{t_v^*}{t_r} \sim \sin \theta \quad (1)$$

де t_v^* є фактичним розміром відбитка в площині РС.

Оскільки цікавим є випадок, коли зображення можна стиснути до мікронних або навіть субмікронних розмірів, необхідно зробити оцінку можливих дифракційних ефектів. Видиму частину відбиваючої маски чи її частини можна розглядати

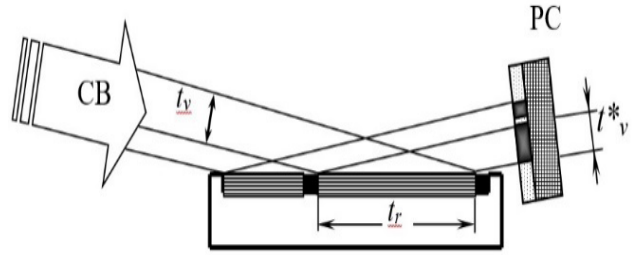


Рис. 2. Схематичне зображення відбиваючої рентгенівської маски і схеми її застосування за нормальною експозицією поверхні реєструючих елементів. СВ – синхротронне випромінювання, РС – реєструюче середовище.

Fig. 2. Schematic drawing of the reflecting X-ray mask and the schemes of its application according to a normal exposure of the registering element surface. СВ – synchrotron radiation, РС – recording tool.

як щілину розміром t_v (рис. 2); тоді для відстані L від маски до реєструючого середовища та довжини хвилі рентгенівського випромінювання λ можна використовувати величину $t_v^2/(\lambda L)$ як критерій застосування конкретного дифракційного наближення [11]:

$$\frac{t_v^2}{\lambda L} \begin{cases} \gg 1 & * \\ \approx 1 & ** \\ \ll 1 & *** \end{cases} \quad (2)$$

де * - геометрична оптика, ** - дифракція Френеля, *** - дифракція Фраунгофера.

Для видимого розміру маски величиною ~ 1 мікрона, відстані від маски до реєструючого середовища десятки міліметрів і довжиною хвилі $\lambda \approx 0,1$ нм величина $t_v^2/(\lambda L)$ знаходиться в межах $0,1-1,0$, що вказує на необхідність використання наближення Френеля.

Щоб оцінити фактичний розмір відбитків, ми повинні врахувати ефекти дифракції. Ми використовуємо вираз для дифракції Френеля на щілині. Відомо [9], що для випромінювання з довжиною хвилі λ , спрямованого перпендикулярно до щілини шириною W , перший дифрагований пік спостерігатиметься в межах кутів $\pm \text{asin}(\lambda/W)$ або для розглянутого випадку $\pm \text{asin}(\lambda/t_v)$ (див. рис. 3). Інтенсивність бічних максимумів менше 3%; тому в першому наближенні ними можна знехтувати.

Якщо врахувати геометричний розмір окремого сегмента, то остаточна формула для розміру відбитка (t_v^*) матиме вигляд:

$$t_v^* = t_r \times \sin \theta + 2L \times \sin \phi = \quad (3)$$

$$= t_r \times \sin \theta + 2L \times \frac{\lambda}{t_v} = \quad (4)$$

$$= t_r \times \sin \theta + 2L \times \frac{\lambda}{t_r \times \sin \theta} \quad (5)$$

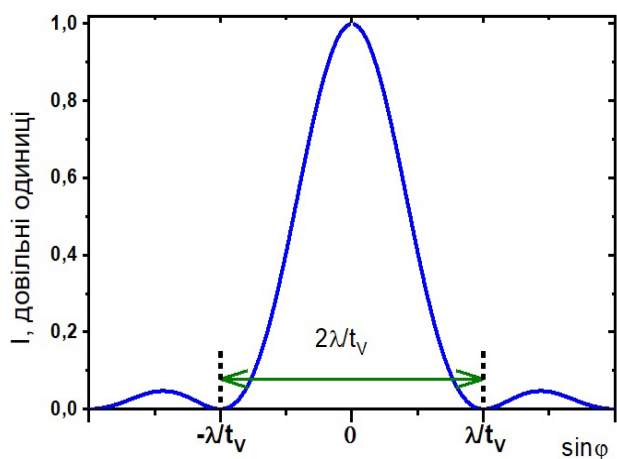


Рис. 3. Розподіл інтенсивності електромагнітного випромінювання (довжина хвилі λ) після проходження через щілину шириною t_v відповідно до дифракції Френеля.

Fig. 3. The distribution of the intensity of electromagnetic radiation (wavelength λ) after passing through a slit with a width of t_v in accordance with the Fresnel diffraction.

де L – відстань від окремого сегмента до реєструючого середовища; φ – кутова розбіжність променю за щілиною (для розміру щілини t_v) (див. рис. 3); t_v – видимий розмір відбиваючого сегмента без урахування дифракції. Перший член у рівняннях (3) - (5) відповідає чистому геометричному стисненню, другий враховує ефект дифракції.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для успішного застосування відбиваючих рентгенівських масок необхідно виконання двох суперечливих вимог: мати порівняно великі розміри візерунка, що переноситься; і забезпечити прийнятну роздільну здатність зображення. Оскільки ці вимоги взаємозалежні, ми виразимо перші, а потім оцінимо другі. Пластини кремнію діаметром ~ 76 мм можна розглядати як задовільного кандидата на підкладку, що використовується, наприклад, у LIGA-технології [12]. За схемою на рис. 2 відстань між елементами маски та РС змінюється вздовж відбитого променю, і для РС, розташованих близько (< 1 мм) до маски, і для вищезгаданих Si-підкладок може становити 1-80 мм для одного візерунку на РС. Нижче наведено результати розрахунків, в яких враховано дифракційні ефекти за формулою (5).

В якості вхідних даних ми взяли косий кут падіння $\theta \approx 4^\circ$, який відповідав кутовому положенню 1-го максимуму Бреґа для БРД WC/Si з періодом $d \approx 2,5$ нм на довжині хвилі $\lambda \approx 0,35$ нм. Таким чином, ми повинні отримати стиснення геометричного зображення $1/\sin(4^\circ) \approx 14$.

На рис. 4 показано очікуваний розмір окремих

елементів відбитка в площині РС на різних відстанях (L) від відбивних сегментів залежно від розміру окремих сегментів на масці. Для порівняння додано розрахований геометричний розмір (суцільна сіра лінія) елементів фоторезисту без ефектів дифракції. Можна побачити, що хоча спостерігається одновимірне стиснення сегментів, що відбивають, є ділянки на графіку, де розмір відбитка починає зростати, незважаючи на зменшення розміру сегментів маски. Це пов'язано з впливом дифракції. Критичні точки, в яких починається збільшення розмірів елементів відбитка, позначені вертикальними лініями. Відповідні координати критичних точок показані на кожній кривій на рис. 4. Наприклад, для верхньої кривої 107-мкм сегмент стискається до 15-мкм відбитка на РС. Ми можемо легко оцінити, що в цих точках можна отримати принаймні 7-кратне стиснення, що становить приблизно половину геометричного стиснення. Враховуючи, що отриманий розмір відбитка подвоюється порівняно з геометричним розміром, ми вважаємо ці критичні точки розумною межею застосування для запропонованих ВРМ.

Тут також слід зазначити, що в перехідних областях (біля критичних точок) розмір окремих елементів відбитка практично не залежить від розміру сегментів. Наприклад, для $L = 10$ мм зміна розміру сегмента від 33 до 44 мкм супроводжується варіацією розміру стиснутих відбитків в межах 1% (5,30-5,34 мкм); і для $L = 80$ мм таке ж варіювання розміру відбитків спостерігається для розмірів сегментів 66-87 мкм. Іншими словами, поблизу критичних точок можна домогтися стабілізації розмірів стислих відбитків і отримати, наприклад, періодичний трафарет.

Опромінення ВРМ WC/Si було проведено в синхротронному центрі Лунда (Швеція) з використанням фоторезиста SU-8 як носія запису. Біле випромінювання синхротронного кільця було відфільтровано берилієвою фольгою товщиною 40 мкм для відсікання випромінювання з енергією менше $\sim 1,5$ кеВ ($\lambda > 0,8$ нм). Колімований пучок синхротрона має розмір $\sim 1 \times 60$ мм.

Для випробування з синхротронним випромінюванням були виготовлені спеціальні відбиваючі рентгенівські маски. Багатошарове дзеркало наносили на підкладку з термополірованого скла розмірами $70 \times 70 \times 4$ мм³ для перекриття пучка синхротрона. Скло підкладки товщиною 4 мм була досить жорсткою, щоб протистояти можливій деформації поверхні під час монтажу та опромінення. На рис. 6а показаний 1-й дифракційний пік для виготовленого WC/Si БРД, при випромінюванні $\text{CuK}\alpha_1$. Характеристика БРД в області жорсткого рентгенівського випромінювання дозволяє передбачити його рентгенівські оптичні властивості на більших

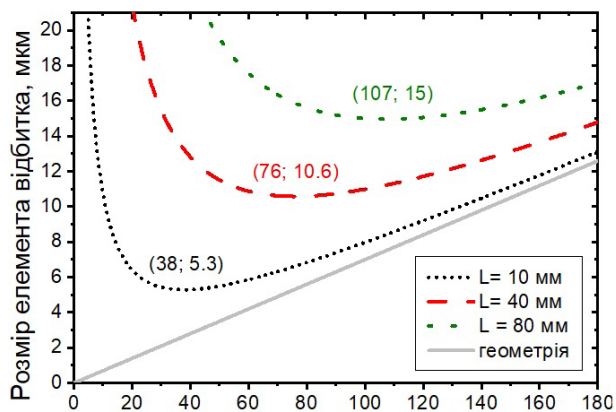


Рис. 4. Залежність очікуваного розміру елемента в площині фоторезисту від розміру сегмента в площині відбиваючої рентгенівської маски для різних відстаней (L) між маскою та фоторезистом. Період БРД становить 2,5 нм. Довжина хвилі 0,35 нм.

Fig. 4. Expected size of an element in the photoresist plane as a function of the segment size in the plane of reflecting X-ray mask for different distances (L) between the mask and the photoresist. Multilayer period is 2.5 nm. Wavelength is 0.35 nm.

довжинах хвиль. На рис. 6б показано результати такого передбачення для WC/Si БРД при фіксованому куті нахилу 4° у білому синхротронному спектрі. Очікуваний спектр відбиття має максимум $R > 0,1$ з центром піку біля 0,345 нм. Також видно, що можна досягти контрастності для БРД WC/Si як спектрального фільтра > 100 . Крім того, БРД може працювати і як фільтр, і як коліматор, ефективно обрізаючи діапазон довжин хвиль і обмежуючи розбіжність відбитого променю шириною піку Бреґа.

Ми використовували дві різні металеві маски для формування поглинаючих візерунків напленням шару WC. Зображення цих масок, отримані на скануючому електронному мікроскопі (СЕМ-зображення), показані на рис. 5. Металева маска (з Ni) на рис. 5а має комірчасту структуру з круглими отворами діаметром 500 мкм і розділеними металевою стінкою 250 мкм (горизонтальний напрямок на рис. 5а). Друга металева маска (з Cu) на рис. 5б представляє сітку електронної мікроскопії з прямокутними отворами ~ 50 мкм, які періодично повторюються через кожні 100 мікрон. Оскільки SU-8 є позитивним резистом, ми повинні отримати стислі відбитки, що нагадують оригінальні металеві маски, з характерним розміром 500 і 50 мкм в одному з напрямків.

Поглинаючий візерунок, утворений W-шаром, створює контраст не менше 2000. Цього достатньо, щоб уникнути підсвічування фоторезисту під ним. Півтінь, створена краєм поглиначка під кутом 4° , становить $\sim 3,6$

мкм з кожного боку, що набагато менше ($\sim 14,3\%$), ніж розмір сегментів маски.

Зображення проявленого фоторезисту SU-8, масштабоване ВРМ з комірковим візерунком (рис. 5а) і розміщене на відстані 80 мм від маски, показано на рис. 7. Очевидно, що відбувається стиснення шаблону маски. Найтонші зони резиста (рис. 7а) мають розмір ~ 16 мкм, що приблизно відповідає 14-кратному стисненню сегментів маски, очікуваному для кута нахилу 4° . Круглі сегменти набувають форми еліпсів.

Загальна ширина поля фоторезисту на Рис. 7а дорівнює ~ 250 мкм. Це обмеження пов'язане з вертикальним розміром падаючого синхротронного

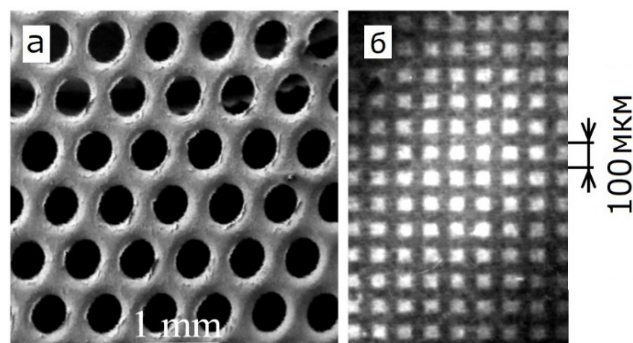


Рис. 5. Металеві маски для нанесення поглинаючого шару на поверхні БРД. (а) Комірчаста структура з круглим отвором 500 мкм. (б) Сітка електронної мікроскопії з прямокутними отворами ~ 50 мкм.

Fig. 5. Metal masks for patterning XMM surface with absorbing layer. (a) Cellular structure with circular opening of 500 μm . (b) Electron microscopy grid with rectangular openings of ~ 50 μm .

променю ($< 0,5$ мм) при фіксованій геометрії освітлення. За такої статичної схеми площа освітлення на ВРМ має розмір $\sim 3,6$ мм у площині падіння. Зображення на Рис. 7б показує результат освітлення, коли ВРМ разом із фоторезистом сканується під синхротронним променем як єдине ціле, щоб розширити освітлену область на ВРМ і, отже, збільшити корисну площу фоторезиста.

Відповідно до Рис. 7б площа освітлення збільшена приблизно в три рази порівняно з такою на Рис. 7а. Це означає, що при такій динамічній схемі освітлюється практично вся поверхня ВРМ. Як видно якість отриманої продукції не висока. Ми не можемо назвати чітку причину цього. Основною причиною, на нашу думку, є неправильний вибір часу експозиції. Незважаючи на те, що стороннє синхротронне випромінювання (більш жорстке або м'якше) також може відбиватися багатшаровим дзеркалом або проникати через берилієву фольгу, це все одно потрібно контролювати часом експозиції. Виявлення справжньої причини вимагає проведення додаткового дослідження.

Зображення, що показує результати тесту для ВРМ

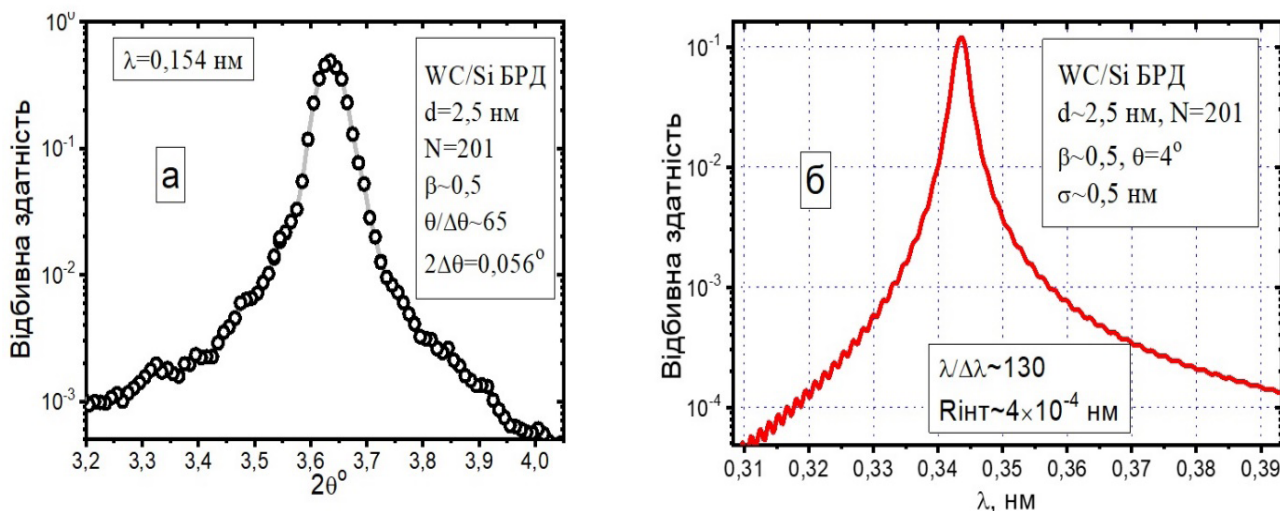


Рис. 6. Характеристика БРД в області жорсткого та синхротронного рентгенівського випромінювання. (а) Перший пік Брегга для БРД WC/Si відбиваючої рентгенівської маски, записаний при випромінюванні $\text{CuK}\alpha_1$. (б) Розрахована рефлектограма для БРД з характеристиками, показаними на рис. 6а при фіксованому куті нахилу $\varphi=4^\circ$.

Fig. 6. (a) First Bragg's peak for the WC/Si XMM of reflecting X-ray mask reordered at $\text{CuK}\alpha_1$ radiation. (b) Calculated reflected spectrum for the XMM with characteristics shown in fig. 5a at fixed grazing angle $\theta=4^\circ$.

з іншим шаблоном відповідно до рис. 5б показано на рис. 12. Площина фоторезисту знаходиться на ~ 40 мкм від ВРМ. Техніка підсвічування динамічна. На рис. 12а показана структура шириною 4 періоди в нестиснутому напрямку (нормаль до площини падіння). Між великими горизонтальними виступаючими смугами фоторезисту видно візерунок з вертикальних ліній з низьким контрастом. Цей шаблон має періодичність ~ 7 мкм, що відповідає стисненню періодичного шаблону

100 мкм на ВРМ. Це відповідає розміру елементів при простому геометричному стисненні візерунка в одному вимірі. На рис. 8б показана збільшена частина стиснутої області рис. 8а. Це демонструє, що можна розпізнати навіть такі дрібні деталі, як ~ 1 мкм. Також видно, що області стиснутого візерунку знаходяться глибше на зображенні. Це означає, що ці регіони більш проявлені. Якщо проводити розрахунки за формулою (5), то для відрізків 50 мкм і відстані 40 мм

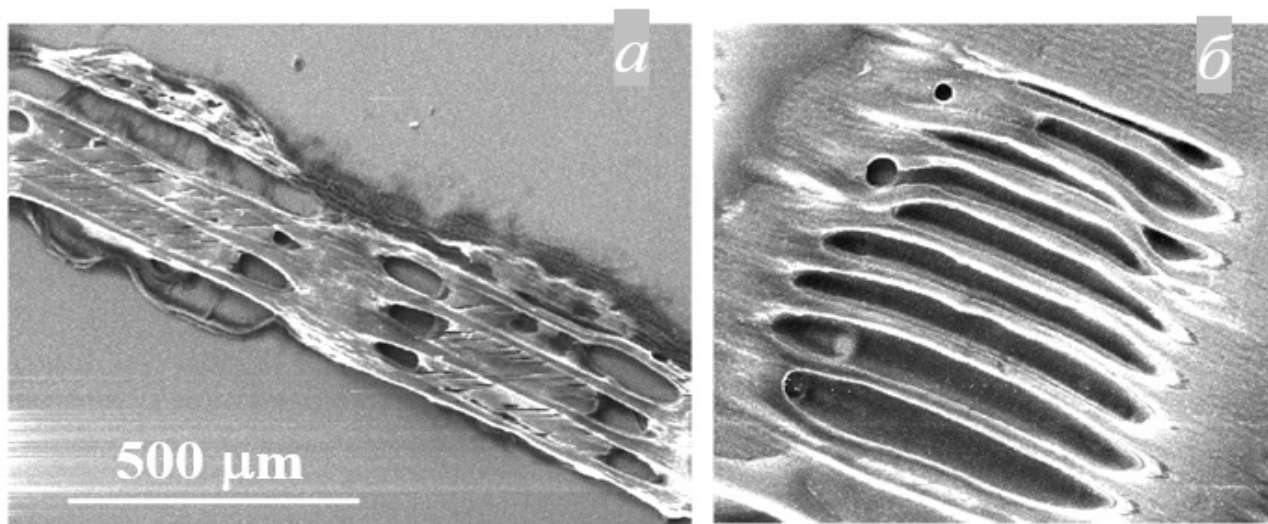


Рис. 7. Зображення проявленого фоторезисту, освітленого від відбиваючої рентгенівської маски з комірковим візерунком, зображеним на рис. 5а відповідно до статичної (а) та динамічної (б) схеми підсвічування резиста.

Fig. 7. Pictures of the developed photoresist illuminated from the reflecting X-ray mask with a cellular pattern shown in fig. 5a in accordance to static (a) and dynamic (b) scheme of the resist illumination.

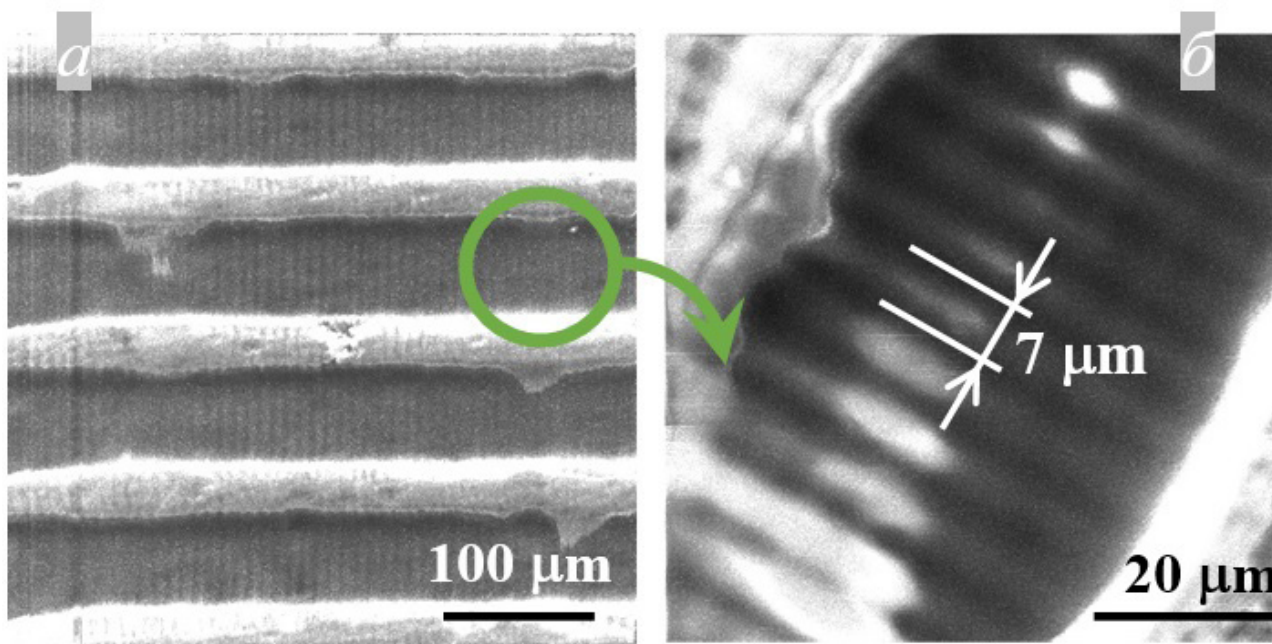


Рис. 8. СЕМ-зображення експонованого фоторезисту SU-8 (товщина 30 мкм) з використанням відбиваючої рентгенівської маски WC/Si, з шаблоном рис. 5б. Кут падіння на маску дорівнює 4° . Номінальне стиснення шаблону маски ~ 14 . Відстань між маскою і площиною фоторезисту ~ 40 мм. Смуга пропускання довжини хвилі для освітлення фоторезистом зосереджена на 0,35 нм. (а) Загальний вигляд показує структуру 4 періодів у горизонтальному напрямку. (б) Збільшене зображення відбитка.

Fig. 8. SEM image of exposed photoresist SU-8 (thickness of 30 μm) using WC/Si reflecting X-ray mask with a pattern of fig. 5b. Grazing angle of incidence to the mask is 4° .

до фоторезисту маємо отримати розмір відбитка $\sim 5,5$ мкм. Експериментальний розмір відбитка сегментів (4–6 мкм) близький до розрахованого.

Незважаючи на помітну розбіжність синхротронного пучка, це не впливає на якість стиснутого зображення, оскільки в нашому наближенні джерело випромінювання можна вважати точковим. Тоді кожен сегмент маски буде працювати як коліматор, значно обмежуючи розбіжність пучка синхротрона. Так, для відстані ~ 10 м від джерела до маски і розміру «щілини» $\sim 3,5$ мкм (для відрізка 50 мкм під кутом 4°) фактична розбіжність променя буде менше ніж 3×10^{-4} градуси ($< 5 \times 10^{-6}$ радіан), тобто менше, ніж фізична розбіжність пучка синхротронного випромінювання (0,2 радіана).

Розрахунки показують, що незважаючи на дифракційні ефекти, використовуючи відбиваючу маску (наприклад, з $d \sim 2,5$ нм), можна отримати відбиток субмікронного розміру на відстані менше 2 мм від маски. У цьому випадку шаблон повинен бути менше 2 мм (близьке наближення) у площині падіння.

Чим більший період БРД, тим більше можна отримати стиснення візерунка. Однак у цьому випадку збільшується площа опромінення маски падаючим променем. З обмеженнями відстані (як, наприклад, у даному випадку) можливо, що буде використана лише

частина променя.

З іншого боку, чим коротший період БРД, тим ближче до маски можна розташувати площину фоторезисту. На рис. 9 наведено результати розрахунків розміру відбитка, які можна отримати на відстанях 0,5–2 мм від ВРМ до фоторезисту, для багатошарового періоду ($d=2,5$ нм) з випромінюванням 0,154 нм. Подібно до даних, наведених на рис. 4, залежності $t^*_v = f(t_p)$ на рис. 9 мають мінімуми: гостріші для дзеркал, що розташовані ближче до фоторезисту і більш плоскі для дзеркал, що розташовані далі від фоторезисту.

Очевидно, що чим ближче відбиваючі сегменти маски до фоторезисту, тим менші розміри відбитка можна отримати. Наприклад, коли відстань до резиста становить ~ 1 мм, можна отримати відбиток розміром менше 0,7 мкм. Ще раз підкреслимо, що таке одновимірне стиснення сегментів маски досягається лише для плоских ВРМ. У разі фокусування, тобто з циліндричними ВРМ, можна отримати субмікронне стиснення на великих відстанях.

З плоскими масками 2D-стиснення навряд чи можна досягти доступними засобами через обмеження відстані. Однак при використанні фокусуєчих масок це можливо, оскільки це може збільшити відстань між маскою та фоторезистом.

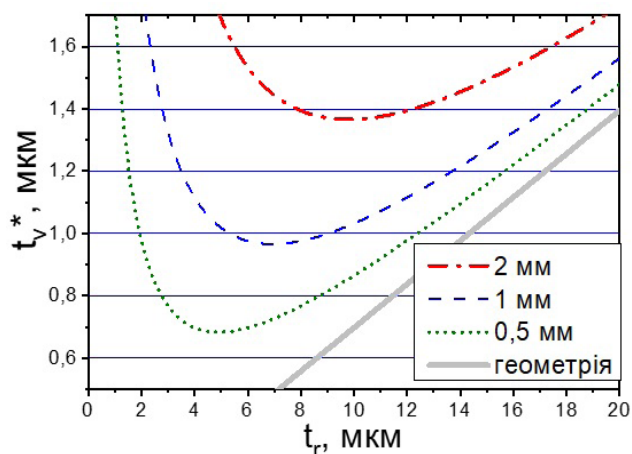


Рис. 9. Розраховані розміри відбитків, t_v^* , залежно від відстані між рентгенівською маскою та фоторезистом, t_r , у випромінюванні з $\lambda = 0,154$ нм. Розміри сегментів на масці – 2,5 нм.

Fig. 9. Calculated sizes of imprints, t_v^* , depending on the distance between the X-ray mask and the photoresist, t_r , in radiation with $\lambda=0.154$ nm. Sizes of segments on the mask - 2.5 nm.

ВИСНОВКИ

1. Показана можливість одновимірного стиснення зображення за допомогою відбиваючої рентгенівської маски в короткохвильовому рентгенівському випромінюванні ($\lambda \sim 0,35$ нм) за допомогою синхротронного випромінювання.
2. Для відбиваючої маски з рентгенівським

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. N. Fu, Y. Liu, X. Ma, and Z. Chen, *Microelectron. Manuf.*, 2, 19020202 (2019). <https://doi.org/10.33079/jomm.19020202>
2. Q. Lin, T. Hisamura, N. Chong, and J. Chang, *Proc. SPIE*, 11609(116090V) (2021). <https://doi.org/10.1117/12.2584288>
3. I. Mohacsi, I. VaPCiainen, B. Rösner, M. Guizar-Sicairos, V.A. Guzenko, I. McNulty, R. Winarski, M.V. Holt, and C. David, *Scientific Reports*, 7, 43624 (2017). <https://doi.org/10.1038/srep43624>
4. M. Kördel, A. Dehlinger, C. Seim, U. Vogt, E. Fogelqvist, J.A. Sellberg, H. Stiel, and H.M. Hertz, *Optica*, 7(6), 658-674 (2020). <https://doi.org/10.1364/OPTICA.393014>
5. L. Jiang, B. Verman, B. Kim, Y. Platonov, Z. Al-Mosheky, R. Smith, N. Grupido, *The Rigaku Journal*, 18(2), 13-22 (2001).
6. J. Zhu, Q. Huang, H. Li, Y. Tu, Z. Song, L. Pan, L. Jiang, X. Wang, F. Wang, Z. Zhang, Z. Wang, L. Chen, *Proc. SPIE*, 7995(79952R) (2011). <https://doi.org/10.1117/12.888275>
7. S. Rahn, A. Kloidt, U. Kleineberg, B. Schmiedeskamp, K. Kadel, W.K. Schomburg, J. Hormes, U. Heinzmann, *Proc. SPIE*, 1742, 585-592 (1992). <https://doi.org/10.1117/12.140591>
8. S. Mardix, A.R. Lang, *Rev. Sci. Instrum.*, 50(4), 510-512 (1979). <https://doi.org/10.1063/1.1135862>
9. I.F. Mikhailov, A.A. Baturin and A.I. Mikhailov, "Analyzing

багат шаровим дзеркалом WC/Si ($d=2,5$ нм) отримано щонайменше 14-кратне стиснення зображення з розміром відбитка ~ 5 мкм.

3. Показано, що за відповідних умов можна отримати зображення з субмікронним розміром елементів.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. N. Fu, Y. Liu, X. Ma, and Z. Chen, *Microelectron. Manuf.*, 2, 19020202 (2019). <https://doi.org/10.33079/jomm.19020202>
2. Q. Lin, T. Hisamura, N. Chong, and J. Chang, *Proc. SPIE*, 11609(116090V) (2021). <https://doi.org/10.1117/12.2584288>
3. I. Mohacsi, I. VaPCiainen, B. Rösner, M. Guizar-Sicairos, V.A. Guzenko, I. McNulty, R. Winarski, M.V. Holt, and C. David, *Scientific Reports*, 7, 43624 (2017). <https://doi.org/10.1038/srep43624>
4. M. Kördel, A. Dehlinger, C. Seim, U. Vogt, E. Fogelqvist, J.A. Sellberg, H. Stiel, and H.M. Hertz, *Optica*, 7(6), 658-674 (2020). <https://doi.org/10.1364/OPTICA.393014>
5. L. Jiang, B. Verman, B. Kim, Y. Platonov, Z. Al-Mosheky, R. Smith, N. Grupido, *The Rigaku Journal*, 18(2), 13-22 (2001).
6. J. Zhu, Q. Huang, H. Li, Y. Tu, Z. Song, L. Pan, L. Jiang, X. Wang, F. Wang, Z. Zhang, Z. Wang, L. Chen, *Proc. SPIE*, 7995(79952R) (2011). <https://doi.org/10.1117/12.888275>
7. S. Rahn, A. Kloidt, U. Kleineberg, B. Schmiedeskamp, K. Kadel, W.K. Schomburg, J. Hormes, U. Heinzmann, *Proc. SPIE*, 1742, 585-592 (1992). <https://doi.org/10.1117/12.140591>
8. S. Mardix, A.R. Lang, *Rev. Sci. Instrum.*, 50(4), 510-512 (1979). <https://doi.org/10.1063/1.1135862>
9. I.F. Mikhailov, A.A. Baturin and A.I. Mikhailov, "Analyzing

- Materials Using Joint X-ray Fluorescence and Diffraction Spectra“, Cambridge Scholars Publishing, (2020), 237 c.
10. C.P. Jensen, K.K. Madsen, and F.E. Christensen, *Exp. Astron.*, 20, 93-103 (2005). <https://doi.org/10.1007/s10686-006-9022-9>
11. Jan Vitasek, Jan Latal, Jan Skapa, Petr Koudelka, Frantisek Hanáček, Petr Shishka, Vladimír Vashinek, 2011 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, (18-20 August 2011, Budapest, Hungary) <https://doi.org/10.1109/TSP.2011.6043762>
12. L. Wang, T. Christenson, Y.M. Desta, R.K. Fettig, and R.K. Fettig, *J. Microlith., Microfab., Microsyst.*, 3(3), 423-428 (2004). <https://doi.org/10.1117/1.1753271>
- Materials Using Joint X-ray Fluorescence and Diffraction Spectra“, Cambridge Scholars Publishing, (2020), 237 c.
10. C.P. Jensen, K.K. Madsen, and F.E. Christensen, *Exp. Astron.*, 20, 93-103 (2005). <https://doi.org/10.1007/s10686-006-9022-9>
11. Jan Vitasek, Jan Latal, Jan Skapa, Petr Koudelka, Frantisek Hanáček, Petr Shishka, Vladimír Vashinek, 2011 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, (18-20 August 2011, Budapest, Hungary) <https://doi.org/10.1109/TSP.2011.6043762>
12. L. Wang, T. Christenson, Y.M. Desta, R.K. Fettig, and R.K. Fettig, *J. Microlith., Microfab., Microsyst.*, 3(3), 423-428 (2004). <https://doi.org/10.1117/1.1753271>

ONE-DIMENSIONAL IMAGE SCALING WITH REFLECTING X-RAY MASK

V.S. Chumak¹, S. Peredkov², V.V. Kondratenko¹, I.A. Kopylets¹, Yu.P. Pershin¹

¹ *National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Ukraine, 61002, Kharkiv, Kyrpychova str., 2*

² *Max-Planck-Institute Für Chemische Energiekonversion,
Stiftstrasse 34 – 36, 45470 Mülheim an der Ruhr, Germany, Nordrhein-Westfalen
chumak.vytalyi@gmail.com*

Submitted September 08, 2022; Revised October 9, 2022; Accepted October 21, 2022

The work deals with the issue of miniaturization of template images using X-ray radiation. The compression method is based on the fact that X-ray radiation is directed at a specific template that reflects X-ray radiation at an grazing angle and a one-dimensional compressed image is recorded on a plane not parallel to the plane of the template. The advantage of this method of image compression is the relative simplicity of its implementation. The paper proposes the use of X-ray multilayer mirrors as reflective X-ray masks (RXM) for one-dimensional image compression. Control of the structural parameters of multilayer mirrors was carried out on a DRON-3M X-ray diffractometer. The RXM template was formed by sputtering an absorbing WC layer with a thickness of ~0.2 μm through a certain stencil on the surface of a multilayer mirror. The test of the RXM with mirrors based on a pair of WC/Si materials in synchrotron radiation (1~3.5 nm) was carried out. A 14-fold compression of the reflective segments of the RXM with a size of ~50 μm was obtained. Theoretically, the principle possibility of obtaining compression of reflective segments to submicron sizes is shown.

Keywords: *X-ray multilayer mirror, reflective X-ray mask, image compression.*