

**О.В. Шиховець¹, В.М. Рубіш¹, С.О. Костюкевич²,
Є.В. Беляк¹, Д.Ю. Манько¹, А.А. Крючин¹**

ВИКОРИСТАННЯ ПЛІВОК ХРОМУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОТОШАБЛОНІВ ТА КОДОВИХ ДИСКІВ ДЛЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Проведено дослідження особливостей нанесення плівок хрому при виготовленні фотошаблонів та кодкових дисків, що використовуються у фотоелектричних вимірювальних системах. Зазначено, що процедура нанесення тонких плівок хрому на прозорі підкладки має широкий спектр застосувань у фотолітографії та мікрообробці поверхні, що зумовлює актуальність удосконалення відповідної технології для забезпечення вимог на рівні технічного завдання. При цьому було досліджено оптичні властивості хромових плівок у контексті організації фотолітографічної процедури. Визначено залежність коефіцієнта пропускання ультрафіолетового випромінювання від товщини шару хрому, що дозволяє сформулювати методологічні рекомендації для фотолітографічного виробництва. Розглянуто вплив методу осадження хрому на його оптичні характеристики, а також порівняно спектри поглинання актуальних фотошаблонів, з визначенням показників ефективності для широкого діапазону довжин хвиль експонування. Проведено оцінку продуктивності використання джерел інфрачервоного випромінювання для експонування фотошаблонів модуляційних дисків енкoderів. Показано, що застосування інфрачервоних джерел забезпечує стабільність процесу експонування, знижує енергоспоживання та собівартість фотолітографічного комплексу. Водночас відзначено необхідність збільшення товщини хромової плівки для компенсації зниженого рівня поглинання у довгохвильовій частині спектра, що підтверджується аналізом спектрів поглинання для різних товщин плівки. Також було розглянуто вплив технологій осадження тонких плівок хрому на параметри фотошаблонів, зокрема, мікроструктуру, оптичні та електрофізичні характеристики. Проаналізовано методи фізичного осадження з парової фази, хімічного осадження з парової фази та електронно-променевого напилення, що використовуються для формування хромових плівок різної товщини. Досліджено вплив параметрів процесу на стовпчасту мікроструктуру, коефіцієнти відбивання, поглинання та питомий опір. Показано, що хромові плівки можуть слугувати альтернативою прозорим електропровідним оксидам завдяки кращій електропровідності, стабільності властивостей та стійкості до агресивних умов експлуатації. Розроблено двоетапну технологію напилення хромових плівок із забезпеченням високої оптичної щільності та низької шорсткості поверхні. Визначено оптимальні режими формування плівок для покращення їх адгезії до скляної підкладки. Запропонований підхід забезпечує стабільні параметри покриття для використання у фотошаблоні. Зазначено, що якість очищення підкладок та контроль технологічних параметрів мають ключове значення для формування дефектів у хромових плівках. Виявлено, що механічні напруження та забруднення можуть спричинити проколи, локальне відшарування та зміни оптичної щільності. Запропоновано оптимальні режими напилення, які мінімізують внутрішні напруження та покращують якість фотошаблонів.

Ключові слова: кодкові диски, фотошаблони, дифракційні оптичні елементи, прямий лазерний запис, субмікронні структури, нанесення хрому, оптична щільність.

1. ВСТУП

На сьогоднішній день впровадження у технологічний процес процедури нанесення на прозорі підкладки на основі скла або кварцу тонких плівок хрому [1-4] відіграє ключову роль при виготовленні фотошаблонів [2], дифракційних ґраток [3] і високоточних шкал для фотоелектричних вимірювальних систем [4]. Дослідниками зазначається, що відповідна процедура знаходить широке застосування не лише у фотолітографії, але й у галузі мікрообробки поверхні [5], де плівка хрому використовується як проміжний шар для підвищення рівня адгезії. Водночас із розвитком засобів вимірювальної техніки та

© О.В. Шиховець, В.М. Рубіш, С.О. Костюкевич, Є.В. Беляк, Д.Ю. Манько, А.А. Крючин, 2025

збільшенням точності приладів зростають і вимоги до контролю товщини, однорідності та оптичних властивостей хромових плівок, що свідчить про високу актуальність вдосконалення зазначеної технології.

Аналіз наукових досліджень, присвячених проблемам впровадження процедури нанесення тонких плівок хрому при організації фотолітографічної системи, вказує на переваги технології електронно-променевого експонування (Electron Beam Lithography, EBL). Тонка плівка хрому при цьому використовується як маска для глибокого травлення аморфного кремній-нітридного матеріалу (Si_xN_y), а також як провідний шар, який допомагає зменшити ефект заряду під час проведення EBL [6]. Хромові шаблони відіграють важливу роль при виготовленні мікророзмірних оптичних елементів та структур завдяки технологічності та універсальності відповідного підходу. При цьому зазначається актуальність задачі формування кодових дисків, патерни яких характеризуються високою роздільною здатністю та низьким рівнем дефектів, як основи систем автоматизованого прецизійного позиціонування рухомих платформ та складових роботизованих комплексів [7]. Тонкі хромові плівки субмікронної товщини (близько 100 нм) зазвичай наносяться на прозорі підкладки методом вакуумного випаровування. На подальших етапах роботи фотолітографічного комплексу зазначені плівки слугують непрозорими поглинаючими структурами. Важливо зазначити, що тонка плівка хрому на скляній підкладці представляє собою двошарову структуру, де нижній шар являє собою чистий хром (Cr), а верхній шар, у свою чергу, є оксидом хрому. У залежності від обраної методики може бути обрано оксид хрому IV (CrO_2) або оксид хрому III (Cr_2O_3), що є більш ефективним при організації фотолітографічного комплексу на основі джерел глибокого ультрафіолету (Deep Ultraviolet; DUV). Тонкі шари хрому блокують проходження через маску фотошаблону світла ультрафіолетового діапазону або короткохвильового видимого діапазону (400-700 нм), що використовується для запису патернів у рамках сучасних методів фотолітографії. Для формування мікророзмірних та субмікронних структур високої якості необхідно забезпечити нанесення плівок хрому з однорідною структурою без дефектів, зокрема, (i) проколів, як отворів у плівці хрому, що найбільшою мірою порушує функціональність процедури; нерівномірності товщини плівки хрому і надалі призводить до неоднорідних оптичних і механічних властивостей структури; (ii) мікротріщин, які утворюються через напруження в плівці під час її формування або експлуатації; (iii) адгезійних дефектів, що полягають у відшаруванні плівки хрому від підкладки через недостатню адгезію або наявність забруднень на поверхні підкладки; (iv) контамінацій, як забруднень плівки хрому сторонніми частинками або хімічними речовинами під час нанесення або подальшої обробки; (v) кристалічних дефектів, як змін у структурі плівки, таких як утворення великих зерен, що можуть погіршувати її оптичні та механічні властивості; (vi) дефектів країв, як порушення процесів нанесення плівки на краї підкладки, що може призвести до розривів або відшарування. Наявність оксидного покриття розглядається як складова захисту поверхні плівки хрому, що вносить зміни у параметр відбиття, які мають бути враховані при організації фотолітографічного процесу.

При цьому типовий фотошаблон (рис.1) зазвичай базується на основі шару хрому товщиною від 70 до 100 нм з оксидним покриттям товщиною від 25 до 30 нм [9,10], що дозволяє отримати показник оптичної щільності до 3,0 при проведенні процедури фотолітографії в ближньому ультрафіолетовому спектрі (Near-Ultraviolet; NUV). Удосконалення методики осадження оксиду хрому, у свою чергу, надає можливість використання відповідного матеріалу при формуванні твердої маски, при цьому зазначається, що відповідна технологія характеризується високими показниками швидкості травлення та селективності порівняно з плівкою хрому [10,11].

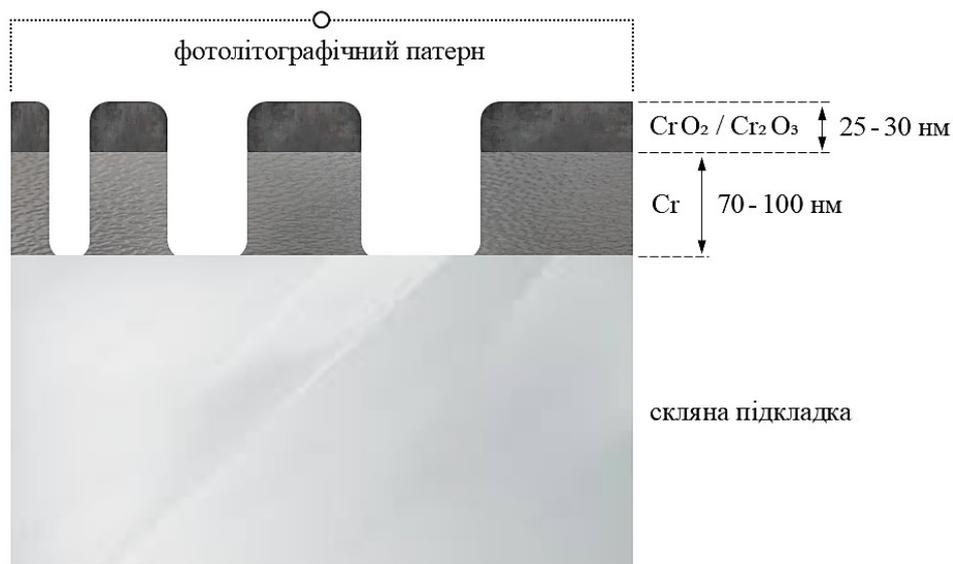


Рис. 1. Поперечний переріз типового літографічного фотошаблону на основі плівки хрому.

Одна з основних переваг масок на основі хрому та оксиду хрому полягає у можливості їх ефективного використання у процесах травлення підкладок. Відповідні плівки характеризуються високою селективністю до кремнію та його сполук, що дозволяє використовувати їх для перенесення на підкладку фотолітографічних патернів з високою роздільною здатністю, що є важливим при впровадженні нанотехнологічних процедур [12]. Зазначається, що використання тонкого шару хрому як жорсткої маски полегшує виготовлення щільно упакованих фотонних кристалічних структур із співвідношенням глибини елемента мікрорельєфу до його ширини (показник співвідношення сторін) до рівня 10:1 [6]. Стійкість маскуючого шару при селективному травленні матеріалу підкладки сильно залежить від температури осадження тонкої плівки хрому, причому показник стійкості зростає зі збільшенням температури осадження [13]. Однак слід зазначити, що розрізнені дослідження, представлені у рамках аналізу, не надають вичерпної картини щодо взаємозв'язку між методами осадження, параметрами формування оксидного шару та оптичними властивостями тонких плівок хрому, а також перспектив розширення інструментарію із впровадження розглянутої технології, що розглядається як невирішена частина загального дослідження.

Таким чином, метою роботи є дослідження оптичних властивостей тонких плівок хрому та аналіз методів їх осадження з урахуванням впливу технологічних параметрів на структурні та оптичні характеристики отриманих шарів з метою побудови цілісної методології використання плівок хрому для виготовлення як фотошаблонів, так і кодових дисків для фотоелектричних вимірювальних систем.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТОНКИХ ПЛІВОК ХРОМУ

Покриття на основі хрому у рамках розглянутих вище фотолітографічних технологій розглядається як абсолютне непрозоре у видимому та ультрафіолетовому діапазоні. Водночас плівка хрому характеризується спектром пропускання, який залежить від товщини плівки, причому для тонких плівок ($d_{Cr} < 30$ нм) коефіцієнт пропускання короткохвильового опромінення може бути достатньо високим ($\kappa_T > 10\%$). На рис.2

представлена залежність усередненого значення показника пропускання $\bar{\kappa}_T^{NUV}$ від товщини шару хрому у діапазоні $d_{Cr} \in [7,25 \text{ нм}; 60,25 \text{ нм}]$ для ближнього ультрафіолетового діапазону (Near-Ultraviolet;NUV). Графік демонструє експоненційний ріст пропускання ультрафіолетового світла при зменшенні товщини плівки хрому, що надає можливість сформулювати методологічні рекомендації у відповідності до технологічного завдання, особливостей організації технологічного процесу та налаштування фотолітографічного комплексу.

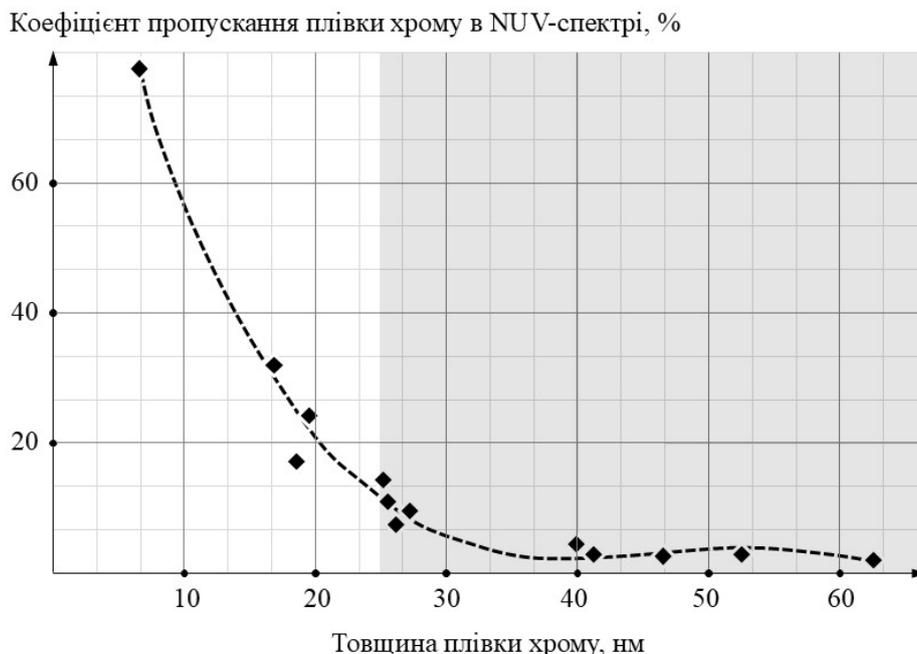
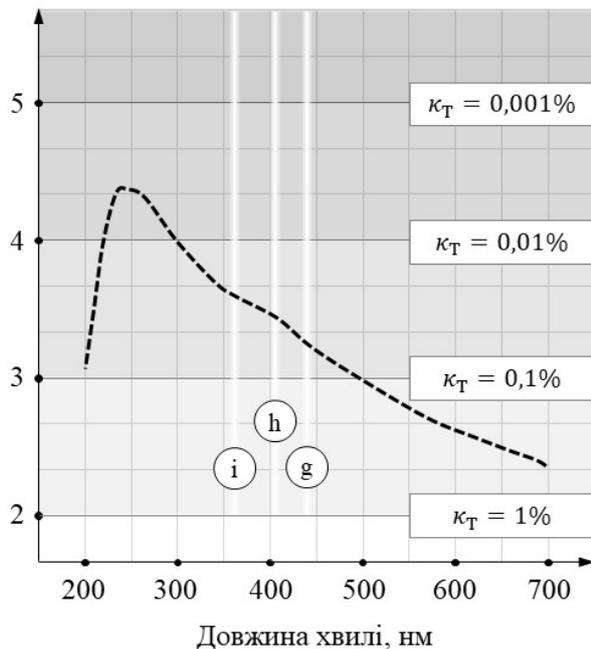


Рис. 2. Залежність коефіцієнта пропускання від товщини плівки хрому в ближньому ультрафіолетовому діапазоні [8].

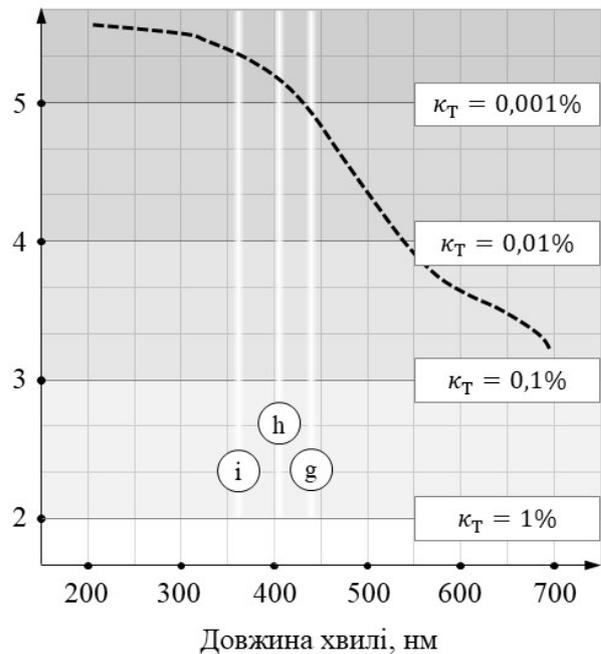
Також у сучасних дослідженнях зазначається, що на залежність показника пропускання від довжини хвилі світла значний вплив має метод осадження плівки хрому на прозору підкладку, що визначає її мікроструктурні та оптичні характеристики. На рис.3 наведено спектри поглинання для двох типів хромових плівок, які відрізняються як методом нанесення, так і товщиною, що безпосередньо впливає на їхні експлуатаційні властивості у фотолітографічних процесах [15]. Фотошаблон «OD3» є базовим стандартом у галузі фотолітографії та забезпечує необхідний рівень пропускання для застосування у звичайних технологічних умовах. Водночас фотошаблон «OD4» характеризується вищою щільністю осадженої плівки та більшою товщиною, що дозволяє реалізовувати процеси довготривалої експозиції у фотолітографічному виробництві. Завдяки цим властивостям фотошаблони типу «OD4» є оптимальними для високоточного перенесення складних патернів великої площі (понад 18×18 см) на прозорі підкладки, що особливо важливо для виготовлення мікроелектронних компонентів та оптичних елементів [14, 15]. Спектри поглинання на рис.3 представлені для показника оптичної ефективності (Optical Density;OD), що розраховується на основі показника пропускання через десятковий логарифм як $\kappa_{OD}(\lambda) = -\log_{10}(\kappa_T(\lambda))$. Це надає можливість обрати єдину шкалу для спектрів фотошаблонів «OD3» і «OD4», показник пропускання яких відрізняється при цьому від 10 до 300 разів.

Оптическая плотность плівки OD3, в.о.



(а)

Оптическая плотность плівки OD4, в.о.



(б)

Рис. 3. Спектр поглинання: (а) стандартної плівки хрому «OD3» і (б) надщільної плівки хрому «OD4»[15].

Порівняння рис.3а і 3б вказує на ріст поглинання фотошаблону «OD4» у діапазоні експонування ртутних ламп високого тиску, що на графіку позначається трьома лініями:

- відмітка «g-line» відповідає довжині хвилі $\lambda = 436$ нм, що використовується у фотолітографічних комплексах з роздільною здатністю 800-1000 нм;
- відмітка «h-line» відповідає довжині хвилі $\lambda = 405$ нм, що дозволяє збільшити чіткість експонованих структур, покращуючи контроль над процесом експозиції, і отже, збільшити роздільну здатність системи до 600-800 нм;
- відмітка «i-line» відповідає довжині хвилі $\lambda = 365$ нм, що входить в ультрафіолетовий діапазон і широко використовується у сучасних фотолітографічних комплексах, дозволяючи формувати патерни з роздільною здатністю 300–500 нм.

Водночас аналіз спектра «OD4» надає можливість зазначити, що відповідний фотошаблон може використовуватись при побудові фотолітографічного комплексу із системами фокусування для експонування джерелами глибокого ультрафіолетового випромінювання у діапазоні $\lambda \in [190 \text{ нм}; 300 \text{ нм}]$.

Важливо зазначити, що для ряду задач у галузі фотолітографії, як то формування патернів модуляційних дисків енкодерів, вимоги щодо показника роздільної здатності є порівняно низькими. Це зумовлює актуальність впровадження джерел інфрачервоного світла (Infrared;IR) для експонування фотошаблону, що характеризується рядом переваг:

1. Забезпечення стабільності процесу експонування у зв'язку з меншою чутливістю до мікрodefektів та нерівностей поверхні, що знижує вимоги до підготовки поверхні підкладки та фотошаблону.
2. Зменшення рівня енергоспоживання та проста схема терморегуляції, що пов'язано з вищим коефіцієнтом корисної дії IR-джерел. При цьому менша енергоємність зменшує нагрівання системи, що полегшує контроль температурних параметрів.

Оптична щільність плівки хрому, в.о.

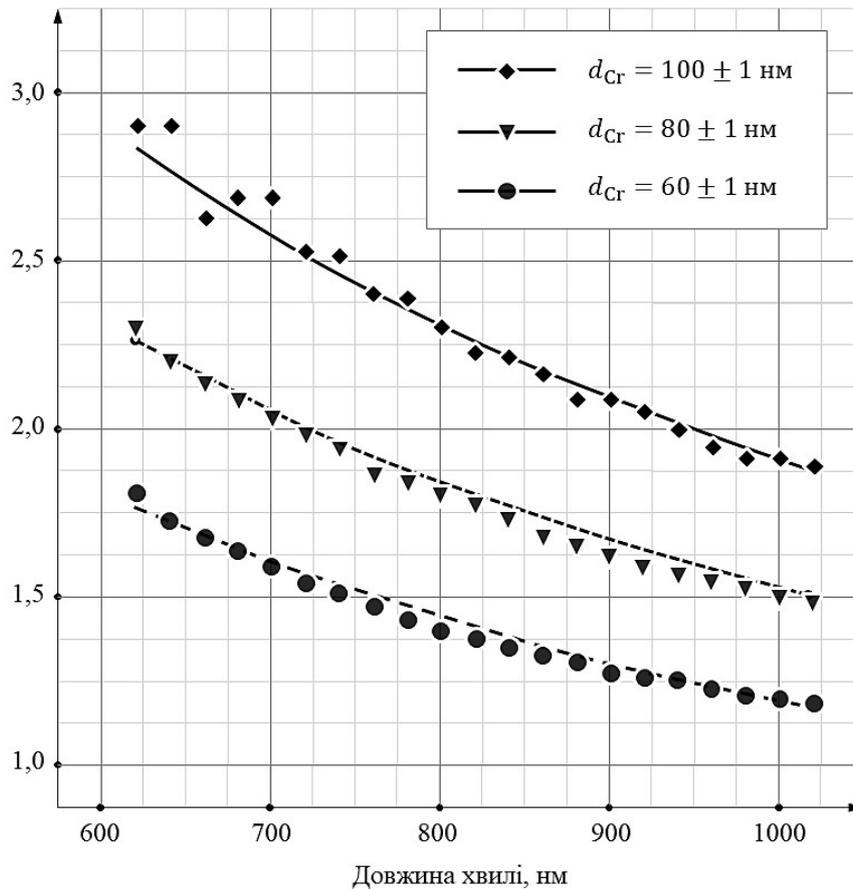


Рис. 4. Спектри поглинання фотошаблонів модуляційних дисків енкодерів[16].

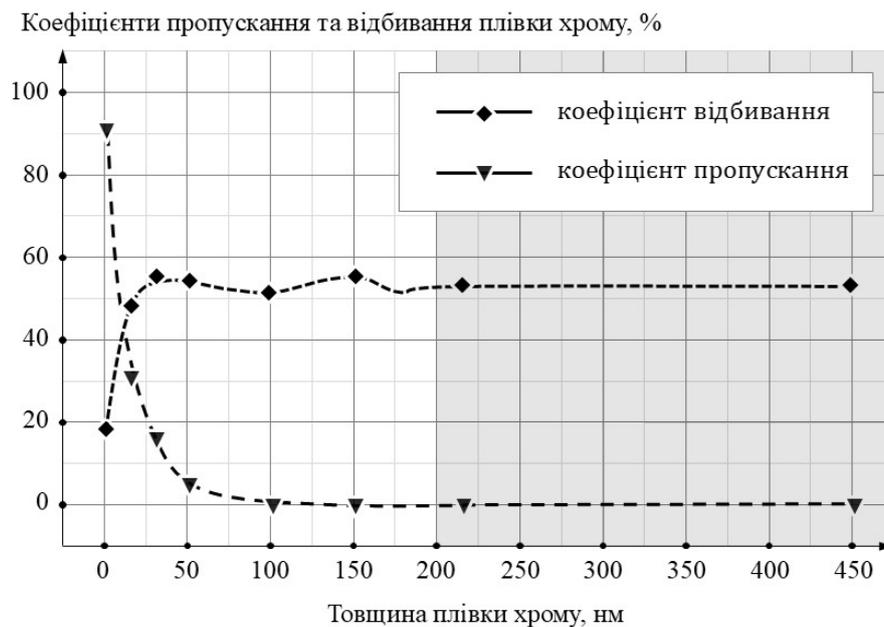
- Зменшення собівартості та габаритів фотолітографічного комплексу. IR-лазери значно дешевші у виробництві та експлуатації порівняно з короткохвильовими джерелами, які потребують налаштування складних оптичних та вакуумних систем з метою зменшення рівня поглинання UV-випромінювання оптичними елементами та середовищем.

Водночас як показав попередній аналіз, застосування для експонування фотошаблонів джерел довгохвильової частини спектра призводить до необхідності збільшення товщини плівки хрому у зв'язку з більшою проникністю IR-випромінювання [16]. На рис.4 наведено спектри поглинання фотошаблонів модуляційних дисків енкодерів на основі плівки хрому товщиною 60 нм, 80 нм і 100 нм для довгохвильового видимого діапазону і ближнього інфрачервоного. Зважаючи на те, що як цільовий показник була використана оптична щільність, можна вважати, що вісь ординат є логарифмічною. Це вказує на швидке падіння рівня поглинання плівки хрому з ростом довжини хвилі, що ефективно нівелюється через збільшення товщини плівки хрому.

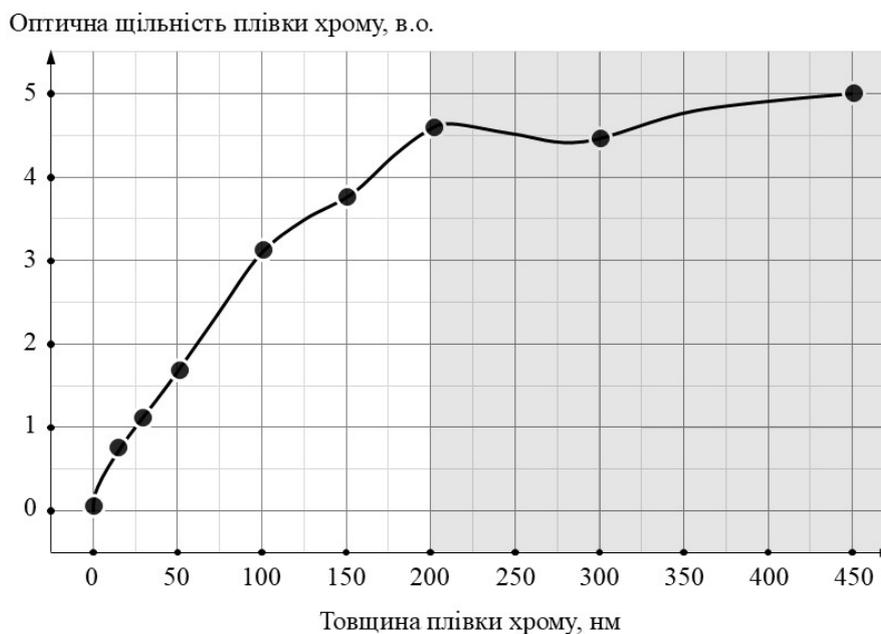
3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОСАДЖЕННЯ ТОНКОЇ ПЛІВКИ ХРОМУ НА ПІДКЛАДКУ

Як було зазначено вище, на параметри фотошаблону значним чином впливає технологія осадження тонкої плівки хрому на підкладку, в основі якої можуть бути такі методи як випаровування електронним пучком [17, 18], термічне випаровування [19], осадження з парової фази [20-23] тощо. При фізичному осадженні тонкої плівки хрому з парової фази (Physical Vapor Deposition;PVD) на мікроструктуру нанесених покриттів сильно

впливає налаштування комплексу, як то тиск, температура, напруга зміщення тощо. Так, було показано, що плівки хрому, нанесені при низькій температурі підкладки та низькому тиску, мають тенденцію до типової стовпчастої мікроструктури. Додатковим параметром, який впливає на формування стовпчастої мікроструктури, є напрямок потоку частинок, що осаджуються (кут потоку) відносно нормалі до поверхні [22]. В процесі виготовлення фотошаблонів модуляційних дисків енкодерів широко використовується метод резистивного вакуумного напилення, у той час як методи PVD та хімічного осадження з парової фази (Chemical Vapor Deposition;CVD) розглядаються як перспективні для вирішення задачі формування двошарової структури хрому та оксиду хрому з регульованими оптичними властивостями [20,21].



(а)



(б)

Рис. 5. Залежності (а) коефіцієнтів відбивання та пропускання і (б) оптичної щільності для плівки хрому при експонуванні на довжині хвилі 550 нм [20].

Відповідна задача вирішується також через впровадження технології магнетронного напилення (Direct Current Physical Vapor Deposition; PVD-DC), у рамках якого масив хрому поділяється на атоми під дією процесу фізичного впливу інертного газу, який спрямовує частинки до підкладок в умовах високого вакууму. Атоми конденсуються і утворюють плівку хрому фіксованої товщини. При цьому швидкість осадження, товщина покриття, якість покриття та рівень адгезії є параметрами, які мають бути включені у математичну модель процесу, їх варіація може призвести до значних змін у оптичних та механічних характеристиках фотошаблону [20]. Дослідження осадження двошарової плівки хрому та оксиду хрому методом PVD-DC показує можливість отримання показника оптичної щільності, яка перевищувала $\kappa_{OD} > 3,5$ при товщині плівки хрому $d_{Cr} > 150$ нм. Натомість для двошарової плівки хрому та оксиду хрому відповідної товщини було досягнуто рівень поглинання $\kappa_{OD} \approx 4$. На рис.5 наведено залежності відбивання та проходження світла від товщини плівки хрому (рис.3, 5a) та залежність оптичної щільності від товщини плівки хрому (рис.3, 5б) на довжині хвилі $\lambda = 550$ нм [20, 24]. Слід зазначити, що коефіцієнти відбивання та проходження світла не змінюються при збільшенні товщини плівки $d_{Cr} > 200$ нм, у той час як для показника оптичної щільності, що як логарифмічний показник для коефіцієнта поглинання, можна вказати на зміни у відповідному діапазоні $d_{Cr} \in [200 \text{ нм}; 450 \text{ нм}]$.

Для нанесення плівок хрому з товщиною у діапазоні $d_{Cr} \in [5 \text{ нм}; 100 \text{ нм}]$ та високою оптичною прозорістю пропонується використовувати метод електронно-променевого напилення. Експериментально було показано, що для даної товщини плівок хрому коефіцієнт поглинання збільшується при зменшенні швидкості осадження частинок хрому. На рис.6 представлені спектри пропускання тонких плівок хрому, отриманих методом електронно-променевого напилення [17,18]. Величина питомого опору плівок хрому з набором товщин $d_{Cr} \in [5 \text{ нм}; 100 \text{ нм}]$ змінюється у межах $\rho \in [10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}; 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}]$. Отримані результати, таким чином, підтверджують гіпотезу, що тонкі плівки хрому можуть розглядатись як альтернатива прозорим електропровідним оксидам [17,18], забезпечуючи кращу електропровідність, а також стабільність оптичних та електричних властивостей у жорстких умовах експлуатації. Додатковою перевагою хромових плівок є їхня висока механічна та хімічна стійкість, що забезпечує довговічність покриттів у порівнянні з оксидами. Завдяки цьому вони можуть використовуватись у середовищах з підвищеною вологістю, температурними коливаннями та впливом агресивних речовин без значної деградації електрофізичних характеристик. Точний контроль товщини плівки та однорідності осадження методом електронно-променевого напилення дозволяє оптимізувати їхні властивості під конкретні технічні вимоги.

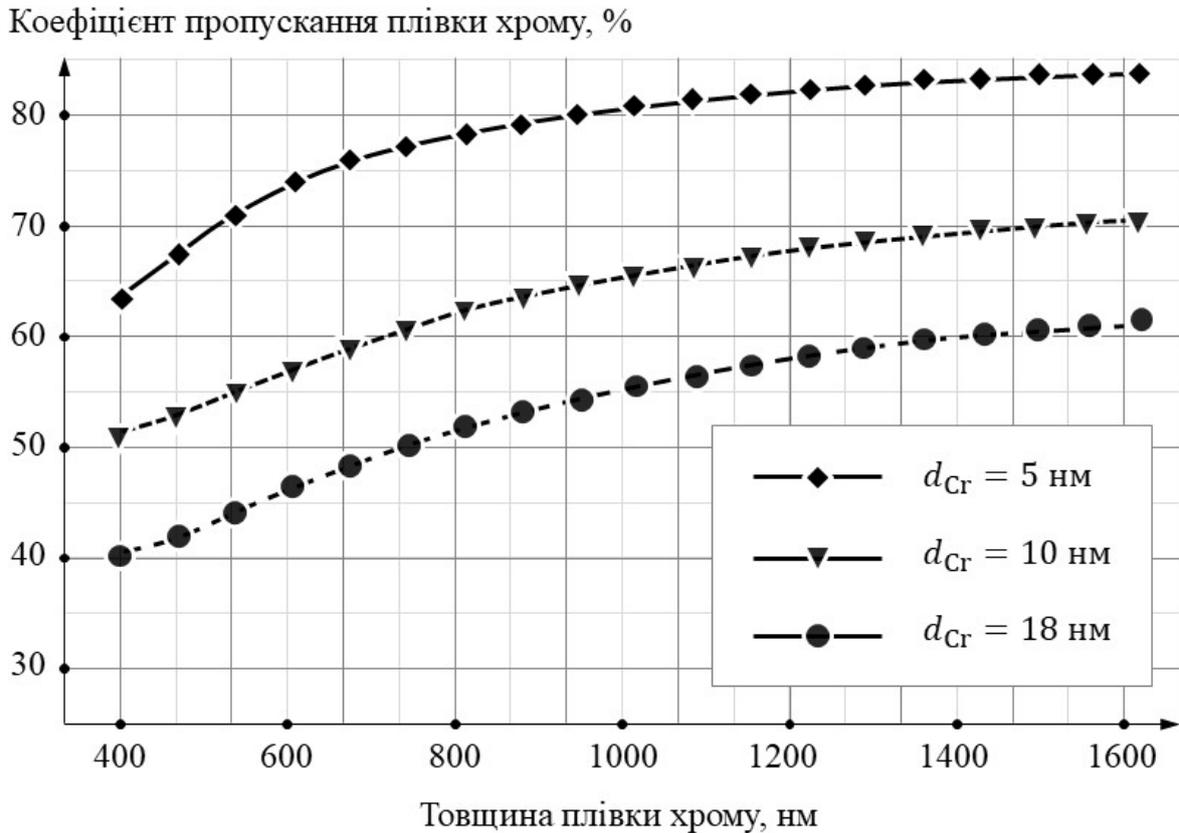


Рис. 6. Спектр пропускання надтонких плівок хрому, отриманих методом електронно-променевого напилення [17].

У рамках даного дослідження з метою формування модуляційних дисків енкодерів була розроблена двоетапна технологія напилення шару хрому товщиною $d_{Cr} \in [140 \text{ нм}; 180 \text{ нм}]$ із забезпеченням оптичної щільності на рівні 3,5 для довжини хвилі $\lambda = 1060 \text{ нм}$. На першому етапі підготовки фотошаблону проводилось напилення шару товщиною $d_{Cr} \in [60 \text{ нм}; 80 \text{ нм}]$ на вакуумній установці «ВУ-1А» з використанням підсистеми на основі резистивного вольфрамового випаровувача. Ступінь розрідження під час виконання процедури напилення складав $P = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$, а іонізаційна очистка поверхні проводилась при розрідженні на рівні $P = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ протягом 5 хв. Після цього була впроваджена процедура напилення. Вимірювання остаточного значення товщини шару хрому проводилось на мікроскопі-інтерферометрі Лінника «МП-4» при використанні червоного світлофільтра, з максимальним пропусканням на довжині хвилі $\lambda = 607 \text{ нм}$. Було виготовлено серію зразків плівки хрому товщиною $d_{Cr} \in [140 \text{ нм}; 160 \text{ нм}]$ при початковій товщині шару хрому $d_{Cr}^0 = 80 \text{ нм}$. Для відповідних зразків були досліджені параметри середньоквадратичної шорсткості Ra . Результати дослідження показали, що шорсткість скляної підкладки становила $Ra = 1,026 \text{ нм}$, шорсткість базового шару хрому товщиною 80 нм становила $Ra = 1,250 \text{ нм}$, шорсткість напиленого на установці ВУ-1А шару хрому становила $Ra = 1,203 \text{ нм}$ (рис.7).

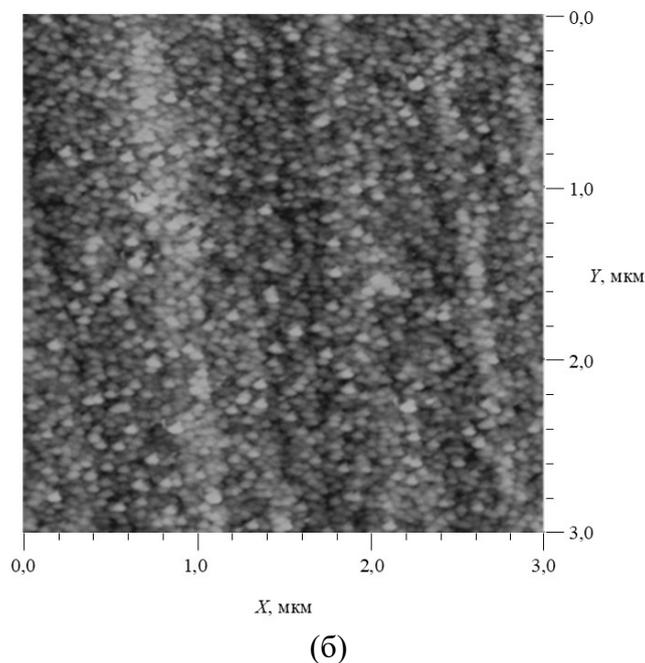
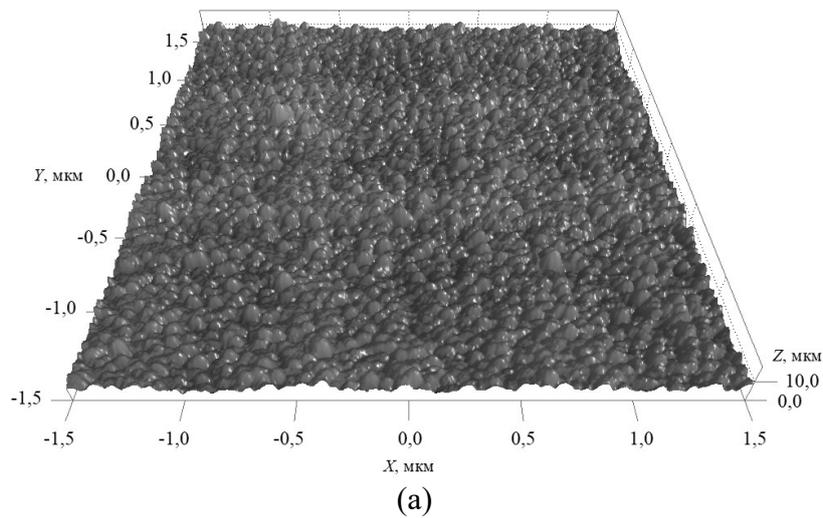


Рис. 7. Мікрофотографії фотошаблону енкодера, отримані на атомно-силового мікроскопі: (а) мікрорельєф; (б) структура поверхні.

Результати дослідження показали, що шорсткість скляної підкладки становила $Ra = 1,026$ нм, шорсткість базового шару хрому товщиною 80 нм становила $Ra = 1,250$ нм, шорсткість напиленого на установці ВУ-1А шару хрому становила $Ra = 1,203$ нм (рис.7). Запропонована технологія дозволила отримати плівки шару хрому товщиною $d_{Cr} \in [150 \text{ нм}; 250 \text{ нм}]$ з оптичною щільністю у діапазоні $\kappa_{OD} \in [3,5; 4,0]$ з низькою шорсткістю поверхні плівки. При напиленні плівок хрому значна увага приділялась отриманню плівок з високою адгезією до скляної підкладки. Використовувались два режими: у першому здійснювалось нагрівання підкладки до початку процесу напилення до температури $T \in [120^\circ\text{C}; 150^\circ\text{C}]$, у другому режимі нагрівання здійснювалось в процесі плазмового очищення та нагріванням підкладки під час резистивного напилення плівки хрому. Обидва режими забезпечували необхідну величину адгезії плівок хрому до підкладки із силікатного скла.

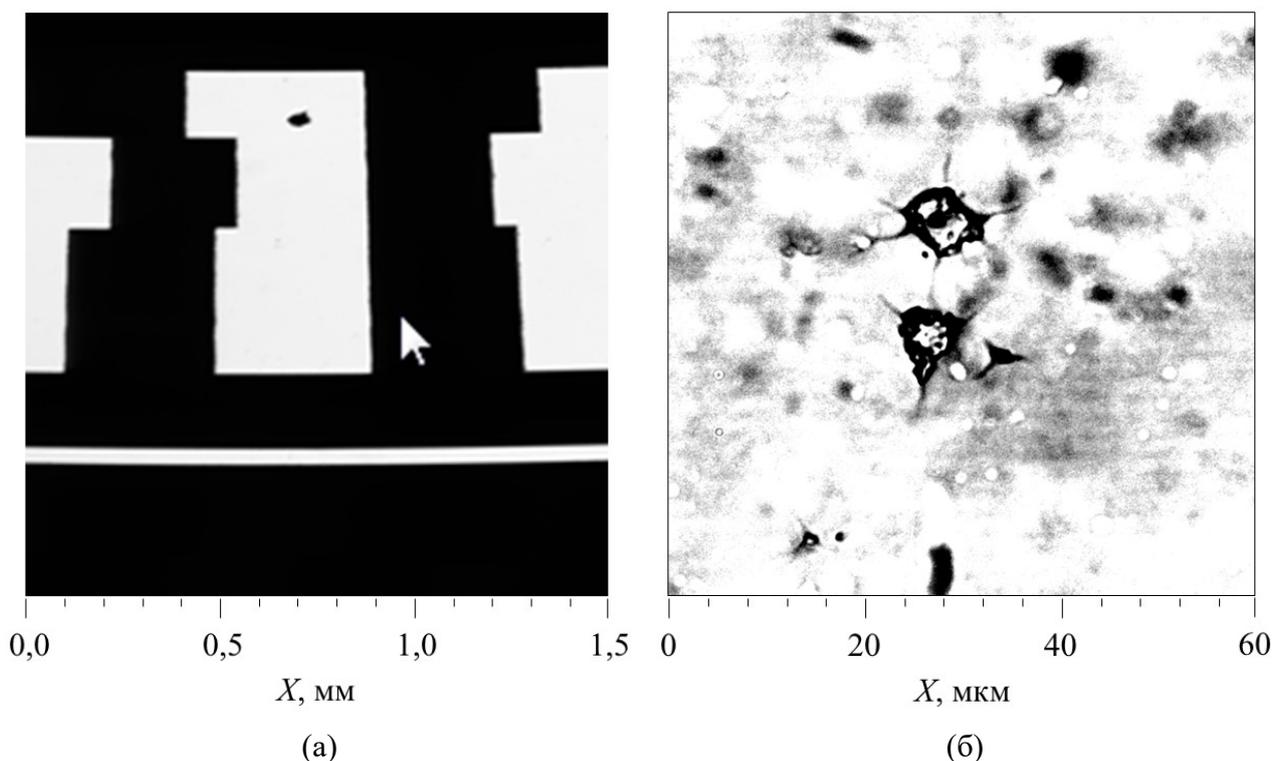


Рис. 8. Мікрображення дефектів плівки хрому:(а) прокол пов'язаний з пилом на поверхні,б) дефект пов'язаний зі сколом на поверхні.

Зазначено, що значний вплив на характеристики плівок хрому має якість очищення підкладок перед нанесенням плівки хрому. Основним завданням формування плівки хрому є забезпечення мінімальної кількості дефектів. Дефекти на підкладках з шаром хрому виникають, головним чином, внаслідок порушень технології очищення скляних підкладок перед нанесенням шару хрому та вакуумної гігієни при виконанні технологічних операцій з нанесення шару хрому. Пилкові частинки призводять до появи дефектів плівки у вигляді проколів з рівними краями (рис.8а), причому лінійний розмір проколу становить $s \in [2 \text{ мкм}; 20 \text{ мкм}]$. У свою чергу, дефекти підкладки типу сколів призводять до проколів фотошаблону, форма яких показана на рис.8б. Водночас за товщини плівки хрому $d_{Cr} \in [150 \text{ нм}; 200 \text{ нм}]$ плівки характеризуються значними механічними напруженнями, які можуть призводити до локального відшаровування плівки хрому. При цьому після хімічної обробки фотошаблону виникають проколи з діаметром у межах $s \in [10 \text{ мкм}; 100 \text{ мкм}]$. Наявність таких дефектів є неприпустимою і необхідно обирати режими вакуумного напилення, які дозволяють отримувати плівки з мінімальним рівнем внутрішніх напружень.

Останній етап дослідження методів осадження тонкої плівки хрому показав, що фотошаблони товщиною $d_{Cr} > 300 \text{ нм}$ характеризуються блочною структурою, характерні зразки якої були отримані із застосуванням засобів мікроскопічного контролю за допомогою мікроскопу «Neophot-2» (рис.9). Механічні напруження у відповідних структурах призводять до виникнення характерних проколів, що представлені на рис.10. Частина дефектів пов'язана з наявністю ділянок розміру $s < 200 \text{ мкм}$, з меншою оптичною щільністю, що призводить до проникнення світла при експонуванні. Глибина відповідних дефектів складає $d = 30 \text{ нм}$, причому їх розташування та розмір не пов'язані зі зміною хімічного складу та різницею градієнта напруги у фотолітографічному процесі [25].

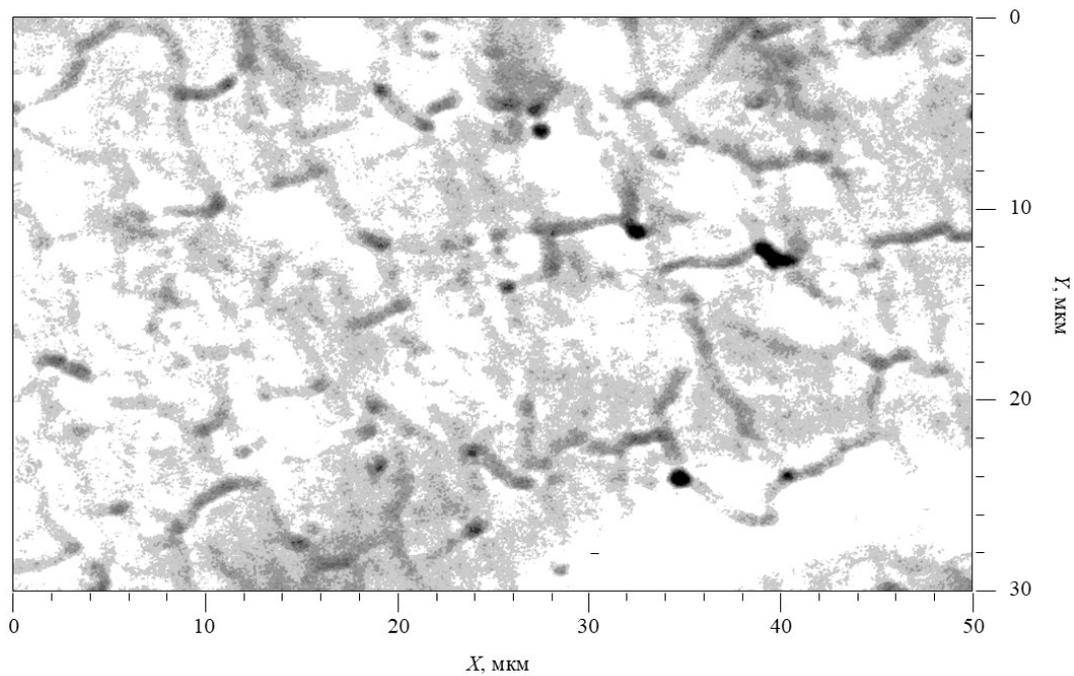


Рис. 9. Мікрображення блочної структури плівки хрому[25].

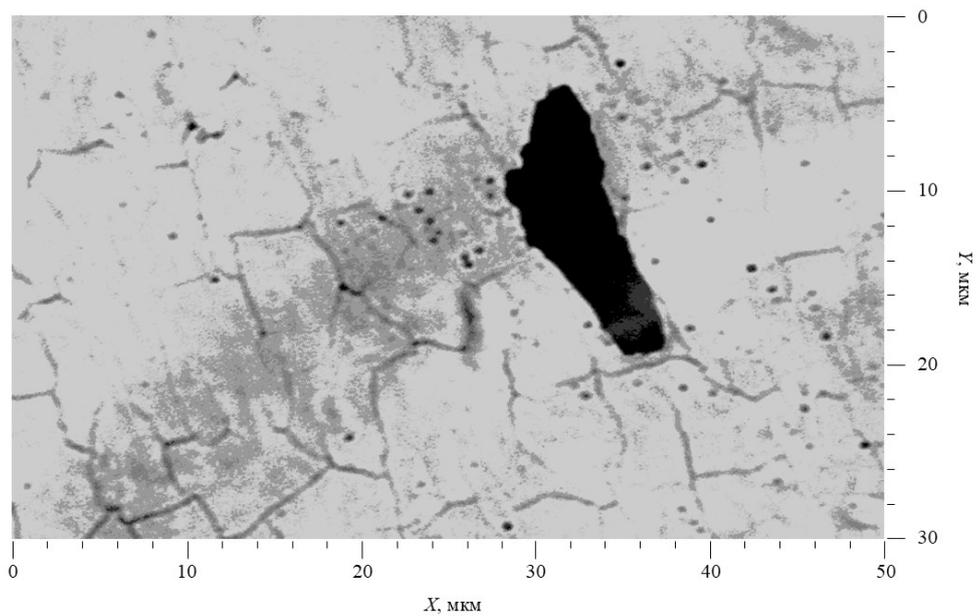


Рис. 10. Прокол у плівці хрому з блочною структурою [25].

Слід відзначити, що на якість фотошаблонів також впливають параметри підкладки. Плівки хрому, нанесені на підкладки з високими значеннями твердості, мають кращу оптичну прозорість [26], а площинність підкладки фотошаблону впливає на точність формування патерну високої роздільної здатності [27].

4. ВИСНОВКИ

Проведено аналіз особливостей нанесення хромових плівок при виготовленні фотошаблонів та кодових дисків, що використовуються у фотоелектричних вимірювальних системах, та отримано такі результати:

1. Визначено залежність коефіцієнта пропускання ультрафіолетового випромінювання від товщини хромового шару, що дозволяє сформулювати методологічні рекомендації для фотолітографічного виробництва. Проведено порівняння спектрів поглинання фотошаблонів та визначено показники ефективності для широкого діапазону довжин хвиль джерела експонування.
2. Оцінено продуктивність використання джерел інфрачервоного випромінювання для експонування фотошаблонів модуляційних дисків енкодерів, встановлено переваги у стабільності процесу експонування, зниженні енергоспоживання та собівартості фотолітографічного комплексу. Проаналізовано необхідність збільшення товщини хромової плівки для компенсації зниженого рівня поглинання у довгохвильовій частині спектра, що підтверджено аналізом спектрів поглинання.
3. Розглянуто вплив технологій осадження тонких плівок хрому на параметри фотошаблонів, зокрема, мікроструктуру, оптичні та електрофізичні характеристики. Проаналізовано методи фізичного та хімічного осадження з парової фази, а також електронно-променевого напилення, що використовуються для формування хромових плівок різної товщини.
4. Встановлено вплив технологічних параметрів процесу осадження на стовпчасту мікроструктуру, коефіцієнти відбивання, поглинання та питомий опір. Показано, що хромові плівки можуть бути альтернативою прозорим електропровідним оксидам завдяки кращій електропровідності, стабільності властивостей та стійкості до агресивних умов експлуатації.
5. Розроблено двоетапну технологію напилення хромових плівок, що забезпечує високу оптичну щільність та низьку шорсткість поверхні. Визначено оптимальні режими формування плівок для покращення їх адгезії до скляної підкладки, що забезпечує стабільні параметри покриття у фотошаблоні. Показано, що якість очищення підкладок та контроль технологічних параметрів мають вирішальне значення для формування дефектів у хромових плівках.

Подяка

Автори висловлюють глибоку подяку Національному фонду досліджень України за фінансову підтримку у рамках проєкту №2023.04/0004.

O.V. Shikhovets, V.M. Rubish, S.O. Kostyukevych, E.V. Belyak, D.Yu. Manko, A.A. Kryuchyn

The peculiarities of applying chromium melts during the preparation of photomasks and code disks that are used in photovoltaic dimming systems were investigated. It has been noted that the procedure of applying thin chrome flakes on the lining gap can have a wide range of hardening effects in photolithography and microprocessing of the surface, which implies the relevance of improving this type of technology to ensure the possibility of equal to the technical department. In this case, the optical power of chromium melts was investigated in the context of organizing a photolithographic procedure. The presence of the transmittance coefficient of ultraviolet vibration in the chromium ball was determined, which allows us to formulate methodological recommendations for photolithographic production. The application of the chromium deposition method to its optical characteristics is examined, as well as the deposition spectra of current photomasks are aligned, with significant indicators of effectiveness for a wide range of exposures. An assessment was made of the productivity of the high-speed infrared worm gear for exposing photomasks of modulation disks of encoders. It has been shown that stagnation of infrared cores ensures stability of the exposure process and

reduces the energy consumption and performance of the photolithographic complex. Nowadays, it has been identified that there is a need to increase the thickness of the chrome molten material to compensate for the reduced level of claying in the low-voltage part of the spectrum, which is confirmed by the analysis of the claying spectra for various types of spittle. The influence of the technology of deposition of thin chromium slabs on the parameters of photomasks, spectacle, microstructure, optical and electrical characteristics was also examined. The methods of physical vapor deposition, chemical vapor deposition and electron-metal deposition, which are used for forming chrome smelts of various materials, are analyzed. The integration of process parameters into the microstructure, beating coefficients, polishing and pitomy operations was observed. It is shown that chromium films can serve as an alternative to transparent conductive oxides due to better electrical conductivity, stability of properties and resistance to aggressive operating conditions. A two-stage technology for sputtering chromium films has been developed to ensure high optical density and low surface roughness. Optimal film formation modes have been determined to improve their adhesion to the glass substrate. The proposed approach provides stable coating parameters for use in photomasks. It is noted that the quality of substrate cleaning and control of technological parameters are of key importance for the formation of defects in chromium films. It is found that mechanical stresses and contamination can cause punctures, local delamination and changes in optical density. Optimal sputtering modes are proposed that minimize internal stresses and improve the quality of photomasks.

1. Regelskis K., Račiukaitis G., & Gedvilas M. Ripple formation in the chromium thin film during laser ablation. *Applied Surface Science*. 2007.**253**, №15. P.6584-6587. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.01.048>.
2. Rauf A., Ahmed K., Nasim F., Khan A. N., & Gul, A. Optical and structural properties of Cr and Ag thin films deposited on glass substrate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016.**146**. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/146/1/012013>.
3. Lei L., Liang L., Liu L., Shen Y., Guan Y., Zhang Y., Zou W., Guo C., & Fu Y. A study on length traceability and diffraction efficiency of chromium gratings. *Photonics*. 2024.**11**, №3. P.233. <https://doi.org/10.3390/photonics11030233>.
4. Huang Y., Yang Y., Liang J., Miao Z., Zhao M., & Zheng, Y. An optical glass plane angle measuring system with photoelectric autocollimator. *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2019.**2**, №2. P. 71-76. <https://doi.org/10.1016/j.npe.2019.06.001>.
5. Wavrunek T., Ball S., Gotto Z., & White B. An Adhesion-based Alternative to Solvent Processing in Microfabrication. *Proceedings of The National Conference On Undergraduate Research (NCUR) Montana State University*.2020. <https://libjournals.unca.edu/ncur/wp-content/uploads/2021/01/3238-Trevor-Wavrunek-FINAL.pdf>.
6. Hossain N., Justice J., Lovera P., McCarthy B., O’Riordan A., & Corbett B. High aspect ratio nanofabrication of photonic crystal structures on glass wafers using chrome as hard mask. *Nanotechnology*.2014.**25**, №35. P.355301. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/35/355301>.
7. Lee S.H., Seo S.E., Kim K.H., Lee J., Park C.S., Jun B.-H., Park S. J., & Kwon O.S. Single Photomask lithography for shape modulation of micropatterns. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020. **84**. P.196-201. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.12.034>.
8. Atthi N. & Jeamsaksiri W., Aramphongphun Ch., & Jantawong J., Hruanun Ch. Poyai, A. The Influence of Chromium Film Thickness on Photomask on Light Transmission for 3D-Lithography Application. *Conference:German-Thai Symposium on Nanoscience and Nanotechnology (GTSNN-2007)*. <https://www.researchgate.net/publication>.
9. Ekinici H., Soltani M., Jahed M.S.N., Zhu Cui X.B., Pushin D. Effect of annealing on the structural, optical and surface properties of chromium oxide (Cr₂O₃) thin films deposited by e-beam evaporation for plasma etching applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. **875**. P.160087. ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160087>.
10. Aydinoglu F., Saffih F., Dey R., & Cui B. Chromium oxide as a hard mask material better than metallic chromium. *Journal of Vacuum Science & Technology B Nanotechnology and Microelectronics Materials Processing Measurement and Phenomena*.2017. **35**, №6. <https://doi.org/10.1116/1.4998480>.
11. Dey R., Ekinici H., & Cui B. Effects of mask material conductivity on lateral undercut etching in silicon nano-pillar fabrication. *Journal of Vacuum Science & Technology B Nanotechnology and Microelectronics Materials Processing Measurement and Phenomena*. 2020. **38**, №1. <https://doi.org/10.1116/1.5123601>.
12. Dan L. Schurz, Warren W. Flack, and Makoto Nakamura. High-optical-density photomasks for large exposure applications. Proc. SPIE 4186, 20th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology. 22 January 2001; <https://doi.org/10.1117/12.410770>.
13. Sahu V., Dewangan P., Vardhan R.V. et al. A study on chromium thin film with positive photoresist as a masking layer towards the wet bulk micromachining of Borofloat glass. *Micro and Nano Syst. Lett.* 2024.**12**, №12. <https://doi.org/10.1186/s40486-024-00201-5>.

14. Schurz D. L., Flack W. W., & Nakamura M. High-optical-density photomasks for large exposure applications. *SPIE Proceedings*. 2001.**4186**.869. <https://doi.org/10.1117/12.410770>.
15. Glenn S. Chrome Photomask specifications. JD Photo Data. 2019. <https://www.jd-photodata.co.uk/chrome-photomask-specifications>.
16. Tranca D. E., Sobetkii A., Hristu R., Anton S. R., Stanciu S. G., Fiorentis E., Vasile E., Banica C. K., & Stanciu G. A. Mechanical and optical investigations of CR thin films deposited on si substrate. *2023. 23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/icton59386.2023.10207526>.
17. Lozanova V., Lalova A., Soserov L., & Todorov R. Optical and electrical properties of very thin chromium films for optoelectronic devices. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014.**514**.012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/514/1/012003>.
18. Katrova V., Atanasova A., Hristova-Vasileva T., & Todorov R. Application of cold clusters as a template for control of the columnar microstructure of thin silver films and their plasmonic properties. *Frontiers in Optics / Laser Science*. 2020. <https://doi.org/10.1364/fio.2020.jth4a.27>.
19. Gedvilas M., Voisiat B., Regelskis K., Raciukaitis G. Impact of capillarity forces on the steady-state self-organization in the thin chromium film on glass under laser irradiation. *Thin Solid Films*. 2014.**571**. DOI: 10.1016/j.tsf.2014.09.047.
20. Ferreira A. A., Silva F. J., Pinto A. G., & Sousa V. F. Characterization of thin chromium coatings produced by PVD sputtering for optical applications. *Coatings*. 2021. **11**, №2. P.215. <https://doi.org/10.3390/coatings11020215>.
21. Alkhazali A., Hamasha S., Hamasha M. M., Khaled H., & Massadeh R. Crack development and electrical degradation in chromium thin films under tensile stress on pet substrates. *Coatings*. 2024. **14**, №11. P. 1403. <https://doi.org/10.3390/coatings14111403>.
22. Ivanova T., Surtchev M., & Gesheva K. Characterization of cvd chromium oxide thin films. *Physica Status Solidi (A)*. 2001.**184**, №2. P. 507-513. [https://doi.org/10.1002/1521-396X\(200104\)184:2%3C507::AID-PSSA507%3E3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/1521-396X(200104)184:2%3C507::AID-PSSA507%3E3.0.CO;2-O).
23. Kariper I.A. Synthesis and characterization of CRSE thin film produced via Chemical Bath Deposition. *Optical Review*. 2017. **24**, №2. P.139-146. <https://doi.org/10.1007/s10043-017-0307-1>.
24. Hsia L.C. Applications of optical properties of sputtered chromium thin films in Photomask making. *Journal of The Electrochemical Society*. 1984. **131**, №9. P. 2133-2137. <https://doi.org/10.1149/1.2116034>.
25. Kostelak R. Analysis of "Thin chrome" on photomasks. *Bay Area Chrome Users Society Symposium*. 2023.7. <https://doi.org/10.1117/12.3011918>.
26. Garratt E., AlFaify S., Yoshitake T., Katamune Y., Bowden M., Nandasiri M., Ghantasala M., Mancini D. C., Thevuthasan S., & Kayani A. Effect of chromium underlayer on the properties of nano-crystalline diamond films. *Applied Physics Letter*. 2013. **102**, №1. <https://doi.org/10.1063/1.4774086>.
27. Algirdas L., & Viktoras G. Float glass surface preparation methods for improved chromium film adhesive bonding | glassonweb.com. *Glass on Web*. 2013. <https://www.glassonweb.com/article/float-glass-surface-preparation-methods-improved-chromium-film-adhesive-bonding>.

¹Інститут проблем реєстрації інформації
НАН України, 2, вул. М. Шпака,
03113 Київ, Україна
kryuchun@gmail.com

Отримано: 26.05.2025

²Інститут фізики напівпровідників
ім. В.С. Лашкарьова НАН України,
41, просп. Науки, 03028 Київ, Україна
skostyukevych@gmail.com