

DOI: 10.35681/1560-9189.2019.21.4.199188

УДК 004.85

**В. В. Петров, А. А. Крючин, В. М. Рубіш,  
О. В. Шиховець, С. А. Міхальченко**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

## **Високотемпературні відбивальні покриття для носіїв довготривалого зберігання даних**

*Представлено результати аналізу технологій створення та властивостей високотемпературних відбивальних покриттів для носіїв довготривалого зберігання даних. Показано, що перспективними матеріалами для таких покриттів є тонкі плівки на основі нітридів перехідних металів і металів платинової групи. Особливу увагу приділено фізичним методам отримання високотемпературних оптично однорідних покриттів. Показано, що як відбивальні покриття для оптичних носіїв може бути використано одержані магнетронним розпиленням плівки хрому та нітридів Cr, Ti, Zr та Hf.*

**Ключові слова:** оптичні носії інформації, довготривале зберігання даних, нітриди, високотемпературні відбивальні покриття.

### **Вступ**

Для отримання визначеного значення сигналу зчитування у більшості оптичних носіїв інформації використовуються металеві відбивальні покриття, характеристики яких суттєво впливають на термін служби носіїв інформації. Оптичні носії інформації зі срібними і алюмінієвими відбивальними покриттями, які використовуються у більшості компакт-дисків, не можуть забезпечити тривалий термін зберігання записаної інформації. Для створення носіїв інформації довготривалого зберігання даних, в яких використовуються підкладки з високостабільних матеріалів (сапфір, кварц та ін.), повинні застосовуватися спеціальні високотемпературні відбивальні покриття, які би витримували короткочасний вплив підвищених температур порядку 1000 °С [1, 2]. Аналіз науково-технічної літератури показав, що перспективними матеріалами для створення жароміцних відбивальних покриттів є металеві плівки сплавів платини [3, 4], хрому [5, 6] і нітридів перехідних металів [8]. У [3] для створення високотемпературних відбивальних покриттів запропоновано використовувати плівки ZrPt<sub>3</sub>. Вибір цієї інтерметалевої сполуки для створення відбивального покриття обумовлений високим значенням її температури плавлення (>2190 °С) [3]. На основі ZrPt<sub>3</sub> було створено високотемпературні та

© В. В. Петров, А. А. Крючин, В. М. Рубіш, О. В. Шиховець, С. А. Міхальченко

стійкі до окислення покриття для вуглецевих композиційних матеріалів, які широко використовуються в аерокосмічній промисловості. Наявні на даний час стійкі до окислення покриття, на жаль, не здатні протистояти екстремальним температурам ( $>2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [3].

Як відбивальні покриття широко використовуються плівки хрому [5, 6]. Хромове покриття може ефективно захистити трубки із Zr від високотемпературного окислення на повітрі протягом однієї години. В такому покритті при окисленні за температури  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  утворюється оксидний шар  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  товщиною 5 мкм, який перешкоджає подальшому проникненню кисню у покриття [6].

Тонкі плівки тугоплавких нітридів перехідних металів завдяки своїм специфічним фізико-механічним властивостям (високі твердість, абразивна здатність, тугоплавкість, пластичність при високих температурах та ін.) досить широко застосовуються як спеціальні покриття в багатьох галузях техніки, наприклад, як декоративні покриття, покриття для зміцнення ріжучого інструменту та формування дифузійних бар'єрів при виробництві інтегральних схем. Крім того, тонкі плівки тугоплавких нітридів перехідних металів можуть знайти широке використання в навігаційно-приладових комплексах, ширококуглових системах електромагнітного захисту, високотемпературних паливних елементах [9–12].

Значна частина нітридів характеризується гетеродесмічністю хімічного зв'язку з широкими межами варіювання долі різних типів цього зв'язку [13]. Цьому відповідає зміна характеру та значень фізичних і хімічних властивостей. Так, якщо нітриди неметалів є переважно ковалентними сполуками класу діелектриків, а нітриди перехідних металів з дефіцитом азоту та деякі нітриди граничного складу (наприклад, нітрид хрому) можуть мати напівпровідникові властивості зі змішаним іонно-ковалентно-металевим типом зв'язку, то значна частина нітридів перехідних металів граничного складу по азоту ближче за своїми властивостями до металевих речовин [13].

До нітридів перехідних металів відносяться нітриди металів IV (TiN, ZrN, HfN), V (VN, NbN, TaN) та VI (CrN, MoN, WN) груп. Для цих сполук характерним є утворення ними фаз впровадження (проникнення), причому характерною рисою тугоплавких сполук, які побудовані за типом фаз-впровадження, є здатність утворювати дефектні структури з дефіцитом атомів неметалу в решітці. При утворенні таких дефектних структур до певного вмісту азоту будова залишається незмінною. Змінюється тільки параметр відповідної кристалічної решітки та фізичні властивості сплаву [13]. Наприклад, у нітридах Ti параметри решітки зростають при насиченні азотом впритул до складу TiN, а у нітридів Zr та Hf при збільшенні вмісту азоту — зменшуються. Найбільші значення періодів решітки  $\text{ZrN}_x$  та  $\text{HfN}_x$  відповідають фазам з мінімальним вмістом N.

На теперішній час найбільш вивченими серед нітридів металів IV групи є нітрид титану та плівки на його основі, що отримані як за допомогою фізичних, так і за допомогою хімічних методів осадження. Властивості TiN сильно залежать від кількості азоту в нітриді та від швидкості осадження покриття. При високій швидкості осадження може бути отримана дуже дрібнозерниста а, отже, дуже спотворена структура, яка містить метастабільні фази. При низьких швидкостях осадження формується луската структура. Мікротвердість плівок TiN, залежно від вмісту азоту та структурних особливостей, змінюється в межах 20–40 ГПа. Велика твер-

дість конденсованого TiN є наслідком високого рівня внутрішніх напружень, які становлять  $10^9$ – $10^{10}$  Па для покриттів, що отримані фізичними методами. Наявність таких напружень підтверджується збільшенням параметра решітки, який для стехіометричних плівок рівний 0,425 нм [13]. При цьому величина параметра решітки прямо пропорційна вмісту азоту і обернено пропорційна товщині плівки. Одним із недоліків, що обмежують перспективу використання таких покриттів, є їхня низька окислювальна стійкість. При нагріванні вище 550 °С на поверхні TiN починає рости крихкий з низькою адгезією шар оксиду титану у фазі рутилу, який швидко зменшує захисну стійкість покриття [14].

## Аналіз властивостей покриттів на основі плівок нітридів перехідних металів

Покриття з нітриду титану, які широко використовуються як захисні покриття, не можуть повністю задовольнити жорстким вимогам, що пред'являються до фізичних, хімічних і механічних властивостей багатофункціональних тонкоплівкових матеріалів. Введення до складу додаткових елементів дозволяє модифікувати його структуру і, як наслідок, сприяє підвищенню механічних і трибологічних властивостей покриттів, дозволяє підвищити їхню термічну стабільність, жаростійкість і корозійну стійкість. Кремній, бор і хром є одними із найбільш перспективних легуючих елементів. Введення до складу нітриду титану кремнію або бору призводить до значного зменшення розмірів кристалічних зерен і формування наноструктур, що мають комплекс унікальних характеристик [15]. Менш дослідженими є покриття з нітридів цирконію, які одержуються як за допомогою дугового випаровування, так і шляхом реактивного розпилення, хоча за деякими параметрами та можливостями практичного застосування (зміцнення ріжучого інструменту та формування дифузійних бар'єрів в інтегральних схемах) вони не поступаються TiN. Наприклад, значення мікротвердості конденсатів ZrN (26 ГПа) значно перевищує мікротвердість масивного нітриду цирконію (15 ГПа) [9]. Параметр кристалічної решітки плівок нітриду цирконію, що отримані реактивним розпиленням, зі збільшенням концентрації азоту зростає і при досягненні стехіометричного складу стає рівним значенню відповідного параметра масивного ZrN (0,456 нм). Нагадаємо, що в масивних нітридах цирконію при збільшенні вмісту азоту спостерігається зменшення параметру кристалічної решітки. Нітрид гафнію характеризується високими температурою плавлення, хімічною інертністю та стійкістю до окислення в екстремальних умовах [16].

З точки зору підвищення зносостійкості покриттів, значний інтерес викликають нітриди металів VI групи, які, на відміну від металів IV групи, мають меншу хімічну спорідненість до азоту. Це ускладнює одержання мононітридних плівок. Як правило, плівки CrN одержуються двофазними і містять фази Cr та Cr<sub>2</sub>N. Однак мікротвердість таких покриттів складає ~23 ГПа, що значно перевищує мікротвердість масивного матеріалу. Ще вищою (25 ГПа) є мікротвердість однофазних плівок нітриду хрому, які одержані реактивним магнетронним розпиленням [10]. Як однофазні, так і двофазні покриття з нітриду хрому характеризуються високою зносостійкістю.

В останні роки досліджуються багатоелементні нітриди, а також багатошарові системи, що мають високі механічні властивості. Серед численних систем,

сплави яких характеризуються високою твердістю, слід зазначити системи, які містять важкі елементи зі значною енергією зв'язку з азотом, зокрема, системи на основі Ti, V, Zr, Nb, Hf [17]. Перспективними, але мало вивченими, є тернарні нітриди типу TiZrSiN [10].

## Технології отримання тонких плівок перехідних металів

Нанесення тонких плівок перехідних металів у виді покриттів здійснюється двома основними методами — хімічного осадження покриттів (ХОП) та фізичного осадження покриттів (ФОП) [18]. При хімічному осадженні формування покриття здійснюється за рахунок хімічних реакцій між парогазовими сумішами, що складаються зі сполук металоносія і носія іншого компонента, який виконує одночасно роль газотранспортера та відновника. У процес формування покриття вносять внесок як структура поверхні матеріалу підкладки, так і гетеродифузійна реакція між конденсатом і матеріалом підкладки. Цей метод застосовується при нанесенні покриттів на основі карбідів, нітридів, карбонітридів титану та оксиду алюмінію. Метод ХОП реалізується при температурах 1000–1100 °С.

Найбільше розповсюдження при формуванні наноструктурованих покриттів нітридів перехідних металів одержали фізичні методи осадження: магнетронне розпилення та вакуумно-дугове осадження [9, 10, 18], причому найбільш ефективним є метод магнетронного розпилення. Цей метод, за рахунок зміни технологічних параметрів (температура підкладки, напруга зміщення, концентрація легуючих елементів, парціальний тиск реакційного газу), дозволяє досить легко керувати фазовим складом і структурою покриттів. В останні роки можливості методу магнетронного розпилення істотно розширилися за рахунок застосування нового класу композиційних мішеней, одержуваних методом високотемпературного синтезу (СВС). СВС-компактування дає широкий спектр різних мішеней на основі кераміки, металокераміки та інтерметалідів. Для успішного застосування технології магнетронного розпилення необхідні розробка нових перспективних складів композиційних СВС-мішеней, а також встановлення взаємозв'язку між параметрами осадження, структурою та властивостями покриттів [19].

## Аналіз методів збільшення жаростійкості плівок перехідних металів

Висока термічна стабільність властивостей і висока температурна стійкість до окислення (жаростійкість) є одними із найбільш привабливих властивостей твердих нанокompозитних покриттів. Зазначимо, що жаростійкість характеризується деякою критичною температурою, вище якої відбувається повне окислення та руйнування покриття. Ці характеристики сильно залежать від фазового складу та термічної стабільності окремих фаз, що беруть участь у формуванні плівки.

Залежно від хімічного складу жаростійкість плівок змінюється у широких межах: від 400 °С для TiC і 650 °С для TiN до 850 °С для (TiAl)N та 930 °С для (Ti, Al, Y)N [10]. Такого ж порядку (950–1000 °С) і значення жаростійкості плівок системи Me-Si-N (Me-Ti, Zr, Cr, W, Ta, Mo, Nb) та нанокompозитів *нк*-TiN/*a*-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (*нк* і *a* позначають нанокристалічні і аморфні фази, відповідно) з низьким (≤10 ат.%) вмістом кремнію. Особливий інтерес викликає композиційне покриття (Ti, Al)N,

яке має таку ж структуру (кубічну) як і TiN, але менший період решітки і більшу твердість. Покриття з такого матеріалу стабільне при температурах 710–830 °С. У той же час TiN починає окислюватися при 550 °С. Пояснюється це тим, що на поверхні (Ti, Al)N формується захисний шар Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, який запобігає подальшому окисленню плівки. Довговічність ріжучого інструменту з покриттям з (Ti, Al)N значно перевершує (у 3–3,5 рази) довговічність інструменту з нітридотитановим шаром [20]. Аналіз літературних даних показав, що зносостійкість, термостабільність і стійкість до окислення розглянутих покриттів не високі і суттєво залежать від способу отримання покриття та концентрації реагентів у ньому. При переході від нітридів металів IV групи до нітридів металів V та особливо VI груп стійкість до високотемпературного окислення знижується [21].

Як уже відмічалось, одним із найбільш важливих параметрів покриттів на основі тугоплавких нітридів перехідних металів є твердість. Однак високі значення цього параметра при кімнатних температурах у багатьох випадках недостатні для вибору того чи іншого матеріалу для конкретного застосування. При високих температурах твердість плівок може суттєво змінюватися [13]. Наприклад, у плівках Ti-B-N твердість при 1000 °С дещо нижча, ніж при 800 °С, однак залишається доволі високою. В той же час для покриттів Ti-Cr-B-N високі значення твердості зберігаються впритул до 1000 °С. Екстремальний характер температурної залежності твердості покриттів з Ti-B-N добре узгоджується з раніше отриманими результатами про наявність піку твердості плівок Ti-Al-Si-N та W-Si-N при 800 °С і 900–950 °С, відповідно [13]. При більш високих температурах відбувається окислення плівок і їхнього руйнування. Відповідно, при виборі матеріалу покриття для того чи іншого застосування необхідно враховувати комбінацію твердості та жаростійкості.

Як було показано вище, більшість плівок нітридів перехідних металів володіє порівняно низькою жаростійкістю. Це обумовлено особливостями їхньої структури. Плівки нітридів перехідних металів характеризуються полікристалічною, колумнарною мікроструктурою [6, 7, 12]. Такі структури забезпечують прямий доступ кисню за механізмом поверхневої реакційної дифузії по границях розділу зерен або колон до підкладки.

Ефективним способом підвищення жаростійкості покриттів є усунення колумнарної структури та неперервності переходів між границями зерен від самої поверхні покриття і аж до підкладки. Цього можна досягнути шляхом створення щільної композитної структури, в якій кристаліти знаходяться в аморфній матриці, що містить елементи (Si, Al, Cr, B) з високою хімічною спорідненістю до кисню. Цим вимогам повною мірою відповідають композити *нк*-TiN/*a*-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> з високим (≥50 об.%) вмістом аморфної фази Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [10, 12]. Такі покриття мають високу жаростійкість (~1000 °С), а їхня твердість досягає 40 ГПа. Відмітимо, що максимальна величина твердості досягається у випадку, коли розмір нанокристалів TiN ≈10 нм або менше. У свою чергу, розмір нанокристалів нітриду титану визначається вмістом аморфної фази Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Відповідно, максимальне значення твердості покриттів *нк*-TiN/*a*-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> досягається за відносно низької концентрації кремнію (8–10 ат.%) у їхньому складі. Ще вищу стійкість до високотемпературного окислення показали нанокомпозитні покриття *нк*-TiN/*a*-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> з високим (>55 об.%) вмістом аморфної фази Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Дослідження показали [9], що такі покриття проявляють високу жаростійкість у потоці повітря, нагрітому вище 1300 °С.

Високою жаростійкістю вирізняються і нанокompозитні покриття в системах Ti-B-N, Ti-C-B, Ti-Si-B-N, Ti-Si-C-N, Ti-Al-C-N, в яких в ролі аморфної матриці виступають фази  $a$ -BN,  $a$ -B<sub>4</sub>C,  $a$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> і  $a$ -AlN [15]. При збільшенні вмісту цих аморфних фаз у складі нанокompозитів підвищується термічна стабільність наноструктурного стану, а на поверхні покриттів утворюються бар'єрні захисні оксидні плівки, які перешкоджають проникненню кисню до підкладки. Наприклад, у наноструктурних плівках системи титан-алюміній-вуглець-азот, кисень розчиняється в гранецентрованій кубічній решітці (Ti, Al)<sub>1-x</sub>(C, N)<sub>x</sub>. При вищій температурі (~1000 °C) алюміній дифундує до поверхні плівки. Формується захисний шар Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, який перешкоджає подальшому окисленню плівки.

Вище відмічалось, що покриття з TiN уже при 550 °C окислюються. При цьому глибина окислення складає ~800 нм. При введенні до нітриду титану аморфуючих елементів (Si, Al, B) стійкість до окислення покриттів підвищується, причому жаростійкість покриттів зростає в ряду Ti-B-N→Ti-Si-B-N→Ti-Cr-B-N→Ti-Al-Si-B-N

Відмітимо, що в цьому ряду найбільшою стійкістю до високотемпературного окислення володіють покриття Ti-Cr-B-N та Ti-Al-Si-B-N [15]. Глибина проникнення кисню в покриття після відпалу при 800 °C не перевищує 800 нм. Висока жаростійкість цих покриттів обумовлена формуванням на їхній поверхні захисних шарів на основі оксидів (Ti, Cr)VO<sub>3</sub> та Ti<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>SiO<sub>z</sub> [14].

### **Багатошарові покриття на основі тонких плівок нітридів перехідних металів**

Значний інтерес, з точки зору можливостей практичного застосування нітридів перехідних металів, представляють багатошарові покриття на їхній основі. Такі складні тонкоплівкові системи, які формуються шляхом контрольованого чергового осадження двох матеріалів, дозволяють отримувати наноструктуровані об'єкти, що мають низку властивостей, які визначаються складом, кількістю та товщиною осаджуваних шарів. У [22] методом вакуумно-дугового осадження на сталеву підкладку шляхом почергового напилення нітридів титану та цирконію, було отримано багатошарові (60–300 шарів) тонкоплівкові композити TiN/ZrN і досліджено вплив товщини одного шару на структурні, фізичні та механічні властивості цих багатошарових покриттів. Було показано, що сформовані багатошарові покриття представляють собою системи, які складаються з шарів стехіометричних нітридів титану та цирконію, що чергуються, з постійною товщиною шару від 10 до 50 нм і переважною орієнтацією росту монокристалів (111). Покриття мають стовпчастий характер росту з поперечним розміром нанокристалів ~55 нм. Зі зменшенням товщини шару відбувається подрібнення стовпчиків (до 8 нм), яке супроводжується збільшенням внутрішніх стискаючих напружень (до 15 ГПа). Крім цього, така багатошарова система характеризується підвищеною твердістю (29 ГПа) і меншим модулем пружності (291 ГПа) порівняно з мононітридними покриттями TiN (20 ГПа і 450 ГПа, відповідно).

Високі мікротвердість і термостійкість до окислення у повітряному потоці при температурах ~1500 °C мають і нанокристалічні покриття, що отримані магнетронним розпиленням легованого кремнієм нітриду молібдену [23].

Більш детальні дослідження нанокompозитів  $nk\text{-MoN}_x/a\text{-Si}_3\text{N}_4$  показали, що покриття з більшим (>60 %) об'ємним вмістом аморфної фази  $\text{Si}_3\text{N}_4$  володіють високою жаростійкістю при температурах, суттєво вищих 1000 °C, і достатньо високою твердістю (>25 ГПа) [23].

Проведений аналіз літературних даних щодо одержання та властивостей покриттів (відбивальних, з високою твердістю та стійкістю до окислення, зносостійких) на основі тугоплавких нітридів перехідних металів показав, що значення їхніх параметрів і характеристик значною мірою визначаються елементним складом покриттів, вибором легуючих елементів та технологічними умовами їхнього одержання. Незважаючи на широке практичне застосування різноманітних покриттів на основі нітридів перехідних металів, питання про оптимальний вибір співвідношення концентрацій компонентів у різноманітних покриттях і умов їхнього формування залишається відкритим і обумовлює проведення подальших досліджень, оскільки зростає необхідність серійного відтворення нанокompозитних покриттів із заданими властивостями. Таким чином, синтез нанокompозитних плівок на основі сполук перехідних металів, вивчення закономірностей формування фазово-структурних станів і пояснення природи отриманих фізико-механічних характеристик, є одними із найбільш важливих і перспективних напрямків розвитку нанотехнологій та отримання нових матеріалів.

## Результати експериментальних досліджень

З метою встановлення можливості використання плівок перехідних металів як відбивальних покриттів для носіїв довготривалого зберігання даних в умовах підвищених температур досліджено залежності їхнього коефіцієнта відбивання від температури.

Нанесення плівок хрому та нітридів перехідних металів проводилося методом магнетронного розпилення на поліровані підкладки з боросилікатного скла, плавленого кварцу та сапфіру. Товщина плівок хрому та нітридів металів складала ~1 мкм. Характерною особливістю напилених плівок була наявність крапель на поверхні плівок. Типову ділянку поверхні плівки нітриду титану наведено на рис. 1.

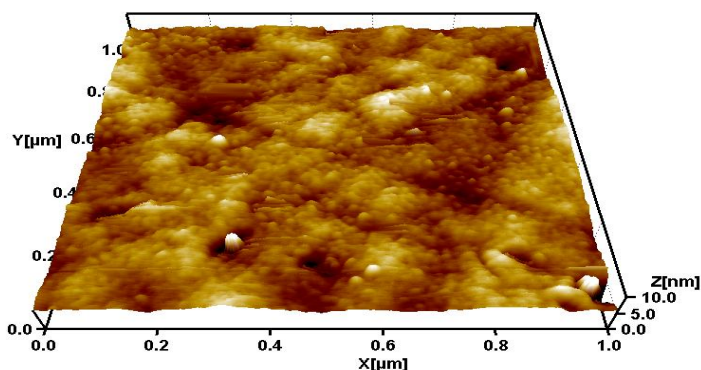


Рис. 1. АСМ-зображення поверхні плівки нітриду титану, нанесеного методом магнетронного розпилення на поверхню підкладки оптичного носія

Наявність крапель на поверхні плівки не перешкоджала відтворенню інформації з оптичного диска з підкладкою із боросилікатного скла, рельєф на поверхні

якої був сформований у процесі плазмохімічного травлення через шар фоторезисту, на якому на станції лазерного запису було записано дані у форматі CD [24]. Зображення інформаційної поверхні оптичного носія з відбивальним шаром з плівки нітриду титану, наведено на рис. 2. Зображення поверхні зроблено з боку підкладки оптичного носія.

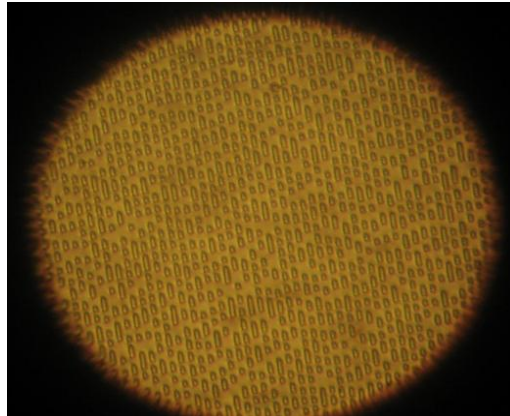


Рис. 2. Зображення інформаційної поверхні оптичного носія з відбивальним шаром нітриду титану

Відбивальна здатність одержаних на сапфірових підкладках покриттів за різних температур оцінювалася за зміною коефіцієнта відбивання на 10 відсотків свіжоприготованих і відпалених при різних швидкостях нагрівання протягом 1 год. плівок Cr, CrN, TiN, ZrN, HfN. Результати вимірювань наведено в таблиці. Коефіцієнт відбивання плівок контролювався як з боку підкладки, так і з боку плівки.

Значення температур, за яких коефіцієнт відбивання плівок Cr та нітридів перехідних металів змінюється на 10 %

Матеріал покриття	Температура відпалу, °C	Примітка
Cr	500	
CrN	700	
ZrN	600	
TiN	600	
Hf + HfN	800	Плівка повністю руйнується при 900 °C

З наведених даних видно, що за порівняно низьких температур оточуючого середовища (~500 °C) як відбивальні покриття для оптичних дискових носіїв довготривалого зберігання даних можуть бути використані плівки хрому. У разі більш високих температур ефективними є покриття на основі тонких плівок перехідних металів, зокрема нітриди хрому, титану та гафнію.

## Висновки

1. Для створення відбивальних шарів оптичних носіїв довготермінового зберігання даних можуть використовуватися технології виготовлення захисних пок-



риттів, які застосовуються при виготовленні спеціального інструменту та захисних шарів у аерокосмічній галузі.

2. Серед досліджених металевих відбиваючих плівок для оптичних дискових носіїв довготермінового зберігання даних найбільшою термічною стійкістю володіють плівки хрому.

3. Перспективним напрямком створення відбивальних шарів оптичних носіїв довготермінового зберігання даних є покриття на основі тонких плівок нітридів перехідних металів.

4. У цілому технологія створення високотемпературних відбивальних шарів оптичних носіїв довготермінового зберігання даних представляє складний технологічний процес, який передбачає використання коштовних матеріалів і технологій.

1. Petrov V., Kryuchyn A., Gorbov I. High-density optical disks for long-term information storage Proc. SPIE. Vol. 8011, 22nd Congress of the International Commission for Optics: Light for the Development of the World; 80112J (2011). <https://doi.org/10.1117/12.900745>. Event: International Commission for Optics (ICO 22), 2011, Puebla, Mexico.

2. Petrov V.V., Zichun Le., Kryuchyn A.A., Shanoylo S.M., M.Fu, Beliak Ie.V., Manko D.Yu., Lapchuk A.S., Morozov E.M. Long-term storage of digital information. July 2018. DOI: 10.15407/Akademperiodyka. 360.148ISBN: 9789663603605.

3. Alvey M.D., and George P.M. ZrPt<sub>3</sub> as a high-temperature, reflective, oxidation-resistant coating for carbon-carbon composites. *Carbon*. 1991. Vol. 29. Issue 4–5. P. 523–530.

4. Cornish L.A., Suss R., Chown L.H. New Pt-based alloys for high temperature application in aggressive environments. URL: <https://www.researchgate.net/publication/242731931>

5. Hu Ch., Liu J., Wang J. New design for highly durable infrared-reflective coatings. *Light Sci Appl*. 2018. Vol. 7. P. 17175. doi: 10.1038/lsa.2017.175.

6. Куприн А.С., Белоус В.А., Брык В.В., Василенко Р.Л., Воеводин В.Н., Овчаренко В.Д., Толмачёва Г.Н., Колодий И.В., Лунёв В.М., Клименко И.О. Вакуумно-дуговые хромовые покрытия для защиты сплава Zr-1Nb от высокотемпературного окисления на воздухе. *Вопросы атомной науки и техники*. 2015. № 2. С. 111–118.

7. Overton G. Rhodium-coated dental mirrors surpass chromium and stainless steel in performance and reliability. *Laser Focus World*. Sep 30th, 2019. URL: <https://www.laserfocusworld.com/optics/article/14040435/rhodiumcoated-dental-mirrors-surpass-chromium-and-stainless-steel-in-performance-and-reliability>

8. Белявский Д.С., Зайков В.А., Людчик О.Р., Комаров В.В., Пилько В.В. Спектры отражения покрытий на основе бинарных и тернарных нитридов переходных металлов, полученных реактивным магнетронным напылением. *Квантовая электроника*. Материалы IX Междунар. науч.-техн. конф./отв. ред. М.М. Кугейко (18–21 нояб. 2013 г. Минск). Минск, 2013. С. 179–180. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/89476>

9. Дробышевская А.А., Сердюк Г.А., Фурсова Е.В., Береснев В.М. Нанокompозитные покрытия на основе нитридов переходных металлов. *Физическая инженерия поверхности*. 2008. Т. 6. № 1–2. С. 80–87.

10. Береснев В.М., Погребняк А.Д., Азаренков Н.А., Фареник В.И., Кирик Г.В. Нанокристаллические и нанокompозитные покрытия, структура, свойства. *Физическая инженерия поверхности*, 2007. Т. 5. № 1–2. С. 4–27.

11. Nanostructured coatings/Edited by: Cavaleiro, Albano, De Hosson, Jeff Th.M. Springer. Verlag, 2006. 648 p.

12. Азаренков А.А., Соболев О.В., Погребняк А.Д., Береснев В.М. Инженерия вакуумно-плазменных покрытий. Харьков: Изд-во ХНУ им. Каразина, 2011. 344 с.

13. Асанов Б.У. Макаров В.П. Нитридные покрытия, полученные вакуумно-дуговым осаждением. *Вестник КРСУ*. 2002. № 2. URL: <https://www.krsu.edu.kg/vestnik/2002/v2/a01.html>

14. Chen Li, Paulitsch J., Du Y., Mayrhofer P.H. Thermal stability and oxidation resistance of Ti-Al-N coatings. *Surface and Coating Technology*. 15 February 2012. Vol. 206. Issues 11–12. P. 2954–2960. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.12.028>
15. Левашов Е.А. Многофункциональные наноструктурные пленки. URL: [http://www.nanometer.ru/2008/03/31/nanostrukturirovanie\\_9161.html](http://www.nanometer.ru/2008/03/31/nanostrukturirovanie_9161.html)
16. Chen Y., Laha T., Balani K., Agarwal A. Nanomechanical properties of hafnium nitride coating. *Scripta Materialia*. 2008. Vol. 58. P. 1121–1124.
17. Соболев О.В., Андреев А.А., Воеводин В.Н., Горбань В.Ф., Григорьев С.Н., Волосова М.А., Сердюк И.В. Влияние потенциала смещения и давления азота на структурно-напряженное состояние и свойства нитридных покрытий, полученных испарением высокоэнтропийных сплавов вакуумно-дуговым методом. *Вопросы атомной науки и техники*. 2014. Т. 89. № 1. С. 140–145.
18. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. Москва: Машиностроение, 1991. 208 с.: ил. ISBN 5-217-01411-3.
19. Кирюханцев-Корнеев Ф.В. Разработка твердых износостойких наноструктурных покрытий в системах Ti-Si-N, Ti-B-N, Cr-B-N, Ti-Cr-B-N: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.16.06. Москва, 2004.
20. Табаков В.П., Чихранов А.В. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 255 с.
21. Третьяков И.П., Верещака А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. Москва: Машиностроение, 1986. 192 с.
22. Анищик В.М., Углов В.В., Злоцкий С.В. и др. Многослойные наноструктурированные покрытия TiN/ZrN: структура и механические свойства. *Перспективные материалы*. 2003. № 4. С. 75–78.
23. Musil J., Dohnal P., Zeman P. Physical properties and high-temperature oxidation resistance of sputtered Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/MoN<sub>x</sub> nanocomposite coatings. *J. Vac. Sci. Technology*, 2005. Vol. 23. No 4. P. 1568–1574. <https://doi.org/10.1116/1.1947798>
24. Gorbov I.V., Petrov V.V., Kryuchyn A.A. Using ion beams for creation of nanostructures on the surface of the high-stable materials. *Semiconductor Physics, Quantum*. 2007. Vol. 10. No 1. P. 27–29.

Надійшла до редакції 02.12.2019