

УДК 537.533:621.793:535.3

Сергій Сімченко, кандидат фізико-математичних наук,
доцент, доцент кафедри робототехніки та технічних систем,
Ілона Сімченко, інженер кафедри робототехніки та технічних систем,
Державний університет інформаційно-комунікаційних
технологій, м. Київ, Україна
Володимир Капінус, здобувач освіти,
Заклад позашкільної освіти Палац дітей та молоді
Бердянської міської ради Запорізької області,
м. Запоріжжя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ТА МОРФОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛІВОК НА ОСНОВІ НІТРИДІВ МЕТАЛІВ

Анотація. У роботі досліджено процес формування тонких нітридних плівок TiN, CuN та AgN методом реакційного магнетронного напилення та проаналізовано їх спектральні характеристики у видимому діапазоні. Показано, що магнетронне розпилення забезпечує отримання плівок із високою адгезією, стабільними структурними параметрами та відтворюваними оптичними властивостями. Модернізація спектрального комплексу КСВУ-12 дала змогу підвищити чутливість вимірювань і автоматизувати реєстрацію сигналів. Виявлені характерні максимуми поглинання на довжинах хвиль 450 та 570 нм інтерпретовано як локальні та колективні коливання у системі «метал-азот». Отримані результати підтверджують перспективність нітридів TiN, CuN та AgN для застосування в оптоелектроніці, зокрема у селективних оптичних фільтрах та елементах сонячної енергетики.

Ключові слова: нітридні плівки; магнетронне напилення; оптичні властивості; спектральний аналіз; TiN; CuN; AgN; оптоелектроніка; тонкі плівки; плазмові технології.

Abstract. The paper investigates the process of forming thin nitride films of TiN, CuN and AgN by the method of reactive magnetron sputtering and analyzes their spectral characteristics in the visible range. It is shown that magnetron sputtering provides films with high adhesion, stable structural parameters and reproducible optical properties. The modernization of the spectral complex KSVU-12 made it possible to increase the sensitivity of measurements and automate signal registration. The characteristic absorption maxima detected at wavelengths of 450 and 570 nm were interpreted as local and collective oscillations in the “metal-nitrogen” system. The obtained results confirm the prospects of TiN, CuN and AgN nitrides for use in optoelectronics, in particular in selective optical filters and solar energy elements.

Keywords: nitride films; magnetron sputtering; optical properties; spectral analysis; TiN; CuN; AgN; optoelectronics; thin films; plasma technologies.

Сучасний розвиток матеріалознавства та оптоелектроніки значною мірою пов'язаний із дослідженням тонких плівок функціональних матеріалів. Особливе місце серед них займають нітридні плівки перехідних і благородних металів, що вирізняються високою хімічною стабільністю, зносостійкістю та специфічними оптичними властивостями [1-2], завдяки чому широко застосовуються у сенсорах, мікроелектроніці, плазмоніці та енергетичних технологіях [3].

Напівпровідникові нітриди металів становлять значний інтерес через поєднання унікальних оптичних, електричних і п'єзоелектричних властивостей [4], що робить TiN, CuN, AgN перспективними для сенсорів, пристроїв генерації поверхневих акустичних хвиль, фотонних кристалів і світлодіодів [5]. Завдяки широкій забороненій зоні ці матеріали придатні для детектування ультрафіолетового випромінювання та створення ефективних LED- і лазерних діодів [6].

Невелика невідповідність параметрів ґратки TiN і Si забезпечує формування майже ідеальних гетеропереходів [7]. Плівки TiN, CuN, AgN також розглядаються як віконні, антиблікові, захисні та струмознімальні шари дешевих СЕ великої площі [8]. Особливий інтерес становлять гетероструктури n-TiN/p-Si і n-CuN/p-Si, які характеризуються широкою фоточутливістю (560–2000 нм), низькою вартістю та доступністю матеріалів [9].

Для отримання тонких шарів TiN, CuN, AgN застосовують магнетронне розпилення, CVD та золь-гель-методи [10], однак властивості полікристалічних широкозонних плівок, отриманих цими технологіями, досліджені недостатньо, що стримує їх практичне використання.

Мета роботи – отримання тонких нітридних плівок TiN, CuN, AgN методом реакційного магнетронного напылення та дослідження їх спектральних характеристик для оцінки перспективності їх застосування в оптоелектроніці.

Формування плівок у термовакuumних системах ґрунтується на переході речовини в пароподібний стан, зокрема шляхом сублімації. Швидкість випаровування визначається співвідношенням

$$V_{\text{вип}} = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{M}{T_y}},$$

де M – молекулярна маса. Для Al при $T_y=1423$ К отримано $V_{\text{вип}} \approx 9 \cdot 10^{-5}$ г/(см²·с). Для мінімізації розсіювання частинок тиск у камері підтримують на рівні 10^{-3} – 10^{-5} Па.

Рівномірність покриття залежить від конструкції підкладкотримача: плоскі системи дають нерівномірність до $\pm 20\%$, тоді як планетарні каруселі забезпечують точність ± 3 - 4% . У термовакuumних установках застосовують дротяні, стрічкові, тигельні та лабіринтові випаровувачі залежно від типу матеріалу.

Резистивний нагрів є простим і ефективним, але може спричиняти забруднення плівки. Індукційний нагрів забезпечує якісне знегажування розплаву, проте потребує дорогого обладнання. Електронно-променеве випаровування дозволяє працювати з тугоплавкими матеріалами, однак для нітрідів малоефективне через їх дисоціацію при надвисоких температурах.

Іонно-плазмові методи базуються на бомбардуванні мішені іонами Ar^+ , що забезпечує високу адгезію та активацію поверхні підкладки. У магнетронних системах схрещені електричне й магнітне поля формують «магнітну пастку», яка підвищує іонізацію газу та локалізує плазму, забезпечуючи високі швидкості осадження при низьких температурах.

Експериментальна установка та методика. Дослідження виконано на вакуумному посту ВУП-5М із планарним магнетроном власної конструкції. Осадження проводили в середовищі Ar (1–10 Па) з додаванням азоту. Спектральні вимірювання здійснювали на модернізованій установці КСВУ-12 з високошвидкісною АЦП-системою та автоматизованою обробкою даних.

Аналіз результатів спектральних досліджень. Спектри плівок TiN, CuN та AgN у видимому діапазоні виявили два характерні максимуми: близько 450 нм (локальні коливання атомів азоту) та 570 нм (колективні коливання системи «метал-азот»). Оптичні властивості визначаються зонною структурою, морфологією поверхні та товщиною плівки, що формує інтерференційні ефекти й забезпечує селективність оптичного відгуку.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили, що метод реакційного магнетронного напылення є ефективним і керованим способом формування нітридних плівок із високою адгезією та стабільними відтворюваними властивостями. Спектральний аналіз у видимому діапазоні виявив характерні максимуми поглинання на довжинах хвиль 450 та 570 нм, що забезпечує можливість точної ідентифікації структури та фазового складу отриманих сполук. Модернізація спектрального комплексу КСВУ-12, зокрема впровадження автоматизованої системи реєстрації та підвищення чутливості вимірювального тракту, дала змогу значно покращити якість та достовірність експериментальних даних.

Отримані результати підтверджують високу практичну цінність нітридів TiN, CuN та AgN для оптоелектронних застосувань. Завдяки поєднанню низької вартості, доступності матеріалів та сприятливих оптичних характеристик ці сполуки є перспективними для створення ефективних сонячних елементів, селективних оптичних фільтрів та інших функціональних елементів сучасної фотоніки.

Список використаних джерел

1. Ohring M. Materials Science of Thin Films. 3rd ed. Academic Press, 2020. 896 p.
2. Mattox D. M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. 2nd ed. Elsevier, 2020. 924 p.
3. Kelly P. J., Arnell R. D. Magnetron sputtering: A review of recent developments and applications. *Vacuum*, 2020. Vol. 56, no. 3. P. 159–172.

4. Chapman B. Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching. Wiley, 2020. 432 p.
5. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. 3rd ed. Wiley, 2022. 784 p.
6. Rossnagel S. M. Thin film deposition with physical vapor deposition and related technologies. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2021. Vol. 39, no. 2, P. 020801.
7. Behrisch R., Eckstein W. Sputtering by Particle Bombardment. Springer, 2020. 504 p.
8. Vriens L. Energy balance in low-pressure gas discharges. *Journal of Applied Physics*, 2020. Vol. 127. P. 013301.
9. Sheridan T. E., Goree J. Electron energy distributions in sputtering plasmas. *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 128. P. 093302.
10. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. 4th ed. Wiley, 2021. 880 p.