

# Осадження тонких плівок оксиду молібдену для гнучкої біорозкладної електроніки

Дідусь Р. І., ORCID [0000-0003-4252-7049](https://orcid.org/0000-0003-4252-7049)

Лапшуда В. А., ORCID [0000-0002-1234-3743](https://orcid.org/0000-0002-1234-3743)

Кафедра мікроелектроніки [www.me.kpi.ua](http://www.me.kpi.ua)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Гондовська А. С., ORCID [0000-0002-9795-768X](https://orcid.org/0000-0002-9795-768X)

Ященко О. В., ORCID [0000-0003-3716-8707](https://orcid.org/0000-0003-3716-8707)

Кафедра екології та технології рослинних полімерів [www.eco-paper.kpi.ua](http://www.eco-paper.kpi.ua)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

Київ, Україна

**Анотація**—У статті розглянуто використання біополімерного матеріалу (наноцелюлози) як гнучкої підкладки для осадження функціональних шарів електронних приладів. Плівки оксиду молібдену осаджувались на поверхню наноцелюлози методом йонно-променевого розпилення в низькотемпературних режимах без наступного відпалу. Було виміряно спектри оптичної прозорості отриманих зразків у вихідному та зігнутому станах та встановлено вплив пружної деформації зразку з радіусом згину 5 мм на коефіцієнт оптичного пропускання в ультрафіолетовому, видимому та інфрачервоному діапазонах спектру. При цьому було показано, що оптична прозорість вихідних зразків під час згину може зменшуватись на 12-15% порівняно з вихідним станом. Мінімальна величина впливу згину на коефіцієнт оптичного пропускання (від 0,7 до 3,3%) спостерігається для плівок оксиду молібдену, синтезованих за температури 50°C. Одержані результати можуть бути використані при розробці гнучких електронних приладів на основі оксиду молібдену.

**Ключові слова** – оксид молібдену; наноцелюлоза; гнучка електроніка.

## I. ВСТУП

Протягом останнього десятиріччя має місце значне зростання попиту на прилади гнучкої електроніки, які здатні пружно деформуватись в процесі експлуатації (згинатись, розтягуватись, скручуватись), чого не може забезпечити традиційна твердотільна електроніка. Галузі використання гнучких електронних приладів: медицина, спорт, військова галузь, побут тощо. Зокрема гнучкі сенсори можуть бути нанесені на одяг або безпосередньо на тіло людини з метою аналізу роботи м'язів та суглобів, контролю за виділенням поту та зміною температури [1], [2].

Прилади гнучкої електроніки являють собою гнучку підкладку, на поверхню якої нанесено функціональні шари та контакти. Зазвичай як підкладка використовуються гнучкі полімери (PI, PA, PET, PEN, PDMS [3]–[5]). Враховуючи обмеженість викопних ресурсів, що використовуються для отримання штучних полімерних матеріалів, а також забруднення навколишнього середовища внаслідок технологічного процесу виготовлення та утилізації приладів, все більшу увагу звертають на природні полімери на основі

целюлози, яка є найбільш розповсюдженим і відновлювальним біополімером на Землі, що можна отримати з рослинних джерел: деревини, очерету, соломки пшениці, міскантусу тощо [6]–[9]. Завдяки відмінним механічним та оптичним властивостям (відносно висока гнучкість та прозорість), а також через практично невичерпаність джерел целюлозного біополімеру та його біорозкладність, він розглядається як ефективний заміник штучним полімерним підкладкам в гнучкій електроніці. В якості функціональних шарів пристроїв гнучкої електроніки використовуються тонкі металеві, напівпровідникові та діелектричні плівки. Зокрема важливою складовою таких приладів є оксидні плівки (ZnO, MoO<sub>3</sub>, ITO тощо). Так, оксиди перехідних металів слугують ефективними дірково-селективними контактами, що використовуються для синтезу різноманітних напівпровідникових перетворювачів [10]–[13]. Для синтезу оксидних плівок використовують наступні технологічні методи: термічне випаровування, ВЧ магнетронне розпилення та хімічне газофазне осаження. До недоліків даних методів слід віднести високу вірогідність забруднення плівки сторонніми домішками і/або



складність технологічного керування хімічним складом плівки. Тому в даній роботі пропонується використати метод реактивного іонно-променевого розпилювання, який крім високої хімічної чистоти та контрольованого складу матеріалу, забезпечує можливість вирощувати плівки з гарною адгезією до підкладки. Крім того, більшість оксидних матеріалів синтезуються за підвищених температур (більше 200°C) та/або потребують наступного відпалу, що є недопустимим для полімерних підкладок з nanoцелюлози.

Тому метою даної роботи є розробка низькотемпературної технології синтезу тонких плівок оксиду молібдену на поверхні підкладок з nanoцелюлози та дослідження впливу згину на оптичні спектри пропускання плівок для застосування в приладах гнучкої електроніки.

## II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

### A. Синтез гнучких підкладок з nanoцелюлози

Для синтезу nanoцелюлози в даній роботі було використано біомасу очерету звичайного (*Phragmites australis*) із Черкаської області України після збору врожаю в 2019 р. На початку синтезу сировину подрібнювали до 2–5 мм і зберігали в ексікаторі для підтримання постійного вмісту вологи та хімічного складу. Целюлозу отримували із стебла очерету у два етапи. На першій стадії розчин лугу використовували як попередню обробку рослинної сировини для видалення основної частини геміцелюлоз та мінеральних речовин і часткового видалення лігніну. Для цього стебла очерету екстрагували розчином NaOH з концентрацією 50 г/л за температури  $97 \pm 2^\circ\text{C}$  протягом 180 хв та гідромодуля 10:1. На другому етапі для видалення залишків лігніну і мінеральних речовин проводили варіння з використанням розчину крижаної оцтової кислоти та 35% перекису водню за об'ємного співвідношення 7:3, гідромодуля 10:1 за температури  $97 \pm 2^\circ\text{C}$  протягом 180 хв. Отримана очеретяна целюлоза (ОЦ) мала залишки нецелюлозних компонентів і зберігалася вологою в герметичній ємності для отримання nanoцелюлози.

Nanoцелюлоза була отримана шляхом TEMPO окислення за допомогою системи TEMPO/NaBr/NaOCl з подальшою обробкою ультразвуком. Для отримання nanoцелюлози 1 г ОЦ перенесли в склянку, додавали 100 мл дистильованої води і отриману водну суспензію целюлози змішували з 0,16 г бромиду натрію та необхідною кількістю TEMPO із розрахунку 1,6% на вагу ОЦ. Розчин NaClO з витратою 10 ммоль/г ОЦ додають до суспензії за кімнатної температури з безперервним додаванням 0,5M NaOH розчину до підтримання суміші при рН 10. Потім суспензію з TEMPO, солями та іншими сполуками тричі центрифугують по 10 хв з додаванням дистильованої води за 4000 об/хв. Ультразвукову обробку суспензії nanoцелюлози, окисленої TEMPO, проводили протягом 10-30 хв до утворення прозорого nanoцелюлозного гелю. Отриману суспензію nanoцелюлози виливали в чашки Петрі і сушили на повітрі за кімнатної температури з отриманням гнучкої плівки з nanoцелюлози товщиною близько 30 мкм.

### B. Осадження тонких плівок оксиду молібдену на підкладки з nanoцелюлози

Тонкі плівки оксиду молібдену були осаджені на підкладки з nanoцелюлози методом реактивного іонно-променевого розпилення металеві мішені на установці УВН-75Р. Схема методу наведена на Рис. 1.

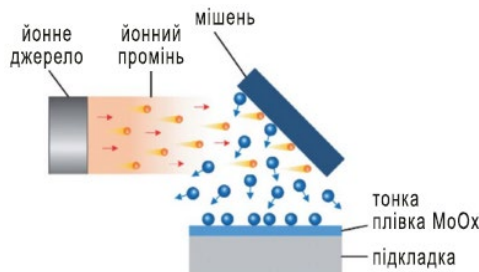
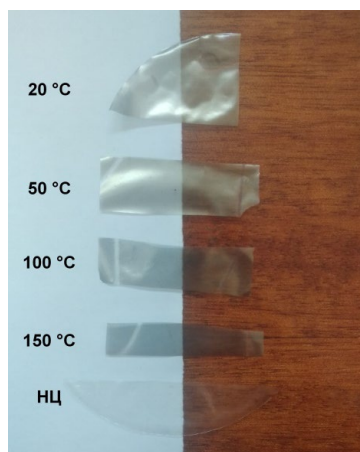


Рис. 1 Ескіз схеми методу реактивного іонно-променевого розпилення



(а)



(б)

Рис. 2 Зовнішній вигляд плівок оксиду молібдену, осаджених на поверхню nanoцелюлози: а) демонстрація прозорості зразків; б) демонстрація гнучкості зразків

Перед осадженням підкладки з наноцелюлози підлягали сухому очищенню у камері за допомогою йонного променя. Температура підкладок під час синтезу тонких плівок оксиду молібдену варіювалась в діапазоні від кімнатної температури до 150°C. Так, зразки № 1, 2, 3, 4 були синтезовані за температур 20°C, 50°C, 100°C та 150°C відповідно. Час осадження становив 10 хв. Тиск у камері підтримувався на рівні  $(5-6) \cdot 10^{-4}$  мм.рт.ст. Прискорювальна напруга та струм променю відповідно становили 2,5 кВ та 50 мА. Отримані плівки були товщиною близько 70 нм та мали n-тип провідності. Зовнішній вигляд дослідних зразків наведено на Рис. 2.

На Рис. 2, а наведено знімки 4 дослідних зразків, що містять плівки оксиду молібдену, синтезовані за різних температур, а також чисту підкладку з наноцелюлози. Даний знімок демонструє гарну прозорість чистої наноцелюлози, яка зменшується при осадженні плівок оксиду молібдену. Крім того, помітною є зміна забарвлення плівок від світло-сірого до темно-сірого по мірі зростання температури осадження. Попри це зразки залишаються достатньо прозорими навіть за температури осадження 150°C. Гнучкість одержаних зразків продемонстровано на Рис. 2, б.

### С. Опис обладнання та методика вимірювання

Трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ) використана для вивчення морфології суспензії наноцелюлози. Для цих спостережень застосовано прилад ТЕМ SELMI EMV-125, для якого був підготовлений зразок НЦ шляхом диспергування 2 мкл суспензії наноцелюлози в дистильованій воді об'ємом 1-18 мкл. Потім цю суспензію перенесли на мідну сітку, покриту вуглецевою плівкою товщиною 5-10 нм, і сушили на повітрі протягом 15 хв. Аналіз ТЕМ та електронної дифракції проводили за кімнатної температури з використанням прискорювальної напруги 75 кВ. Діаметр та довжину наночастинок целюлози визначали за допомогою програми аналізу зображень ImageJ 1.37v<sup>®</sup>, мінімум 500 вимірювань, проведених для кожного визначення.

Хімічний склад тонких плівок оксиду молібдену вивчався на основі енерго-дисперсійного аналізу, в якому реєструвалось характеристичне рентгенівське випромінювання поверхні зразку під дією опромінення прискореними електронами. Для цього використовувався скануючий електронний мікроскоп РЕМ-106U у режимі елементного мікроаналізу.

Вимірювання спектрів оптичного пропускання тонких плівок оксиду молібдену, осаджених на поверхні наноцелюлози, здійснювалось за допомогою двохпроменевого спектрофотометра 4802 UV/VIS Double Beam Spectrophotometer в діапазоні довжин хвиль від 190 до 1100 нм. В роботі вивчався вплив згину радіусом 5 мм на величину прозорості зразків в різних спектральних діапазонах: УФ, видимому та ІЧ.

## III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

### А. Структура та хімічний склад отриманих дослідних зразків

На Рис. 3 видно, що при використанні концентрованої суспензії на ТЕМ-зображенні щільної області наноцелюлози візуалізуються наночастинки із середньою шириною від 4 до 10 нм, а також мережі із середньою шириною в діапазоні 5-40 нм і довжиною до 0,8 мкм.

З наведеного на Рис. 4 енерго-дисперсійного рентгенівського спектру, видно, що синтезовані в роботі плівки містять молібден та кисень без сторонніх домішок.

### В. Вплив згину на величину прозорості отриманих дослідних зразків

Чиста наноцелюлоза має прозорість у діапазоні видимого світла 73%. Після нанесення плівки MoO<sub>3</sub> ця величина зменшується в середньому на 25-30%, що обумовлено додатковим поглинанням в оксидному матеріалі.

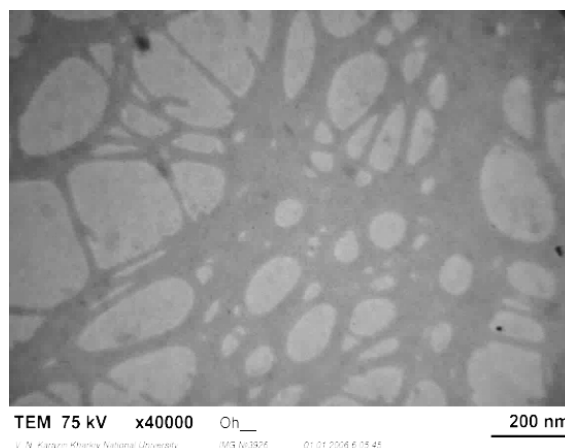


Рис. 3 Зображення суспензії наноцелюлози в трансмісійному електронному мікроскопі

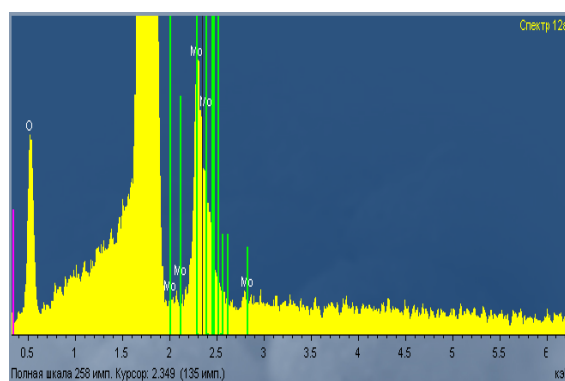
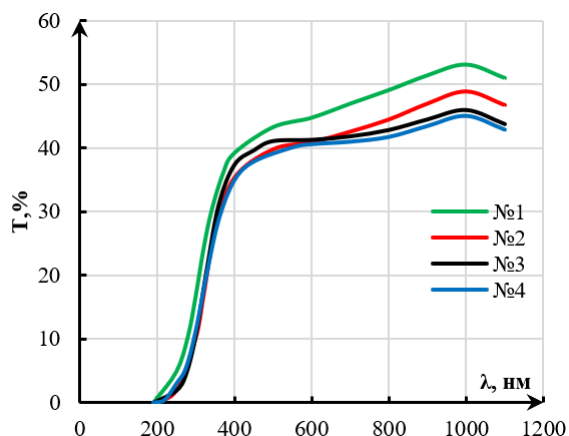
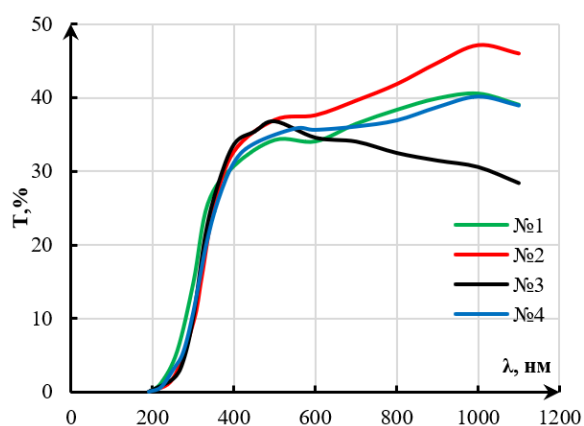


Рис. 4 Енерго-дисперсійний рентгенівський спектр плівки оксиду молібдену



(a)



(b)

Рис. 5 Спектри прозорості зразків з різною температурою осадження у вихідному (а) та зігнутому (б) станах

ТАБЛИЦЯ 1 ЗМІНА КОЕФІЦІЄНТІВ ОПТИЧНОГО ПРОПУСКАННЯ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ ПІД ЧАС ЗГИНУ В РІЗНИХ ЧАСТИНАХ ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ

№ зразка	ΔT, %		
	УФ-діапазон (λ = 300 нм)	Видимий діапазон (λ = 600 нм)	ІЧ-діапазон (λ = 1100 нм)
НЦ	3,51	8,14	7,53
№1	1,83	10,76	12,01
№2	0,69	3,26	0,7
№3	0,22	6,67	15,31
№4	0,28	4,95	3,91

З Рис. 5, а можна бачити, як температура осадження впливає на спектр оптичного пропускання тонких плівок оксиду молібдену. Зразки демонструють поступове зменшення прозорості при збільшенні температури осадження: на 4% в УФ- та видимому діапазоні та на 8% в ІЧ області спектру. Одержана закономірність узгоджується з результатами, одержаними для плівок MoOx на кристалічній кремнієвій підкладці [12]. Зокрема зміна прозорості із зростанням температури пов'язується з переходом від більш прозорої MoO3 фази до менш прозорої MoO2 фази. Варто відзначити низьку різницю між коефіцієнтами

прозорості для зразків №3 та №4, синтезованими за температур 100 та 150°C (Рис. 5, а), що свідчить про наближення до стабільної фази.

Вплив згину зразків на спектри оптичного пропускання продемонстровано на Рис. 5, б та у Таблиця 1. Порівнюючи Рис. 5, а та Рис. 5, б, видно, що згинання виготовлених плівок зменшує прозорість зразків, що, очевидно, обумовлено порушенням умов геометричної оптики і закону Снеліуса. Слід звернути увагу, що величина зменшення коефіцієнту прозорості в зігнутому стані залежить від області спектру електромагнітних хвиль. В УФ діапазоні наявність згину практично не впливає на прозорість, а саме величина зменшення коефіцієнта пропускання не перевищує 3,5% для чистої наноцелюлози та є меншим 1,8% для зразків з плівками оксиду молібдену (Таблиця 1). В той час, як у видимому та ІЧ діапазоні має місце значно більший вплив згину – від 7-8% для чистої наноцелюлози до 12-15% для плівок оксиду молібдену. Це може бути пов'язане з тим, що для довгохвильового випромінювання довжина хвилі стає співвимірною з радіусом кривизни зразку у зігнутому стані, а тому таку межу поділу не можна розглядати як необмежену у просторі.

В роботі також встановлено вплив температури осадження плівок оксиду молібдену на величину зменшення прозорості при згині зразку. Згідно даним Таблиця 1, найбільша зміна коефіцієнта прозорості ΔT (15,3%) спостерігається для зразка №3, що синтезувався за температури 100°C. Мінімальні зміни в оптичній прозорості мають місце для плівок оксиду молібдену, синтезованого за температури 50°C (близько 3%). Така значна відмінність механічних властивостей двох плівок, очевидно, обумовлена відмінністю їх оптичних показників (ширини забороненої зони, показника заломлення тощо), що потрібно враховувати в процесі розробки гнучких приладів на їх основі.

## ВИСНОВКИ

У роботі осаджено плівки оксиду молібдену на поверхні підкладок з наноцелюлози методом йонно-променевого розпилення за низьких температур (менше 200°C) без наступного відпалу та досліджено вплив згину на оптичні спектри пропускання плівок MoOx. При цьому було встановлено, що в УФ діапазоні для всіх зразків спостерігався мінімальний вплив згину на коефіцієнт прозорості (зміна не перевищувала 1,8% для кімнатної температури синтезу, а для температур осадження 50-150°C – не перевищувала 1%). В той час, як для видимого та ІЧ випромінювання зміна коефіцієнту оптичного пропускання від згину була набагато більшою (сягаючи 15,3%) і сильно залежала від технологічних умов синтезу плівки MoOx. Встановлено, що мінімальну зміну оптичного пропускання при згині у всіх трьох діапазонах оптичного спектру (від 0,7 до 3,3%) можна досягнути для плівки оксиду молібдену, осадженої за температури 50°C. Одержані результати у подальшому можуть бути використані при розробці гнучких електронних приладів на основі оксиду молібдену.





## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] J. van den Brand *et al.*, “Flexible and stretchable electronics for wearable health devices,” *Solid. State. Electron.*, vol. 113, pp. 116–120, Nov. 2015, DOI: [10.1016/j.sse.2015.05.024](https://doi.org/10.1016/j.sse.2015.05.024).
- [2] Y. Zhang *et al.*, “Flexible transparent high-voltage diodes for energy management in wearable electronics,” *Nano Energy*, vol. 40, pp. 289–299, Oct. 2017, DOI: [10.1016/j.nanoen.2017.08.025](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.08.025).
- [3] M.-S. Tsai, P.-G. Su, and C.-J. Lu, “Fabrication of a highly sensitive flexible humidity sensor based on Pt/polythiophene/reduced graphene oxide ternary nanocomposite films using a simple one-pot method,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 324, p. 128728, Dec. 2020, DOI: [10.1016/j.snb.2020.128728](https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128728).
- [4] H. Jeong, Y. Noh, and D. Lee, “Highly stable and sensitive resistive flexible humidity sensors by means of roll-to-roll printed electrodes and flower-like TiO<sub>2</sub> nanostructures,” *Ceram. Int.*, vol. 45, no. 1, pp. 985–992, Jan. 2019, DOI: [10.1016/j.ceramint.2018.09.276](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.276).
- [5] Y. Zhang *et al.*, “Ultrasensitive flexible NH<sub>3</sub> gas sensor based on polyaniline/SrGe<sub>4</sub>O<sub>9</sub> nanocomposite with ppt-level detection ability at room temperature,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 319, p. 128293, Sep. 2020, DOI: [10.1016/j.snb.2020.128293](https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128293).
- [6] V. A. Barbash, O. V. Yashchenko, and O. A. Vasylieva, “Preparation and Properties of Nanocellulose from *Miscanthus x giganteus*,” *J. Nanomater.*, vol. 2019, pp. 1–8, Nov. 2019, DOI: [10.1155/2019/3241968](https://doi.org/10.1155/2019/3241968).
- [7] V. Koval, V. Barbash, M. Dusheyko, V. Lapshuda, O. Yashchenko, and Y. Yakimenko, “Application of Nanocellulose in Humidity Sensors for Biodegradable Electronics,” in *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, 2020, pp. 02NS01-1-02NS01-5, DOI: [10.1109/NAP51477.2020.9309598](https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309598).
- [8] N. P. Klochko *et al.*, “Use of biomass for a development of nanocellulose-based biodegradable flexible thin film thermoelectric material,” *Sol. Energy*, vol. 201, pp. 21–27, May 2020, DOI: [10.1016/j.solener.2020.02.091](https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.091).
- [9] N. Saba and M. Jawaid, “Recent advances in nanocellulose-based polymer nanocomposites,” in *Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites*, Elsevier, 2017, pp. 89–112, DOI: [10.1016/B978-0-08-100957-4.00004-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100957-4.00004-8).
- [10] C. Battaglia *et al.*, “Hole Selective MoO<sub>x</sub> Contact for Silicon Solar Cells,” *Nano Lett.*, vol. 14, no. 2, pp. 967–971, Feb. 2014, DOI: [10.1021/nl404389u](https://doi.org/10.1021/nl404389u).
- [11] Y. Zhou *et al.*, “High moisture-resistive MoO<sub>x</sub>/metal/graphite barrier films with excellent thermal dissipation for the encapsulation of organic electronics,” *Org. Electron.*, vol. 86, p. 105817, Nov. 2020, DOI: [10.1016/j.orgel.2020.105817](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105817).
- [12] V. Koval *et al.*, “Reactive Ion Beam Sputtered Molybdenum Oxide Thin Films for Optoelectronic Application,” in *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2020, pp. 246–250, DOI: [10.1109/ELNANO50318.2020.9088736](https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088736).
- [13] M. Kim, C. Lim, D. Jeong, H.-S. Nam, J. Kim, and J. Lee, “Design of a MoO<sub>x</sub>/Au/MoO<sub>x</sub> transparent electrode for high-performance OLEDs,” *Org. Electron.*, vol. 36, pp. 61–67, Sep. 2016, DOI: [10.1016/j.orgel.2016.05.035](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2016.05.035).

Надійшла до редакції 06 березня 2021 р.



# Deposition of Molybdenum Oxide Thin Films for Flexible Biodegradable Electronics

R. I. Didus, ORCID [0000-0003-4252-7049](https://orcid.org/0000-0003-4252-7049)

V. A. Lapshuda, ORCID [0000-0002-1234-3743](https://orcid.org/0000-0002-1234-3743)

Department of microelectronics [www.me.kpi.ua](http://www.me.kpi.ua)

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)  
Kyiv, Ukraine

A. S. Hondovska, ORCID [0000-0002-9795-768X](https://orcid.org/0000-0002-9795-768X)

O. V. Yashchenko, ORCID [0000-0003-3716-8707](https://orcid.org/0000-0003-3716-8707)

Department of Ecology and Technology of Plant Polymers [www.eco-paper.kpi.ua](http://www.eco-paper.kpi.ua)

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**— With its unprecedented properties over conventional rigid platforms, flexible electronics have been a significant research topic in the last decade, offering a broad range of applications from bendable display, flexible solarenergy systems, to soft implantable-devices for health monitoring. Flexible electronics is a disruptive science that requires a high level of multi-disciplinary research, including chemistry, physics, material science, electronic and electrical engineering, mechanical engineering, computing science, biomedical engineering. The deep cross-integrate of it with other key subjects such as artificial intelligence, material science, Internet of things, space science, health science, energy science and data science, breaks through the intrinsic limitations of convention silicon electronics and affords unprecedented opportunities for relative industries involving integrated circuit, new and renewable.

One way to reduce the cost of photoconverters is to use transition metal oxide, which is characterized by better solar energy conversion efficiency.  $\text{MoO}_3$  is one of the promising candidates due to its nontoxicity, deep electronic state and relative lower vaporization temperature, which can easily deposited in vacuum. In contrast, the other transition metal oxides need relative higher evaporation temperature to deposit the film. The conventional and common fabrication methods for  $\text{MoO}_3$  are thermal evaporation or sputtering under vacuum. This work presents molybdenum oxide films grown on nanocellulose. Molybdenum oxide thin films were grown by reactive ion beam sputtering on UVN-75R equipment. Measurements of thin film transparency spectra and the effect of bending on the transparency value were measured using a 4802 UV/VIS Double Beam Spectrophotometer. The energy-dispersion X-ray spectrum showed no impurities. The chemical composition of molybdenum oxide thin films was studied on the basis of energy-dispersion analysis, in which the characteristic X-ray radiation of the sample surface under the action of accelerated electron irradiation was recorded. For this purpose, a scanning electron microscope REM-106U in the mode of elemental microanalysis was used.

The films show high transparency in the visible spectrum, as well as a low influence of bending on the transparency in the ultraviolet spectrum. Bending of the manufactured samples reduces the amount of transparency. Increasing the deposition temperature of the films has the same effect as bending. Combining the excellent electrical properties of  $\text{MoO}_x$  and the high flexibility and transparency of nanocellulose, an excellent replacement for silicon heterostructures has been demonstrated.

**Keywords** – molybdenum oxide; nanocellulose; flexible electronics.

