

СЕКЦІЯ XII. ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

ГНУЧКА ЕЛЕКТРОНІКА НА ПРОЗОРИХ ПРОВІДНИКАХ

Червінський Владислав Олегович

здобувач вищої освіти

факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

Вінницький національний технічний університет, Україна

Науковий керівник: Мартинюк Володимир Валерійович

ORCID ID: 0000-0001-5401-3980

канд.техн.наук, доцент кафедри загальної фізики

Вінницький національний технічний університет, Україна

ВСТУП

Протягом понад п'яти десятиліть кремній був універсальною основою для виробництва транзисторів, мікропроцесорів і більшості електронних компонентів. Проте зі зменшенням довжини каналу транзистора до кількох нанометрів традиційні кремнієві технології підходять до межі можливостей: виникає квантове тунелювання, зростає струм витоку, погіршується контроль над каналом і зростає теплове навантаження. Пошук нових матеріалів, здатних працювати при атомарній товщині, став ключовим завданням сучасної наноелектроніки.

Теоритична частина

Прозорий провідник (transparent conductive film, TCF) – тонкоплівкова система, що поєднує високу електричну провідність із великою оптичною пропускну здатністю у видимому діапазоні; у гнучкій електроніці до TCF додається вимога механічної витривалості при згинанні/розтягуванні. Ключові параметри:

- оптична пропускання $T(\%)$
- питомий опір листа $R_s(\text{Ом/кв})$

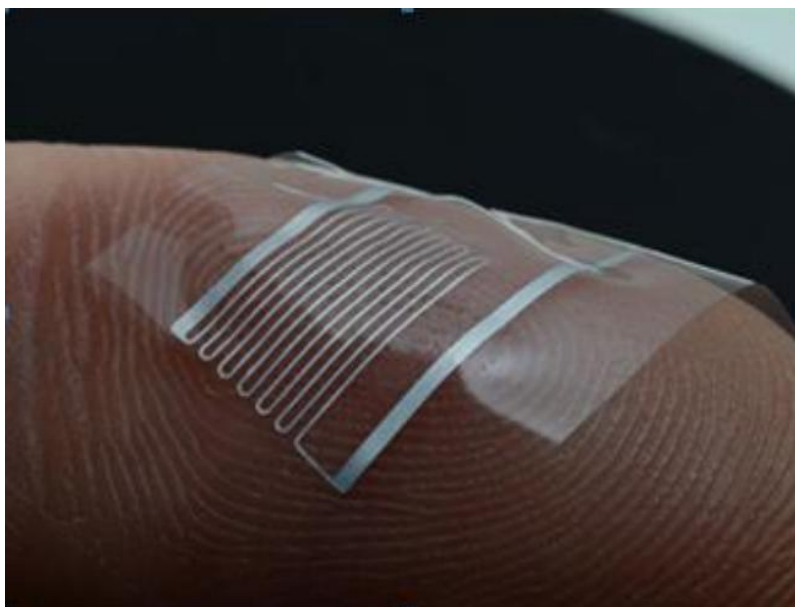
Основні класи прозорих провідників і їхні властивості

Срібні нанодропи (AgNW) - мережі демонструють одночасно високу прозорість і низький R_s , прості у нанесенні (розпилення, друк, Mayer-rod) і добре переносять циклічне згинання, що робить їх основним

кандидатом для гнучких дисплеїв і сенсорів. Головні проблеми: стабільність (окиснення, контактна неоднорідність) і масштабування однорідних покриттів. Останні огляди показують, що оптимізовані AgNW-плівки досягають $T > 90\%$ при $R_s \sim 10-20 \Omega/\text{sq}$, а також успішно інтегруються у гібридні системи (AgNW + графен / PEDOT:PSS).[1]

Графен і редукований графен-оксид (rGO) – має дуже високу електронну рухливість і високу прозорість (моношар пропускає $\approx 97\%$ світла), але «чистий» графен зазвичай має достатньо високий R_s у порівнянні з ITO/AgNW і проблеми із формуванням безперервних великих плівок. Тому практично використовують rGO або гібридні структури (графен + AgNW або графен + PEDOT:PSS), які значно покращують електропроникність і стабільність. [3]

Конструкти на основі PEDOT:PSS та вуглецевих нанотрубок (CNT) – розчинний органічний провідник, зручний для низькотемпературного нанесення (печаті, спін-коут), забезпечує гарну гнучкість (рис 1); його провідність може бути значно підвищена хімічними обробками та формуванням композитів з AgNW або графеном. CNT-плівки мають хорошу гнучкість і стабільність, але викликають складності у досягненні одночасно низького R_s і високої прозорості. [4, 5]



**Рис 1. Загальний вигляд гнучких електронних структур.
Демонстрація їх гнучкості**

Технології формування тонкоплівок

- Розпилення (spray-coat) – застосовуються для AgNW, PEDOT:PSS,

CNT; дозволяють масове виробництво і сумісність із гнучкими підкладками (PET, PEN).

- Хімічне відкладення графену (CVD) – дає високоякісний моношар, але потребує переносу на гнучкі підкладки; виклик – отримати безшовні великі площі. [3]

- Термічна / оптична обробка (sintering, plasmonic welding) – покращує контакт між нанопровідниками (AgNW) і знижує $R_s R_s$.

Критичні проблеми та обмеження для практичної інтеграції

Деградація та хімічна стабільність (AgNW, графен, PEDOT:PSS) – однією з ключових проблем прозорих провідників, особливо тих, що побудовані на мережах срібних нанодротів (AgNW), є хімічна та атмосферна нестабільність. За даними огляду (Langley et al., 2013) срібні нанодроти активно окиснюються у присутності кисню та вологи, що призводить до зростання опору та руйнування контактів між дротами. При підвищеній температурі окиснення прискорюється, а тонкі дроти (<50 нм) деградують швидше через більший відсоток поверхневих атомів. У присутності хлоридів або сірковмісних сполук срібло може утворювати AgCl чи Ag₂S, що ще сильніше підвищує опір. [1, 2]

Однорідність та масштабованість покриттів (масштабні TCF-плівки) – одна з найскладніших задач для AgNW, CNT та графенових TCF. У випадку AgNW ключовою проблемою є агрегація та штабелювання нанодротів під час сушіння. Під дією капілярних сил дроти збираються у пучки, формуючи ділянки з різною щільністю мережі. Це призводить до:

- нерівномірності sheet resistance (R_s);
- локальних «гарячих точок» у нагрівачах та OLED;
- зниження прозорості на ділянках зі скупченням дротів.

Контактний опір і адгезія між шарами (міжетапні бар'єри) – у багатошарових тонкоплівкових структурах на гнучких підкладках надійність визначається не тільки матеріалом електрода, а й якістю контактів між шарами: TCF, активний напівпровідниковий шар, бар'єр, органічний шар тощо. [5] Проблеми контактів (за ACS Applied Materials & Interfaces, 2024):

- Високий контактний опір між AgNW та наступним шаром через точковий контакт і обмежену площу дотику.

- Слабка адгезія AgNW до підкладок PET/PEN, що може призводити до відшаровування під час згинання. [1]

• У PEDOT:PSS існує високий коефіцієнт термічного розширення, який відрізняється від полімерних підкладок, що при нагріванні може спричинити тріщини. [4]

• Графен має гладку поверхню з низькою енергією адгезії, тому потребує попередньої плазмової або HNO_3 /Bronsted кислотної обробки.

Висновки

Гнучкі прозорі провідники є ключовим елементом майбутньої гнучкої електроніки, однак жоден окремий матеріал наразі не забезпечує оптимального поєднання високої провідності, прозорості, механічної стійкості та довговічності. Найперспективнішим напрямом залишаються гібридні електроди на основі AgNW у комбінації з графеном або PEDOT:PSS, які демонструють збалансовані характеристики та стійкість до багаторазового згинання. Основними викликами залишаються масштабованість виробництва великих однорідних плівок і хімічна стабільність матеріалів, що потребує подальших досліджень у сфері покращення процесів нанесення, контактної адгезії та ефективної інкапсуляції.

Список використаних джерел:

1. Langley, D. P., et al. (2013). *Flexible transparent conductive materials based on silver nanowire networks: A review*. Nanotechnology. Вилучено з: https://www.researchgate.net/publication/257754386_Flexible_transparent_conductive_materials_based_on_silver_nanowire_networks_A_review
2. Li, J., et al. (2025). *Recent Advances in Silver Nanowire-Based Transparent Conductive Films*. Coatings. Вилучено з: <https://www.mdpi.com/2079-6412/15/7/858>
3. Wang, P., et al. (2022). *Highly Stable Graphene-Based Flexible Hybrid Transparent Electrodes*. *Advanced Materials Interfaces*. Вилучено з: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/admi.202101442>
4. Karagiorgis, X., et al. (2024). *Highly Conductive PEDOT:PSS/Ag Nanowire-Based Transparent Electrodes*. *ACS Applied Materials & Interfaces*. Вилучено з: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.4c00682>
5. Peng, H., et al. (2020). *High-performance and ultraflexible PEDOT/silver composite electrodes*. *Optics Letters*. Вилучено з: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-45-8-2443>