

# ІНТЕГРАЦІЯ АМОΡФНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ У СКЛАДНІ ВИСОКОЧАСТОТНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СХЕМИ

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет

## Анотація

Аморфні напівпровідники стали перспективними матеріалами для високочастотних телекомунікаційних схем наступного покоління завдяки їх дешевизні у виробництві, технологічності на великих площах та сумісності з гнучкими основами. Нещодавні досягнення в галузі аморфних оксидних напівпровідників, зокрема сполук на основі індію, значно покращили рухливість носіїв і частотну характеристику, що уможливило їх застосування в радіочастотних (РЧ) і мікрохвильових колах. У цій статті розглядаються ключові властивості матеріалів, технологічні виклики та останні досягнення на рівні схем аморфних напівпровідників, що працюють на частотах від мегагерц до гігагерц. Особливу увагу приділено ефектам джоулевого нагріву, інженерії густини та підходам до композитних матеріалів, які покращують електричні характеристики. Обговорюється потенціал інтеграції аморфних напівпровідників у складні телекомунікаційні архітектури, підкреслюється їхня роль у майбутніх гнучких системах зв'язку на великі площі.

**Ключові слова:** аморфні напівпровідники, високочастотна електроніка, телекомунікаційні схеми, оксидні тонкоплівкові транзистори, радіочастотні пристрої.

## Abstract

Amorphous semiconductors have emerged as promising materials for next-generation high-frequency telecommunication circuits due to their low-cost fabrication, large-area processability, and compatibility with flexible substrates. Recent advances in amorphous oxide semiconductors, particularly indium-based compounds, have significantly improved carrier mobility and frequency response, enabling their application in radio-frequency (RF) and microwave circuits. This paper reviews key material properties, technological challenges, and recent circuit-level demonstrations of amorphous semiconductors operating at megahertz-to-gigahertz frequencies. Special attention is given to Joule heating effects, density engineering, and composite material approaches that enhance electrical performance. The integration potential of amorphous semiconductors in complex telecommunication architectures is discussed, highlighting their role in future flexible and large-area communication systems.

**Keywords:** amorphous semiconductors, high-frequency electronics, telecommunication circuits, oxide TFTs, RF devices.

## Вступ

Постійний розвиток телекомунікаційних систем висуває все більші вимоги до електронних матеріалів, здатних працювати на високих частотах, зберігаючи при цьому низькі виробничі витрати і масштабованість. Традиційні кристалічні та полікристалічні напівпровідники домінують у високопродуктивній радіоелектроніці, однак складність їх виготовлення та обмежена сумісність з гнучкими підкладками обмежують їх застосування у нових системах зв'язку на великі площі.

Аморфні напівпровідники пропонують привабливу альтернативу завдяки простим методам осадження, універсальності підкладок і економічній ефективності. Історично їх використання у високочастотній електроніці було обмежене низькою рухливістю носіїв і термічною нестабільністю. Нещодавні інновації в матеріалах, зокрема в аморфних оксидних напівпровідниках, подолали багато з цих обмежень, що дозволило роботу в мегагерцових і гігагерцових режимах. У цій статті аналізується інтеграція аморфних напівпровідників у складні високочастотні телекомунікаційні схеми з акцентом на властивості матеріалів, проблеми пристроїв і продуктивність на рівні схеми.

## Результати дослідження

На відміну від технологій кристалічного кремнію, аморфні напівпровідники можна осаджувати за низьких температур, використовуючи процеси на основі розчинів або розпилення. Це дає змогу виготовляти їх на гнучких підкладках великої площі, що значно знижує виробничі витрати і розширює сферу застосування [1, 2].

Нещодавні розробки аморфних металооксидних напівпровідників *n*-типу, таких як аморфний оксид індію-галію-цинку (а-IGZO) та аморфний оксид індію-олова (ІТО), продемонстрували високу рухливість носіїв заряду та покращену електричну стабільність [1]. Ці властивості є критично важливими для досягнення високошвидкісного перемикання транзисторів і посилення радіочастотного сигналу [3].

У тонкоплівкових аморфних приладах локальний структурний безлад збільшує електрон-фононне розсіювання, що призводить до надмірного джоулевого нагріву під дією високих електричних полів. Це явище може погіршити продуктивність пристрою або спричинити його передчасний вихід з ладу. Доведено, що вдосконалена інженерія підкладок, включаючи використання матеріалів з високою теплопровідністю, таких як карбід кремнію, дозволяє зменшити ці ефекти [3].

Традиційні прилади на основі аморфного кремнію страждають від притаманної їм низької рухливості носіїв, що обмежує їхню частотну характеристику. На відміну від них, аморфні оксидні напівпровідники, оброблені розчином, демонструють рухливість носіїв, що перевищує  $70 \text{ cm}^2/\text{V}^1\text{s}^{-1}$ , що дозволяє працювати за межами мегагерцового діапазону і відкриває шлях до радіочастотних застосувань [4].

Аморфні ІТО-транзистори досягли частот відсічення понад 100 ГГц і максимальних частот коливань понад 120 ГГц, демонструючи свою придатність для мікрохвильового підсилення потужності [5].

Тонкоплівкові транзистори а-IGZO досягли частот зрізу підсилення струму в сотні мегагерц і частот коливань понад 1 ГГц, що уможливує застосування в системах RFID і бездротових датчиках [5].

На рівні мікросхем аморфні оксидні напівпровідники були успішно інтегровані в інвертори, генератори та підсилювачі з використанням методів виготовлення на основі розчинів. Такі застосування підтверджують можливість рівномірної інтеграції високочастотних схем на великих площах [6].

Регулювання атомної щільності аморфних матеріалів на основі InGaZnO модифікує їхню електронну зонну структуру, що призводить до зменшення ефективної електронної маси, розширення енергетичних щілин і пригнічення струмів витоку поза зоною [7].

Гібридні матеріали, що поєднують аморфні напівпровідники з провідними наноматеріалами, такими як одностінні вуглецеві нанотрубки, продемонстрували суттєве покращення рухливості носіїв і частотної характеристики, досягнувши стабільної роботи в мегагерцовому діапазоні [6].

Продемонстровані високочастотні можливості аморфних напівпровідників [1, 4] роблять їх життєздатними претендентами для телекомунікаційних компонентів, таких як радіочастотні підсилювачі, високошвидкісні транзистори і гнучкі комунікаційні модулі. Їх сумісність з гнучкою електронікою на великі площі робить їх ключовими компонентами для мереж зв'язку наступного покоління, в тому числі для натільних, прозорих і розподілених систем, які можна носити з собою.

Майбутні дослідження мають бути зосереджені на довготривалій надійності в умовах високих електричних полів, стратегіях терморегулювання та монолітній інтеграції зі звичайними напівпровідниковими технологіями для подальшого розширення їхнього промислового впровадження.

### Висновки

Аморфні напівпровідники перейшли від низькочастотних дисплеїв до високочастотних телекомунікаційних схем завдяки значному прогресу в матеріалознавстві та проектуванні пристроїв. Завдяки вирішенню таких проблем, як джоулеве нагрівання та обмеження рухливості носіїв заряду, аморфні оксидні напівпровідники тепер демонструють конкурентоспроможні радіочастотні характеристики, зберігаючи при цьому переваги у вартості та масштабованості. Їх інтеграція в складні телекомунікаційні схеми є перспективним напрямком для гнучких, великогабаритних електронних систем наступного покоління.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Liu A., Kim Y.-S., Kim M. G. et al. Selenium-alloyed tellurium oxide for amorphous p-channel transistors // Nature. – 2024.
2. Sturm J. C., Huang Y., Han L. et al. Amorphous silicon: The other silicon // Proceedings of the 12th International Conference on Ultimate Integration on Silicon (ULIS 2011). – 2011.
3. Hu Q., Zhu S., Zhu Y. et al. Amorphous indium tin oxide transistors for power amplification above 10 GHz // Nature Electronics. – 2025.

4. Liu X., Wan D., Wu Y. et al. Transparent megahertz circuits from solution-processed composite thin films // *Nanoscale*. – 2016.
5. Su L.-Y., Huang J. Demonstration of radio-frequency response of amorphous IGZO thin film transistors on the glass substrate // *Solid-State Electronics*. – 2015.
6. Lee C.-G., Joshi T., Divakar K., Dodabalapur A. Circuit applications based on solution-processed zinc-tin oxide TFTs // *Device Research Conference (DRC): Conference Digest*. – 2011.
7. Cha S.-K., Im S., Kim Y.-S. et al. Density-dependent microstructures and electromechanical properties of amorphous InGaZnO<sub>4</sub> semiconductors: An ab initio study // *ACS Applied Electronic Materials*. – 2022.

**Барабан Інна Олександрівна** — аспірантка кафедри інфокомунікаційних систем і технологій факультету інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [baraban.i.o@vntu.edu.ua](mailto:baraban.i.o@vntu.edu.ua)

Науковий керівник: **Кичак Василь Мартинович** — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Baraban Inna O.** — Postgraduate Student of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, e-mail: [baraban.i.o@vntu.edu.ua](mailto:baraban.i.o@vntu.edu.ua)

Supervisor: **Kychak Vasyl M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Information and Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia