

РАДІАЦІЙНО-СТІЙКІ РАДІОТЕХНІЧНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ АМОРФНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Радіаційна стійкість є критично важливою вимогою для радіотехнічних пристроїв та телекомунікаційного обладнання, що експлуатуються в космічних, ядерних та інших середовищах з високим рівнем радіації. Протягом останніх двох десятиліть аморфні напівпровідники привертають все більшу увагу як альтернатива традиційним кристалічним матеріалам завдяки своїй вродженій стійкості до структурної деградації, спричиненої радіацією. У цих матеріалах представлено огляд сучасного стану радіочастотних і телекомунікаційних пристроїв, стійких до радіації, на основі аморфних напівпровідників, з особливим акцентом на технологіях аморфних оксидних напівпровідників. У огляді узагальнено властивості матеріалів, механізми реакції на радіацію, реалізації на рівні пристроїв та сфери застосування, що дає уявлення про сучасні досягнення, обмеження та напрямки майбутніх досліджень.

Ключові слова: радіаційностійка електроніка; радіоінженерні пристрої; телекомунікаційне обладнання; аморфні напівпровідники; аморфні оксидні напівпровідники; радіаційні ефекти; тонкоплівкові транзистори; високонадійні системи зв'язку.

Abstract

Radiation tolerance is a critical requirement for radio engineering devices and telecommunication equipment operating in space, nuclear, and other high-radiation environments. Over the past two decades, amorphous semiconductors have attracted increasing attention as an alternative to conventional crystalline materials due to their inherent resistance to radiation-induced structural degradation. This paper presents a state-of-the-art review of radiation-resistant radio-frequency and telecommunication devices based on amorphous semiconductors, with a particular focus on amorphous oxide semiconductor technologies. The review synthesizes reported material properties, radiation response mechanisms, device-level implementations, and application domains, providing a consolidated perspective on current achievements, limitations, and future research directions.

Keywords: radiation-resistant electronics; radio engineering devices; telecommunication equipment; amorphous semiconductors; amorphous oxide semiconductors; radiation effects; thin-film transistors; high-reliability communication systems.

Вступ

Надійна робота радіотехнічних і телекомунікаційних систем в умовах інтенсивного випромінювання залишається актуальною проблемою в електронній інженерії. Іонізуюче та неіонізуюче випромінювання може викликати дефекти кристалічної решітки, захоплення заряду та довготривалий дрейф параметрів у звичайних кристалічних напівпровідниках, що призводить до погіршення продуктивності та передчасного виходу приладів з ладу. Ці проблеми особливо гостро стоять у космічній електроніці, ядерному приладобудуванні та висотних системах зв'язку.

У відповідь на ці виклики значні дослідницькі зусилля були спрямовані на пошук альтернативних напівпровідникових матеріалів з покращеною радіаційною стійкістю. Серед них аморфні напівпровідники стали перспективним класом матеріалів. Цей огляд має на меті узагальнити та критично проаналізувати сучасний стан досліджень радіаційно-стійких радіотехнічних і телекомунікаційних пристроїв на основі аморфних напівпровідників, висвітлити ключові тенденції та відкриті проблеми, про які повідомляється в літературі.

Результати дослідження

Радіаційні ефекти в напівпровідникових приладах зазвичай поділяють на іонізуючі ефекти, пошкодження зсувом і одномоментні явища [1]. У кристалічних напівпровідниках ці ефекти призво-

дять до появи чітко визначених дефектів кристалічної ґратки та інтерфейсних станів, які суттєво змінюють транспорт заряду та надійність приладу.

У літературі [1 – 6] постійно повідомляється, що аморфні напівпровідники демонструють принципово іншу реакцію на радіаційне опромінення. Через відсутність дальнього кристалічного порядку радіаційно-індуковані дефекти мають тенденцію до злиття з існуючою неупорядкованою структурою, що призводить до порівняно менших змін електронних властивостей. Ця фундаментальна відмінність є основою для їх використання в радіаційно-стійких електронних системах [7].

Ранні дослідження аморфного кремнію продемонстрували помірну стійкість до радіації; однак обмеження в рухливості носіїв заважали його використанню у високочастотних застосуваннях. Останні дослідження [3, 4, 8] були зосереджені на аморфних оксидних напівпровідниках, таких як аморфний оксид індію, галію і цинку (a-IGZO) та споріднених системах матеріалів [9].

Опубліковані експериментальні результати [8 – 9] вказують на те, що ці матеріали зберігають стабільні електричні характеристики при тривалому радіаційному впливі, включаючи мінімальний зсув порогової напруги і обмежену деградацію рухливості. Огляд наявних даних дозволяє припустити, що дефектні стани, пов'язані з киснем, і локалізоване захоплення заряду відіграють другорядну роль порівняно з дефектоутворенням у кристалічних аналогах, що підвищує радіаційну стійкість [10].

У літературі [8 – 14] описано широкий спектр архітектур пристроїв на основі аморфних напівпровідників. Тонкоплівкові транзистори, виготовлені з аморфних оксидних напівпровідників, є найбільш вивченими і представляють собою основні будівельні блоки для радіаційно-стійких схем.

Попередні дослідження [7 – 9] показують, що такі прилади можна використовувати в каскадах підсилення сигналів, керуючій електроніці та схемах зі змішаними сигналами, що застосовуються в телекомунікаційних системах. Важливо, що численні публікації повідомляють про стабільну роботу пристроїв при кумулятивних дозах радіації, що мають відношення до космічних та ядерних застосувань, підтверджуючи придатність аморфних напівпровідникових технологій для високонадійних систем.

Порівняльні аналізи, наведені в літературі [10 – 14], послідовно показують, що аморфні напівпровідникові пристрої перевершують традиційні кристалічні пристрої з точки зору стійкості до радіації, демонструючи при цьому дещо знижену мобільність носіїв і частотні характеристики. Однак для багатьох телекомунікаційних підсистем компроміс між продуктивністю і надійністю є прийнятним або навіть бажаним.

Крім того, технології виготовлення аморфних напівпровідників, часто засновані на процесах низькотемпературного осадження, дозволяють інтегрувати їх на гнучкі або нестандартні підкладки. Ця характеристика все частіше підкреслюється в оглядових дослідженнях як стратегічна перевага для легких, компактних і механічно стійких комунікаційних платформ.

Проаналізована література [8 – 14] визначає кілька ключових сфер застосування радіаційно-стійких аморфних напівпровідникових приладів. До них відносяться корисне навантаження супутникового зв'язку, космічна радіоелектроніка, системи моніторингу ядерних об'єктів і телекомунікаційна інфраструктура, критична для безпеки.

На системному рівні автори підкреслюють важливість поєднання толерантності до радіації на рівні матеріалу зі стратегіями зменшення впливу на рівні схеми для досягнення надійної загальної продуктивності системи. Конвергенція аморфних напівпровідникових технологій з сучасними підходами «система-на-панелі» і гетерогенної інтеграції виділяється як перспективний напрямок досліджень [13].

Незважаючи на значний прогрес, література [3, 4, 11, 13] виявляє кілька невирішених проблем. До них відносяться довгострокова стабільність в умовах змішаного випромінювання, обмеження високочастотних характеристик і потреба в стандартизованих методологіях випробувань на випромінювання. Крім того, всебічних демонстрацій на рівні систем залишається відносно мало, що вказує на можливість для майбутніх досліджень на стику матеріалознавства та інженерії телекомунікаційних систем.

Висновки

У цьому огляді узагальнено та проаналізовано сучасні дослідження радіаційно-стійких радіотехнічних і телекомунікаційних пристроїв на основі аморфних напівпровідників. Розглянуті дослідження послідовно демонструють, що аморфні оксидні напівпровідники мають вищу радіаційну стійкість

порівняно з традиційними кристалічними матеріалами, зберігаючи при цьому прийнятні електричні характеристики для багатьох комунікаційних застосувань. Очікується, що подальші міждисциплінарні дослідження ще більше закріплять ці матеріали як ключові компоненти стійких до радіації телекомунікаційних систем наступного покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fishchuk I. I. Determination of energy disorder value in amorphous oxide semiconductors // Nuclear Physics and Atomic Energy. – 2024. – Т. 25, № 2. – С. 134–142.
2. Huang C.-Y. The effect of gamma irradiation on the stability of amorphous InGaZnO metal–semiconductor–metal UV photodetectors // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2020. – Vol. 533. – Article 119941.
3. Duan Z., Zhao X., Han J., Wang P. Mo–S–Pb–Ti amorphous films: Achieving exceptional irradiation tolerance and enhanced wear resistance // Applied Surface Science. – 2025. – Vol. 666. – Article 160960.
4. Kang D., Jeon S., Ju E. C., Park S. K. Highly stable amorphous metal oxide thin-film transistors for in situ X-ray tolerant electronics // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2025. – Vol. 17, No. 4. – P. 5123–5132.
5. Park B., Ho D., Kwon G., Kim M.-G. Solution-processed rad-hard amorphous metal-oxide thin-film transistors // Advanced Functional Materials. – 2018. – Vol. 28, No. 25. – Article 1800479.
6. Zalte M. B., Kumar V., Surya S. G., Baghini M. S. A solution-processed amorphous InGaZnO thin-film transistor-based dosimeter for gamma-ray detection and its reliability // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21, No. 18. – P. 20538–20545.
7. Itoh H. Present status and prospects of R&D of radiation-resistant semiconductor devices at JAEA // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2013. – Vol. 8773. – Article 87730B.
8. Muhammad Z., Wang Y., Zhang Y., Zhao W. Radiation-tolerant electronic devices using wide bandgap semiconductors // Advanced Materials Technologies. – 2023. – Vol. 8, No. 9. – Article 2300275.
9. Wang J., Mulligan P., Brillson L., Cao L. R. Review of using gallium nitride for ionizing radiation detection // Applied Physics Reviews. – 2015. – Vol. 2, No. 3. – Article 031102.
10. Jeong H.-J., Lee H.-M., Oh K.-T., Park J.-S. Enhancement of In–Sn–Ga–O TFT performance by the synergistic combination of UV + O₃ radiation and low-temperature annealing // Journal of Electroceramics. – 2016. – Vol. 37, No. 2–4. – P. 138–145.
11. Kim J., Kim S., Kim H., Kim C. Enhancing AC stress stability in amorphous indium gallium zinc oxide thin-film transistors via controlled hydrogen diffusion // Journal of Materials Chemistry C. – 2025. – Vol. 13. – Early Access.
12. Kamiya T., Hosono H. Amorphous In–Ga–Zn–O thin film transistors: Fabrication and properties // Handbook of Zinc Oxide and Related Materials. Volume Two: Devices and Nano-Engineering. – Boca Raton : CRC Press, 2012. – P. 207–234.
13. Wang X.-L., Zhao H.-L., Lee B., Kim S.-J. Improved performance and bias stability in TFTs with solution-processed graphene oxide-doped In₂O₃ active layers treated under deep UV irradiation // Journal of Materials Chemistry C. – 2025. – Vol. 13. – Early Access.
14. Herman G. S., Rajachidambaram J. S., Rajachidambaram M. S., Conley J. F. Transparent oxide semiconductors: Recent material developments and new applications // Proceedings of the IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting (PHO 2011). – 2011. – P. 481–482.

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

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

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