

5. Mattioli F, Stampatori C, Righetti F, Sala E, Tomasi C, De Palma G. Neurological and cognitive sequelae of Covid-19: a four month follow-up. *J Neurol.* 2021;268(12):4422-4428. doi:10.1007/s00415-021-10579-6
6. Shariff S, Uwishema O, Mizero J, et al. Long-term cognitive dysfunction after the COVID-19 pandemic: a narrative review. *Ann Med Surg (Lond).* 2023;85(11):5504-5510. Published 2023 Sep 7. doi:10.1097/MS9.0000000000001265
7. Beghi E, Giussani G, Westenberg E, et al. Acute and post-acute neurological manifestations of COVID-19: present findings, critical appraisal, and future directions. *J Neurol.* 2022;269(5):2265-2274. doi:10.1007/s00415-021-10848-4

НОВІ ФІЗИЧНІ ПІДХОДИ ДО ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

Кевшин Назар Андрійович¹, Семенюк Андрій Анатолійович², Кевшин Андрій Григорович³

¹Студент 3-го курсу Волинського національного університету імені Лесі Українки

²Студент 4-го курсу Волинського національного університету імені Лесі Українки

³Доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки

Kevshyn.Nazar2023@vnu.edu.ua, Kevsyin_A@ukr.net

Стрімка експансія мобільних технологій, екосистем інтернету речей та нейромережових обчислень створює безпрецедентний попит на продуктивність електронних систем. Однак на шляху цього прогресу дедалі гостріше постає проблема енергоспоживання мікро- та наноелектронних компонентів, яка перетворилася на один із головних обмежувальних чинників індустрії. Тривала мініатюризація елементів інтегральних схем, що десятиліттями підпорядковувалася закону Мура, призвела до критичного зростання щільності транзисторів. Це, своєю чергою, спричинило різке збільшення теплових втрат і струмів витоку, що нівелює переваги від зменшення розмірів. За таких обставин виникає нагальна потреба у переході від традиційного масштабування до пошуку фундаментально нових фізичних принципів і матеріалів, здатних забезпечити високу швидкодію при мінімальних енергетичних витратах.

Фундамент сучасної електроніки – класична КМОН-технологія – базується на керуванні електронними потоками за допомогою електричного поля затвора. Основний масив енергетичних втрат у таких схемах зумовлений динамічним перемиканням паразитних ємностей та витоками в неактивному стані. Існує фундаментальне термодинамічне обмеження, відоме як принцип Ландауера, що визначає мінімальну кількість тепла, яка виділяється під час незворотної логічної операції [1]. Хоча сучасні пристрої все ще працюють на рівнях, значно вищих за цю межу, подальший розвиток вимагає якісної зміни інженерної парадигми.

Одним із найбільш вивчених шляхів вирішення цієї проблеми є перехід до субпорогових режимів роботи транзисторів, де керування здійснюється при напругах, нижчих за порогові. Це дозволяє радикально знизити енергоспоживання на одну операцію, що є критичним для автономних сенсорів, хоча й супроводжується певним зниженням частоти роботи та підвищеною чутливістю до похибок виготовлення.

Новий етап у подоланні енергетичного бар'єра пов'язаний із впровадженням інноваційних наноструктур, зокрема двовимірних матеріалів. Графен та дихалькогеніди перехідних металів, завдяки своїй атомарній товщині, забезпечують винятковий електростатичний контроль над каналом. Це дає змогу ефективно боротися зі струмами витоку та знижувати робочу напругу живлення. Зокрема, напівпровідникові властивості таких сполук, як MoS₂, відкривають нові можливості для логічних схем, що підтверджується численними сучасними дослідженнями [2]. Паралельно з цим активно розвивається концепція тунельних польових транзисторів. На відміну від стандартних пристроїв, де носії долають бар'єр за рахунок теплової енергії, у тунельних транзисторах використовується квантово-механічне тунелювання. Це дозволяє подолати класичну межу крутизни характеристики (60 мВ на декаду) і забезпечити стабільну роботу на наднизьких напругах [3].

Крім удосконалення зарядової електроніки, дослідники розробляють альтернативні методи обробки даних, серед яких особливе місце посідає спінтроніка. Тут носієм інформації виступає не заряд, а спіновий стан електрона, що дозволяє створювати енергонезалежні пристрої з миттєвим увімкненням і низьким рівнем тепловиділення [4]. Додаткові перспективи відкриває використання ферроелектричних матеріалів, що демонструють ефект негативної ємності. Інтеграція таких шарів у затвор транзистора дозволяє підсилювати напругу без додаткових витрат енергії, знижуючи поріг перемикання. У віддаленій перспективі радикальну зміну ситуації можуть забезпечити квантові та оборотні обчислення, які обіцяють принципово інший рівень енергоефективності. Таким чином, розв'язання проблеми енергоспоживання в наноелектроніці лежить у площині синергії нових фізичних ефектів, передових матеріалів та нестандартних архітектурних рішень, що формують фундамент для систем наступного покоління.

Список літератури

1. Bormashenko E. Landauer's principle: past, present and future. *Entropy*. 2025. Vol. 27, № 4. P. 437.
2. Muñoz Martínez B. A., Flores Salazar M., Syamala Rao M. G., de Luna Bugallo A., Ramirez-Bon R. Effect of thickness and thermal treatment on the electrical performance of 2D MoS₂ monolayer and multilayer field-effect transistors. *Journal of Electronic Materials*. 2024. Vol. 53. P. 2124–2134.
3. Chen S., An Y., Wang S., Liu H. A review of tunnel field-effect transistors: materials, structures, and applications. *Micromachines*. 2025. Vol. 16, № 8. P. 881.
4. Rajput P. J., Bhandari S. U., Wadhwa G. A review on spintronics: an emerging technology. *Silicon*. 2022. Vol. 14, № 10. P. 9195–9210.