

SECTION: PHYSICS AND ASTRONOMY

ВИКОРИСТАННЯ ГРАФЕНУ ТА 2D-МАТЕРІАЛІВ У НАНОЕЛЕКТРОНІЦІ

Мартинюк Володимир Валерійович

кандидат технічних наук, доцент

Кафедра загальної фізики

Гевко Богдан Васильович

здобувач вищої освіти бакалаврського рівня

Кафедра обчислювальної техніки

Вінницький національний технічний університет, Україна

Стрімкий розвиток сучасної електроніки вимагає створення матеріалів із принципово новими фізичними властивостями, здатними забезпечити підвищення швидкодії, зниження енергоспоживання та зменшення розмірів електронних компонентів. Одним із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті є використання графену та двовимірних матеріалів, які мають товщину в один або кілька атомних шарів і володіють унікальними електричними, механічними та оптичними властивостями.

Від моменту відкриття графену у 2004 році дослідження 2D-матеріалів значно розширилися, охопивши дихалькогеніди перехідних металів, гексагональний нітрид бору, фосфорен, оксид графену та інші сполуки. Їхні властивості визначаються квантовими ефектами, які проявляються лише за умов двовимірної геометрії, що робить такі матеріали надзвичайно цінними для наноелектроніки.

Графен – це моношар атомів вуглецю, які лежать у площині та утворюють правильну шестикутну решітку (рис. 1). Кожен атом має sp^2 -гібридизацію та зв'язується з трьома іншими атомами, формуючи дуже міцні σ -зв'язки в площині. При цьому кожен атом має ще один електрон, який не бере участі у σ -зв'язку і створює π -електронну хмару над і під площиною. Саме ці π -електрони забезпечують надзвичайно високу електронну рухливість та визначають унікальні електронні властивості матеріалу.

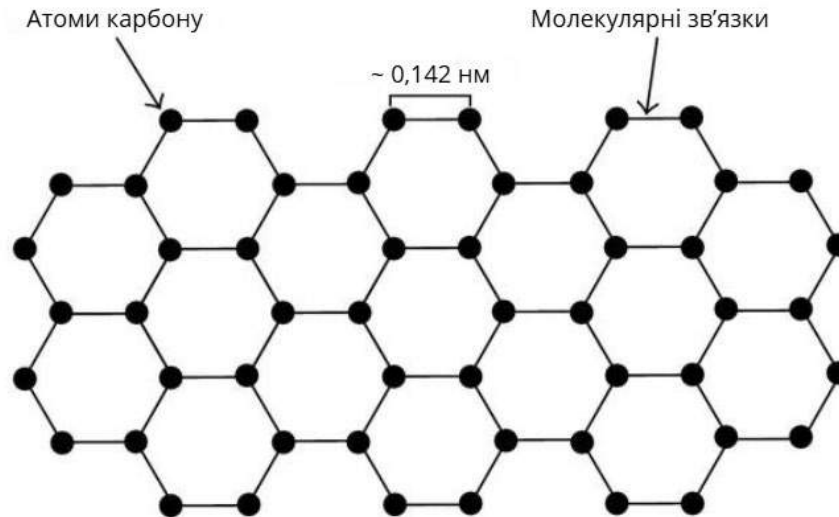


Рис. 1. Кристалічна структура графену

Завдяки такій будові графен має лінійну дисперсію енергетичних зон поблизу точок K і K' у зонній структурі. У цих точках валентна й провідна зони торкаються одна одної, утворюючи так звані «конуси Дірака» (рис. 2). У межах цих конусів носії заряду поведуться подібно до частинок із нульовою ефективною масою – так званих дираківських ферміонів. Ці особливості визначають багато чудових електронних властивостей графену й роблять його «модельним» 2D-матеріалом [2].

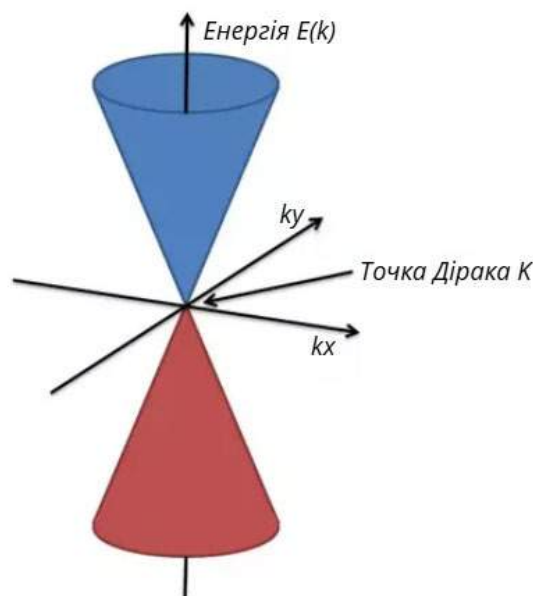


Рис. 2. Енергетична дисперсія графену (конуси Дірака)

Електричні властивості графену:

– Висока рухливість носіїв: графен демонструє надзвичайно високу рухливість електронів – у підвісних зразках при низьких температурах вона може досягати 10^5 – 10^6 $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, а в практичних пристроях на підкладках – часто

десятки тисяч $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, що забезпечує потенціал для надшвидких електронних компонентів [2];

– Висока провідність і прозорість: поєднання високої електропровідності та оптичної прозорості робить графен привабливим для прозорих електродів у фотоніці й дисплеях [1];

– Відсутність нормальної ширини забороненої зони (нульова ширина забороненої зони): у чистому моношарі графену немає значущого енергетичного проміжку між валентною та зоною провідності, що ускладнює створення ключового елементу цифрової логіки – ефективного вимикача з високим співвідношенням «увімкнено/вимкнено». Це спонукає до пошуку методів інженерії меж, подвійних шарів або комбінування з іншими 2D-матеріалами для отримання потрібного «бандгепу» [2].

Графен має унікальні механічні та термічні властивості, які роблять його одним з найкращих матеріалів для майбутньої електроніки. Насамперед він вирізняється своєю дуже великою міцністю. Хоча графен складається всього з одного шару атомів вуглецю, він у понад 100 разів міцніший за сталь. Це означає, що, незважаючи на свою мінімальну товщину, він може витримувати великі навантаження та деформації без руйнування. Дослідження показують, що графен має надзвичайно високий модуль пружності. Для графену він наближається до 1 терапаскаля, що є рекордним значенням серед твердих матеріалів [3].

Важливою характеристикою є також дуже висока теплопровідність графену, яка в окремих випадках перевищує 3000–5000 Вт/м·К. Завдяки цьому графен ефективно розсіює тепло, що робить його перспективним матеріалом для теплового менеджменту в наноелектронних пристроях з високою щільністю інтеграції [1].

Багатогранність фізичних властивостей графену визначає широкий спектр його потенційних застосувань у сучасній та майбутній наноелектроніці. Однією з найважливіших галузей є створення високочастотних і високошвидкісних транзисторів, де графен демонструє значний потенціал завдяки високій рухливості носіїв заряду, що дозволяє працювати на гігагерцових і навіть терагерцових частотах [2]. Хоча графен не підходить для класичної цифрової логіки через відсутність енергетичного забороненого проміжку, він демонструє значний потенціал у радіочастотних пристроях та активних модуляторах, де висока рухливість носіїв є вирішальним фактором.

Іншим важливим напрямом є сенсорні технології. Завдяки великій площі поверхні та високій чутливості електропровідності до адсорбованих молекул графен дозволяє створювати газові сенсори та біосенсори з наднизьким порогом виявлення [4]. Не менш перспективним є застосування графену у фотоніці – зокрема, в оптичних модуляторах, фотодетекторах і прозорих електродах, де він виступає альтернативою традиційному індій-олов'яному оксиду. Крім того, поєднання графену з іншими двовимірними матеріалами у так званих гетероструктурах ван дер Ваальса відкриває можливості для створення нових наноелектронних архітектур із контрольованими електронними властивостями, включаючи формування бар'єрів, тунельних переходів та різноманітних

квантових структур [1]. Усе це робить графен одним із ключових кандидатів на роль універсального матеріалу для електроніки майбутнього.

Попри значний науковий і промисловий інтерес, впровадження графену в наноелектроніку стикається з низкою суттєвих труднощів. Насамперед залишається актуальною проблема масштабованого виробництва графенових плівок високої якості. Методи CVD-синтезу вже дозволяють отримувати великі площі графену, однак процес перенесення плівок на цільові підкладки супроводжується ризиком утворення дефектів, зморшок, домішок і забруднень, що знижує якість кінцевих пристроїв [1]. Не менш важливою є проблема формування низькоомних і стабільних контактів між графеном та металами, що відіграє ключову роль у досягненні високої продуктивності електронних компонентів. Крім цього, велике значення мають питання відтворюваності параметрів – навіть невеликі дефекти, неоднорідність поверхні або деформація зразка здатні суттєво впливати на електронні та механічні властивості матеріалу [1]. Нарешті, існують і економічні обмеження, пов'язані з вартістю високотехнологічного обладнання та хімічних реагентів, необхідних для синтезу та очищення графенових плівок, що ускладнює широке комерційне впровадження матеріалу у масштабах промисловості.

Підсумовуючи, графен та інші двовимірні матеріали поєднують видатні електричні, механічні й теплові властивості, що робить їх одними з найперспективніших матеріалів для майбутньої наноелектроніки. Їх використання відкриває шлях до створення високошвидкісних транзисторів, надчутливих сенсорів, гнучких електронних пристроїв і сучасних оптоелектронних елементів. Водночас одним із найбільш активно досліджуваних напрямів сьогодні вважається поєднання графену з іншими 2D-матеріалами. Такий підхід дає змогу компенсувати природні обмеження графену та формувати гетероструктури з новими функціональними властивостями.

Подальший прогрес у цій галузі залежатиме від здатності дослідників підвищити стабільність параметрів матеріалів, зменшити контактний опір та забезпечити сумісність технологій із сучасними виробничими процесами. Саме ці кроки визначатимуть, наскільки широко графен буде застосований у наступному поколінні нанопристроїв.

Список використаних джерел

1. S. H. Choi та ін. Large-scale synthesis of graphene and other 2D materials towards industrialization. *Nature Communications*, 2022. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-29182-y> (дата звернення: 07.12.2025)
2. Y. Lei та ін. Graphene and Beyond: Recent Advances in Two-Dimensional Materials Synthesis, Properties, and Devices, *ACS Nanoscience Au*, 2022. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnanoscienceau.2c00017> (дата звернення: 07.12.2025)
3. D. Akinwande та ін. A Review on Mechanics and Mechanical Properties of 2D Materials, 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1611.01555> (дата звернення: 07.12.2025)
4. J. Liu та ін. Applications of Graphene-Based Materials in Sensors: A Review, *Micromachines (MDPI)*, 2022. URL: <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/2/184> (дата звернення: 07.12.2025)