

ЧОМУ ГРАФЕН МАЄ ТАКУ ВИСОКУ ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ

Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Досліджено фізичні принципи, що зумовлюють надзвичайно високу електропровідність графену. Проаналізовано унікальну електронну структуру графену з конусом Дірака та безмасовими діраковськими ферміонами. Розглянуто механізми розсіювання носіїв заряду, роль дефектів та вплив підкладки. Наведено порівняльну характеристику провідності графену з іншими матеріалами та обґрунтовано перспективи його застосування в наноелектроніці.

Ключові слова: графен, електропровідність, конус Дірака, безмасові ферміони, мобільність носіїв заряду, балістичний транспорт, гексагональна ґратка.

Abstract

The physical principles underlying the exceptionally high electrical conductivity of graphene are investigated. The unique electronic structure of graphene with Dirac cone and massless Dirac fermions is analyzed. The mechanisms of charge carrier scattering, the role of defects and the influence of substrate are considered. A comparative characteristic of graphene conductivity with other materials is provided, and prospects for its application in nanoelectronics are substantiated.

Keywords: graphene, electrical conductivity, Dirac cone, massless fermions, charge carrier mobility, ballistic transport, hexagonal lattice.

Вступ

Відкриття графену - одношарового вуглецю, організованого у гексагональну ґратку - революціонізувало сучасну матеріалознавчу науку. Його унікальні властивості, зокрема надзвичайно висока електропровідність, обумовлені принципово новими квантово-механічними явищами. Ця властивість робить графен перспективним матеріалом для створення швидкодіючих транзисторів, гнучкої електроніки та квантових пристроїв.

Мета роботи систематичний аналіз причин високої провідності графену через призму його електронної структури та транспортних характеристик.

Результати дослідження

Основним результатом дослідження є комплексне пояснення високої електропровідності графену через аналіз його енергетичної зонної структури. У звичайних металах і напівпровідниках носії заряду поведуться як частинки з ефективною масою, що описуються нерелятивістською теорією. У графені ж електрони в точках К і К' зворотного простору поведуться як безмасові релятивістські частки - діраковські ферміони.

$$E(k) = \pm \hbar v_F |k| \quad (1)$$

де $v_F \approx 10^6$ м/с - швидкість Фермі, яка приблизно в 300 разів менша за швидкість світла, але значно перевищує швидкості електронів у звичайних напівпровідниках. Така лінійна залежність призводить до формування конічної енергетичної структури - конуса Дірака продемонстровано на рисунку 1.

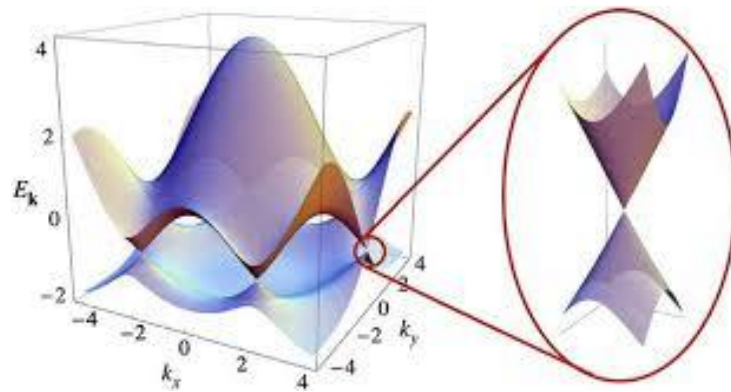


Рис. 1. Конус Дірака в графені. Лінійний закон дисперсії поблизу точок К і К' зворотного простору

Другим фактором є висока рухливість носіїв заряду. Експериментально виміряна рухливість у підвішених зразках графену при низьких температурах може перевищувати $200000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Це на порядки вище, ніж у кремнію $\approx 1400 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ та навіть якщо у високоякісного арсеніду галію $\approx 8000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Висока рухливість пояснюється низьким розсіюванням носіїв, пов'язаним з унікальними властивостями діраковських ферміонів: симетрією хвильової функції та відсутністю зворотного розсіювання на довгих дефектах.

Квантово-механічні обчислення показують, що ймовірність зворотного розсіювання електрона на діраковському потенціалі прямує до нуля, що забезпечує балістичний транспорт на мікрометрових масштабах.

Третім фундаментальним аспектом є дворівневий характер провідності через наявність двох підгра-ток у кристалічній структурі графену. Ця особливість призводить до появи додаткової симетрії - псевдоспіну, який захищає електрони від розсіювання на деяких типах дефектів.

Таблиця 1 порівняння транспортних властивостей графену з іншими матеріалами

Матеріал	Рухливість носіїв ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	Питомий опір ($\text{Om} \cdot \text{cm}$)	Заборонена зона	Тип носіїв
Графен (підвішений)	200 000 (рекорд)	$\sim 10^{-6}$	0 (нульова заборонена зона)	Електрони та дірки
Кремній (високоякісний)	1400	$\sim 10^3$	1.12 eV	Електрони/дірки
Мідь	-	$1.68 \cdot 10^{-6}$	Немає	Електрони
Арсенід галію	8000	$\sim 10^8$	1.42 eV	Електрони

Практичні вимірювання демонструють, що питома провідність графену залежить від якості зразка та методу виготовлення. Механічно ексфоліований графен має найкращі характеристики, тоді як хімічно осаджений (CVD) графен має більше дефектів, що знижує його провідність. Дефекти ґратки, атомарні домішки та шорсткість підкладки є основними джерелами розсіювання, що обмежують рухливість у реальних пристроях продемонстровано на рисунку 2.

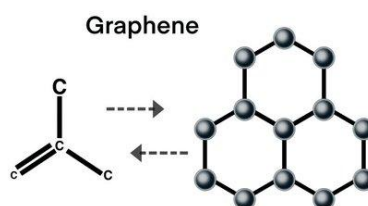


Рис. 2. Атомна структура графену (гексагональна ґратка)

Слід зазначити, що провідність графену має ненульове мінімальне значення навіть при нульовій концентрації носіїв (в точці Дірака). Це пов'язано з квантовими флуктуаціями і описується універсальною величиною $\sigma_{min} = 4e^2 / h$. Така поведінка принципово відрізняється від звичайних металів і напівпровідників.

Таким чином, висока електропровідність графену є наслідком сукупної дії декількох унікальних факторів: безмасового характеру носіїв заряду, лінійного закону дисперсії, низької ймовірності зворотного розсіювання та високої швидкості Фермі. Ці властивості роблять графен не лише матеріалом з рекордними транспортними характеристиками, але й платформою для дослідження нових квантових явищ, таких як квантовий ефект Холла при кімнатній температурі.

Висновки

На основі проведеного дослідження можна зробити висновок, що екстремально висока електропровідність графену зумовлена його фундаментальною електронною структурою з конусом Дірака та безмасовими діраковськими ферміонами. Основні фактори, що визначають провідність, включають: лінійний закон дисперсії, високу швидкість Фермі, низьке розсіювання через заборону зворотного розсіювання та вплив псевдоспінової симетрії.

Перспективи практичного застосування графену в електроніці безпосередньо пов'язані з можливістю контролю якості матеріалу та мінімізації дефектів. Найближчим часом очікується інтеграція графену в гібридні системи разом із традиційними напівпровідниками для створення високошвидкісних транзисторів та фотодетекторів. Довгостроковою перспективою є розробка повноцінної графенової наелектроніки, що може працювати на терагерцових частотах, а також використання графену як платформи для топологічних ізоляторів та спинтронних пристроїв. Розуміння природи високої провідності графену є ключовим для проектування нового покоління електронних пристроїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2023). *Graphene: The road from wonder material to technology*. Nature Reviews Physics, 5(8), 453–465.
2. Banszerus, L., Möller, S., Steiner, C., et al. (2023). *Ballistic transport in graphene grown by chemical vapor deposition*. Nature Communications, 14, 5290.
3. Jiang, J., Mao, J., Duan, S., et al. (2024). *Direct visualization of Dirac fermion dynamics and scattering in graphene heterostructures*. Science Advances, 10(3), ead6037.
4. Yankowitz, M., & LeRoy, B. J. (2022). *Van der Waals heterostructures for advanced electronic and photonic devices*. Nature Reviews Materials, 7(10), 781–799.
5. Miseikis, V., Convertino, D., & Coletti, C. (2022). *Charge carrier dynamics and photoconductivity in graphene at the Dirac point*. 2D Materials, 9(4), 045002.
6. Zhang, Y., & Kim, P. (2023). *Quantum-limited conductivity and electron–phonon coupling in ultra-clean graphene*. Physical Review Letters, 130(21), 216401.

Георгіян Євгеній Геннадійович – студент групи 1KI-25МС, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: zena2zoomcon2661@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Georgian Yevhenii Hennadiiovych – student of group 1KI-25MS, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: zena2zoomcon2661@gmail.com

Scientific advisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriyovych** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia