

СУЧАСНА ФІЗИКА

УДК 539

DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2024/2.14>

Дмитро ЗАЯЦЬ¹, магістр
ORCID ID: 0009-0005-8469-1332
e-mail: dimainthesven@gmail.com

Денис ШПИЛЬКА¹, асп.
ORCID ID: 0000-0003-4255-0994
e-mail: denys.shpylka@knu.ua

Ірина ОВСІЄНКО¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-0508-9652
e-mail: irynaovsienko@knu.ua

Людмила МАЦУЙ¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-8611-437X
e-mail: liudmyla.matsui@knu.ua

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

МАГНІТООПІР НАНОКАРБОНОВИХ СТРУКТУР, МОДИФІКОВАНИХ NiFe

Подано результати досліджень магніто-транспортних властивостей нанокарбонівих структур, модифікованих по поверхні одночасно частинками перехідних металів нікелю і заліза. Як вихідні для модифікації були обрані дві різного типу нанокарбонівих структури: графітові нанопластили з латеральними розмірами частинок до 10 мкм, отримані розщепленням терморозширеного графіту за його кількогодінної обробки ультразвуком в ацетоні, та багатостінні вуглецеві нанотрубки з діаметром до 40 нм. Модифікацію нанокарбону проводили методом відновлення металу на поверхні нанокарбонівого носія з водного розчину нітрату, яким просочували відповідний карбонівий носій. Унаслідок модифікації були отримані нанокарбоніві структури з рівномірним розподілом частинок металу по поверхні нанокарбонівого носія. Сумарна масова концентрація металу на поверхні нанокарбону становила 60 %. Проведені дослідження структурно-фазового складу отриманих модифікованих нанокарбонівих структур виявили, що на поверхні модифікованого нанокарбону наявні не окремі гранули нікелю та заліза, а частинки сплаву FeNi₃.

Для вимірювання опору в магнітному полі об'єми зразки з порошків модифікованих графітових нанопластин (ГНП) та багатостінних вуглецевих нанотрубок (БВНТ) у вигляді прямокутних паралелепіпедів були виготовлені методом холодного пресування з використанням у ролі зв'язувального полівінілацетату (25 % мас.). Вимірювання магнітоопору проводили за температур 293 К і 77 К та за поперечної та поздовжньої орієнтації зразка відносно зовнішнього магнітного поля стандартним чотирьохзондовим методом.

Проведені експериментальні дослідження магнітоопору виявили, що для модифікованих шаруватих нанокарбонівих структур основний внесок у магнітоопір роблять анізотропний магнітоопір, характерний для магнітних металів, і лінійний магнітоопір, що властивий для шаруватих систем із нульовою забороненою зоною та квазілінійним законом дисперсії. Для модифікованих багатостінних вуглецевих нанотрубок БВНТ властивості магнітоопору зумовлюються зазвичай спин-орбітальною взаємодією носіє заряду з магнітними моментами атомів сплаву-модифікатора.

Ключові слова: графітові нанопластили, багатостінні вуглецеві нанотрубки, модифікація, анізотропний магнітоопір, лінійний магнітоопір, спин-поляризоване транспортування.

Вступ

Інтенсивні дослідження нанокарбонівих структур зумовлені їхніми унікальними механічними, адсорбційними, оптичними, електричними, магнітними властивостями та можливістю застосування в різних галузях науки і техніки. На основі нанокарбонівих структур створюють нові наноматеріали для розв'язання нагальних завдань нанотехнології. Одним з напрямків цілеспрямованого керування властивостями нанокарбонівих структур є модифікація поверхні нанокарбону частинками магнітних металів. Така модифікація нанокарбону надає нанокарбонівим структурам якісно нових властивостей, що не є просто поєднанням властивостей обох наносистем, та значно розширює їхні можливі застосування. Модифіковані магнітними металами або їх сполуками вуглецеві нанотрубки можна використовувати як магнітні накопичувачі інформації (Terrones et al., 2006; Liu et al., 2003; Wu et al., 2008), паливні елементи (Okochukwu, & Abimbola, 2024; Vijayan, & Sheik, 2022), поглиначі електромагнітних хвиль (Lan et al., 2023, Luo et al., 2015). Для модифікації нанокарбону магнітною фазою можна використовувати один магнітний метал, одночасно декілька магнітних металів або магнітні сплави. Такими металами, які часто застосовують для модифікації нанокарбону і які за певних умов можуть утворювати частинки сплаву безпосередньо в процесі модифікації нанокарбону, є нікель і залізо. Модифікація нанокарбону, зокрема графітових нанопластин, частинками нікелю та заліза може значно підвищити їхню твердість, зносостійкість і міцність. Це робить такі композити ідеальними для використання в умовах високих механічних навантажень і зношування, наприклад, у покриттях для металевих поверхонь (Bin, & Li, 2022). Модифіковані частинки нанокарбону знаходять застосування в електродах для суперконденсаторів і батарей завдяки поліпшеним електропровідним властивостям і стабільності. Додавання металевих наночастинок поліпшує здатність зберігати заряд і підвищує енергоефективність пристроїв (Vijaya, & Stefanos, 2023). Модифікацію поверхні нанокарбону нікелем і залізом також розглядають як шлях для створення ефективних каталізаторів. Метали слугують активними центрами для каталітичних реакцій, а нанокарбоніві частинки забезпечують високу площу поверхні для підвищення ефективності реакцій (Worsley, & Margadonna, 2022). Модифіковані нанокарбоніві частинки демонструють підвищену термостабільність, що робить їх придатними для використання в екстремальних температурних умовах, таких як в аерокосмічній галузі, та в умовах високих температур у промислових процесах (Xiangqun et al., 2024).

© Заяць Дмитро, Шпилька Денис, Овсієнко Ірина, Мацуй Людмила, 2024

У разі поверхневої модифікації частинок нанокарбону одночасно нікелем і залізом виникають питання структурно-фазового складу магнітної фази: у якому стані перебувають метали на поверхні нанокарбонного носія. Крім того, важливим є встановлення зв'язку між структурно-морфологічними особливостями нанокарбонного носія і впливом модифікації на властивості нанокарбону.

Метою пропонованої роботи було встановлення особливостей магнітотранспорту об'ємних зразків модифікованого нікелем і залізом нанокарбону залежно від структурно-морфологічних особливостей нанокарбону.

1. Методи дослідження

Як вихідні для модифікації були обрані два структурно-різних типи нанокарбонних структур: графітові нанопласти (ГНП) та багатостінні вуглецеві нанотрубки (БВНТ). ГНП були отримані шляхом розщеплення терморозширеного графіту за кількогодінної обробки його ультразвуком в ацетоні. БВНТ отримували CVD-методом з використанням нікелю як каталізатора. Для видалення залишків металу-каталізатора БВНТ піддавали обробці в кислотному середовищі. Отже, для модифікації були обрані шаруваті нанокарбонні структури, утворені плоскими графітовими шарами (ГНП) з латеральними розмірами частинок до 10 мкм та циліндричні нанокарбонні структури (БВНТ) діаметром до 40 нм.

Модифікацію нанокарбону здійснювали методом відновлення металу на поверхні нанокарбонного носія з водного розчину нітрату, яким просочували відповідний карбоний носій. Зазначений метод дає змогу отримати модифіковані нанокарбонні структури з рівномірним розподілом частинок металу по поверхні карбонного носія, а також задавати концентрацію металу на/в карбонному носії. Унаслідок цього були отримані модифіковані ГНП та багатостінні ВНТ із сумарною масовою концентрацією металу 60 %, з яких 80 % мас. становить нікель та 20 % мас. – залізо. Детально метод модифікації нанокарбону нікелем і залізом описано в (Matzui et al., 2023).

На рис. 1 наведено фрагменти дифрактограм для модифікованих NiFe ГНП (а) та БВНТ (б).

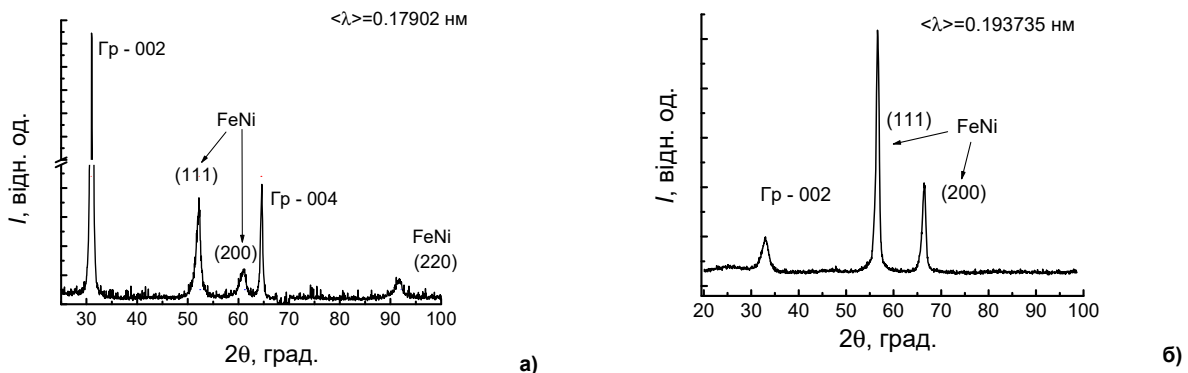


Рис. 1. Фрагменти дифрактограм ГНП (а) та БВНТ (б), модифікованих NiFe (довжину рентгенівської хвилі вказано на рисунку)

Як видно з рис. 1 а, для модифікованих ГНП ідентифікуються 001 лінії, пов'язані з відбиттям від графітових площин. Їхнє точне кутове положення відповідає міжплощинній відстані $d_{002} = 0,335 \text{ nm}$, що ідентично міжплощинній відстані в монокристалічному гексагональному графіті. На дифрактограмі для модифікованих БВНТ ідентифікується тільки одна 002 – графітова лінія. При цьому як для модифікованих ГНП, так і для БВНТ, на дифрактограмі бачимо лінії, що відповідають відбиттям від гранецентрованої кубічної решітки сплаву FeNi₃. Отже, на поверхні частинок нанокарбону наявні не окремі гранули нікелю та заліза, а частинки сплаву FeNi₃. Детально структуру модифікованих частинок нанокарбону досліджено в (Shrylka et al., 2020), де показано, що гранули модифікуючої фази – сплаву FeNi₃ – рівномірно й однорідно розподілені по поверхні окремих частинок нанокарбону.

Для вимірювання опору в магнітному полі об'ємні зразки з порошків модифікованих ГНП і БВНТ у вигляді прямокутних паралелепіпедів розмірами (15×3,5×1,5) мм були виготовлені методом холодного пресування з використанням як зв'язувального полівінілацетату (25 % мас.). Вимірювання магнітоопору проводили за температур 293 К та 77 К та за поперечної (поперечний магнітоопір) та повздовжньої (повздовжній магнітоопір) орієнтації зразка щодо зовнішнього магнітного поля стандартним чотирьохзондовим методом. Опір у магнітному полі вимірювали за схемою: R(0) → R(+Vmax) → R(0) → R(-Vmax) → R(0). Похибка вимірювання електроопору становила 0,5 %. Магнітоопір розраховували як:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\rho(B) - \rho(0)}{\rho(0)} 100\%, \tag{1}$$

де $\rho(B)$ – опір у магнітному полі з індукцією B, $\rho(0)$ – опір у нульовому магнітному полі.

2. Основні результати й обговорення

На рис. 2 наведено температурні залежності питомого електроопору об'ємних зразків, вихідних для модифікування, а також модифікованих нікелем і залізом ГНП (1, 2) та БВНТ (3, 4).

Як видно з рис. 2, для всіх зразків маємо спадну температурну залежність питомого електроопору, що пов'язано з переважним температурно-незалежним розсіюванням носіїв заряду на межах кристалітів. Низькотемпературні особливості в температурній залежності питомого опору для в БВНТ можна пояснити проявом ефекту слабкої локалізації носіїв заряду, що характерний для вуглецевих нанотрбок з недосконалою структурою. Модифікація поверхні нанокарбону частинками сплаву NiFe, як впливає з рис. 2, не приводить до зменшення питомого електроопору об'ємних зразків порівняно з вихідними для модифікування зразками. Це вказує на те, що

модифікування поверхні нанокарбонових частинок частинками сплаву NiFe з концентрацією 60 % мас. не приводить до формування в об'ємному зразку неперервного кластеру зі струмопровідних частинок металу. Зростання питомого опору об'ємних зразків як модифікованих ГНП, так і модифікованих БВНТ, очевидно, пов'язане зі зростанням унаслідок модифікації поверхні контактної опору між частинками нанокарбону.

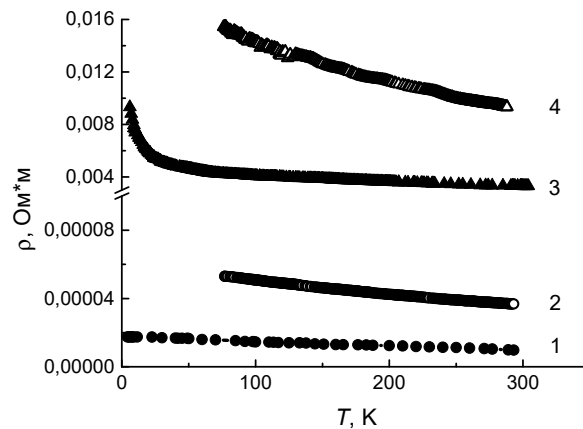


Рис. 2. Температурні залежності питомого електроопору об'ємних зразків вихідних структур (1, 3) та модифікованих NiFe (2, 4) нанокарбонових структур; 1, 2 – ГНП; 3, 4 – БВНТ

На рис. 3 наведено залежності магнітоопору від магнітного поля $\Delta\rho/\rho(B)$ для об'ємних зразків вихідних для модифікації ГНП та БВНТ (вставка) за кімнатної температури та за температури $T = 77$ К.

Як видно з рис. 3, для вихідних ГНП магнітоопір є додатним, квадратичним за полем. У разі зниження температури магнітоопір для вихідних ГНП незначно зростає, що пов'язано зі слабкою залежністю рухливості носіїв заряду у вихідних ГНП від температури. Жодних особливостей у польовій залежності магнітоопору для вихідних ГНП не спостерігаємо. Для вихідних БВНТ за кімнатної температури магнітоопір також є додатним і квадратичним за полем, але його величина є суттєво меншою порівняно з магнітоопором для вихідних ГНП. Проте, у разі зниження температури до 77 К, для вихідних БВНТ спостерігаємо від'ємний магнітоопір, що, як і низькотемпературні особливості питомого опору, є проявом ефекту слабкої локалізації носіїв заряду. Зауважимо, що величина повздовжнього магнітоопору для об'ємних зразків ГНП і БВНТ лежить у межах похибки вимірювання.

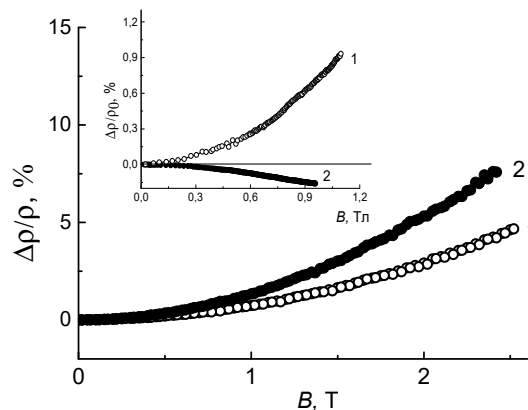


Рис. 3. Залежності $\Delta\rho/\rho(B)$ для об'ємних зразків вихідних для модифікації ГНП і БВНТ (вставка) за кімнатної температури (1) та за температури $T = 77$ К (2)

На рис. 4 подано залежності магнітоопору від величини магнітного поля $\Delta\rho/\rho(B)$ за поперечної (а, в) та повздовжньої (б, г) орієнтації зразка відносно магнітного поля для модифікованих ГНП за температур 293 К (а, б) та 77 К (в, г).

Як випливає з рисунків, модифікація поверхні ГНП частинками сплаву NiFe приводить до суттєвої зміни температурної та польової залежності. Для об'ємного зразка модифікованих ГНП за кімнатної температури поперечний магнітоопір залишається додатним, його величина в максимальному полі, у якому проводили дослідження (2.5 Тл), зростає приблизно у 2,5 рази порівняно з немодифікованим зразком. Для зразка модифікованих ВНТ в залежності $\Delta\rho/\rho(B)$ з'являється гістерезис, залежність $\Delta\rho/\rho(B)$ є близькою до симетричної. Також після модифікації змінюється характер функціональної залежності магнітоопору від магнітного поля: у вихідному зразку ГНП магнітоопір квадратичний за полем, для зразка модифікованих ГНП магнітоопір стає лінійним за полем, починаючи з величини магнітного поля ~ 0.7 Тл, при цьому магнітоопір слабо залежить від температури. Крім того, для об'ємного зразка модифікованих ГНП з'являється повздовжній магнітоопір, для якого характерним є гістерезис, а також зміна знаку магнітоопору. За температури 77 К гістерезис і зміна знаку в польовій залежності магнітоопору зберігаються

На рис. 5 подано залежності поперечного (а, в) та повздовжнього (б, г) магнітоопору від величини магнітного поля для об'ємних зразків модифікованих БВНТ за кімнатної температури (а, б) та за температури 77 К (в, г).

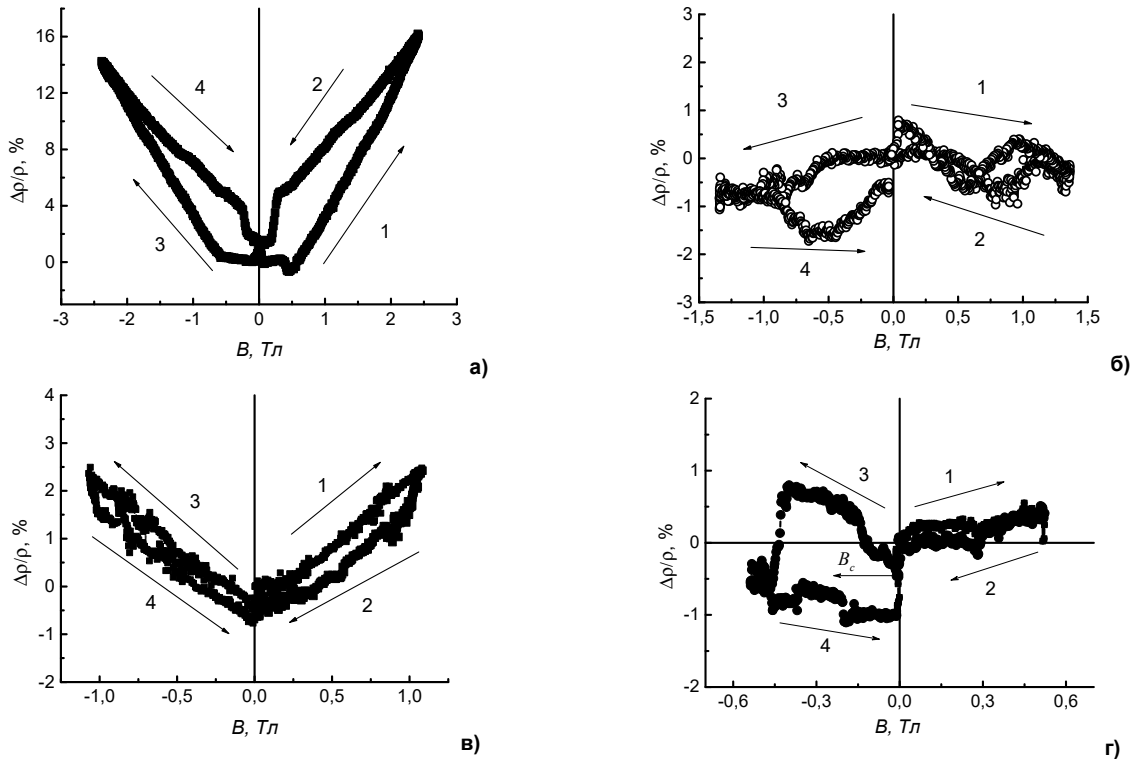


Рис. 4. Залежності $\Delta\rho/\rho(B)$ за поперечної (а, в) та повздовжньої (б, г) орієнтації зразка відносно магнітного поля для модифікованих ГНП за температур 293 К (а, б) та 77 К (в, г)

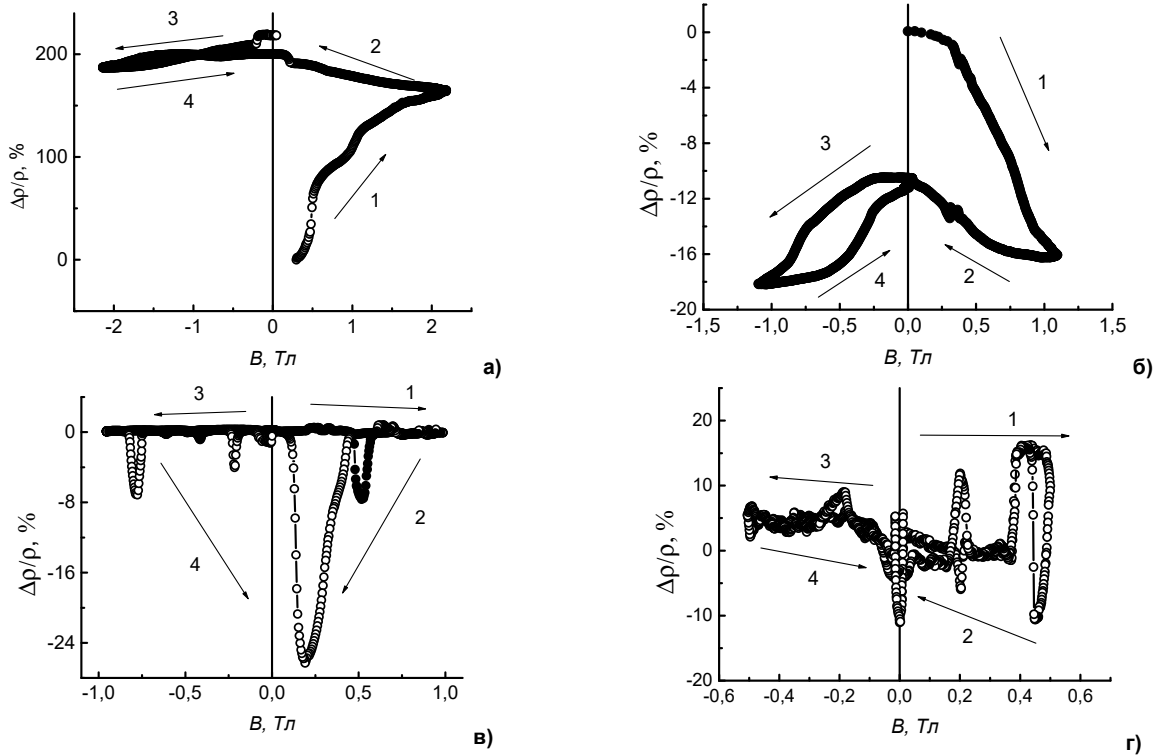


Рис. 5. Залежності $\Delta\rho/\rho(B)$ для поперечного (а, в) та повздовжнього (б, г) магнітоопору для об'ємних зразків модифікованих БВНТ за кімнатної температури (а, б) та за температури 77 К (в, г)

Як видно з рисунків, значні зміни в польовій залежності магнітоопору спостерігаємо для об'ємного зразка БВНТ після модифікації. Значно (до 200 разів) зростає показник поперечного магнітоопору за кімнатної температури, у магнітоопорі спостерігаємо гістерезис, насичення магнітоопору в максимальному полі, за якого проводили

вимірювання, не відбувається. У польовій залежності повздовжнього магнітоопору за кімнатної температури також наявний виражений гістерезис, повздовжній магнітоопір є від'ємним, насичення, як і для поперечного магнітоопору, у польовій залежності повздовжнього магнітоопору не спостерігаємо. За зниження температури до 77 К виражений гістерезис у польовій залежності магнітоопору зникає, а сам магнітоопір залишається додатним.

Отже, магнітоопір і модифікованих ГНП, і модифікованих БВНТ значно змінюється порівняно з магнітоопором вихідних нанокарбонів структур, причому ці зміни є різними для модифікованих NiFe ГНП та БВНТ. Характерними особливостями магнітоопору модифікованих ГНП є його лінійна залежність від магнітного поля за слабкої залежності від температури, наявність невеликого гістерезису, а також зміна знаку для повздовжнього магнітоопору. Магнітоопір модифікованих БВНТ характеризується великими абсолютними значеннями, наявністю вираженого гістерезису, відсутністю насичення магнітоопору. Ці особливості в польовій залежності магнітоопору практично зникають за температури 77К.

Модифіковані магнітною фазою нанокарбонів структури можна представити як гранульовану систему, що сформована з немагнітної матриці (нанокарбонів структури) та гранул магнітної фази (частинки магнітного сплаву). Як показано в роботах (Wang et al., 2004; Schuhl, & Lacour, 2005; Nagamine et al., 1999), у магнітоопорі такої системи може реалізуватися спін-поляризоване транспортування шляхом взаємодії спінів заряду від орієнтації магнітних моментів магнітної фази спричинює появу гігантського магніторезистивного ефекту (ГМЕ), величина якого $\rho_{ГМЕ}$ пропорційна усередненому косинусу кута φ_{ij} між напрямками намагнічування в i -й та j -й магнітних гранулах (Shpylka et al., 2022):

$$\rho_{ГМЕ} \sim \left\langle \cos(\varphi_{ij}) \right\rangle \sim \left\langle \cos(\varphi_j) \right\rangle^2 M^2, \tag{2}$$

де φ_j – кут між магнітним моментом M j -ї магнітної частинки та зовнішнім магнітним полем. Магніторезистивний ефект приводить до появи в залежності магнітоопору від магнітного поля гістерезису, величини, положення та форма якої залежать як від властивостей магнітної фази, так і від орієнтації прикладеного поля відносно магнітного поля зразка.

Ще одним механізмом магнітоопору, характерним для систем, що містять магнітну фазу, є анізотропний магніторезистивний ефект (АМЕ). Зазначений механізм магнітоопору пов'язаний виключно з властивостями магнітного металу і проявляється в залежності електричного опору від напрямку магнітного поля через магнітний метал. Для магнітних металів повздовжній опір у магнітному полі $\rho_{||}$ зазвичай більший, ніж поперечний опір ρ_{\perp} і залежність опору від кута між напрямком струму через зразок і напрямком магнітного поля через зразка подають у вигляді (McGuire, 1975):

$$\rho = \rho_{\perp} + (\rho_{||} - \rho_{\perp}) \cos^2 \varphi, \tag{3}$$

де φ – кут між напрямком струму через зразок і напрямком зовнішнього магнітного поля.

Результати аналізу особливостей магнітоопору модифікованих NiFe нанокарбонів структур з позиції можливостей реалізації в них анізотропного та гігантського магніторезистивних ефектів дають змогу припустити, що для модифікованих БВНТ, у більшій мірі, проявляється саме спін-поляризоване транспортування, що приводить до появи ГМЕ. На це вказує наявність вираженого гістерезису в польовій залежності магнітоопору, величина та форма якого залежать від орієнтації зразка відносно зовнішнього магнітного поля. У разі зменшення температури до 77 К відбувається "заморожування" орієнтації спінів носіїв заряду, що унеможливує залежність розсіювання носіїв заряду від орієнтації їхніх спінів відносно магнітних моментів атомів магнітної фази. Відповідно, гістерезис у залежності $\Delta\rho/\rho(B)$ зникає. Для модифікованих ГНП характер польової та температурної залежності магнітоопору вказує на те, що для зазначеного зразка основним механізмом магнітоопору є АМЕ. Дійсно, для цього зразка спостерігаємо зміну знаку магнітоопору і відносно великі значення магнітоопору, що є характерним саме для прояву АМЕ. Хоча наявність невеликого гістерезису в польовій залежності магнітоопору може свідчити і про невеликий внесок спін-поляризованого транспортування в загальний магнітоопір. Крім того, для зазначеного зразка наявний ще один ефект у магнітоопорі: лінійна залежність магнітоопору від прикладеного магнітного поля за слабкої температурної залежності магнітоопору. Цей ефект пов'язаний виключно з властивостями ГНП. Квантовий лінійний магнітоопір спостерігаємо для шаруватих систем, для яких виконуються декілька умов, зокрема, слабка взаємодія між шарами, відсутність забороненої зони в зонній структурі та квазілінійний закон дисперсії. Ці умови в повній мірі реалізуються для модифікованих ГНП, що приводить до появи лінійної залежності магнітоопору від магнітного поля.

Отже, модифікація поверхні структурно різних нанокарбонів частинок магнітними сплавами NiFe приводить до появи різних механізмів магнітоопору у зразках модифікованого нанокарбону, що зумовлено структурно-морфологічними особливостями частинок нанокарбону. За модифікації ГНП гранули магнітної фази осаджуються зазвичай на латеральній поверхні ГНП, що практично унеможливує взаємодію носіїв заряду у графітових шарах з магнітними моментами атомів магнітної фази. За модифікації БВНТ частинки магнітної фази осаджуються на зовнішній циліндричній поверхні БВНТ, але певна частина магнітних гранул проникає у внутрішню порожнину БВНТ, що приводить до спін-орбітальної взаємодії носіїв заряду у графітових шарах з магнітними домішками. Як наслідок, для модифікованих ГНП два незалежні механізми, анізотропний магнітоопір, характерний для магнітних металів, та лінійний магнітоопір, що з'являється в ГНП після процедури модифікації, формують польову та температурну залежність магнітоопору. Для модифікованих БВНТ основний внесок у магнітоопір надає спін-поляризоване транспортування, що виникає внаслідок взаємодії носіїв заряду в графітових шарах з магнітними моментами атомів нікелю та заліза в магнітному сплаві NiFe.

Дискусія і висновки

Проведені експериментальні дослідження дали змогу встановити закономірності зміни механізмів магнітоопору за модифікації структурно-різних нанокарбонів магнітним сплавом NiFe. За модифікації шаруватих нанокарбонів структур магнітоопір являє собою комбінацію двох незалежних механізмів: анізотропного магніторезистивного ефекту, що притаманний магнітним металам, та лінійного магнітоопору, характерного для шаруватих систем з нульовою

забороненою зоною та квазілінійним законом дисперсії. Проте внесок спін-поляризованого транспортування в сумарний магнітоопір є дуже малим. Для модифікованих БВНТ властивості магнітоопору зумовлюються зазвичай спін-орбітальною взаємодією носіїв заряду з магнітними моментами атомів сплаву-модифікатора. Внесок інших механізмів магнітоопору, пов'язаних із властивостями магнітної фази і БВНТ, у магнітоопір модифікованих БВНТ є суттєво меншим. Зазначені відмінності в механізмах магнітоопору для модифікованих ГНП та БВНТ спричинюються особливостями структурно-фазового складу модифікованого нанокорбону.

Внесок авторів. Дмитро Заяць – методика, проведення експерименту; Денис Шпилька – методика, проведення експерименту; Ірина Овсієнко — аналіз джерел, підготовка огляду літератури, обговорення результатів; Людмила Мацуй – концептуалізація, обговорення результатів.

Подяка, джерела фінансування. Ця робота була підтримана програмою NATO for Peace, project G5697 "Globular Carbon based Structures and Metamaterials for Enhanced Electromagnetic Protection" (CERTAIN).

Список використаних джерел

- Bin, Han, Ge, Zubin, Li, & Chen. (2022). Microstructure and wear property of graphene nanoplatelets reinforced nickel-based composite coating by laser cladding. *Metals*, 12(8), Article 1247. <https://doi.org/10.3390/met12081247>
- Lan, Qin, Shan, Liu, Jifei, Yang, Min, He, & Jie, Yu. (December 2023). Carbon nanotube modified hierarchical NiCo/porous nanocomposites with enhanced electromagnetic wave absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, 966(5), 101–110.
- Liu, Z. J., Xu, Z., Yuan, Z. Y., Chen, W. X., Zhou, W. Z., & Peng, L. M. (2003). Synthesis and characterization of carbon nanotubes in mesoporous materials. *Materials Letters*, 57(8), 1339–1344.
- Luo, Kong, Xiaowei, Yin, Meikang, Han, Litong, Zhang, & Laifei, Cheng. (2015). Carbon nanotubes modified with ZnO nanoparticles: High-efficiency electromagnetic wave absorption at high-temperatures. *Ceramics International*, 41(3B), 4906–4915.
- Matzui, L. Yu., Vovchenko, V. V., Syvolozhskiy, O. A., Yakovenko, O. S., Borovoy, M. O., Gomon, O. O., Dyachenko, A. G., Ishchenko, O. V., Vakalyuk, A. V., Bodnaruk, A. V., & Kalita, V. M. (2023). *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 752(1), 77.
- Mcguire, T. R. (1975). Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic 3d Alloys. In T. R. Mcguire, R. I. Potter. *IEEE Transactions on magnetics*, 11(4), 1018–1038.
- Nagamine, L. C. C. M., Mevel, B., Dieny, B. et al. (1999). Magnetic properties and magnetoresistance of as-deposited and annealed CoxAg1-x and NixAg1-x (x=0.2, 0.37) heterogeneous alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 195, 437–451.
- Okechukwu, Okafor, & Abimbola, Popoola. (2024). Surface modification of carbon nanotubes and their nanocomposites for fuel cell applications. *A review 3 AIMS Materials Science*, 11(2), 369–414. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2024020>
- Schuhl, A., & Lacour, D. (2005). Spin dependent transport: GMR & TMR *Comptes Rendus Physique*, 945–955.
- Shpylka, D. O., Ovsienko, I. V., Len, T. A., Yu, L., Matzui, S. V., Trukhanov, A. V., & Yakovenko, O. S. (2022). The features of the magnetoresistance of carbon nanotubes modified with Fe. *Ceramics International*, 48(14), 19789–19797.
- Shpylka, D., Ovsienko, I., Len, T., Matzui, L., & Semen'ko, M. (2020). Transport properties of carbon nanotubes with different degrees of structural perfection. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 701(1), 1–15.
- Terrones, H., López-Urías, F., Muñoz-Sandoval, E., Rodríguez-Manzo, J. A., Zamudio, A., Elías, A. L., & Terrones, M. (2006). *Solid State Sciences*, 8, 303.
- Vijay, Srivastava Kumar, & Stefanos, Mourdikoudis. (2023). Durability of S- and N-doped graphene nanoplatelets for electrode performance in solid-state batteries. *CrystEngComm*, 25(12), 2101–2112.
- Vijayan, S., Dilimon, S., & Shibli, M. A. S. (2022, October 24). Application of surface modified carbon nanotubes in fuel. Surface Modified Carbon Nanotubes, 2(6), 121–150. <https://doi.org/10.1021/bk-2022-1425.ch006>
- Wang, Ch., Guo, Zh., Rong, Y., & Hsu, T. Y. (2004). A phenomenological theory of the granular size effect on the giant magnetoresistance of granular. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 277, 273–280.
- Worsley, Eleri Anne, & Margadonna, Serena. (2022). Application of Graphene Nanoplatelets in Supercapacitor Devices. *Review of Recent Developments*. www.mdpi.com
- Wu, H. Q., Xu, D. M., Wang, Q., Wang, Q. Y., Su, G. Q., & Wei, X. W. (2008). Preparation of FeCoNi medium entropy alloy from Fe3+–Co2+–Ni2+ solution system. *Journal of Alloys and Compounds*, 463, 78.
- Xiangqun, Zeng, Mengyuan, Yang, Jie, Zhao, Jiao-Jing, Shao, & Zhao, Ding. (2024). Iron-doped nickel sulfide nanospheres anchored on reduced graphene oxide for high performance supercapacitors. *Materials Chemistry Frontiers*. <https://doi.org/10.1039/D3QM01335A>

References

- Bin, Han, Ge, Zubin, Li, & Chen. (2022). Microstructure and wear property of graphene nanoplatelets reinforced nickel-based composite coating by laser cladding. *Metals*, 12(8), Article 1247. <https://doi.org/10.3390/met12081247>
- Lan, Qin, Shan, Liu, Jifei, Yang, Min, He, & Jie, Yu. (December 2023). Carbon nanotube modified hierarchical NiCo/porous nanocomposites with enhanced electromagnetic wave absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, 966(5) 101–110.
- Liu, Z. J., Xu, Z., Yuan, Z. Y., Chen, W. X., Zhou, W. Z., & Peng, L. M. (2003). Synthesis and characterization of carbon nanotubes in mesoporous materials. *Materials Letters*, 57(8), 1339–1344.
- Luo, Kong, Xiaowei, Yin, Meikang, Han, Litong, Zhang, & Laifei, Cheng. (2015). Carbon nanotubes modified with ZnO nanoparticles: High-efficiency electromagnetic wave absorption at high-temperatures. *Ceramics International*, 41(3B), 4906–4915.
- Matzui, L. Yu., Vovchenko, V. V., Syvolozhskiy, O. A., Yakovenko, O. S., Borovoy, M. O., Gomon, O. O., Dyachenko, A. G., Ishchenko, O. V., Vakalyuk, A. V., Bodnaruk, A. V., & Kalita, V. M. (2023). *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 752(1), 77.
- Mcguire, T. R. (1975). Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic 3d Alloys. In T. R. Mcguire, R. I. Potter. *IEEE Transactions on magnetics*, 11(4), 1018–1038.
- Nagamine, L. C. C. M., Mevel, B., Dieny, B. et al. (1999). Magnetic properties and magnetoresistance of as-deposited and annealed CoxAg1-x and NixAg1-x (x=0.2, 0.37) heterogeneous alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 195, 437–451.
- Okechukwu, Okafor, & Abimbola, Popoola. (2024). Surface modification of carbon nanotubes and their nanocomposites for fuel cell applications. *A review 3 AIMS Materials Science*, 11(2), 369–414. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2024020>
- Schuhl, A., & Lacour, D. (2005). Spin dependent transport: GMR & TMR *Comptes Rendus Physique*, 945–955.
- Shpylka, D. O., Ovsienko, I. V., Len, T. A., Yu, L., Matzui, S. V., Trukhanov, A. V., & Yakovenko, O. S. (2022). The features of the magnetoresistance of carbon nanotubes modified with Fe. *Ceramics International*, 48(14), 19789–19797.
- Shpylka, D., Ovsienko, I., Len, T., Matzui, L., & Semen'ko, M. (2020). Transport properties of carbon nanotubes with different degrees of structural perfection. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 701(1), 1–15.

- Terrones, H., López-Urías, F., Muñoz-Sandoval, E., Rodríguez-Manzo, J. A., Zamudio, A., Elías, A. L., & Terrones, M. (2006). *Solid State Sciences*, 8, 303.
- Vijay, Srivastava Kumar, & Stefanos, Mourdikoudis. (2023). Durability of S- and N-doped graphene nanoplatelets for electrode performance in solid-state batteries. *CrystEngComm*, 25(12), 2101–2112.
- Vijayan, S., Dilimon, S., & Shibli, M. A. S. (2022, October 24). Application of surface modified carbon nanotubes in fuel. *Surface Modified Carbon Nanotubes*, 2(6), 121–150. <https://doi.org/10.1021/bk-2022-1425.ch006>
- Wang, Ch., Guo, Zh., Rong, Y., & Hsu, T. Y. (2004). A phenomenological theory of the granular size effect on the giant magnetoresistance of granular. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 277, 273–280.
- Worsley, Eleri Anne, & Margadonna, Serena. (2022). Application of Graphene Nanoplatelets in Supercapacitor Devices. *Review of Recent Developments*. www.mdpi.com
- Wu, H. Q., Xu, D. M., Wang, Q., Wang, Q. Y., Su, G. Q., & Wei, X. W. (2008). Preparation of FeCoNi medium entropy alloy from Fe³⁺–Co²⁺–Ni²⁺ solution system. *Journal of Alloys and Compounds*, 463, 78.
- Xiangqun, Zeng, Mengyuan, Yang, Jie, Zhao, Jiao-Jing, Shao, & Zhao, Ding. (2024). Iron-doped nickel sulfide nanospheres anchored on reduced graphene oxide for high performance supercapacitors. *Materials Chemistry Frontiers*. <https://doi.org/10.1039/D3QM01335A>

Отримано редакцією журналу / Received: 07.06.24

Прорецензовано / Revised: 05.11.24

Схвалено до друку / Accepted: 26.11.24

Dmytro ZAIATS¹, Master's Student
ORCID ID: 0009-0005-8469-1332
e-mail: dimainthesven@gmail.com

Denys SHPYLKA¹, PhD Student
ORCID ID: 0000-0003-4255-0994
e-mail: denys.shpylka@knu.ua

Iryna OVSIENKO¹, PhD, Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-0508-9652
e-mail: irynaovsienko@knu.ua

Ludmyla MATZUI¹, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-8611-437X
e-mail: liudmyla.matsui@knu.ua

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

MAGNETORESISTANCE OF NANOCARBON STRUCTURE MODIFIED BY NIFE

The paper presents the results of studies of the magneto-transport properties of nanocarbon structures modified on the surface at the same time with particles of transition metals nickel and iron. Two different types of nanocarbon structures were chosen as starting materials for modification. These are graphite nanoplates with lateral particle sizes up to 10 μm, obtained by sonication of thermally exfoliated graphite during several hours in acetone, and multi-walled carbon nanotubes with a diameter of up to 40 nm. The modification of nanocarbon was carried out by the method of metal reduction on the surface of the nanocarbon particles from an aqueous solution of nitrate, which permeated the corresponding nanocarbon particles. As a result of the modification, nanocarbon structures with a uniform distribution of metal particles on the surface of the nanocarbon particles were obtained. The total mass concentration of the metal on the nanocarbon surface was 60%. Studies of the structural and phase composition of the obtained modified nanocarbon structures revealed that on the surface of the modified nanocarbon there are not individual granules of nickel and iron, but FeNi₃ alloy particles.

To measure the resistance in the magnetic field, bulk samples from modified graphite nanoplatelets and multiwalled carbon nanotubes powders were produced in the form of rectangular parallelepipeds by cold pressing using polyvinyl acetate (25% by mass) as a binder. Measurements of magnetoresistance were carried out by the standard four-probe method at temperatures of 293 K and 77 K and with transverse and longitudinal orientation of the sample relative to the external magnetic field.

Conducted experimental studies of magnetoresistance revealed that for modified layered nanocarbon structures, the main contribution to magnetoresistance is made by anisotropic magnetoresistance, which is characteristic of magnetic metals, and linear magnetoresistance, which occurs for layered systems with a zero-band gap and a quasi-linear dispersion law. For modified multi-walled carbon nanotubes, the magnetoresistance properties are determined mainly by the spin-orbital interaction of charge carriers with the magnetic moments of the atoms of the modifier alloy.

Keywords: *graphite nanoplatelets, multiwalled carbon nanotubes, modification, anisotropic magnetoresistance, linear magnetoresistance, spin-polarized transport*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.