

## Дослідження польових та температурних залежностей опору нанокарбонів, модифікованих нікелем та кобальтом

Т.А. Ленъ\*, І.В. Овсієнко, Л.Ю. Мацуї, В.Я. Ткачук

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, просп. Глушкова, 4, 01601 Київ, Україна

(Одержано 17.12.2014; опубліковано online 10.06.2015)

Робота присвячена дослідженню впливу модифікації магнітними металами структурно різних нановуглецевих структур на їх електро- та магнітотранспортні властивості. Розглянуто експериментальні температурні та польові залежності електроопору в широкому інтервалі температур та магнітних полів, проведено аналіз їх особливостей та механізми формування. Модифікація нанокарбону магнітними металами у концентрації 10 % мас. практично не впливає на величину та хід температурної залежності електроопору модифікованого нанокарбону. Температурна залежність питомого електроопору модифікованого нанокарбону визначається ти ми самими механізмами, що і для вихідного для модифікації нанокарбону. Виявлені розбіжності у впливі модифікації магнітними металами на магнітотранспортні властивості різних типів нанокарбону, пов'язані з особливостями взаємодії частинок магнітного металу з частинками нанографіту та ВНТ.

**Ключевые слова:** Модифіковані багатостінні вуглецеві нанотрубки, Електроопір, Магнітоопір.

PACS numbers: 61.48.De, 65.80. – g

### 1. ВСТУП

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) та вуглецеві матеріали володіють комплексом унікальних фізико-хімічних властивостей і знаходять все більш широке практичне застосування [1-3]. Важливою проблемою є спрямоване регулювання їх властивостей. Модифікація нановуглецевих структур представляє значний інтерес, оскільки дозволяє впливати на електронну структуру нановуглецю та змінювати його властивості, які пов'язані з переносом заряду та магнітні властивості. Використання модифікованих вуглецевих наноструктур в полімерних композитах дозволяє розширити межі їх використання. Тому актуальним є питання розробки методів модифікації нановуглецю та встановлення впливу модифікації на властивості нанокарбону.

Мета роботи – встановити вплив модифікації ВНТ та нанографіту нікелем та кобальтом на механізми електро- та магнітоопровідності.

### 2. ОПИС ОБ'ЄКТУ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості вихідних для модифікації були обрані два типи нанокарбону: багатостінні ВНТ, отримані методом каталітичного піролізу вуглеводнів (CVD-методом), та нанографіт, отриманий методом термохімічної обробки з терморозширеного графіту.

Модифікація нанокарбону металами була проведена методом відновлення металу з солі при просоченні вихідного нанокарбону водно-солевим розчином [4]. Модифікуючими металами були обрані кобальт та нікель. Модифікація була проведена методом відновлення з водносолевого розчину в струмені водню. В результаті були отримані зразки нанокарбону з вмістом модифікуючої компоненти 10 мас. %.

Для просочення вуглецевого матеріалу використовувався водний розчином ацетату кобальту  $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  з концентрацією солі (80 мас. %) Просо-

чування відбувалося при температурі 350 К протягом 48 годин. Відновлення порошоків вуглецевий матеріал- $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  до стану вуглецевий матеріал-метал проводилось в струмені водню при  $T = 350^\circ\text{C}$  протягом 15 годин [5, 6].

Вимірювання електротранспортних властивостей проводилося за стандартною чотирьохзондовою методикою [7]. Зразки виготовлялися методом холодного пресування. Отримані зразки позначили таким чином: зразок # 1 – нанографіт + Ni, зразок # 2 – ВНТ + Ni, зразок # 3 – нанографіт+Co, зразок # 4 – ВНТ + Co.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

На рис. 1 наведені фрагменти дифрактограм, отриманих для зразків модифікованого нанокарбону.

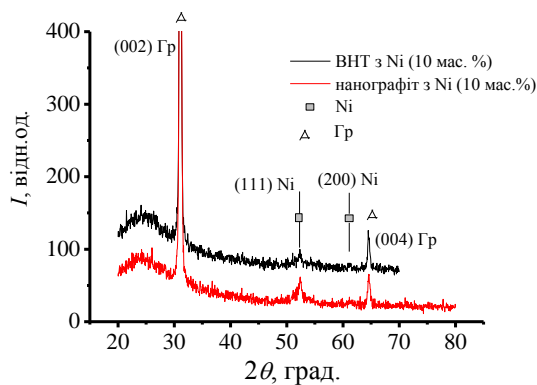
Згідно рентгенографічних досліджень визначені параметри зразків нанографіту: Багатостінні ВНТ діаметром 40 нм з внутрішньою порожниною до 10 нм,  $d_{002} = 3.35$  нм,  $L_c = 10$  нм; нанографіт: пласкі лусочки діаметром до 10 мкм,  $d_{002} = 3.36$  нм,  $L_c = 20$  нм (де  $L_c$  – розмір кристалітів вздовж базисної площини  $c$ ).

Як видно з рис. 1, в зразках нанокарбону, модифікованого Ni, виявляються тільки Ni, в той час, як для нанокарбону, модифікованого кобальтом, за даними рентгенівської дифракції ідентифікуються як лінії чистого кобальту, так і лінії, які відповідають оксидам кобальту.

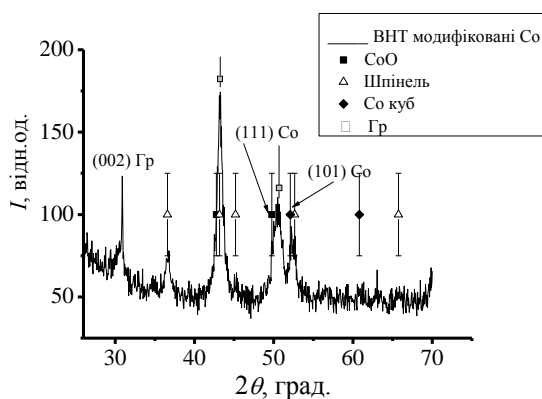
На рис. 2 наведений фрагмент електронно-мікроскопічного зображення, що отримане за допомогою просвічуючого електронного мікроскопу – ПЕМ-зображення зразків нанокарбону, модифікованого Ni.

Як видно з рис. 2, спостерігається досить рівномірний однорідний розподіл частинок Ni як на поверхні ВНТ, так, очевидно, і частково у внутрішній порожнині ВНТ.

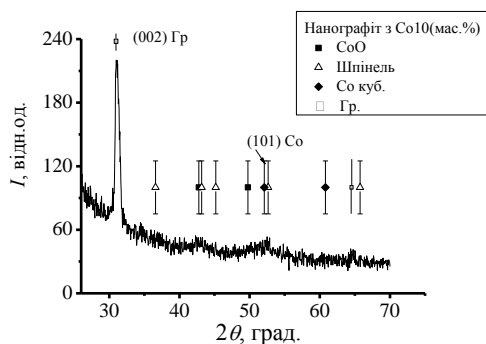
\* talen148@gmail.com



а



б



в

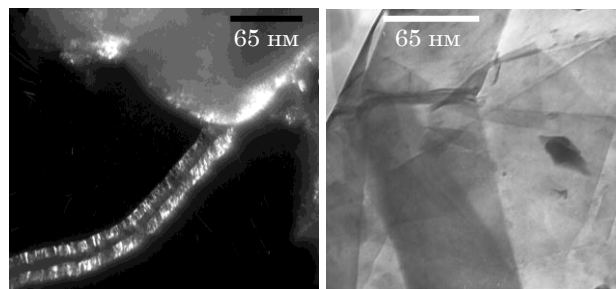
**Рис. 1** – Дифрактограми нанографітових зразків: (а) ВНТ модифіковані 10 мас. % Ni, (б) ВНТ модифіковані 10 мас. % Co, (в) нанографіт модифікований 10 мас. % Co

Візуалізуються окремі частинки нікелю розміром не більше 5 нм. На поверхні частинок нанографіту спостерігаються окремі частинки Ni розміром до 50 нм.

Отже, зразки являють собою гетерогенні системи, що складаються із багатостінних ВНТ чи нанокарбону та частинок нікелю.

Були досліджені температурні та польові залежності електроопору та магнітоопору модифікованих металами зразків нанокарбону.

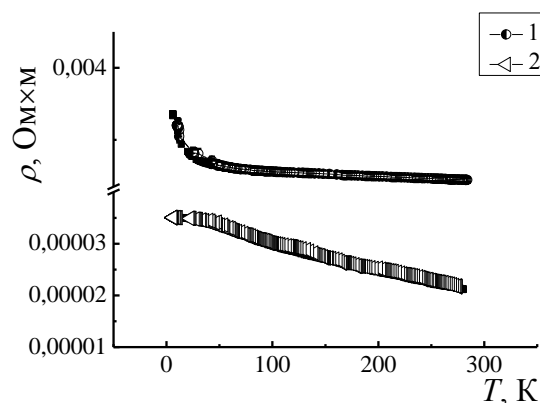
На рис. 3 наведені залежності  $\rho(T)$  для зразків нанографіту та ВНТ, модифікованих нікелем.



а

б

**Рис. 2** – Фрагмент ПЕМ зображення модифікованих Ni: ВНТ (а) та нанографіту (б)



**Рис. 3** – Експериментальні залежності  $\rho(T)$  для зразків: (1) ВНТ модифікованих нікелем та (2) нанографіту модифікованого нікелем

Як видно з рис. 3, залежність  $\rho(T)$  є спадаючою. На відміну від зразка модифікованого нанографіту, у зразку ВНТ модифікованого Ni спостерігається аномальне зростання значення опору при спаданні температури до 4,2 К.

Відношення  $\rho_{4.2\text{K}} / \rho_{277\text{K}}$  для зразка # 1 складає 1,61 й для зразка # 2 – 3,09. Відношення  $\rho_{4.2\text{K}} / \rho_{277\text{K}}$  зростає майже в 2 рази для зразка # 2 (у порівнянні із аналогічним відношенням для зразка # 1).

При низьких температурах спостерігається суттєва різниця в температурних залежностях питомого електроопору для цих двох зразків: для модифікованого нанографіту спостерігається при низьких температурах горизонтальна поличка, для модифікованих ВНТ – аномальне зростання електроопору. Такий характер залежності електроопору є характерним для впорядкованих графітів. Для модифікованих ВНТ при високих температурах також спостерігається слабка залежність опору від температури, хоча сама величина питомого електроопору є суттєво більшою. Проте, при низьких температурах, спостерігається аномальне зростання питомого електроопору, характерне для дрібнокристалічних слабо впорядкованих графітів. Відмітимо, що вигляд температурної залежності питомого електроопору для модифікованого нанокарбону абсолютно ідентичний вигляду температурної залежності електроопору для вихідних до модифікації зразків нанокарбону. Тобто, впливу модифікації на зміну  $\rho$  та  $\rho(T)$  не виявлено. Частинки металу не формують суцільний кластер через весь зразок нанокарбону.

Слабка залежність електроопору від температури для досліджених зразків модифікованого нанокорбону пов'язана з тим, що основним механізмом розсіювання носіїв заряду в даному матеріалі є температурно незалежне розсіювання на межах кристалітів, що приводить до слабкої залежності від температури рухливості носіїв заряду. Для впорядкованих нанографітів існує невелике перекриття валентної зони і зони провідності, що приводить до того, що за низьких температур концентрація носіїв заряду не змінюється з температурою. Цим пояснюється горизонтальна поличка в залежності  $\rho(T)$  для нанографіту.

При низьких температурах, на відміну від нанографіту в модифікованих ВНТ спостерігається аномальне зростання величини питомого електроопору, що, очевидно пов'язане з проявом в даних матеріалах квантових ефектів слабкої локалізації та електрон-електронної взаємодії носіїв заряду. На рис. 4 наведена розрахована залежність поправки до провідності від логарифму температури  $\Delta\sigma/\sigma_0 \sim f(\ln T)$  для модифікованих нікелем ВНТ.

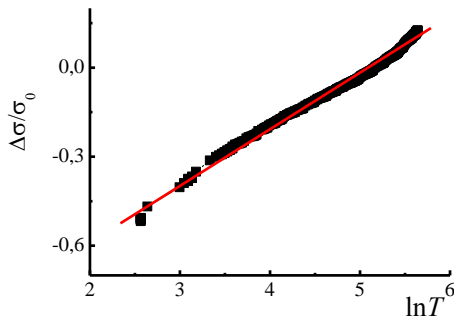


Рис. 4 – Залежність поправки до провідності від логарифму температури  $\Delta\sigma/\sigma_0 \sim f(\ln T)$  для ВНТ модифікованих Ni

Як випливає з рис. 4, спостерігається лінійна залежність  $\Delta\sigma/\sigma_0 \sim f(\ln T)$ , що дійсно свідчить про можливість реалізації для отриманих модифікованих ВНТ квантових ефектів слабкої локалізації та електрон-електронної взаємодії та про двомірний характер провідності в них.

На рис. 5 та 6 представлено відносну зміну магнітоопору  $\Delta\rho/\rho$  для зразка # 1 нанографіту з Ni та зразка # 2 ВНТ з Ni відповідно, у двох конфігураціях: струм  $I$ , що проходить через зразок спрямований перпендикулярно напрямку індукції магнітного поля  $B$  ( $0^\circ$ )  $I \perp B$  та струм через зразок – паралельно напрямку ( $90^\circ$ ) індукції магнітного поля  $IPB$  при температурах  $T = 77$  та  $300$  К.

З рис. 5 видно, що при перпендикулярній орієнтації магнітного поля в спостерігається значне зростання значення магнітоопору  $\Delta\rho/\rho$  до 2%, в той час як при паралельній орієнтації  $\Delta\rho/\rho$  зростає на 0,4 %. Для ВНТ модифікованих Ni спостерігається петлеподібний додатний магнітоопір при кімнатній температурі і від'ємний при низьких температурах (рис. 6).

На рис. 7 та 8 наведено залежність  $\Delta\rho/\rho$  при  $T = 293$  К й  $77$  К та при перпендикулярній  $I \perp B$  і паралельній орієнтації  $IPB$  для ВНТ одифікованих Co.

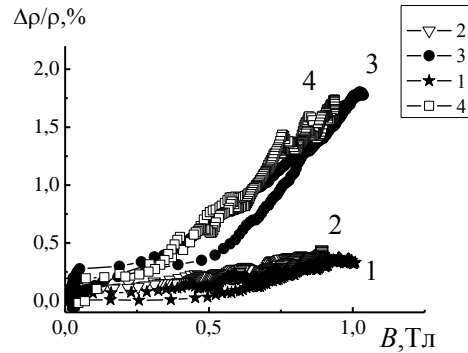


Рис. 5 – Експериментальні залежності магнітоопору нанографіту, модифікованого Ni при: 1 – ( $0^\circ$ , 300 К), 2 – ( $0^\circ$ , 77 К), 3 – ( $90^\circ$ , 300 К) та 4 – ( $90^\circ$ , 77 К)

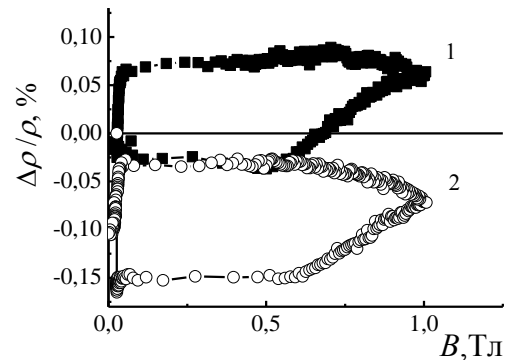


Рис. 6 – Експериментальні залежності магнітоопору ВНТ модифікованих Ni: 1 – при ( $90^\circ$ , 300 К), 2 – ( $0^\circ$ , 300 К)

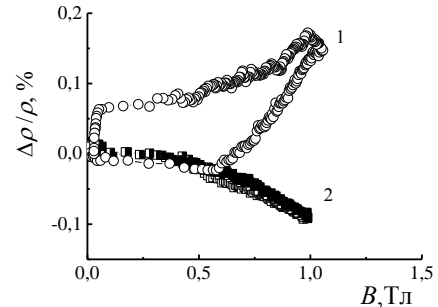


Рис. 7 – Експериментальна залежність магнітоопору ВНТ модифікованих Co при  $I \perp B$ , крива 1 –  $T = 293$  К, крива 2 –  $T = 77$  К

Для ВНТ модифікованих Co магнітоопір додатний за абсолютною величиною при  $T = 293$  К і величина  $\Delta\rho/\rho$  зменшується й стає від'ємною при зменшенні температури. При кімнатній температурі спостерігається петлеподібна залежність  $\Delta\rho/\rho(B)$ .

На рис. 9 приведено залежність  $\Delta\rho/\rho(B)$  при  $I \perp B$  для нанографіту модифікованого Co при  $T = 293$  К.

При паралельній орієнтації магнітного поля спостерігається незначне зростання магнітоопору, а при перпендикулярній орієнтації  $B$  та  $I$ , значення магнітоопору є дещо більшим і складає 2,35 %.

Значення магнітоопору для нанографіту модифікованого Co при  $T = 77$  К й при перпендикулярній та паралельній орієнтації  $B$  та  $I$  наведено на рис. 10.

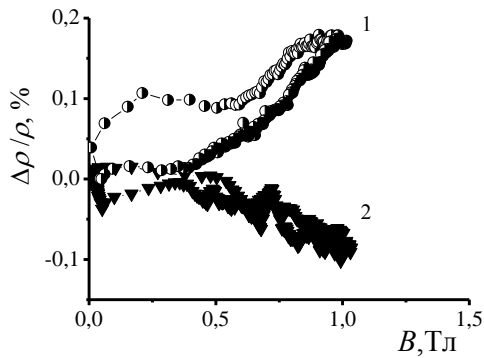


Рис. 8 – Експериментальна залежність магнітоопору зразка # 4 при  $I \perp B$ , крива 1 –  $T = 293$  К, крива 2 –  $T = 77$  К

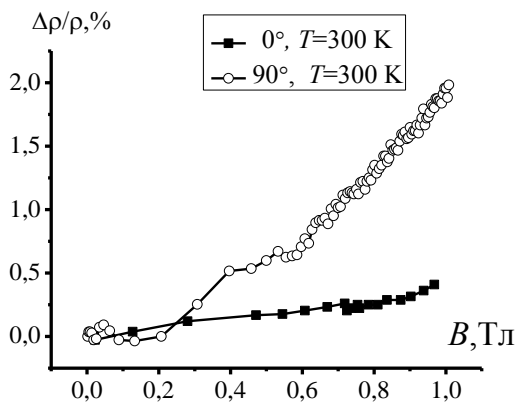


Рис. 9 – Експериментальні залежності магнітоопору для нанографіту модифікованого Со при  $I \perp B$  та  $I \parallel B$  й при  $T = 293$  К

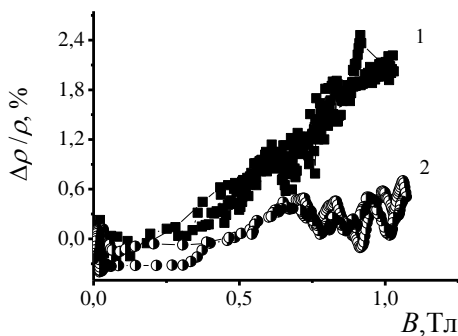


Рис. 10 – Експериментальні залежності магнітоопору для нанографіту модифікованого Со при азотній температурі: крива 1 –  $I \perp B$ , крива 2 –  $I \parallel B$

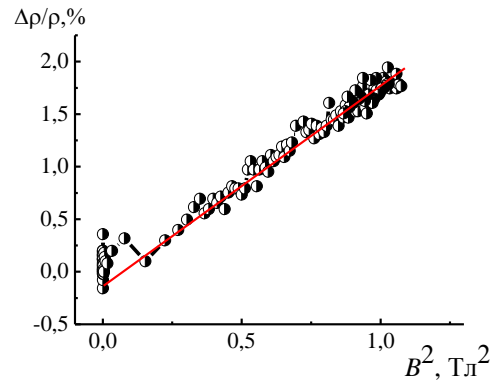
Як видно з рис. 10, при азотній температурі магнітоопір для нанографіту модифікованого Со є додатнім та складає 2,4 %. Магнітоопір при  $T = 77$  К є додатнім як і у випадку паралельної орієнтації  $B$  та  $I$ , так і при перпендикулярній орієнтації  $B$  та  $I$ . За абсолютною величиною магнітоопір є дещо меншим та складає 0,6 %. У випадку перпендикулярної орієнтації магнітного поля та струму спостерігається додатний, квадратичний за полем магнітоопір величиною  $\sim 2-2,5$  % в максимальному полі. Причому, при зменшенні температури величина магнітного опору практично не змінюється, опір залишається додатним. Такий вигляд залежності магнітоопору є типовим для впорядкованих графітів.

Залежність магнітоопору впорядкованих графітових матеріалів може бути записана як:

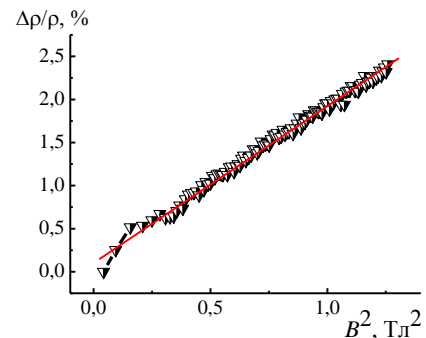
$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{p}{n} \bar{\mu}^2 B^2, \quad (1)$$

де  $p$ ,  $n$ ,  $\bar{\mu}$  – концентрації дірок та електронів і відповідно їхня середня рухливість. Відносний магнітоопір залежить квадратично від величини магнітної індукції.

На рис. 11 наведені залежності магнітоопору від квадрату індукції магнітного поля для зразків нанографіту, модифікованого нікелем (а) та кобальтом (б).



а



б

Рис. 11 – Залежність магнітоопору від  $B^2$  (а) для нанографіту модифікованого нікелем та (б) для нанографіту модифікованого кобальтом

Дійсно спостерігається лінійна залежність магнітоопору від квадрату магнітної індукції як для нанографіту модифікованого Ni, так й для нанографіту модифікованого Со (рис. 11). Вважаючи, що рухливості електронів і дірок є приблизно однаковими, а відношення  $p/n$  дорівнює 1,2, за формулою (1) оцінимо усереднене значення рухливості  $\bar{\mu}$ , яке складає для нанографіту, модифікованого нікелем  $0,114 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  та  $0,119 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  для нанографіту, модифікованого кобальтом. При зменшенні температури величина магнітоопору дещо збільшується внаслідок незначного зростання величини рухливості [8-10].

Відмітимо, що для даних зразків спостерігається невеликий за значенням квадратичний повздовжній магнітоопір, якого не повинно бути в графітовому матеріалі при такій взаємній орієнтації магнітного

поля та струму. На нашу думку, це пов'язано з певною дезорієнтацією частинок нанографіту в об'ємному зразку та значною різницею в значеннях провідності вздовж графітових шарів та перпендикулярно графітовим шарам. Що, очевидно, приводить до появи невеликого за значенням повздовжнього магнітоопору. Відмітимо, що присутність частинок магнітного металу на поверхні частинок нанографіту не впливає на магнітоопір зразка.

Зовсім інша залежність магнітоопору від величини магнітного поля та температури спостерігається для зразків модифікованих нанотрубок. Як впливає з рис. 10 та 11, спостерігається складний вигляд польових залежностей магнітоопору для зразків модифікованих ВНТ: як в поперечному, так і в повздовжньому магнітному полі присутній гістерезис в залежності магнітоопору від магнітного поля. Для зразків ВНТ, модифікованих нікелем (рис. 6) також спостерігається зміна знаку магнітоопору для різних орієнтацій магнітного поля відносно струму через зразок. Як було встановлено на попередніх етапах роботи [11-13], при дослідженні закономірностей зміни магнітоопору при різних взаємних орієнтаціях магнітного поля та струму через зразок для зразків ВНТ, модифікованих залізом, дані особливості в залежностях магнітоопору пов'язані з проявом двох ефектів: ефекту гігантського магнітоопору та анізотропним магнітоопором. Гігантський магнітоопір має місце в шаруватих або кластерних системах, в яких поєднуються магнітні та немагнітні матеріали, і є наслідком спінової поляризації носіїв заряду. Орієнтація спинів магнітних металів в магнітному полі приводить до значного зменшення розсіювання носіїв заряду на них, що, в свою чергу, приводить до зменшення електроопору системи в цілому. Анізотропний магнітоопір виникає в магнітних металах при умові, якщо вісь легкого намагнічування не співпадає з напрямком зовнішнього магнітного поля і визначається  $\rho = \rho_{\perp} + (\rho_{\perp} - \rho_{\parallel}) \cos^2 \theta$ , де  $\rho_{\perp}$  та  $\rho_{\parallel}$  – відповідно, опір в магнітному полі при перпендикулярній та паралельній орієнтації вектора густини струму відносно вектора намагнічування,  $\theta$  – кут між вектором намагнічування та вектором густини струму. Таким чином, складний характер польової залежності магнітоопору для модифікованих ВНТ пояснюється проявом ефектів гігантського магнітоопору та анізотропного магнітоопору, причому, для зразків, модифікованих нікелем, ці ефекти виражені сильніше, ніж для зразків, модифікованих кобальтом. Така різниця пояснюється вменшим вмістом магнітної фази в зразках ВНТ, модифікованих кобальтом в порівнянні з зразками, модифікованими нікелем. Крім того, як показує порівняльний аналіз результатів, отриманих для модифікованих ВНТ та модифікованого нанографіту, вирішальним фактором для присутності ефектів гігантського та анізотропного магнітоопорів є розміщення частинок нано-

розмірного металу в нановуглеці. Для ВНТ, частинки магнітного металу – модифікатор розміщені по поверхні ВНТ і, очевидно, частково проникають у внутрішню порожнину ВНТ, при цьому носії заряду в графітових шарах і атоми магнітного металу взаємодіють між собою, що приводить виникнення вказаних явищ. Для модифікованого нанографіту, частинки металу розміщуються тільки на поверхні частинок нанографіту, не взаємодіють з носіями заряду в графітових шарах, тому для даних структур не спостерігаються явища гігантського та анізотропного магнітоопору.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Модифікація нанокарбону феромагнітними металами у концентрації 10 % мас. практично не впливає на величину та хід температурної залежності електроопору модифікованого нанокарбону. Температурна залежність питомого електроопору модифікованого нанокарбону визначається тими ж механізмами, що і для вихідного для модифікації нанокарбону: для нанографіту – це переважне зерно граничне розсіювання носіїв заряду, для ВНТ – механізми слабкої локалізації та взаємодії носіїв заряду.

2. Виявлено розбіжності у впливі модифікації магнітними металами на магнітотранспортні властивості різних типів нанокарбону, пов'язані з особливостями взаємодії частинок магнітного металу з частинками нанографіту та ВНТ. Встановлено, що модифікація магнітними металами нанографіту не змінює класичного механізму виникнення магнітоопору в ньому, в той час як модифікація магнітними металами вуглецевих нанотрубок суттєво впливає на характер залежності електроопору від магнітного поля. Магнітоопір модифікованих магнітними металами ВНТ визначається поєднанням двох механізмів: механізмом гігантського магнітоопору, який є характерним для систем, в яких чергуються магнітні та немагнітні шари, та анізотропним магнітоопором.

3. Встановлено, що вирішальним фактором, який визначає характер залежності електроопору від магнітного поля для модифікованого магнітними металами нанокарбону є структурно-морфологічні особливості та характер розподілу частинок магнітного металу по поверхні частинок нановуглецю. Для ВНТ нанорозмірні частинки магнітного металу розміщені по поверхні ВНТ і частково у внутрішній порожнині ВНТ, що приводить до взаємодії носіїв заряду в графітових шарах і атомів магнітного металу. Це спричинює появу ефектів гігантського та анізотропного магнітоопорів для даних модифікованих структур. Для модифікованого нанографіту частинки металу розміщуються тільки по поверхні частинок нанографіту, атоми магнітних металів не взаємодіють з носіями заряду в графітових шарах, тому для даних структур вказані ефекти не спостерігаються.



## Investigation of the Field and Temperature Dependences of the Resistance of Nanocarbons Modified by Nickel and Cobalt

T.A. Len, I.V. Ovsienko, L.Yu. Matzui, V. Ya. Tkachuk

*Taras Shevchenko National University of Kyiv, Volodymyrska Str., 64, 01601 Kyiv, Ukraine*

The work is devoted to the study of the effect of modifying by magnetic metals of structurally different nanocarbon structures on their electrical and magnetotransport properties. The experimental temperature and field dependences of the resistivity in a wide temperature and magnetic field ranges are considered, and the analysis of their features and formation mechanisms is performed. Modification of nanocarbon by magnetic metals of the concentration of 10 wt. % almost does not influence the value and behavior of the temperature dependence of the resistivity of modified nanocarbon. The temperature dependence of the resistivity of modified nanocarbon is determined by the same mechanisms as for the initial (before modification) nanocarbon. We have revealed the difference in the effect of modifying by magnetic metals on the magnetotransport properties of different types of nanocarbon associated with the features of interaction of the magnetic metal particles with particles of nanographite and CNT.

**Keywords:** Modification multiwalled carbon nanotubes, Electrical resistance, Magnetoresistance.

## Исследование полевых и температурных зависимостей сопротивления наноканобов, модифицированных никелем и кобальтом

Т.А. Лень, І.В. Овсиенко, Л.Ю. Мацуй, В.Я. Ткачук

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, просп. Глушкова 4, 01601 Київ, Україна*

Работа направлена на исследование влияния модификации магнитными металлами структурно разных наноканобов на их электро- и магнитотранспортные свойства. Рассмотрены экспериментальные температурные и полевые зависимости электросопротивления в широком интервале температур и магнитных полей, проведен анализ их особенностей и механизмы формирования. Модификация наноканоба магнитными металлами в концентрации 10 % мас. практически не влияет на величину и ход температурной зависимости электросопротивления модифицированного наноканоба. Температурная зависимость удельного электросопротивления модифицированного наноканоба определяется теми же механизмами, что и для исходного до модификации наноканоба. Выявлены различия во влиянии модифицирования магнитными металлами на магнитотранспортные свойства разных типов наноканоба, связанных с особенностями взаимодействия частиц магнитного металла с частицами наногрфита и УНТ.

**Ключевые слова:** Модифицированные многостенные углеродные нанотрубки, Электросопротивление, Магнитосопротивление.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Л. Ивановский, *Журнал неорганической химии* **48** № 6, 945 (2003) (A.L. Ivanovskiy, *Zhurnal neorganicheskoy khimii* **48** № 6, 945 (2003)).
2. M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P. Eklund, (Academic Press: 1996).
3. П. Харрис, *Углеродные нанотрубки и родственные структуры* (М.: Техносфера: 2003) (P. Kharris, *Uglerodnyye nanotrubki i rodstvennyye struktury* (М.: Tekhnosfera: 2003)).
4. E.S. Choi, J.S. Brooks, D.L. Eaton, H. Garmestani, *J. Appl. Phys.* **94**, 6034 (2003).
5. Sarbajit Banerjee, Stanislaus S. Wong. *Nano Lett.* **2** No 1, 49 (2002).
6. Q. Li, Q.Z. Xue, X.L. Gao, Q.B. Zheng, *Polymer Lett.* **3**, No 12, 769 (2009).
7. L.Yu. Matzui, I.V. Ovsienko, T.A. Len, Yu.I. Prylutskiy, P. Scharff, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures* **13**, 259 (2005).
8. I. Ovsienko, T. Len, L. Matzui, Yu. Prylutskiy, P. Eklund, F. Normand, U. Ritter, P. Scharff, *Physica E* **37**, 78 (2007).
9. Т.А. Лень, Л.Ю. Мацуй, І.В. Овсиенко, Ю.І. Прилуцкий, І.В. Беркутов, В.В. Андриевский, Г.Е. Гречнев, Ю.А. Колесниченко, *Физика низких температур* **37** вып. 9-10, 1027 (2011) (T.A. Len', L.Yu. Matsuy, I.V. Ovsiyenko, Yu.I. Prilutskiy, I.B. Berkutov, V.V. Andriyevskiy, G.Ye. Grechnev, Yu.A. Kolesnichenko, *Low Temp. Phys.* **37** No 9-10, 1027 (2011)).
10. I. Ovsiyenko, T. Len, L. Matzui, O. Golub, Yu. Prylutskiy, P. Eklund, *Mater. Sci. Eng. C* **26**, 1180 (2006).
11. І.В. Овсиенко, *Вісник київського університету. Серія фіз.-мат. наук.* **1**, 267 (2014) (I.V. Ovsiyenko, *Visnyk kyiv's'koho universytetu. Seriya fiz.-mat. nauk.* **1**, 267 (2014)).
12. I.V. Ovsienko, L.Y. Matzui, I.V. Yatsenko, *Mat.-wiss. u Werkstofftech.* **44**, No 2-3, 161 (2013).
13. Л.Ю. Мацуй, Т.А. Лень, І.В. Овсиенко, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології* **7** вип. 2, 383 (2009) (L.Yu. Matsuy, T.A. Len', I.V. Ovsiyenko, *Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnolohiyi* **7** No 2, 383 (2009)).