

УДК 537.311.3:536.532(054.3)

ЕЛЕКТРИЧНІ І ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТУ LaNi_5 З ВУГЛЕЦЕВИМИ НАНОТРУБКАМИ

*М. М. Нищенко, д-р фіз.-мат. наук; **Г. П. Приходько, канд. хім. наук; *М. Я. Шевченко,
А. Г. Дубовий, *Г. Ю. Михайлова, *Б. В. Ковальчук, *****Ю. Ф. Бозбей,
*****Д. Е. Азнакаєва, *****В. Ю. Московка

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України

**Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України

***Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України

****Національний авіаційний університет

nish@imp.kiev.ua

Досліджено електричні і термоелектричні властивості наноконкомпозиту з мікрочастинок LaNi_5 і вуглецевих нанотрубок (ВНТ) із середнім діаметром 10 ± 2 нм у процесі встановлення між ними електричних контактів деформацією стискуванням, яка приводить до зміни орієнтації і геометрії ВНТ. У результаті електропровідність (σ) композиту з 19,7 ваг. % ВНТ стає на порядок більшою порівняно з σ масиву ВНТ, а коефіцієнт Зеебека (який має позитивний знак) на порядок зменшується при концентраціях ВНТ, менше 5 % вагових. Механізм зростання σ і спадання α полягає в перенесенні електронів провідності з металу до ВНТ.

Ключові слова: вуглецеві нанотрубки, LaNi_5 , електропровідність, термо-ЕРС.

Electrical and thermoelectric properties of nanocomposite microparticles LaNi_5 and carbon nanotubes (CNT) with an average diameter of 10 ± 2 nm were studied in the process of establishing electrical contact between the compression deformation, which leads to a change in the orientation and geometry of CNT. Electrical conductivity (σ) of composite with 19,7 weight % CNT is an order of magnitude higher in comparison with the σ array CNT, and with concentrations CNT less than 5 weight % Seebeck coefficient (which has a positive sign) is decreasing by order. Mechanism of growth σ and decline α is the transfer of conduction electrons from the metal to the CNT.

Keywords: carbon nanotubes, LaNi_5 , electrical conductivity, thermopower.

Вступ

Вуглецеві нанотрубки — це новий фізичний об'єкт, унікальні властивості якого дають змогу розраховувати на його ефективне використання в різних галузях науки і техніки [1]. Їх сильно анізотропна циліндрична структура діаметром від одного до декількох десятків нанометрів і довжиною в кілька десятків мікрометрів складається з одного або декількох гексагональних згорнутих у трубку графенових шарів.

Вуглецеві нанотрубки мають високі електро- і теплопровідність, хімічну, термічну і механічну стабільність і отже, розглядаються як один з найбільш перспективних об'єктів наноелектроніки. Вони добре себе зарекомендували як холодні польові емітери [2; 3; 4], суперконденсатори [5], сонячні елементи [6], сенсори [7] тощо.

сигнал і, навпаки, перетворення електричного сигналу в механічний рух.

Оскільки в поперечному напрямку одношарові ВНТ є ізоляторами, а вздовж осі трубки — добрими провідниками носіїв заряду і фононів, то залежно від розподілу ВНТ, ступеня їх орієнтаційного впорядкування матеріал може мати широкий діапазон властивостей [9]. За прогнозами багатофункціональність композитів, які містять ВНТ, визначає їх широке використання в перспективі.

Зокрема, покриття з високою тепло- і електропровідністю важливі для застосування в авіації та космонавтиці. З наноконкомпозитів, які містять ВНТ, можуть виготовлятися деталі теплових двигунів, які потрібно ефективно охолоджувати. Їх можливо було б використовувати як космічний радіатор та для запобігання обмерзанню лі-

така,
що
до-

© М.М. Нищенко, Г.П. Приходько, М.Я. Шевченко, А.Г. Дубовий, Г.Ю. Михайлова, Б.В. Ковальчук, Ю.Ф. Бозбей, Д.Е. Азнакаєва, В.Ю. Московка, 2011

Було виявлено, що деформація ВНТ впливає на її електронну структуру, зокрема, ширину забороненої зони та концентрацію носіїв заряду [8]. Вказана властивість ВНТ може бути покладена в основу надмініаторних приладів, за допомогою яких здійснюється перетворення механічного впливу (деформації) в електричний

звольтити замінити рідинні системи відводу тепла, а також як сенсори напруг найбільш відповідальних вузлів для попередження від руйнування техніки.

Композити, які мають високу електропровідність і перколяційну структуру, є антистатич-

ками і можуть забезпечити розсіяння заряду по всьому фюзеляжу для попередження удару блискавки [10].

Унікальні механічні характеристики ВНТ, зокрема, рекордне значення модуля пружності, яке досягає 1 ТПа, є важливими для створення нового класу матеріалів, які легші за алюміній і міцніші за сталь. Вважається [9], що легкі і міцні наноконпозиційні матеріали з ВНТ, у першу чергу, знайдуть застосування в автомобільній, авіаційній і аерокосмічній галузях.

Наноконпозиційні матеріали відрізняються від звичайних композиційних матеріалів значно більш розвинутою (на багато порядків) площею поверхні частинок наповнювача. Внаслідок цього зростає поверхнева енергія і властивості наноконполімерів усе більше стають залежними від морфології частинок наповнювача і природи взаємодії компонентів на поверхні поділу фаз.

Характерні для нанотрубок високі відношення довжини до діаметра забезпечать їм додаткові переваги, які проявляються в досягненні перколяції при нижчих концентраціях, ніж у випадку сферичних наповнювачів. При досягненні перколяції питома електропровідність стрімко зростає внаслідок утворення тривимірної сітки з нанотрубок — шляхів електропровідності.

Електропровідні полімери, які містять ВНТ, мають перколяційний поріг, масовою часткою нижче 5 % ВНТ, що виявляється важливим для забезпечення електростатичної дисипації електромагнітної енергії, яка поглинається нанотрубками. Стає можливим створення електромагнітних перешкод, які екранують персонал, електронні прилади та інші об'єкти від НВЧ-випромінювання. Так, у працях [11; 12; 13] було встановлено згасання у 400 разів НВЧ випромінювання на частоті 2 ГГц, яке проходить скрізь полімер з нанотрубками товщиною 2 мм.

Важливим для багатьох застосувань є встановлення умов, при яких властивості композиту з нанотрубками, зокрема, електропровідність досягає ще вищих значень порівняно з відповідними властивостями кожного з компонентів. Виявленню таких особливостей і присвячена дана стаття.

У роботі досліджено електричні і термоелектричні властивості наноконполімеру з частинок LaNi_5 і вуглецевих багатощарових нанотрубок у процесі деформації стисканням, яка приводить до встановлення контактів між нанотрубками, збільшення їх загальної площі і зміни орієнтації і геометрії нанотрубок, а отже, і властивостей.

Методика проведення експерименту

Багатощарові ВНТ, одержані методом CVD, ідентифікувалися методом трансмісійної електронної мікроскопії (JEM-100CX11, Японія).

Електропровідність масиву вуглецевих нанотрубок (ВНТ) з частинками LaNi_5 діаметром 40 ± 10 мкм вимірювалася в діелектричному циліндрі під поршнем при прямому і зворотному ході. Під час опускання поршня і зменшення об'єму, який займає наноконполімер утворюються провідні шляхи і електропровідність стрибком на багато порядків зростає (перколяційний перехід) у малому діапазоні зміщень.

Після стиснення пружної суміші до густини $\rho \sim 1 \text{ г/см}^3$ поршень поступово підіймали і одночасно вимірювали електропровідність. При зростанні об'єму відбувається пружна релаксація масиву ВНТ з металевими частинками, яка зберігає їх контакт з електродами.

Припинення релаксації призводило до стрімкого падіння електропровідності і розриву електричного кола [14].

Метод термо-ЕРС дає важливу інформацію про стан електронної підсистеми наноконполімеру з нанотрубками. Багатощарові ВНТ після механічного перемішування з частинками LaNi_5 розміщувались у циліндричній капсулі під поршнем, який закріплювався на осі мікрометричного гвинта. При контрольованому стисненні порошкового зразка під поршнем зростала його густина.

Обидва металеві електроди («гарячий» — поршень і «холодний» — нерухомий електрод) були підключені до диференціальної термопари для вимірювання різниці температур між ними і до вольтметра, який реєстрував сигнал термо-ЕРС, який виникав у зразку. Діапазон різниці температур між електродами ΔT знаходився в межах $0 \dots 20^\circ\text{C}$. За сукупністю отриманих точок ΔT і U_{therm} (де U_{therm} — термо-ЕРС зразка) будувалась залежність U_{therm} від ΔT . Для всіх матеріалів, які були задіяні в експерименті, спостерігалась лінійна залежність, тангенс кута нахилу якої дає значення коефіцієнта Зеєбека. Це свідчило про незмінність коефіцієнта термо-ЕРС зразка у вказаному температурному інтервалі.

Калібрування методики відбувалось з використанням еталонних зразків Fe і Ni. Абсолютне значення коефіцієнта термо-ЕРС металу, зазвичай, визначається стосовно до свинцю, оскільки у цього металу не виникає різниці потенціалів між його нагрітим і холодним кінцями.

Додатний знак α приписується тим металам, у яких термо-ЕРС більша (з урахуванням знаку) і до яких тече струм через нагрітий спай.

Результати досліджень і обговорення

На рис. 1 наведено електронно-мікроскопічні знімки багатощарових вуглецевих нанотрубок.

На кінцях ВНТ спостерігаються частинки каталізатора.

Статистична обробка знімків показала, що середній радіус багат шарових вуглецевих нанотрубок становить 10 ± 2 нм, але незначна кількість ВНТ виходить за вказані межі і спостерігаються ВНТ у діапазоні діаметрів від 4 до 16 нм. У цьому ж напрямку лінійно зростає і товщина стінки від 0,6 до 3,6 нм що відповідає 2–10 графеновим шарам.

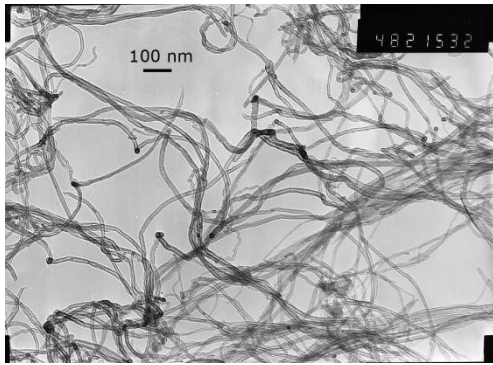


Рис. 1. Електронно-мікроскопічні знімки багат шарових вуглецевих нанотрубок

На рис. 2 показано залежності електропровідності $\sigma(\rho)$ масиву довільно орієнтованих ВНТ з частинками LaNi_5 від їх густини при прямому і зворотному ході поршня.

У разі зменшення об'єму в циліндрі під поршнем, у якому стискається зразок ВНТ, найменше початкове значення електропровідності було зафіксоване при густині $\rho = 2,74 \text{ г/см}^3$ для LaNi_5 (рис. 2, а), $\rho = 0,81 \text{ г/см}^3$ для LaNi_5 з масовою часткою 19,7 % ВНТ (рис. 2, б) і $\rho = 0,12 \text{ г/см}^3$ для ВНТ (рис. 2, в).

Стрибокподібне зростання електропровідності на малому інтервалі переміщень поршня і, відповідно, при незначних змінах густини (рис. 2) виявляється найбільш суттєвим (у 10^7 разів) для зразків з ВНТ.

Воно обумовлено утворенням електропровідних шляхів в результаті перегрупування, ущільнення масиву ВНТ і зростання загальної площі контактів між сусідніми ВНТ.

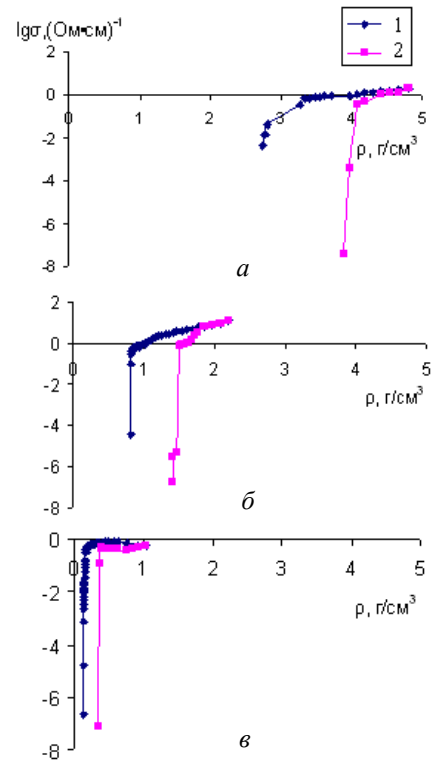


Рис. 2. Залежність логарифму електропровідності $\lg(\sigma)$ від густини ρ для:

- а — частинок LaNi_5 із середнім діаметром 50 мкм;
- б — нанокompозиту LaNi_5 з 19,7 ваг. % ВНТ;
- в — ВНТ 1 — прямий і 2 — зворотний хід поршня

Під час подальшого стиснення порошкових зразків електропровідність зростає для LaNi_5 і нанокompозиту LaNi_5 з масовою часткою 19,7 %, але для чистих ВНТ після досягнення максимуму на кривій $\sigma(\rho)$ починається незначне падіння. При зворотному ході поршня і зростанні об'єму з нанотрубками, відбувається пружна релаксація, яка найменша для мікрочастинок LaNi_5 і найбільша для масиву ВНТ.

Стрімке падіння електропровідності свідчить про завершення процесу пружної релаксації, зменшення загальної площі контакту між нанотрубками і електродами та розмикання електричного кола.

Цей процес відбувається при $\rho = 3,98 \text{ г/см}^3$ для LaNi_5 , при $\rho = 1,47 \text{ г/см}^3$ для LaNi_5 з масовою часткою 19,7 % ВНТ і при $0,35 \text{ г/см}^3$ для ВНТ. Це означає, що серед досліджених зразків найбільш пружним виявляється ВНТ. Таким чином, з рис. 2 безпосередньо видно, як анізотропія форми ВНТ впливає на перколяційний, а пружність ВНТ — на релаксаційний поріг. На рис. 3 наведено залежність електропровідності $\sigma(n)$ нанокompозиту LaNi_5 з ВНТ від концентрації ВНТ.

Видно, що електропровідність вихідних компонентів компактованих частинок LaNi_5 діаметром 40 мкм становить $\sigma = 1,74 \text{ (Om·cm)}^{-1}$, а для компактованого масиву ВНТ — $\sigma = 0,79 \text{ (Om·cm)}^{-1}$.

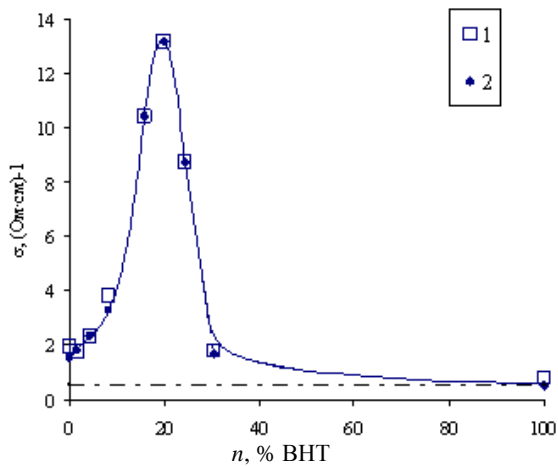


Рис. 3. Залежність електропровідності нанокompозиту LaNi_5 з ВНТ від концентрації ВНТ: 1 — максимальне значення електропровідності; 2 — електропровідність за максимального стиснення

Збільшення концентрації ВНТ у нанокompозиті до 19,7 % ваг. приводить до зростання електропровідності $\sigma(n)$ на порядок до значення $\sigma = 13,2 (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ (рис. 3), а на залежності $\sigma(n)$ спостерігається гострий пік. Це значення перевищує електропровідність компактованих ВНТ у 16,7 разу.

На рис. 4 наведено залежність перколяційного і релаксаційного переходів для нанокompозиту від концентрації ВНТ (n).

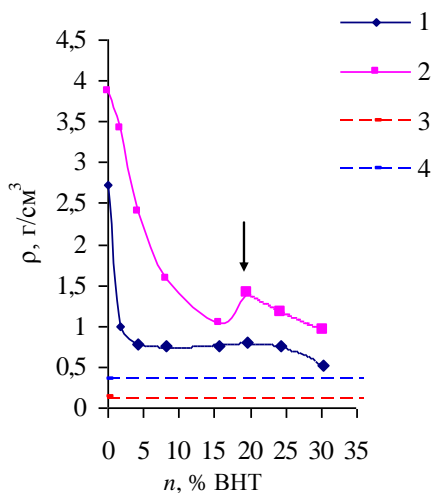


Рис. 4. Залежність перколяційного і релаксаційного переходів у нанокompозиті від концентрації ВНТ:

1, 2 — перколяційний та релаксаційний пороги;
3, 4 — теж саме для ВНТ

При додаванні до порошкового LaNi_5 1,24 % ВНТ перколяційний поріг падає майже втричі (рис. 4). Це означає, що сильно анізотропні нанотрубки, вздовж осі яких переважно тече струм, з'єднують частинки між собою і таким чином знижують поріг перколяції. При цьому електропровідність суттєво не змінюється (див. рис. 3).

При збільшенні n до масової частки 19,7 % ВНТ на кривих $\rho_{\text{перк.}}(n)$ і $\rho_{\text{рел.}}(n)$ також спостерігаються максимуми, але вже не такі гострі (рис. 4).

Релаксаційний поріг розміщується дещо вище, ніж перколяційний для всіх концентрацій ВНТ у композиті, що обумовлено непружними процесами. При масовій частки $n = 24,2$ % ВНТ електропровідність нанокompозиту знижується від 13,2 до 8,7 $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$. Це може бути пов'язано з утворенням більш «товстого» шару з ВНТ між частинками LaNi_5 , питома електропровідність яких зменшується.

Подальше збільшення n зменшує перколяційний поріг до значення 0,51 $\text{г}/\text{см}^3$, але при цьому електропровідність падає до 1,33 $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$.

Аналогічно знижується і релаксаційний поріг (рис. 4).

Невеличкий максимум обох переходів при 19,7 $\text{г}/\text{см}^3$ пов'язується з незначним впорядкуванням ВНТ, а на релаксаційній кривій — зниженням коефіцієнта пружності композиту.

При більших концентраціях ВНТ перколяційний і релаксаційний пороги знижуються, внаслідок деякого руйнування порядку, зростання пружності і суттєвого зменшення електропровідності.

Можливо зменшення пружності пов'язано зі зростанням концентрації електронів до максимуму у ВНТ і не випадково всі три максимуми на різних кривих $\sigma(n)$, $\rho_{\text{перк.}}(n)$ і $\rho_{\text{рел.}}(n)$ спостерігаються при одній і тій самій концентрації (масова частка 19,7 % ВНТ), що може свідчити про взаємозв'язок різних фізичних параметрів, які показані на рис. 2–4.

На рис. 5 подано залежності коефіцієнта Зеєбека α від густини ρ нанокompозиту з різною концентрацією ВНТ. Видно, що найменше значення 1,8 $\text{мкВ}/\text{К}$ спостерігається для масиву частинок LaNi_5 , а введення до нього масової частки лише 1,24 % ВНТ приводить до зростання коефіцієнта α більше, ніж на порядок (до 27 $\text{мкВ}/\text{К}$). Це підтверджує той факт, що сильно анізотропні нанотрубки, незважаючи на малу концентрацію, з'єднують частинки LaNi_5 між собою, забезпечують електричний контакт і знижують у 2,7 разу поріг перколяції. Хоча мала концентрація нанотрубок суттєво і не впливає на електропровідність, але визначає термоелектричні характеристики нанокompозиту. При стисненні порошкового нанокompозиту під поршнем коефіцієнт Зеєбека стрімко падає і досягає значення, характерного для LaNi_5 , що може бути пов'язано з утворенням безпосереднього електричного контакту між частинками і шунтуванням внеску від ВНТ. Останнє узгоджується з даними з електропровідності.

При зростанні концентрації ВНТ найбільше значення (при мінімальних густинах) коефіцієнта Зеебека майже не змінюється, але при максимальному стисненні спостерігається, по-перше, значне падіння коефіцієнта зі зростанням ρ , а, по-друге, спостерігається поступове зростання мінімального значення (рис. 5).

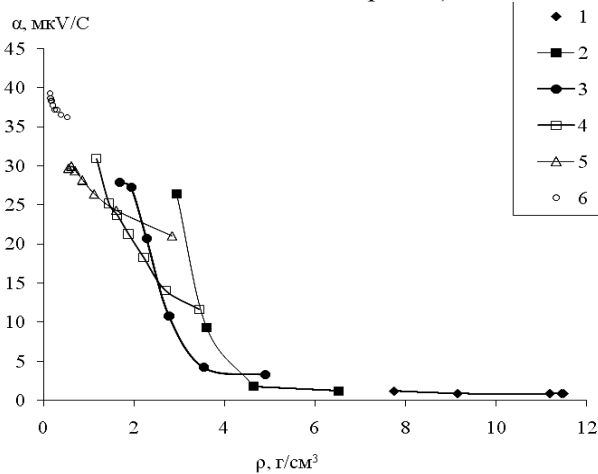


Рис. 5. Залежність коефіцієнта Зеебека від густини нанокompозиту при зменшенні об'єму під поршнем: 1 — LaNi_5 ; 2 — LaNi_5 + 1,24 % ВНТ; 3 — LaNi_5 + 5,3 % ВНТ; 4 — LaNi_5 + 11,43 % ВНТ; 5 — LaNi_5 + 14,48 % ВНТ; 6 — ВНТ

Обговорення

Відомо, що поява термо-ЕРС зумовлена трьома причинами:

- 1) температурною залежністю рівня Фермі, що приводить до появи контактної складової термо-ЕРС;
- 2) дифузією носіїв заряду (електронів і дірок) від гарячого кінця до холодного;
- 3) процесом захоплення фононами електронів [15].

У праці [16] встановлено, що найбільше значення термо-ЕРС спостерігається для найбільш очищених ВНТ і становить $\alpha = 23,7$ мкВ/К, а розрахована концентрація електронів при 0 К дорівнює $n_e = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Менш очищені нанотрубки, тобто більш дефектні, мають менше значення α і більше n_e , тобто збільшення концентрації електронів зменшує коефіцієнт термо-ЕРС, який має знак «плюс».

Наведена вище концентрація електронів означає, що на 10000 атомів вуглецю в нанотрубці припадає тільки 1 електрон. Але його рухливість μ дуже висока і становить $10 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

У металах, навпаки, на один атом, наприклад у міді, припадає один електрон, але рухливість дуже мала ($\mu = 0,0035 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). Рухливість електронів — це величина, яка характеризує, наскільки швидко вільний електрон рухається в речовині

під дією електричного поля і визначається за формулою:

$$\mu = \frac{v}{E},$$

де v — швидкість направленої руху електронів; E — напруженість електричного поля.

Згідно з класичною електронною теорією металів, питома електропровідність провідника дорівнює

$$\sigma = e n_e \mu,$$

де n_e — концентрація електронів провідності; e — заряд електрона.

Це означає, що стрімке зростання електропровідності (див. рис. 3) може бути обумовлено значним збільшенням концентрації електронів n_e , за умови, що рухливість суттєво не змінюється.

Враховуючи, що зміна перколяційного порогу в цій області концентрацій ВНТ — незначна, конфігурація наноструктурної системи майже не змінюється і струм переважно йде вздовж тонких вигнутих ВНТ, які кулонівськими силами притягуються до частинок LaNi_5 , що приводить, як показав експеримент, до компактування нанокompозиту при кімнатних температурах. При цій, мабуть оптимальній, концентрації починає найбільш ефективно діяти механізм перенесення електронів з металевих частинок LaNi_5 до ВНТ із залученням до цього процесу максимальної кількості нанотрубок.

Подальше зростання концентрації ВНТ змінює ситуацію: середня концентрація електронів у ВНТ знижується за рахунок наявності надлишкових ВНТ, знижується поріг перколяції, що свідчить про зростання невпорядкованості структури, знижується релаксаційний поріг з 1,4 до $0,96 \text{ г/см}^3$, що свідчить про суттєве зростання коефіцієнта пружності композиту, але він при цьому втрачає свою компактну форму.

Для всіх зразків системи LaNi_5 -ВНТ при всіх значеннях ρ знак α додатний (нагрітий кінець зразка заряджається від'ємно, а холодний — позитивно), що вказує на діркову провідність.

Стрімке зниження величини α при деформації пов'язується зі зростанням частки ВНТ, які вступили в електричний контакт з металевими частинками LaNi_5 , що веде до зростання концентрації електронів у нанотрубках. Вони обумовлюють падіння на порядок коефіцієнта α при малих концентраціях (масова частка < 5 %) нанотрубок (рис. 5).

Зростання концентрації електронів провідності підтверджується також і тим, що значення коефіцієнта α (27-31 мкВ/К) при мінімальній густині для всіх зразків нанокompозиту залишаються нижче значень α (37-39 мкВ/К) для масиву нанотрубок.

У разі зростання концентрації ВНТ у нанокомпозиті падіння коефіцієнта α зменшується внаслідок зростання частки ВНТ, які не контактують з частинками LaNi_5 .

Висновки

1. Встановлено, що в композиті з мікрочастинками LaNi_5 масової частки 19,7 % ВНТ (діаметром 10 ± 2 нм) електропровідність σ на порядок більша, порівняно з σ масиву ВНТ, а коефіцієнт Зеєбека (який має додатний знак) на порядок зменшується при концентраціях ВНТ масовою часткою нижче 5 %.

2. Виявлений механізм зростання електропровідності і падіння термо-ЕРС композиту LaNi_5 з ВНТ, який полягає у перенесенні електронів провідності з металу до ВНТ при встановленні між ними електричного контакту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки / А. В. Елецкий. // Успехи физических наук. — Т. 167. — № 9. — С. 945–972.
2. Gulyaev Ju. V. Work Function Estimate for Electrons Emitted from Nanotube Carbon Cluster Films / Ju. V. Gulyaev, N. I. Sinitsyn, G. V. Torgashov. — J. : Vac. Sci. Technol. — 1997. — V. 15. — № 2.
3. Синицин Н. И. Углеродные нанокластерные структуры — один из материалов эмиссионной электроники будущего / Н. И. Синицин, Ю. В. Гуляев, Н. Д. Девятков // Радиотехника. — 2000. — № 2. — С. 9–18.
4. De Jonge N. Carbon nanotube electron sources and applications / N. de Jonge, J. M Bonard. // Phil. Trans. R. Soc. London. — 2004. — V. 362. — P. 2239–2266.
5. Futaba D. N. Mechanical Properties of Beams from Self-Assembled Closely Packed and Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes // Nature Mater. — 2006. — № 5. — P. 987.
6. Kamat P. V. // Nanotoday. — 2006. — 1(4). — P. 20.
7. Lucci M. Gas sensing using single wall carbon-nanotubes ordered with dielectrophoresis / M. Lucci, P. Regoliosi, A. Reale, A. di Carlo // Sensors Actuators. — 2005. — V. 111–112. — P. 181–186.
8. Electrical and mechanical properties of distorted carbon nanotubes / A. Rochefort, P. Avouris, F. Lesage, D. R. Salagub // Phys. Rev. — 1999. — V. 60. — P. 13824–13830.
9. Barrera E. V. Carbon nanotubes science and applications / E. V. Barrera, M. I. Shofner, E. L. Corral // CRC Press. — 2005. — С. 253–273.
10. Zhang N. Chemical bonding of multivalled carbon nanotubes to SU-8 via ultrasonic irradiation / N. Zhang, J. Xie, M. Guers, V. Varadan // Smart Materials and Structures. — V. 12. — № 2. — P. 260–264.
11. Коротащ І. В. Виявлення ефекту гігантського поглинання мікрохвильового випромінювання в структурах вуглецевих нанотрубок / І. В. Коротащ, М. М. Нищенко, Е. М. Руденко, О. І. Ржешевська, Г. П. Приходько, Н. А. Гаврилюк // Металлофізика і новітні технології. — 2006. — Т. 28. — № 4. — С. 545–552.
12. Коротащ І. В. Мікрохвильові характеристики структур вуглецевих нанотрубок у діапазоні кімнатних та криогенних температур / І. В. Коротащ, Е. М. Руденко, М. М. Нищенко // Металлофізика і новітні технології. — 2007. — Т. 29. — № 7. — С. 849–855.
13. Лихторович С. П. Влияние нанотрубок на параметры нанопор и радиопоглощение на частоте 2 ГГц во фторопласте Ф4 / С. П. Лихторович, М. М. Нищенко, И. Е. Галстян, Э. М. Руденко, И. В. Коротащ, О. И. Ржешевская, Г. П. Приходько, Н. А. Гаврилюк // Металлофізика і новітні технології. — 2010. — Т. 32. — № 4. — С. 475–486.
14. Нищенко М. М. Электропроводность массива многослойных углеродных нанотрубок в процессе деформации сжатием / М. М. Нищенко, Г. Ю. Михайлова, Е. И. Архипов, Ю. В. Кода, Г. П. Приходько, Ю. И. Семенов // Металлофізика і новітні технології. — 2009. — Т. 31. — № 4. — С. 437–443.
15. Мацуй Л. Ю. Структура та електрофізичні властивості вуглеграфітових матеріалів і інтеркальованих сполук на їх основі: дис. на здобуття наук. ступеня д.ф.-м.н: спец. 01.04.07 «Фізика твердого тіла» / Л. Ю. Мацуй. — К. — 2005. — 427 с.
16. Мавринский А. В. Термоэлектродвижущая сила порошкообразных тубуленов / А. В. Мавринский, В. П. Андрийчук, Е. М. Байтингер // Известия Челябинского научного центра. — 2002. — № 3(16).

Стаття надійшла до редакції 05.07.2011.