

PACS numbers: 61.82.Rx, 68.37.Hk, 78.40.Ri, 78.67.Bf, 78.70.Gq, 79.60.Jv, 81.05.ub

Модифікування одностінних вуглецевих нанотрубок наночастинками CdTe з використанням мікрохвильового опромінення

Н. А. Курган, В. Л. Карбівський, С. І. Шулима, В. О. Москалюк,
О. А. Пузько

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Акад. Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна*

Одностінні вуглецеві нанотрубки було зв'язано з наночастинками CdTe, покритими тiogліколевою кислотою, з утворенням гібридних наноструктур. Нові наногібриди було охарактеризовано з особливим акцентом на фізико-хімію перенесення електрона. Представлено спектроскопічні докази, що підтверджують часткове перенесення густини заряду з функціональних груп безпосередньо на вуглецеву нанотрубку. Оскільки нанотрубки забезпечують швидкий шлях транспортування носіїв заряду до електроди, проведені дослідження відкривають перспективи застосування таких наноструктур для створення інтерфейсів сенсорних систем.

Single-walled carbon nanotubes are bonded to thioglycolic acid-coated CdTe nanoparticles for forming hybrid nanostructures. The new nanohybrids are characterized with a special emphasis on the physicochemistry of electron transfer. Spectroscopic evidence confirming the partial transfer of charge density from the functional groups directly to the carbon nanotube is presented. Since nanotubes provide a fast way to transport charge carriers to the electrode, the studies open up the prospects of using such nanostructures to create interfaces for sensor systems.

Ключові слова: вуглецеві нанотрубки, наночастинки CdTe, мікрохвильове опромінення, гібридні наноструктури, перенесення заряду.

Key words: carbon nanotubes, CdTe nanoparticles, microwave irradiation, hybrid nanostructures, charge transfer.

(Отримано 22 січня 2025 р.)

1. ВСТУП

Унікальні властивості вуглецевих нанотрубок (ВНТ) роблять їх привабливими матеріалами для створення нових електронних пристроїв: одноелектронних транзисторів, молекулярних діод, сенсорів, елементів пам'яті та логічних клапанів [1–11]. Велика кількість застосувань залежить від хімічного модифікування ВНТ органічними та неорганічними матеріалами. Серед неорганічних сполук для модифікування поверхонь ВНТ використовуються метали, солі металів, оксиди та наночастинки (НЧ) на основі металів [12–15].

ВНТ, декоровані НЧ, утворюють новий клас гібридних наноматеріалів, які потенційно можуть виявити додаткові нові фізичні та хімічні властивості, зумовлені взаємодією між ВНТ і приєднаними НЧ. Ці гібридні наноматеріали є багатообіцяючими будівельними блоками для різних застосувань, включаючи газові датчики, паливні елементи, сонячні елементи, літій-іонні батареї, елементи для зберігання водню та прозорі провідні електроди [16–21].

Однак на шляху створення ефективних гібридних наноматеріалів на основі ВНТ, залишаються невирішеними проблеми, пов'язані з методами функціоналізації ВНТ. Типові шляхи функціоналізації ВНТ включають вологе кислотне хімічне окиснення, етерифікацію, активацію діїмідом, електрохімічне модифікування або гідрофобну адсорбцію ароматичних похідних [22–24]. Багато з цих методів зазвичай передбачають кілька етапів, що включають кип'ятіння з сильними кислотами у поєднанні з ультразвуковим обробленням [25]. Таке агресивне оброблення спричиняє пошкодження ВНТ через появу тріщин і високу концентрацію домішок через тривалий час оброблення. Все це призводить до низької якості одержаних наноструктур. Незважаючи на те, що електрохімічне модифікування є м'яким, застосування його обмежено електропровідними ВНТ [26–28].

Альтернативні підходи до функціоналізації, які використовують неінвазивні та/або нетеплові збудження, пропонують можливості для усунення таких недоліків, наприклад, завдяки використанню полімерного обгортання для нековалентної функціоналізації ВНТ за допомогою макромолекул [29–31]. Інший альтернативний метод функціоналізації використовує мікрохвильове опромінення ВНТ [32–33].

Мікрохвильове випромінювання є добре відомим неінвазивним і чистим інструментом оброблення, який широко використовується для активації або пришвидшення хімічних реакцій [34]. Як правило, мікрохвильова енергія знижує кінетичний бар'єр для реакцій, змінюючи енергію коливань зв'язків і/або конфігурацію

конкретних реагентів. Така активація може забезпечити розширений діапазон реакцій з нижчими температурами та/або скороченим часом реакції, що уможливорює уникнути небажаних побічних реакцій і продуктів. Мікрохвильове випромінювання використовується як для синтезу ВНТ [35], так і для з'єднання ВНТ з наночастинками за допомогою генерування та реконструювання дефектів [36].

В даній роботі було адаптовано новий екологічно чистий підхід з використанням мікрохвиль для швидкого модифікування одностінних ВНТ наночастинками CdTe без використання агресивних окиснювачів (наприклад HNO_3) з ультразвуковим обробленням. Цей підхід пропонує новий спосіб ефективного створення гібридних наноструктур за рахунок того, що весь процес відбувається в один етап, що дає змогу в подальшому масштабувати технологію до промислового рівня. Одностінні ВНТ (ОСВНТ) легко утворюють високопрозору й електропровідну тонку плівку, яка може мати різне прикладне застосування [37]. У поєднанні з наночастинками CdTe, який є широкозонним напівпровідником, відкривається можливість створення гібридних наноструктур для застосування в якості компонент прозорих сонячних елементів, сенсорів, оптоелектронних пристроїв, систем зберігання енергії тощо [38–42].

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для досліджень було використано одностінні ВНТ, функціоналізовані COOH-групами D15L1–5–COOH (NanoLab, Inc., США). За інформацією для споживача: зовнішній діаметр — 15 ± 5 нм, довжина — 1–5 мкм, вміст COOH-груп — 2–7 мас.%, питома поверхня — $220 \text{ м}^2/\text{г}$.

Наночастинки CdTe, стабілізовані тіолами, було одержано за кімнатної температури з дотриманням методи, описаної в [43].

Для приготування зразків робили навіски ОСВНТ по 0,03 г в трьох окремих флаконах, до яких додавалося по 1 мл дейонізованої води. Одержані зразки ОСВНТ були дисперговані в ультразвуковій ванні за частоти ультразвуку у 50 кГц, часу дії у 10 хвилин і температури у 30 градусів за Цельсієм. Потім до одного флакону підготовленої суспензії ОСВНТ додавали 1 мл суспензії наночастинок CdTe та завантажували разом з одним флаконом суспензії чистих ОСВНТ у мікрохвильову піч (модель LG MS-2042), оснащену магнетроном потужністю у 700 Вт, що працює на частоті у 2,45 ГГц. Для мінімізації перегріву розчинника та підвищення тиску в закритому флаконі здійснювали циклічні мікрохвильові експозиції з часом увімкнення у 30 с за 100%-потужності, розділені 10-секундними інтервалами часу вимк-

нення. Загальна тривалість експозиції становила 2400 с. Такі параметри було підбрано з урахуванням даних досліджень з одержання подібних наноструктур [44–47].

Загалом для досліджень було підготовлено зразки чистих ОСВНТ, чистих ОСВНТ, оброблених мікрохвильовим випромінюванням, і гібридних структур ВНТ, модифікованих наночастинками CdTe (ОСВНТ/CdTe). Всі зразки підготовлено у вигляді суспензій.

Рентгенівські фотоелектронні спектри (РФС) основних рівнів елементів було одержано на рентгенівському спектрометрі PERKIN ELMER PHI 5600. Робочий вакуум під час проведення експерименту був у 10^{-7} Па. Використовувалася алюмінійова анода з енергією лінії AlK_{α} у 1486,6 еВ. Діаметер променя був у 400 мкм. Для компенсації заряду зразка використовувалася електронна гармата. Роздільча здатність по енергії складала 0,1 еВ. Калібрування енергій зв'язку проводилося по $Au4f$ -лінії у 87,5 еВ. Для досліджень зразки суспензій наносилися на очищену пластину кремнію та висушувалися за кімнатної температури упродовж 30 хвилин, після чого вносилися у вакуумну шлюзову камеру. Розкладення спектрів на компоненти проводилося за програмою XPSPeak. Початкова ширина на половині висоти піка компонент розкладення вибиралася за значенням для чистої сполуки. Через різне оточення та хемічний зв'язок ширина на половині висоти може дещо змінюватися. Форма кривої компонент розкладення задавалася у вигляді Лоренціяна з невеликою долею Гавсіана, який визначається апаратною функцією. Таким чином, форма кривої компоненти розкладення представляється у вигляді згортки двох функцій — Лоренціяна та Гавсіана.

Спектрофотометричні дослідження зразків проводилися на однопровменевому спектрофотометрі Spekol 1500 у діапазоні довжин хвиль 190–1100 нм. Для досліджень зразки суспензій додавали безпосередньо у кварцову кювету з дистильованою водою. Еталонний розчин, відносно якого було одержано оптичні спектри вбирання, — дистильована вода.

Електронну мікроскопію гібридних структур ОСВНТ/CdTe проводили за допомогою сканівного електронного мікроскопа (SEM) TESCAN MIRA3. Для досліджень зразки суспензій наносилися на провідне скло ІТО та висушувалися за кімнатної температури.

3. РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

Для НЧ CdTe спостерігається широке розмите плече для оптичного вбирання в околі 425–500 нм (рис. 1, *a*), що відображає перехід $1S(e)-1S_{3/2}$ та відповідає розмірам НЧ від 2,2 нм до 4,5 нм

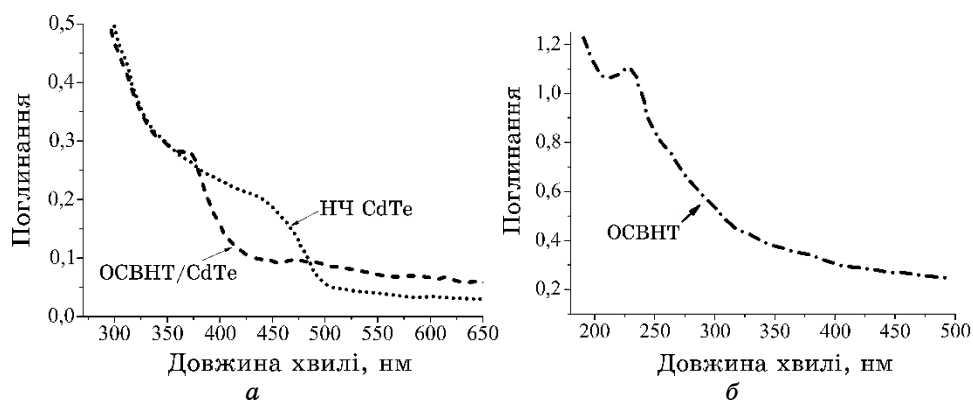


Рис. 1. Оптичні спектри вбирання зразків: а) НЧ CdTe і ОСВНТ/CdTe; б) чисті ОСВНТ.¹

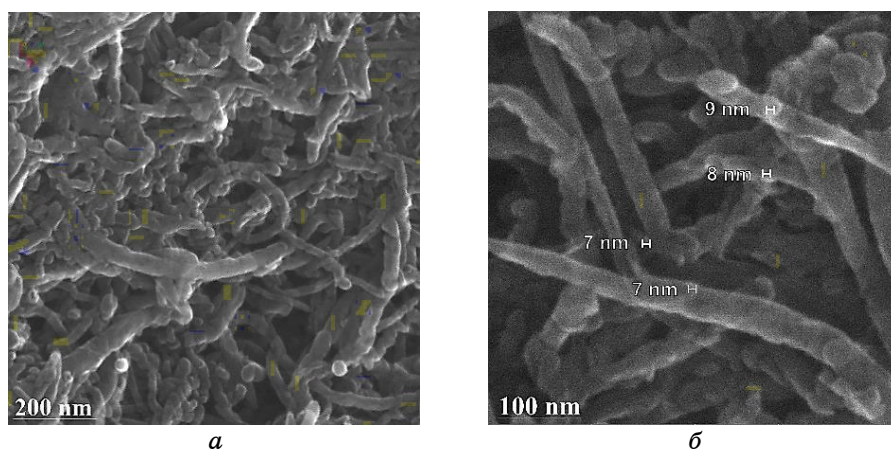


Рис. 2. СЕМ-зображення гібридних наноструктур ОСВНТ/CdTe за різного масштабу.²

[48, 49]. Розмитість піка пов'язана з наявністю полідисперсії розмірів НЧ [39].

Під час формування гібридних наноструктур ОСВНТ/CdTe спостерігаються утворення розміром у 7–9 нм за рахунок формування кластерів з НЧ на поверхні ОСВНТ (рис. 2, а, б). Водночас відбувається зміщення піка оптичного вбирання на 375 нм (рис. 1, а), що вказує на взаємодію НЧ з ВНТ. Збільшення розміру НЧ без зв'язування з поверхнею ОСВНТ приводило б до зміщення піка в область більших довжин хвиль [50, 51] з одночасною появою піка вбирання, характерного для чистих ОСВНТ, який спостерігається на $\cong 230$ нм (рис. 1, б) і зумовлений π - π^* -

переходом ароматичного кільця $C=C$. Чітко видно, що на поверхні ОСВНТ з формуванням гібридних структур ОСВНТ/CdTe згасає 90% випромінення CdTe-НЧ порівняно з чистими CdTe-НЧ. Згасання випромінення може бути пов'язане з перенесенням електронів з фотозбудженого CdTe на ВНТ.

Аналіза рентгенівських фотоелектронних спектрів досліджуваних зразків дала змогу однозначно інтерпретувати енергетичні зв'язки, що превалюють під час формування інтерфейсу ОСВНТ/CdTe. 1s-спектр Карбону (рис. 3, табл. 1) відображає ене-

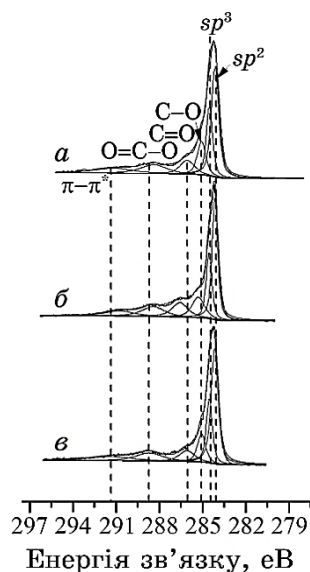


Рис. 3. РФС C1s-спектри зразків: а) гібридні структури ОСВНТ/CdTe НЧ; б) чисті ОСВНТ після мікрохвильового опромінювання; в) чисті ОСВНТ без мікрохвильового опромінювання.³

ТАБЛИЦЯ 1. Енергетичне положення [еВ] і ширина на половині висоти (у дужках) складових компонент основних C1s-спектрів зразків.⁴

Компоненти спектру	sp^2	sp^3	C-O (C-OH)	C=O	O=C-O	$\pi-\pi^*$
Зразок						
Гібридні структури ОСВНТ/CdTe-НЧ	284,2 (0,6)	284,6 (0,5)	285,1 (0,7)	286,1 (1,2)	288,4 (2,2)	291,2 (3,3)
Чисті ОСВНТ після мікро- хвильового опромінювання	284,2 (0,5)	284,6 (0,5)	285,3 (1,1)	286,6 (1,3)	288,4 (1,9)	290,8 (2,4)
Чисті ОСВНТ без мікрох- вильового опромінювання	284,2 (0,6)	284,5 (0,5)	285,1 (0,7)	286,1 (1,3)	288,7 (2,3)	291,4 (3,7)

Примітка: похибка мірянь — 0,1 еВ.

ргію зв'язку Карбону у різних конформаціях: sp^2 , sp^3 , C–O (C–OH), C=O, O=C–O, $\pi-\pi^*$ відповідно. За взаємодії ОСВНТ з наночастинками CdTe зазнає значних змін компонента $\pi-\pi^*$, яка відображає зв'язок C=C між Карбоном на поверхні нанотрубок.

Через опромінення чистих ОСВНТ мікрохвилями відбувається зміщення максимуму енергії цієї компоненти на 0,6 еВ у бік зменшення енергії зв'язку та зменшення значення ширини на половині висоти, що зумовлено появою додаткової електронної густини. За взаємодії ОСВНТ з CdTe-НЧ спостерігається зворотній процес — зміщення максимуму компоненти $\pi-\pi^*$ на 0,4 еВ у бік збільшення енергії зв'язку та збільшення значення ширини на половині висоти, що свідчить про відтік електронної густини за формування гібридних наноструктур ОСВНТ/CdTe.

Значні зміни спостерігаються у формі 1s-спектрів Оксигену із збереженням положень основних компонент спектру в межах похибки мірянь (рис. 4, табл. 2). Для чистих ОСВНТ без хвильового опромінювання спектр O1s характеризується двома піками на 531,6 еВ і 533,3 еВ, що відповідають хемічним зв'язкам C=O та C–O (C–OH) відповідно.

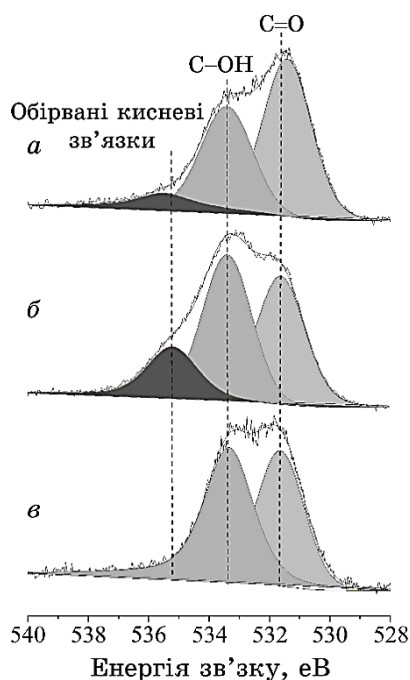


Рис. 4. РФС O1s-спектри зразків: а) гібридні структури ОСВНТ/CdTe НЧ; б) чисті ОСВНТ після мікрохвильового опромінювання; в) чисті ОСВНТ без мікрохвильового опромінювання.⁵

ТАБЛИЦЯ 2. Енергетичне положення [eV] і ширина на половині висоти (у дужках) складових компонент остовних O1s-спектрів зразків.⁶

Компоненти спектру	C=O	C-O (C-OH)	Обірвані Оксигенові зв'язки
Зразок			
Гібридні структури ОСВНТ/CdTe-НЧ	531,4 (1,9)	533,4 (2,0)	535,5 (1,9)
Чисті ОСВНТ після мікрохвильового опромінювання	531,6 (1,9)	533,4 (1,9)	535,2 (1,9)
Чисті ОСВНТ без мікрохвильового опромінювання	531,6 (1,9)	533,3 (1,9)	—

Примітка: похибка мірянь — 0,1 eV.

Під час оброблення ОСВНТ мікрохвильовим випроміненням відбувається зменшення піка C=O та поява нового піка на 535,2 eV, який, швидше за все, відповідає за обірвані Оксигенові зв'язки, що утворюються внаслідок взаємочину випромінення з функціональними групами COOH— на поверхні нанотрубок. Взаємодія ОСВНТ з НЧ CdTe за мікрохвильового опромінювання приводить до значного зменшення інтенсивності піка, що відповідає за зв'язок C—O (C—OH).

Пік, що, швидше за все, відповідає за обірвані Оксигенові зв'язки, зміщується на 0,3 eV у бік збільшення енергії зв'язку порівняно зі зразками ОСВНТ після мікрохвильового оброблення. Таке зміщення у бік збільшення енергії зв'язку з одночасним зменшенням інтенсивності піка свідчить про відтік електронної густини з обірваних Оксигенових зв'язків за рахунок часткового відновлення їх з формуванням зв'язків C=O з йонами Оксигену тілових груп з поверхні CdTe-НЧ під час формування гібридних наноструктур ОСВНТ/CdTe.

Спираючись на одержані дані можна припустити наступний механізм формування гібридних наноструктур ОСВНТ/CdTe (рис. 5): за мікрохвильового опромінювання відбувається утворення обірваних Оксигенових зв'язків, на які відбувається приєднання наночастинок CdTe через об'єднання з Оксигеном тілових груп, і формування гібридних наноструктур ОСВНТ/CdTe. Водночас відбувається транспорт електронного заряду з функціональних груп безпосередньо на ВНТ, що підвищує провідність таких гібридних наноструктур у порівнянні з чистими ОСВНТ.

4. ВИСНОВКИ

Розроблено одноетапний спосіб одержання гібридних наноструктур ОСВНТ/CdTe з використанням мікрохвильового опромінювання.

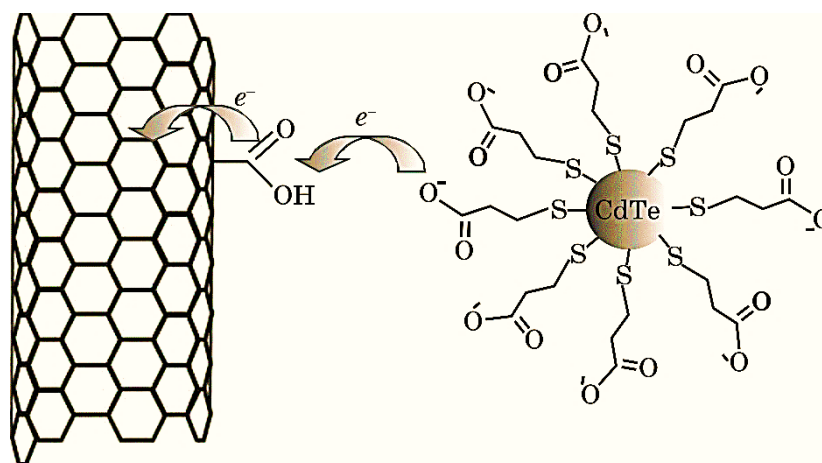


Рис. 5. Схематична інтерпретація механізму приєднання наночастинок CdTe до ОСВНТ.⁷

Встановлено, що для чистих ОСВНТ спектр $1s$ Оксигену характеризується двома піками у 531,6 еВ і 533,3 еВ, що відповідають хемічним зв'язкам C=O та C–O (C–OH) відповідно.

Під час оброблення ОСВНТ мікрохвильовим опроміненням відбувається зменшення піка C=O та поява нового піка на 535,2 еВ, який, швидше за все, відповідає за обірвані Оксигенові зв'язки, що утворюються внаслідок взаємочину випромінювання з функціональними групами COOH– на поверхні нанотрубок.

За взаємодії ОСВНТ з CdTe-НЧ спостерігається значне зменшення інтенсивності піка, що відповідає за зв'язок C–O (C–OH). Це зменшення зумовлене зменшенням кількості зв'язків C–O (C–OH) за рахунок утворення зв'язків C=O з наночастинами? - CdTe.

Запропоновано пояснення механізму електронного транспорту за формування гібридних наноструктур ОСВНТ/CdTe, який полягає в утворенні обірваних Оксигенових зв'язків під час мікрохвильового опромінювання, на які відбувається ковалентне приєднання наночастинок CdTe та формування гібридних наноструктур ОСВНТ/CdTe. Водночас відбувається транспорт електронного заряду з функціональних груп безпосередньо на ВНТ, що підвищує провідність таких гібридних наноструктур у порівнянні з чистими ОСВНТ.

Проведені дослідження відкривають перспективи простого одержання гібридних наноструктур ОСВНТ/CdTe для створення інтерфейсів (перехідних структур), що з'єднують наноматеріали чи то нанооб'єкти з мікроскопічними пристроями або тканинами у біомедичних інвазивних пристроях і сенсорах.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. Z. Shariatinia, *Handbook of Carbon-Based Nanomaterials* (Eds. S. Thomas, C. Sarathchandran, S. A. Ilangoan, and J. C. Moreno-Piraján) (Elsevier: 2021), Ch. 7, p. 321; <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821996-6.00016-6>
2. M. N. Norizan, M. H. Moklis, S. Z. Ngah Demon, N. A. Halim, A. Samsuri, I. S. Mohamad, V. F. Knight, and N. Abdullah, *RSC Adv.*, **10**, No. 71: 43704 (2020); <https://doi.org/10.1039/D0RA09438B>
3. V. Schroeder, S. Savagatrup, M. He, S. Lin, and T. M. Swager, *Chem. Rev.*, **119**, No. 1: 599 (2018); <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00340>
4. J. Wang, *Electroanalysis*, **17**, No. 1: 7 (2005); <https://doi.org/10.1002/elan.200403113>
5. M. Endo, T. Hayashi, K. Y. Ahm, M. Terrones, and M. S. Dresselhaus, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **362**, No. 1823: 2223 (2004); <http://doi.org/10.1098/rsta.2004.1437>
6. C. W. Tan, K. H. Tan, Y. T. Ong, A. R. Mohamed, S. H. S. Zein, and S. H. Tan, *Environ. Chem. Lett.*, **10**: 265 (2012); <https://doi.org/10.1007/s10311-012-0356-4>
7. R. Shoukat and M. I. Khan, *Microsystem Technologies*, **27**, No. 12: 4183 (2021); <https://doi.org/10.1007/s00542-021-05211-6>
8. R. Stadler and M. Forshaw, *Molecular Electronics, 3D Nanoelectronic Computer Architecture and Implementation* (Eds. D. Crawley, K. Nikolic, and M. Forshaw) (Boca Raton: CRC Press: 2020), Ch. 5, p. 90; <https://doi.org/10.1201/9780429150081>
9. M. Zhang, C. Du, Q. Huang, Z. Liao, Y. Deng, W. Huang, and X. Wang, *Carbon Nanotube Transistors, Nanocarbon Electronics* (Eds. Ch. Zhou, M. Zhang, and C. Yang) (New York: Jenny Stanford Publishing: 2020), Ch. 4, p. 143; <https://doi.org/10.1201/9781003043089>
10. S. Darwin, E. Fantin Irudaya Raj, M. Appadurai, and M. Chithambara Thanu, *Energy Systems Design for Low-Power Computing* (Eds. R. R. Gatti, Ch. Singh, P. Srividya, and S. Bhat) (Hershey, PA, USA: IGI Global Scientific Publishing: 2023), Ch. 5, p. 67; <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-4974-5.ch005>
11. V. Selamneni, N. Bokka, V. Adepu, and P. Sahatiya, *Carbon Nanomaterials for Emerging Electronic Devices and Sensors. Carbon Nanomaterial Electronics: Devices and Applications* (Eds. A. Hazra and R. Goswami) (Singapore: Springer Singapore: 2021), p. 215; https://doi.org/10.1007/978-981-16-1052-3_10
12. S. Mallakpour and E. Khadem, *Chemical Engineering Journal*, **302**: 344 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.038>
13. L. K. Sarpong, M. Bredol, M. Schönhoff, A. Wegrzynowicz, K. Jenewein, and H. Uphoff, *Optical Materials*, **86**: 398 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.10.039>
14. C. Soldano, *Progress in Materials Science*, **69**: 183 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.11.001>
15. D. Aasen, M. P. Clark, and D. G. Ivey, *J. Electrochem. Soc.*, **167**, No. 4: 040503 (2020); <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab7094>
16. K. Yadav, N. Khan, and M. Jha, *Surface Modified Carbon Nanotubes. Vol. 2: Industrial Applications* (Eds. J. Aslam, Ch. M. Hussain, and R. Aslam)

- (American Chemical Society: 2022), **1425**, Ch. 5, p. 101;
<https://doi.org/10.1021/bk-2022-1425.ch005>
17. J. Chen and G. Lu, *Carbon Nanotube-Nanoparticle Hybrid Structures. Carbon Nanotubes* (Eds. J. M. Marulanda) (London: IntechOpen: 2010), Ch. 31;
<https://doi.org/10.5772/39446>
 18. X. Li, Y. Jia, and A. Cao, *ACS Nano*, **4**, No. 1: 506 (2010);
<https://doi.org/10.1021/nn901757s>
 19. N. K. Mehra and N. K. Jain, *Journal of Drug Targeting*, **24**, No. 4: 294 (2016); <https://doi.org/10.3109/1061186X.2015.1055571>
 20. C. Baslak, M. D. Kars, M. Karaman, M. Kus, Y. Cengeloglu, and M. Ersoz, *Journal of Luminescence*, **160**: 9 (2015);
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2014.11.030>
 21. L. Wang, H. Liu, R. M. Konik, J. A. Misewich, and S. S. Wong, *Chemical Society Reviews*, **42**, No. 20: 8134 (2013);
<https://doi.org/10.1039/c3cs60088b>
 22. A. Hirsch and O. Vostrowsky, *Functionalization of Carbon Nanotubes. Functional Molecular Nanostructures. Topics in Current Chemistry. Vol. 245* (Eds. A. D. Schlüter) (Berlin–Heidelberg: Springer: 2005), Ch. 5, p. 193;
<https://doi.org/10.1007/b98169>
 23. Y. P. Sun, K. Fu, Y. Lin, and W. Huang, *Acc. Chem. Res.*, **35**, No. 12: 1096 (2002); <https://doi.org/10.1021/ar010160v>
 24. P. W. Chiu, G. S. Duesberg, U. Dettlaff-Weglikowska, and S. Roth, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, No. 20: 3811 (2002); <https://doi.org/10.1063/1.1480487>
 25. K. Balasubramanian and M. Burghard, *Small*, **1**, No. 2: 180 (2005);
<https://doi.org/10.1002/sml.200400118>
 26. K. Balasubramanian, M. Burghard, and K. Kern, *Carbon Nanotubes: Electrochemical Modification, Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. Vol. 7* (Eds. J. A. Schwarz, S. E. Lyshevski, and C. I. Contescu) (New York: Dekker: 2014), p. 507.
 27. M. Musameh, N. S. Lawrence, and J. Wang, *Electrochemistry Communications*, **7**, No. 1: 14 (2005); <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2004.10.007>
 28. S. E. Kooi, U. Schlecht, M. Burghard, and K. Kern, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **41**, No. 8: 1353 (2002); [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020415\)41:8<1353::aid-anie1353>3.0.co;2-i](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020415)41:8<1353::aid-anie1353>3.0.co;2-i)
 29. A. M. Díez-Pascual, *Macromol.*, **1**, No. 2: 64 (2021);
<https://doi.org/10.3390/macromol1020006>
 30. N. Zydziak, C. Hübner, M. Bruns, and C. Barner-Kowollik, *Macromol.*, **44**, No. 9: 3374 (2011); <https://doi.org/10.1021/ma200107z>
 31. P. Eskandari, Z. Abousalman-Rezvani, H. Roghani-Mamaqani, and M. Salami-Kalajahi, *Advances in Colloid and Interface Science*, **294**: 102471 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102471>
 32. S. S. Qureshi, V. Shah, S. Nizamuddin, N. M. Mubarak, R. R. Karri, M. H. Dehghani, and M. E. Rahman, *Journal of Molecular Liquids*, **356**: 119045 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119045>
 33. M. I. Hussein, S. S. Jehangir, I. J. Rajmohan, Y. Haik, T. Abdulrehman, Q. Clément, and N. Vukadinovic, *Scientific Reports*, **10**, No. 1: 16013 (2020); <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72928-1>
 34. E. L. Frankevich, *Chemical Generation and Reception of Radio and Microwaves* (New York: VCH Publishers: 1994).

35. E. H. Hong, K.-H. Lee, S. H. Oh, and C.-G. Park, *Adv. Funct. Mater.*, **13**, No. 12: 961 (2003); <https://doi.org/10.1002/adfm.200304396>
36. T. J. Imholt, C. A. Dyke, B. Hasslacher, J. M. Perez, D. W. Price, J. A. Roberts, J. B. Scott, A. Wadhawan, Z. Ye and J. M. Tour, *Chem. Mater.*, **15**, No. 21: 3969 (2003); <https://doi.org/10.1021/cm034530g>
37. T. M. Barnes, X. Wu, J. Zhou, A. Duda, J. van de Lagemaat, T. J. Coutts, C. L. Weeks, D. A. Britz, and P. Glatkowski, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, No. 24: 243503 (2007); <https://doi.org/10.1063/1.2748078>
38. M. Houshmand, M. H. Zandi, and N. E. Gorji, *Superlattices and Microstructures*, **88**: 365 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.09.023>
39. D. M. Guldi, G. M. A. Rahman, V. Sgobba, N. A. Kotov, D. Bonifazi, and M. Prato, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, No. 7: 2315 (2006); <https://doi.org/10.1021/ja0550733>
40. N. Gan, J. Zhou, P. Xiong, F. Hu, Y. Cao, T. Li, and Q. Jiang, *Toxins*, **5**, No. 5: 865 (2013); <https://doi.org/10.3390/toxins5050865>
41. B. Zebli, H. A. Vieyra, I. Carmeli, A. Hartschuh, J. P. Kotthaus, and A. W. Holleitner, *Phys. Rev. B*, **79**, No. 20: 205402 (2009); <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.205402>
42. S. Leubner, G. Katsukis, and D. M. Guldi, *Faraday Discussions*, **155**: 253 (2012); <https://doi.org/10.1039/c1fd00102g>
43. Y. Khalavka, B. Mingler, G. Friedbacher, G. Okrepka, L. Shcherbak, and O. Panchuk, *phys. stat. sol. (a)*, **207**: 370 (2010); <https://doi.org/10.1002/pssa.200925260>
44. M. S. Raghuveer, S. Agrawal, N. Bishop, and G. Ramanath, *Chemistry of Materials*, **18**, No. 6: 1390 (2006); <https://doi.org/10.1021/cm051911g>
45. Y. Wang, Z. Iqbal, and S. Mitra, *Carbon*, **43**, No. 5: 1015 (2005); <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.11.036>
46. P. Potirak, W. Pecharapa, and W. Techitdheera, *Journal of Experimental Nanoscience*, **9**, No. 1: 96 (2013); <https://doi.org/10.1080/17458080.2013.820848>
47. Gh. Kaushik, K. Mukul, W. Huafeng, M. Takahiro, and A. Yoshinori, *J. Phys. Chem. C*, **114**, No. 11: 5107 (2010); <https://doi.org/10.1021/jp911421a>
48. D. J. Borah, D. Saikia, A. Das, P. K. Saikia, and A. T. T. Mostako, *Discov. Mater.*, **3**, No. 4: 1 (2023); <https://doi.org/10.1007/s43939-023-00041-x>
49. S. Kudera, L. Carbone, L. Manna, and W. J. Parak, *Growth Mechanism, Shape and Composition Control of Semiconductor Nanocrystals. Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots* (Eds. A. L. Rogach) (Vienna: Springer: 2008), Ch. 1, p. 1; https://doi.org/10.1007/978-3-211-75237-1_1
50. Y. C. Lin, W. Chou, A. S. Susha, S. V. Kershaw, and A. L. Rogach, *Nanoscale*, **5**, No. 8: 3400 (2013); <https://doi.org/10.1039/C3NR33928A>
51. P. Dagtepe, V. Chikan, J. Jasinski, and V. J. Leppert, *J. Phys. Chem. C*, **111**, No. 41: 14977 (2007); <https://doi.org/10.1021/jp072516b>

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36, Acad. Vernadsky Blvd.,
UA-03142 Kyiv, Ukraine*

¹ Fig. 1. Optical absorption spectra of the samples: a) CdTe NP and SWCNT/CdTe; б) pure SWCNT.

² Fig. 2. SEM images of hybrid SWCNT/CdTe nanostructures at different scales.

³ Fig. 3. XPS C1s spectra of the samples: a) hybrid structures of SWCNT/CdTe NP; б) pure SWCNT after microwave irradiation; в) pure SWCNT without microwave irradiation.

⁴ TABLE 1. Energy position [eV] and width at half height (in parentheses) of the components of C1s core-level spectra for the samples.

⁵ Fig. 4. XPS O1s spectra of the samples: а) hybrid structures of SWCNT/CdTe NP; б) pure SWCNT after microwave irradiation; в) pure SWCNT without microwave irradiation.

⁶ TABLE 2. Energy position [eV] and width at half height (in parentheses) of the components of O1s core-level spectra for the samples.

⁷ Fig. 5. Schematic interpretation for the attachment mechanism of the CdTe nanoparticles to SWCNT.