

7. Войтович, С.А. Ієрархічна дублетно-матрична структура C<FeS<sub>2</sub>> для Li<sup>+</sup>- та Mg<sup>++</sup>-інтеркаляційного струмоутворення / С.А. Войтович, І.І. Григорчак, М. В. Матвіїв // Фізична інженерія поверхні. – 2010. – Т. 8, № 1. – С. 43-52.
8. Кромптон, Т. Первичные источники тока . Пер. с англ. - М. : Мир, 1986. - 328 с.

### Abstract

The article includes the developed methods of natural graphite modification for its effective use as a cathode material of lithium power sources. It was determined that nanohybridization of thermally expanded graphite with organic thiourea increases the energy capacity Li<sup>+</sup> - intercalation galvanic reaction. This paper analyzes in detail the structure of the modified graphite and its physical properties. In particular, by small-angle X-ray scattering method, it was revealed that in the oxidized graphite the invariant Species is significantly lower than the same parameter for graphite bisulfate. This depends on a decrease of the scattering approximately by 5 times on electronic inhomogeneities. The heat treatment of graphite bisulfate at 600 and 800 °C increases the poral volume by about 4 times. For the first time, the supramolecular ensemble of mesoporous graphite – ferrocene was synthesized, as an active material for pseudocapacitors, which provides the increase of the specific capacity of initial activated carbon.

**Keywords:** intercalation, impedance spectroscopy, small-angle X-ray scattering, oxidized graphite, pseudocapacitor

Розглянуто взаємодію електромагнітного випромінювання (ЕМВ) з плоско-неоднорідними шарами (покриттями), що поділяють два однорідних діелектричних півпростори. Для визначення коефіцієнтів відбиття і прозорості використовується імпедансний метод. Проведено аналіз отриманих результатів і показана фільтруюча властивість шаруватих нанопокриттів

**Ключові слова:** електромагнітне випромінювання, нанопокриття, імпедансний метод

Рассмотрено взаимодействие электромагнитного излучения (ЭМИ) с плоско-неоднородными слоями (покрытиями), которые разделяют два однородных диэлектрических пространства. Для определения коэффициентов отражения и прозрачности используется импедансный метод. Проведен анализ полученных результатов и показано фильтрующее свойство слоистых нанопокровтий

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, нанопокровтие, импедансный метод

УДК 535.3; 535.5; 537.5; 539.51

## ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З НАНОПОКРИТТЯМИ

**Н. Г. Шкода**

Кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник  
Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України  
вул. Генерала Наумова, 17, м. Київ, Україна, 03164  
Контактний тел.: 095-423-46-01  
E-mail: n\_shkoda@ukr.net

**С. В. Шостак**

Кандидат фізико-математичних наук, доцент  
Кафедра вищої та прикладної математики\*  
Контактний тел.: 066-363-37-83  
E-mail: shostakserg@ukr.net

**Я. С. Криворучко**

Старший викладач\*  
Контактний тел.: 050-240-01-86  
E-mail: krayana@ukr.net

\*Національний університет біоресурсів і природокористування  
вул. Героїв оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041

### 1. Вступ

Останнім часом особливий інтерес викликають нанотехнології, за допомогою яких створюються нові матеріали, що мають особливі властивості. В таких матеріалах використовуються так звані нанопокриття, які мають розмір від 1 нм до 20 нм.

В роботі розглядається взаємодія електромагнітного випромінювання (ЕМВ) з плоско-неоднорідним шаром (покриттям), що поділяє два однорідних діелектричних півпростори. Покриття може складатися з довільної кількості шарів, товщини яких мають порядок десятків нанометрів із довільними значеннями діелектричних і магнітних проникностей.

Для визначення коефіцієнтів відбиття і прозорості використовується імпедансний метод [1], хоча можливі і інші підходи для розв'язання задач такого типу [2, 3]. Наводяться основні розрахункові співвідношення і деякі характерні результати виконаних розрахунків. Виконано аналіз отриманих результатів. При поширенні гармонічних електромагнітних хвиль (ЕМХ), а також хвиль іншої природи (акустичних, пружних, поверневих та ін) у нескінчених плоско-сферичних середовищах, наприклад таких, які утворені двома різними матеріалами, що чергуються (смугастий простір), можуть виникати досить цікаві ефекти [1-3].

Нові можливості відкриваються перед дослідниками при використанні нанопокриттів з благородних металів або комбінованих покриттів із металевими і діелектричними прошарками, що чергуються. Пов'язано це з тим, що благородні метали мають унікальні оптичні властивості за рахунок виникнення поверхневих плазмонів на межах поділу метал/діелектрик. Згідно з фізичною енциклопедією поверхневі плазмони – це коливання вільних електронів біля межі поділу метал/діелектрик при дії зовнішнього ЕМВ. Як у будь-якій коливальній системі, в ній існує спектр резонансних частот, і саме цей спектр визначає частоти поверхневих плазмонів.

## 2. Фільтруючі властивості багат шарових нанопокриттів

Розглянемо знову плоску гармонічну ЕМХ з векторами  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}$  і  $\mathbf{H} = (c/\mu\omega)[\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}]$  електричної і магнітної напруженості відповідно, яка поширюється у верхньому півпросторі і падає на плоско-неоднорідний шар, який розділяє два однорідних півпростори (рис. 1). Тут  $\mathbf{k} = \{k_x, k_y, k_z\}$  – хвильовий вектор,  $\mathbf{r} = \{x, y, z\}$  – радіус вектор довільної точки верхнього півпростору,  $\omega$  – частота,  $t$  – час,  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $\mu$  – магнітна проникність верхнього півпростору. Модуль хвильового вектора при цьому визначається як  $k = (\omega/c)\sqrt{\epsilon\mu} = (2\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon\mu}$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі, а сам вектор перпендикулярний площині векторів  $\mathbf{E}, \mathbf{H}$ .

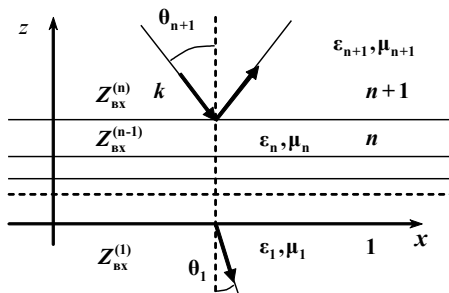


Рис. 1. Відбиття плоскої хвилі від плоско-неоднорідного шару

Будемо вважати, що шар, який розташований між двома півпросторами, утворений системою металевих наночарів з досить великою уявною частиною діелектричної функції, тобто розглядаються неоднорідні нанопокриття, на які падає ЕМХ, але в оптичному діапазоні, і тоді справедлива нерівність  $d/\lambda > 1$ .

В загальному випадку вважається, що кожний з  $n$  шарів може мати свої значення комплексної діелектричної  $\epsilon_j = \epsilon'_j + i\epsilon''_j$  і магнітної проникності  $\mu_j = \mu'_j + i\mu''_j$  ( $j = 2, 3, \dots, n$ ). Кут падіння хвилі, тобто кут між хвильовим вектором та нормаллю до площини розділу, як і раніш, позначимо через  $\theta_{n+1}$ , кут заломлення після проходження шаруватого покриття – через  $\theta_1$  (рис. 1).

## 3. Розрахункові формули

Для знаходження коефіцієнтів відбиття і прозорості знову ж таки використовуємо імпедансний метод. Поняття вхідного імпедансу [1] дозволяє отримати формулу для обчислення коефіцієнта відбиття для системи  $n$  шарів:

$$Z_{\text{BX}}^{(n)} = \frac{Z_{\text{BX}}^{(n-1)} - iZ_n \text{tg}(k_{\text{nz}} d_n)}{Z_n - iZ_{\text{BX}}^{(n-1)} \text{tg}(k_{\text{nz}} d_n)} Z_n, \quad (1)$$

де  $d_n$  – товщина  $n$ -го шару,  $i$  – уявна одиниця,  $k_{\text{nz}}$  – хвильові числа.

Вхідний імпеданс обчислюється рекурентно. Маємо послідовно:

$$\begin{aligned} Z_{\text{BX}}^{(1)} &= Z_1, \quad d_1 = d_2, \\ Z_{\text{BX}}^{(2)} &= \frac{Z_{\text{BX}}^{(1)} - iZ_2 \text{tg}k_{z2} d_2}{Z_2 - iZ_{\text{BX}}^{(1)} \text{tg}k_{z2} d_2} Z_2 = \frac{Z_1 - iZ_2 \text{tg}k_{z2} d_2}{Z_2 - iZ_1 \text{tg}k_{z2} d_2} Z_2 \end{aligned} \quad (2)$$

і т.д. Для  $n$  шарів коефіцієнти відбиття і прозорості можна знайти за формулами:

$$V = \frac{Z_{\text{BX}}^{(n)} - Z_{n+1}}{Z_{\text{BX}}^{(n)} + Z_{n+1}}, \quad W = 1 + V, \quad (3)$$

де імпеданси шарів даються виразами  $Z_j = Z_j^0 / \cos\theta_j$ ,  $Z_j^0 = Z_j^0 \cos\theta_j$ , відповідно для перпендикулярної і паралельної поляризацій ЕМХ, а  $\theta_j$  – кут падіння плоскою хвилі на  $j$ -й шар. При цьому через  $Z_j^0 = (\mu_j / \epsilon_j)^{1/2}$  позначено хвильовий опір  $j$ -го шару. Зауважимо, що для комплексних діелектричних проникностей шарів і хвильових чисел коефіцієнти відбиття і прозорості теж будуть комплексними числами. Звичайно вводять коефіцієнти відбиття та прозорості за потужністю, які визначаються співвідношеннями

$$|R|^2 = V \cdot V^*, \quad |T|^2 = W \cdot W^* \quad (4)$$

де  $V^*, W^*$  – комплексно спряжені числа.

Наведені формули дозволяють повністю розв'язувати задачу про встановлення залежностей коефіцієнтів відбиття та прозорості при проходженні ЕМВ через шарувате середовище від довжини плоскої хвилі, кута падіння і типу поляризації.

## 4. Чисельні результати

На основі розроблених програм було виконано ряд розрахунків. Розглядалися покриття із золота і срібла. У статтях [4, 5] наводяться результати розрахунків для одношарових та двошарових покриттів із золота та срібла. Слід відмітити, що благородні метали (золото, срібло,

платина, також мідь) мають унікальні оптичні властивості [6], і тому їх використовуються в багатьох сучасних нанотехнологіях. Оскільки частоти поверхневих плазмонів золота і срібла істотно відрізняються, то комбінуючи об'ємний зміст металів, можна впливати на максимуми коефіцієнтів відбиття та поглинання в таких системах.

У даній роботі проведені чисельні розрахунки для напокриттів із восьми і десяти наночарів золота і срібла, що чергуються (товщина шарів 10 нм). В даному випадку кут падіння розглядався як параметр і розрахунки були виконані для падіння світла під різними кутами при двох поляризацій. В цій роботі наведено результати тільки для коефіцієнтів відбиття за потужністю, але розраховувались також і амплітуди коефіцієнтів і їх фази. Як ілюстрація виконаних розрахунків деякі отримані результати показані у вигляді графіків на рис. 2 – 9. На рис. 2 – 5 наведено результати для восьмишарового покриття, а на рис. 6 – 9 – для десятишарового покриття.

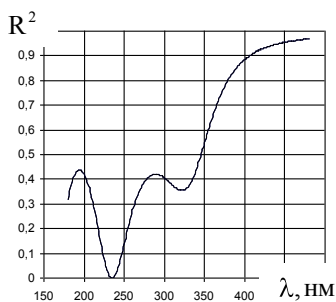


Рис. 2. Спектральна залежність коефіцієнта відбиття для восьмишарового покриття при нормальному падінні хвилі (поляризації співпадають)

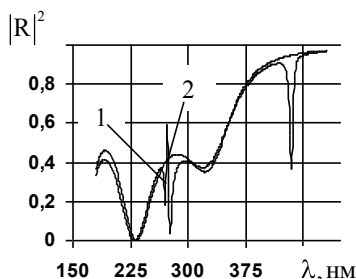


Рис. 3. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття для восьмишарового покриття при падінні хвилі під кутом 20°: 1 – паралельна поляризація, 2 – перпендикулярна поляризація

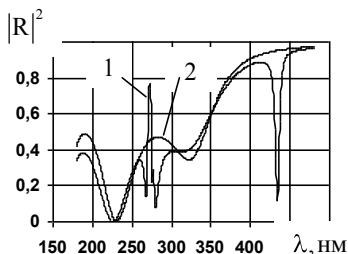


Рис. 4. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття для восьмишарового покриття при падінні хвилі під кутом 30°: 1 – паралельна поляризація, 2 – перпендикулярна поляризація

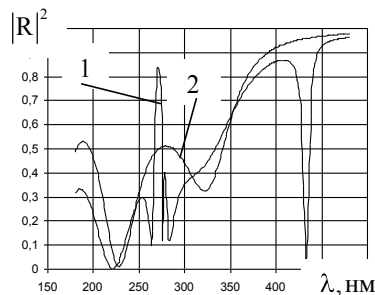


Рис. 5. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття для восьмишарового покриття при падінні хвилі під кутом 40°: 1 – паралельна поляризація, 2 – перпендикулярна поляризація

Для багатошарових покриттів спектри ускладнюються, особливо для паралельно поляризованої хвилі, і спостерігається вже декілька екстремумів. Зміна відбувається у вузькому діапазоні довжин хвиль, а мінімальні і максимальні значення коефіцієнтів відбиття і прозорості в декілька разів відрізняються від основних їх значень

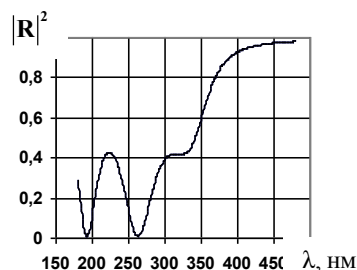


Рис. 6. Спектральна залежність коефіцієнта відбиття при нормальному падінні хвилі для десятишарового покриття (поляризації співпадають)

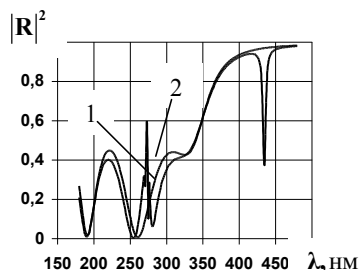


Рис. 7. Спектральні залежності коефіцієнтів відбиття при падінні хвилі під кутом 20° для десятишарового покриття: 1 – паралельна поляризація, 2 – перпендикулярна поляризація

У розрахованих спектрах залежність коефіцієнта відбиття від довжини хвилі при падінні хвилі під кутом показує, що для багатошарових покриттів у спектрах спостерігається декілька екстремумів різної величини. При нормальному падінні ЕМХ мінімум спостерігається поблизу плазмонної довжини хвилі срібла, а із збільшенням кута падіння у випадку паралельно поляризованої хвилі виникають додаткові мінімуми відбиття в зоні поверхневого плазмону золо-

та. Вже відзначалось, що для двошарових покриттів поблизу довжин хвиль, які відповідають частотам поверхневих плазмонів матеріалу поверхневого шару (шарів) золота і срібла спостерігається різка зміна коефіцієнтів відбиття і прозорості.

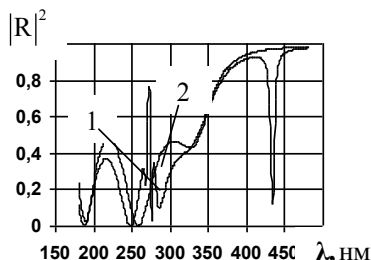


Рис. 8. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття при падінні хвилі під кутом  $30^\circ$  для десятишарового покриття: 1 – паралельна поляризація, 2 – перпендикулярна поляризація

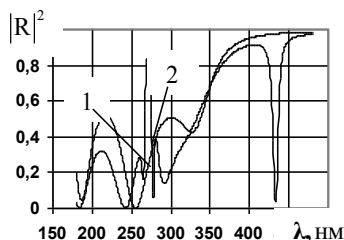


Рис. 9. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття при падінні хвилі під кутом  $40^\circ$  для десятишарового покриття: 1 – паралельна поляризація, 2 – перпендикулярна поляризація

Далі розглянемо комбіновані багатошарові нанопокриття метал-діелектрик, які складаються з довільної кількості шарів, в яких шари діелектрика і метала чергуються. Розрахунки будемо проводити імпедансним методом за формулами (1) – (4). Деякі результати показано на рис. 10 – 13 для десятишарового покриття срібло/діелектрик. При розрахунках було прийнято що ДП діелектрика є дійсна і дорівнює  $\epsilon_r = 2,7$ , товщина шарів  $d_i = 10$  нм.

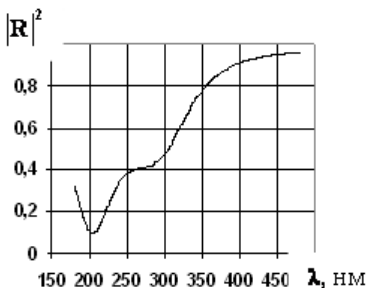


Рис. 10. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття при нормальному падінні хвилі для десятишарового покриття (поляризації співпадають)

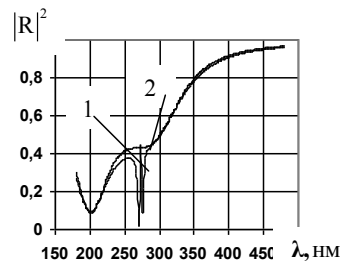


Рис. 11. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття при падінні хвилі під кутом  $20^\circ$  для десятишарового покриття: 1 – паралельна поляризація, 2 – перпендикулярна поляризація

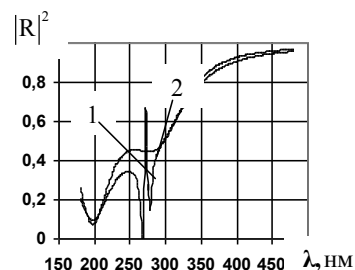


Рис. 12. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття при падінні хвилі під кутом  $30^\circ$  для десятишарового покриття: 1 – паралельна поляризація, 2 – перпендикулярна поляризація

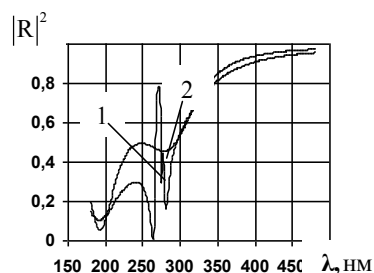


Рис. 13. Спектральні залежності коефіцієнта відбиття при падінні хвилі під кутом  $40^\circ$  для десятишарового покриття: 1 – паралельна поляризація, 2 – перпендикулярна поляризація

Порівнюючи отримані спектральні залежності коефіцієнтів відбиття для комбінованих багатошарових нанопокриттів метал-діелектрик з спектральними залежностями для металевих нанопокриттів, відмічаємо їх аналогічний характер. Зокрема, частоти поверхневих плазмонів зберігаються, але перехід між максимумами і мінімумами в присутності діелектрика відбувається повільніше.

## 5. Висновки

Таким чином розроблена методика дозволяє досліджувати взаємодію ЕМХ з багатошаровими нанопокриттями твердого тіла, виконаних із благородних металів. В процесі розрахунків встановлено, що поблизу довжин хвиль, які відповідають частотам по-

верхневих плазмонів матеріалу поверхневого шару (шарів) золота і срібла спостерігається різка зміна коефіцієнтів відбиття і прозорості. Це означає, що такі покриття мають фільтруючі властивості. Порівняння результатів, отриманих для суцільного і двошарового покриття, показує, що в останньому випадку виникають додаткові екстремуми, а їх величина залежить від порядку нанесення шарів. Більш точні результа-

ти можуть бути отримані при використанні експериментальних залежностей діелектричної функції і врахуванні розмірної поправки. Найбільш цікаві спектри спостерігаються для похилого падіння хвилі і у випадку паралельно поляризованої хвилі. Аналогічні результати спостерігаються і для покриттів метал-діелектрик, але в цьому випадку спектральні криві згладжуються в зонах екстремумів.

#### Література

1. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах [Текст] / Л.М. Бреховских – М.: Наука. – 1973. – 343 с.
2. Кириченко, О.В. Электромагнитные и акустические волны в слоистых органических проводниках: обзор [Текст] / Кириченко О.В., Песчанский В.Г. // Физ. низ. температур. – 1999. – Т. 25, № 12.
3. Стреш, П.Е. К теории распространения электромагнитных волн в слоистых средах [Электронный ресурс] / Вестник Российского Университета Дружбы Народов. – Режим доступа: \www/ URL: http: vestnik.sci.pfu.edu.ru. – 2002. – С. 116-118.
4. Лерман, Л.Б. Взаємодія електромагнітного випромінювання з металевими наночастинами на поверхні твердого тіла [Текст] / Л.Б. Лерман, М.О. Люценко, Я.С. Криворучко // Поверхность. – 2009. – Вып. № 1(16). – С. 271- 277.
5. Лерман, Л.Б. Особенности взаимодействия электромагнитного излучения с малыми частицами и их ансамблями: теоретические аспекты [Текст] / Лерман Л.Б., Грищук Е.Ю., Шкода Н.Г., Шостак С.В. // Успехи физики металлов. – 2012. – Т. 13, № 1. – Р. 71-100.
6. Jonson, P.B. Optical Constants of the Noble Metals [Text] / P.B. Jonson, R.W. Christy // Phys. Rev. B. – 1972. – V. 6, No. 12. – P. 4370-4379.

#### Abstract

*Recently, nanotechnologies have been of particular interest as they help to create new materials with special properties. In such materials, the so-called nano-coatings are used. They have dimensions of 1 - 20 nm. The application of modern optical devices and methods of research in various fields of science and technology creates the necessity of multilayer metal dielectric systems with new requirements for their properties, as well as with the possibility of their unification. This article examines the interaction of electromagnetic radiation (EMR) with the flat heterogeneous layers (coatings), which separate two homogeneous dielectric spaces. The coatings can consist of any number of layers, the thickness of which are of about tens of nanometers with random values of permittivity and permeability. To determine the coefficients of reflection and transparency the impedance method is used. This method allows us to determine the required radio performances of the recurrent procedure. In this case, the reflection and absorption coefficients of electromagnetic radiation are of the main interest. There is an analysis of the numerical results, and it was founded that near the wavelengths, which correspond to the frequencies of the surface plasmons of the surface layer(s) of gold and silver, a dramatic change of the reflection and transparency coefficient is observed. This means that such coatings have filtering properties. This makes it possible to design electronic devices with prescribed properties.*

**Keywords:** nanotechnology, layered nanocoatings, electromagnetic radiation, filtering properties, surface plasmon