

Н. Г. Шкода

## ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З НАНОПОКРИТТЯМИ ШАРІВ ДІЕЛЕКТРИКІВ І МЕТАЛІВ, ЩО ЧЕРГУЮТЬСЯ

Розглядається взаємодія електромагнітного випромінювання з плоско-неоднорідним шаром (покриттям), що поділяє два однорідних діелектричних півпростори. Для визначення коефіцієнтів відбиття і прозорості використовується імпедансний метод. Виконано аналіз отриманих результатів і показана фільтруюча властивість шаруватих нанопокриттів

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

### 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. Це привело до появи нової науково-технічної дисципліни – плазмоніки і її підрозділу нанофотоніки.

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].

### 2. Розрахункові формули

Поняття вхідного імпедансу [1] дозволяє отримати формулу для обчислення коефіцієнта відбиття для системи  $n$  шарів:

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

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

Вхідний імпеданс обчислюється рекурентно. Маємо послідовно:

$$Z_{\text{BX}}^{(1)} = Z_1, \quad d_n = d_2,$$

$$Z_{\text{BX}}^{(2)} = \frac{Z_{\text{BX}}^{(1)} - iZ_2 \text{tg}k_{2z} d_2}{Z_2 - iZ_{\text{BX}}^{(1)} \text{tg}k_{2z} d_2} Z_2 = \frac{Z_1 - iZ_2 \text{tg}k_{2z} d_2}{Z_2 - iZ_1 \text{tg}k_{2z} d_2} Z_2,$$

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

$$V = \frac{Z_{\text{BX}}^{(n)} - Z_{n+1}}{Z_{\text{BX}}^{(n)} + Z_{n+1}}, \quad W = 1 + V, \quad (2)$$

де імпеданси шарів даються виразами  $Z_j = Z_j^0 / \cos \theta_j$ ,  $Z_j = Z_j^0 \cos \theta_j$ , 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 визначається співвідношеннями:

$$|R|^2 = V \cdot V^*, \quad |T|^2 = W \cdot W^*, \quad (3)$$

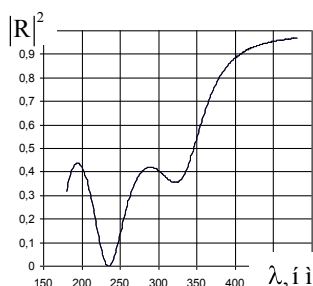
де  $V^*$ ,  $W^*$  – комплексно спряжені числа.

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.

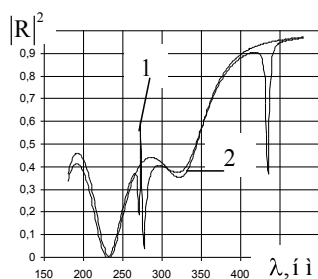
### 3. Чисельні результати

На основі розроблених програм було виконано ряд розрахунків. Розглядалися покриття із золота і срібла. У статтях [4, 5] наводяться результа-

ти 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.



**Рис. 1.** Залежність коефіцієнта відбиття за потужністю від довжини хвилі при нормальному падінні (результати для обох поляризацій співпадають)



**Рис. 2.** Залежність коефіцієнта відбиття за потужністю від довжини хвилі при падінні під кутом 20°: 1 – паралельна поляризація, 2 – перпендикулярна поляризація

На рис 1, 2 наведено результати, отримані для восьмишарового покриття (зовнішній шар – золото, товщина шарів – 10 нм).

З наведених даних і інших проведених розрахунків випливає, що при нормальному падінні (рис. 1) для обох поляризацій спектри співпадають, і при цьому при чисельних розрахунках виявлено два локальних максимуми і два локальних мінімуми. при похилому падінні спостерігається складна картина, і кількість екстремумів в залежності коефіцієнта відбиття залежить від кількості меж поділу шарів, і при цьому за максимумом наступає провал. Це означає, що такі покриття мають фільтруючі властивості.

Виникнення таких екстремумів пояснюється існуванням поверхневих плазмонів у золоті і сріблі.

Якщо в проміжних шарах присутній діелектрик, то такі екстремуми будуть ще помітніше виражені.

**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 [Текст] : обзор / Кириченко О.В., Песчанский В.Г. // Физ. низ. температур. – 1999. – Vol. 25, No. 12.
3. Стрещ, 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. Лющенко, 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] / Гришук Е.Ю., Шкода Н.Г., Шостак С.В. // Успехи физики металлов. – 2012. – Vol. 13, No. 1. – P. 71-100.
6. Jonson, P.V. Optical Constants of the Noble Metals [Текст] / P.V. Jonson, R.W. Christy // Phys. Rev. B. – 1972. – V. 6, No. 12. – P. 4370-4379.

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НАНОПОКРЫТИЯМИ ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ СЛОЕВ ДИЕЛЕКТРИКОВ И МЕТАЛЛОВ**

**Н. Г. Шкода**

Рассматривается взаимодействие электромагнитного излучения с плосконеоднородным шаром (покрытием), которое разделяет два однородных диэлектрических пространства. Для определения коэффициентов отражения и прозрачности используется импедансный метод. Проведен анализ полученных результатов и показано фильтрующее свойство слоистых нанопокрывтий

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

*Наталія Григорівна Шкода, научний співробітник, кандидат фізико-математических наук, Інститут хімії поверхності ім. А.А. Чуйко НАН України, 03164 Україна, Київ, ул. Генерала Наумова, 17, e-mail: natashko@list.ru*

**INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION AND NANOCOVERAGES OF DIELECTRIC AND METAL**

**N. Shkoda**

Interaction of electromagnetic radiation and a flat-heterogeneous slab (cover-age) which divides two homogeneous dielectric spaces is examined. For determination of reflection and transparency coefficient impendancy method is used. The analysis of results and filter property of the stratified nanocoverages is obtained

**Keywords:** electromagnetic radiation, nanocoverages, impendancy method

*Nataliya Shkoda, Senior Researcher, Ph. D., Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine, 17 General Naumov Str., Kyiv 03164, Ukraine, e-mail: natashko@list.ru*