

ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРИШАРОВОЇ МОДЕЛІ БІОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Стаття присвячена методу визначення діелектричної проникності біологічних об'єктів за допомогою аналізу частотної залежності коефіцієнта відбиття за напругою від тришарової плоскої структури. Показано, що діелектричні параметри шарів моделі структури залежать не тільки від частоти, а й від типу поляризації та кута падіння електромагнітної хвилі. Даний метод може бути застосовано в діагностиці пухлинних захворювань людського організму.

The article is devoted to the method of determination of dielectric permeability of biological objects by the analysis of frequency dependence of reflection coefficient from three-layered flat structure. Dielectric parameters of layers depends not only on frequency but also from polarization of wave. This method can be used in diagnostics of tumour diseases of human organism.

Ключові слова: діелектрична проникність, комплексний коефіцієнт відбиття.

Вступ

В наш час діелектричні властивості біологічних середовищ в НВЧ-діапазоні знаходяться в стадії інтенсивних досліджень. Відомо, що спектр діелектричної проникності $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ біологічної тканини в значній мірі визначається вмістом води. Тому ця властивість визначає відносно високу проникну здатність полів НВЧ в подібні середовища.

Основними характеристиками радіопоглинаючих матеріалів є коефіцієнти відбиття R та проходження T . При створенні багат шарових моделей можна використовувати як комплексні значення діелектричної проникності, так і комплексні значення R і T для окремих шарів. Кожен шар в такій моделі характеризується визначеними значеннями товщини та діелектричної проникності. Тому точне вимірювання R і T потрібно вважати самостійною і достатньо важливою задачею.

Огляд літературних джерел

При НВЧ-дослідженнях підповерхневої структури біологічної тканини найбільший вплив на частотні характеристики відбитого сигналу створюють шари шкіри та жиру. В роботі [1] розглянута можливість оцінки товщини шарів шкіри та жиру в біологічній тканині, що використовує вимірювання коефіцієнта відбиття за потужністю на окремих частотах НВЧ-діапазону. Також показано, що при використанні відомої апріорної інформації про товщину шкіри та жиру на різних ділянках людського організму, можна дану інформацію суттєво уточнити, а також контролювати товщину цих шарів у часі. В якості підповерхневої структури була прийнята плоска тришарова модель, яка складалася з шарів шкіри, жиру та м'язової тканини. У зв'язку з сильним поглинанням хвиль НВЧ-діапазону у м'язовій тканині, цей шар розглядався як нескінченний напівпростір. На цю структуру падали з вакууму плоскі електромагнітні хвилі різних частот. Комплексні діелектричні проникності шарів були представлені як відомі функції частоти. Розраховувався коефіцієнт відбиття плоских хвиль за потужністю на різних частотах. З аналізу цієї частотної залежності робився висновок про можливість оцінки товщин першого та другого шарів, а також про те, які частоти електромагнітних хвиль потрібно використовувати, щоб отримати мінімальні похибки визначення цих двох шарів.

Серед задач дистанційного зондування земної поверхні великий інтерес представляють собою радіолокаційні вимірювання електричних та геометричних характеристик поверхні, що має шарову структуру (вода, покрита шаром льоду, підповерхневий шар землі, розміщений над шаром ґрунтової води і т.д.). В роботах [2, 3] представлений аналітичний розв'язок в частотній області задачі відбиття радіохвиль від поглинаючого шару, що лежить на однорідному півпросторі для випадку нормального падіння. Розв'язок використовує дані частотної залежності коефіцієнта відбиття на визначеному інтервалі частот. Отримано вирази для коефіцієнта відбиття, діелектричних проникностей шарів середовища та товщини поглинаючого шару.

В роботі [4] представлена можливість застосування ближньопольової локації НВЧ-діапазону для визначення злякисних утворень всередині біологічної тканини. Теоретичні результати отримані за допомогою теорії плоскошарових середовищ. В роботі представлена електродинамічна модель для діагностики сильно неоднорідних шарових середовищ, яка базується на тому, що злякисна пухлина представляє собою сильноконтрастне утворення, дійсна та уявна частини діелектричної проникності якої можуть в 2–5 разів перевищувати навколишній фон. Неоднорідності середовища поблизу апертури антени призводили до зміни її вхідного імпедансу за рахунок збудження навколишнього електромагнітного поля. В результаті змінювався спектр коефіцієнта відбиття випромінювання від входу антени, що вимірювався за допомогою панорамного рефлектометра.

Дослідження діелектричних властивостей речовин (в тому числі рідин та рідких розчинів) є важливою науковою та прикладною задачею. Ці дослідження дозволяють отримати цінну інформацію про взаємодію електромагнітних хвиль з рідинами. Також знання діелектричних властивостей рідин відкриває можливість створювати методи та прилади для контролю складу цих рідин в реальному часі. Однією з таких

практичних задач є вимірювання вмісту глюкози в різних рідинах, в тому числі у крові. Важливість таких вимірювань застосовується для розв'язку проблеми діабету. В роботі [5] приводяться результати дослідження діелектричних властивостей в ММ діапазоні слабких розчинів глюкози у воді та фізіологічному розчині, а також діелектричних властивостей крові та шкіри. Вимірювання проводилися за допомогою розробленого для цієї цілі методу вимірювання комплексної діелектричної проникності середовищ з великими втратами, що не вимагає фазових вимірювань комплексного коефіцієнта відбиття. З результатів досліджень випливає, що оптимальним частотним діапазоном, в якому досягається максимальна чутливість до концентрації глюкози у воді та фізіологічному розчині, є діапазон частот 30–60 ГГц. Вперше були проведені вимірювання діелектричних властивостей слабких розчинів глюкози у воді та в імітаторі крові в діапазоні частот 28–93 ГГц. Також з високою точністю на частотах 42 та 66 ГГц виміряні діелектричні властивості людської крові без консервантів. Методика дозволяє визначити вміст глюкози в крові в реальному часі по одній краплі крові. Також були проведені вимірювання комплексної діелектричної проникності шкіри в області ліктьового суглава на частотах 30–80 ГГц.

Постановка задачі

Визначення діелектричної проникності біологічних тканин є важливою прикладною задачею, адже за її зміною можна діагностувати наявність пухлинних процесів в організмі людини. Тому розробка нового методу для визначення діелектричних характеристик біологічних тканин є важливою задачею в діагностиці новоутворень на ранніх стадіях захворювання. Однією з основних задач теорії розповсюдження радіохвиль є задача про відновлення діелектричних параметрів середовища, з яким ці хвилі взаємодіють.

Метою роботи є розгляд методу визначення діелектричних параметрів (комплексної діелектричної проникності) середовищ, який оснований на аналізі частотної залежності функції коефіцієнта відбиття радіохвиль у визначеному діапазоні частот (f_1, f_2) .

В роботі [6] представлено методику визначення частотної залежності коефіцієнта відбиття $R(f)$ від тришарової структури (включаючи повітря) (рис. 1) у частотному діапазоні 1,4...1,6 ГГц. В якості моделі біологічного середовища була прийнята плоска тришарова модель з відносними діелектричними проникностями шарів $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$.

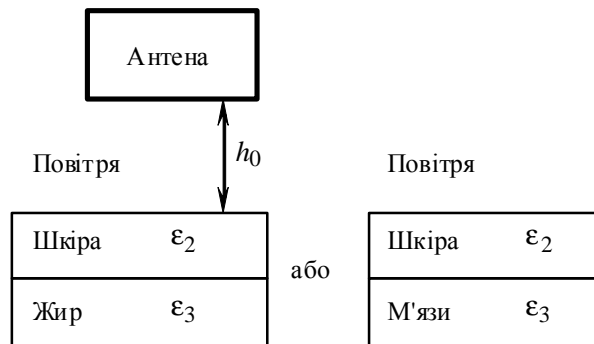


Рис. 1. Моделювання біологічного середовища організму людини за допомогою тришарової моделі, h_0 – висота знаходження антени над тришаровою структурою

Діелектрична проникність біологічного середовища має наступну залежність по глибині

$$\epsilon(y) = \begin{cases} \epsilon_1 = 1, & y < 0, \\ \epsilon_2, & 0 \leq y \leq h, \\ \epsilon_3, & y > h. \end{cases}$$

Для визначення діелектричних проникностей окремих шарів моделі розглянемо випадки падіння електромагнітної хвилі (ЕМХ) на тришарову структуру.

Довільне падіння ЕМХ з перпендикулярною поляризацією

Частотна залежність коефіцієнта відбиття у випадку падіння ЕМХ з перпендикулярною поляризацією під довільним кутом на тришарову структуру (рис. 2) при $\epsilon_1 = 1$ (перше середовище є повітрям) має наступний вигляд [6]

$$R(f) = \frac{(\epsilon_2 - aZ'_{12})(\epsilon_3 + \epsilon_2 bZ'_{23}) + e^{2\gamma_2(f)h \cos a_2} (\epsilon_2 + aZ'_{12})(\epsilon_3 - \epsilon_2 bZ'_{23})}{(\epsilon_2 + aZ'_{12})(\epsilon_3 + \epsilon_2 bZ'_{23}) + e^{2\gamma_2(f)h \cos a_2} (\epsilon_2 - aZ'_{12})(\epsilon_3 - \epsilon_2 bZ'_{23})}, \tag{1}$$

де $\epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2, \epsilon_3 = \epsilon'_3 + i\epsilon''_3$ – комплексні відносні діелектричні проникності середовищ;

$$|\epsilon_2| = \sqrt{(\epsilon'_2)^2 + (\epsilon''_2)^2}, |\epsilon_3| = \sqrt{(\epsilon'_3)^2 + (\epsilon''_3)^2} \text{ – відповідно їх модулі;}$$

$$a = \frac{\cos a_2}{\cos a_1}, b = \frac{\cos a_3}{\cos a_2} - \text{дійсні числа};$$

a_1 – кут падіння;

$$a_2 = \arccos \sqrt{1 - \frac{\sin^2 a_1}{|\epsilon_2|}}, a_3 = \arccos \sqrt{1 - \frac{\sin^2 a_1}{|\epsilon_3|}} - \text{кути заломлення};$$

$$Z'_{12} = \sqrt{\epsilon_2}, Z'_{23} = \frac{\sqrt{\epsilon_3}}{\sqrt{\epsilon_2}} - \text{нормовані опори на границях розподілу шарів};$$

$\gamma_2(f)$ – комплексна постійна розповсюдження в другому середовищі;

h – товщина внутрішнього шару.

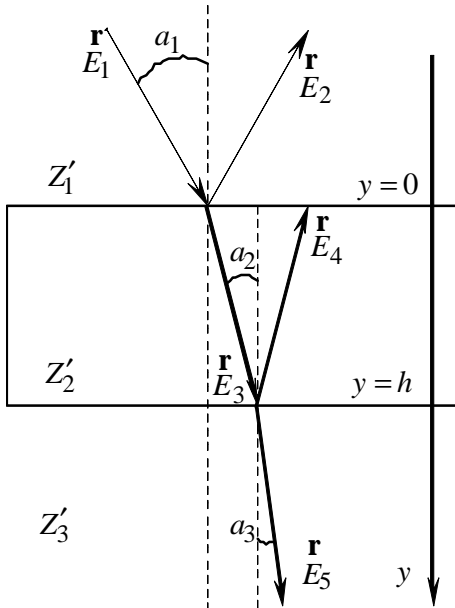


Рис. 2. Падіння ЕМХ з перпендикулярною поляризацією під довільним кутом a_1 до границі розподілу середовищ на тришарову структуру, Z'_1, Z'_2, Z'_3 – комплексні хвильові опори середовищ, причому $Z'_i = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_i}}$, $Z_0 = 377$ Ом – хвильовий опір вільного простору

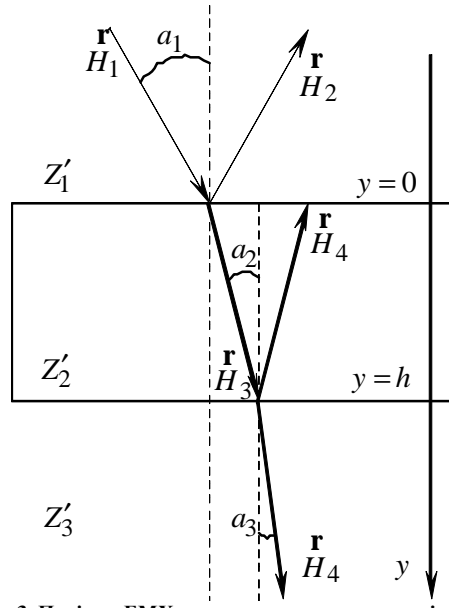


Рис. 3. Падіння ЕМХ з паралельною поляризацією під довільним кутом a_1 до границі розподілу середовищ на тришарову структуру

Після перетворення виразу (1) отримаємо наступне співвідношення для комплексного коефіцієнта відбиття $R(f)$ [6]

$$R(f) = \frac{x + y(f)}{1 + xy(f)}, \tag{2}$$

де $x = r_{12} = \frac{\epsilon_2 - aZ'_{12}}{\epsilon_2 + aZ'_{12}} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - a}{\sqrt{\epsilon_2} + a}$; $y(f) = r_{23}e^{2\gamma_2(f)h \cos a_2}$; $r_{23} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_2 b Z'_{23}}{\epsilon_3 + \epsilon_2 b Z'_{23}} = \frac{\sqrt{\epsilon_3} - b\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_3} + b\sqrt{\epsilon_2}}$.

Так як визначення діелектричної проникності шарів структури відбувається у визначеному діапазоні частот (f_1, f_2) і на кожній частоті f_i нам відоме значення коефіцієнту відбиття $R(f_i)$, то можемо записати систему рівнянь щодо невідомих $x, y(f_1), w$

$$\begin{cases} R(f_1) = \frac{x + y(f_1)}{1 + x y(f_1)}, \\ R(f_2) = \frac{x + w y(f_1)}{1 + w x y(f_1)}, \\ R(f_3) = \frac{x + w^2 y(f_1)}{1 + w^2 x y(f_1)}, \end{cases} \quad (3)$$

де $y(f_1) = w r_{23}$, $y(f_2) = w y(f_1)$, $y(f_3) = w^2 y(f_1)$; $w = -e^{-\pi \frac{\sqrt{\varepsilon_2''}}{\sqrt{\varepsilon_2'}}$ – дійсне число.

Позначивши $R(f_1) \rightarrow R_1$, $R(f_2) \rightarrow R_2$, $R(f_3) \rightarrow R_3$, $y(f_1) \rightarrow y_1$ та розв'язавши систему (3) відносно невідомих x , y_1 , w , запишемо розв'язки у наступному вигляді

$$\begin{cases} y_1 = \frac{-L + \sqrt{L^2 - 4}}{2}, \\ x = \frac{R_1 - y_1}{1 - R_1 y_1}, \\ w = \frac{(R_2 - R_1) + y_1(1 - R_2 R_1)}{y_1^2(R_2 - R_1) + y_1(1 - R_2 R_1)}, \end{cases} \quad (4)$$

де $L = 2g + f - fg^2$, $g = \frac{1 - R_2 R_1}{R_2 - R_1}$, $f = \frac{R_3 - R_1}{1 - R_3 R_1}$,

$$L = 2 \left(\frac{1 - R_2 R_1}{R_2 - R_1} \right) + \left(\frac{R_3 - R_1}{1 - R_3 R_1} \right) - \left(\frac{R_3 - R_1}{1 - R_3 R_1} \right) \left(\frac{1 - R_2 R_1}{R_2 - R_1} \right)^2.$$

Отже, користуючись розв'язками (4), запишемо вираз для знаходження відносної діелектричної проникності другого шару $\varepsilon_2 = \varepsilon_2' + i\varepsilon_2''$

$$\begin{aligned} x = r_{12} &= \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - a}{\sqrt{\varepsilon_2} + a}, \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_2' + i\varepsilon_2'' &= \left(\frac{a(1 + r_{12})}{1 - r_{12}} \right)^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Так як ε_2 , r_{12} є комплексними величинами, то, використовуючи рівність дійсних та уявних частин виразу (5), можемо записати систему рівнянь відносно невідомих складових діелектричної проникності ε_2' , ε_2''

$$\begin{cases} \varepsilon_2' = \operatorname{Re} \left[\left(\frac{a(1 + r_{12})}{1 - r_{12}} \right)^2 \right], \\ \varepsilon_2'' = \operatorname{Im} \left[\left(\frac{a(1 + r_{12})}{1 - r_{12}} \right)^2 \right]. \end{cases}$$

Відносну діелектричну проникність третього шару $\varepsilon_3 = \varepsilon_3' + i\varepsilon_3''$ знаходимо з наступних виразів

$$\begin{aligned} y_1 = w r_{23}, \quad r_{23} &= \frac{y_1}{w} = \frac{\sqrt{\varepsilon_3} - b\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_3} + b\sqrt{\varepsilon_2}}, \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_3' + i\varepsilon_3'' &= \varepsilon_2 \left(\frac{b(1 + r_{23})}{1 - r_{23}} \right)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Виділяючи дійсну та уявну частини виразу (6), отримуємо систему рівнянь відносно невідомих складових діелектричної проникності ε_3' , ε_3''

$$\begin{cases} \epsilon'_3 = \operatorname{Re} \left[\epsilon_2 \left(\frac{b(1+r_{23})}{1-r_{23}} \right)^2 \right], \\ \epsilon''_3 = \operatorname{Im} \left[\epsilon_2 \left(\frac{b(1+r_{23})}{1-r_{23}} \right)^2 \right]. \end{cases}$$

Товщина поглинаючого шару знаходиться наступним чином [6]

$$h = \frac{c}{4 \cos a_2 \tau \sqrt{\epsilon'_2}}, \quad (7)$$

де c – швидкість світла у вакуумі;

τ – період повторення частот f_i .

Довільне падіння ЕМХ з паралельною поляризацією

Частотна залежність коефіцієнта відбиття у випадку падіння ЕМХ з паралельною поляризацією під довільним кутом на тришарову структуру (рис. 3) при $\epsilon_1 = 1$ має наступний вигляд [6]

$$R(f) = - \frac{(a\epsilon_2 - Z'_{12})(b\epsilon_3 + \epsilon_2 Z'_{23}) + e^{2\gamma_2(f)h \cos a_2} (a\epsilon_2 + Z'_{12})(b\epsilon_3 - \epsilon_2 Z'_{23})}{(a\epsilon_2 + Z'_{12})(b\epsilon_3 + \epsilon_2 Z'_{23}) + e^{2\gamma_2(f)h \cos a_2} (a\epsilon_2 - Z'_{12})(b\epsilon_3 - \epsilon_2 Z'_{23})}. \quad (8)$$

Після перетворення виразу (8), отримаємо наступний вираз для комплексного коефіцієнта відбиття $R(f)$ [6]

$$R(f) = - \frac{x + y(f)}{1 + xy(f)}, \quad (9)$$

де $x = r_{12} = \frac{a\epsilon_2 - Z'_{12}}{a\epsilon_2 + Z'_{12}} = \frac{a\sqrt{\epsilon_2} - 1}{a\sqrt{\epsilon_2} + 1}$, $r_{23} = \frac{b\epsilon_3 - \epsilon_2 Z'_{23}}{b\epsilon_3 + \epsilon_2 Z'_{23}} = \frac{b\sqrt{\epsilon_3} - \sqrt{\epsilon_2}}{b\sqrt{\epsilon_3} + \sqrt{\epsilon_2}}$.

Система рівнянь для знаходження невідомих x , $y(f_1)$, w описується виразами (3), а розв'язки – виразами (4).

Відносну діелектричну проникність другого та третього шарів $\epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2$, $\epsilon_3 = \epsilon'_3 + i\epsilon''_3$ знаходимо з наступних співвідношень

$$\begin{aligned} x = r_{12} &= \frac{a\sqrt{\epsilon_2} - 1}{a\sqrt{\epsilon_2} + 1}, \quad r_{23} = \frac{y_1}{w} = \frac{b\sqrt{\epsilon_3} - \sqrt{\epsilon_2}}{b\sqrt{\epsilon_3} + \sqrt{\epsilon_2}}, \\ \epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2 &= \left(\frac{1 + r_{12}}{a(1 - r_{12})} \right)^2, \\ \epsilon_3 = \epsilon'_3 + i\epsilon''_3 &= \epsilon_2 \left(\frac{1 + r_{23}}{b(1 - r_{23})} \right)^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Виділяючи дійсну та уявну частини виразів (10), запишемо систему рівнянь щодо невідомих складових діелектричної проникності ϵ'_3 , ϵ''_3

$$\begin{cases} \epsilon'_2 = \operatorname{Re} \left[\left(\frac{1 + r_{12}}{a(1 - r_{12})} \right)^2 \right], & \epsilon'_3 = \operatorname{Re} \left[\epsilon_2 \left(\frac{1 + r_{23}}{b(1 - r_{23})} \right)^2 \right], \\ \epsilon''_2 = \operatorname{Im} \left[\left(\frac{1 + r_{12}}{a(1 - r_{12})} \right)^2 \right], & \epsilon''_3 = \operatorname{Im} \left[\epsilon_2 \left(\frac{1 + r_{23}}{b(1 - r_{23})} \right)^2 \right]. \end{cases}$$

Глибину поглинаючого шару знаходимо з виразу (7).

Падіння під прямим кутом ЕМХ з перпендикулярною поляризацією

Частотна залежність коефіцієнта відбиття у випадку падіння ЕМХ з перпендикулярною поляризацією під прямим кутом на тришарову структуру (рис. 4) при $\epsilon_1 = 1$ має наступний вигляд [6]

$$R(f) = \frac{(\epsilon_2 - Z'_{12})(\epsilon_3 + \epsilon_2 Z'_{23}) + e^{2\gamma_2(f)h} (\epsilon_2 + Z'_{12})(\epsilon_3 - \epsilon_2 Z'_{23})}{(\epsilon_2 + Z'_{12})(\epsilon_3 + \epsilon_2 Z'_{23}) + e^{2\gamma_2(f)h} (\epsilon_2 - Z'_{12})(\epsilon_3 - \epsilon_2 Z'_{23})}. \quad (11)$$

Після перетворення вираз (11) для комплексного коефіцієнта відбиття $R(f)$ приймає вигляд (2), де

$$x = r_{12} = \frac{\epsilon_2 - Z'_{12}}{\epsilon_2 + Z'_{12}} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - 1}{\sqrt{\epsilon_2} + 1}, \quad r_{23} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_2 Z'_{23}}{\epsilon_3 + \epsilon_2 Z'_{23}} = \frac{\sqrt{\epsilon_3} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_3} + \sqrt{\epsilon_2}}.$$

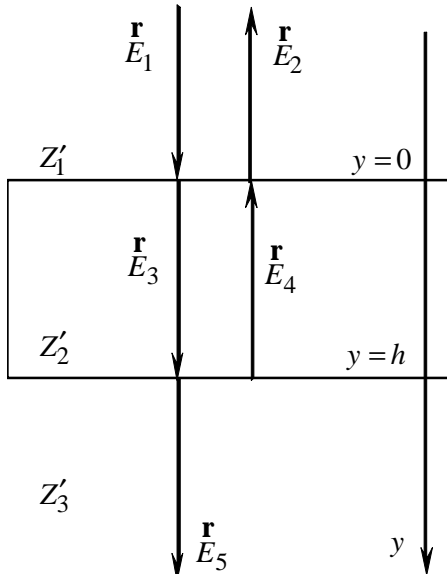


Рис. 4. Падіння ЕМХ з перпендикулярною поляризацією під прямим кутом до границі розподілу середовищ на тришарову структуру

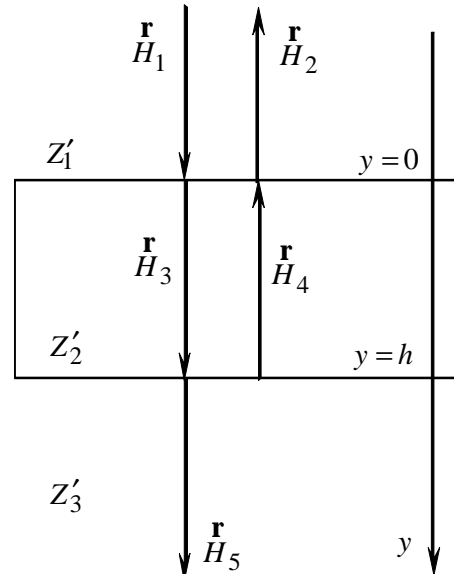


Рис. 5. Падіння ЕМХ з паралельною поляризацією під прямим кутом до границі розподілу середовищ на тришарову структуру

З врахуванням виразу (2) розв'язуємо систему (3), розв'язки якої описуються виразами (4). Відносну діелектричну проникність другого та третього шарів $\epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2$, $\epsilon_3 = \epsilon'_3 + i\epsilon''_3$ знаходимо з наступних співвідношень

$$x = r_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - 1}{\sqrt{\epsilon_2} + 1}, \quad r_{23} = \frac{y_1}{w} = \frac{\sqrt{\epsilon_3} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_3} + \sqrt{\epsilon_2}},$$

$$\epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2 = \left(\frac{1 + r_{12}}{1 - r_{12}} \right)^2, \quad (12)$$

$$\epsilon_3 = \epsilon'_3 + i\epsilon''_3 = \epsilon_2 \left(\frac{1 + r_{23}}{1 - r_{23}} \right)^2.$$

Виділяючи дійсну та уявну частини виразів (12), записуємо систему рівнянь щодо невідомих складових діелектричної проникності ϵ'_3 , ϵ''_3

$$\begin{cases} \epsilon'_2 = \text{Re} \left[\left(\frac{1 + r_{12}}{1 - r_{12}} \right)^2 \right], & \epsilon'_3 = \text{Re} \left[\epsilon_2 \left(\frac{1 + r_{23}}{1 - r_{23}} \right)^2 \right], \\ \epsilon''_2 = \text{Im} \left[\left(\frac{1 + r_{12}}{1 - r_{12}} \right)^2 \right], & \epsilon''_3 = \text{Im} \left[\epsilon_2 \left(\frac{1 + r_{23}}{1 - r_{23}} \right)^2 \right]. \end{cases} \quad (13)$$

Товщину поглинаючого шару знаходимо як [6]

$$h = \frac{c}{4\tau\sqrt{\epsilon'_2}}. \quad (14)$$

Падіння під прямим кутом ЕМХ з паралельною поляризацією

Частотна залежність коефіцієнта відбиття у випадку падіння ЕМХ з паралельною поляризацією під прямим кутом на тришарову структуру (рис. 4) при $\epsilon_1 = 1$ має наступний вигляд [6]

$$R(f) = - \frac{(\epsilon_2 - Z'_{12})(\epsilon_3 + \epsilon_2 Z'_{23}) + e^{2\gamma_2(f)h} (\epsilon_2 + Z'_{12})(\epsilon_3 - \epsilon_2 Z'_{23})}{(\epsilon_2 + Z'_{12})(\epsilon_3 + \epsilon_2 Z'_{23}) + e^{2\gamma_2(f)h} (\epsilon_2 - Z'_{12})(\epsilon_3 - \epsilon_2 Z'_{23})}. \quad (15)$$

Після перетворення вираз для комплексного коефіцієнту відбиття $R(f)$ приймає вигляд (9), з врахуванням якого розв'язуємо систему (3), розв'язки якої описуються виразами (4). Відносно діелектричну проникність другого та третього шарів $\epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2$, $\epsilon_3 = \epsilon'_3 + i\epsilon''_3$ знаходимо з формул (12), (13), а глибину другого шару знаходимо зі співвідношення (14).

Висновки

Таким чином, знаючи частотну залежність коефіцієнта відбиття у визначеному діапазоні частот, який включає в себе три послідовні частоти, можна за отриманими формулами визначити діелектричні параметри середовища $\epsilon'_2, \epsilon''_2, \epsilon'_3, \epsilon''_3$ та глибину проникнення радіохвиль h .

Даний метод може бути застосовано в діагностиці пухлинних захворювань, так як він не потребує хірургічного втручання і є повністю безпечним. В подальшому планується розробити математичну модель методу визначення розподілу температури в біологічній тканині, яка буде використовувати результати даного дослідження.

Література

1. Маречек С.В. Возможности оценки приповерхностной структуры биологической ткани по измерению коэффициента отражения на отдельных частотах СВЧ-диапазона / С.В. Маречек, В.М. Поляков // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2005. – № 11–12. – С. 4–11.
2. Юшкова О.В. Восстановление параметров слоистой среды / О.В. Юшкова // Изв. ВУЗов Радиофизика – 1995. – Т. 38. – № 7. – С. 648–652.
3. Лобач В.Т. Радиолокационные измерения параметров слоистой среды / В.Т. Лобач // Радиоэлектроника. – 2002. – № 3. – С. 71–77.
4. Резник А.Н. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи ближнепольной СВЧ диагностики / А.Н. Резник, Н.В. Юрасова // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. № 1. – С. 90–104.
5. Диэлектрические свойства растворов глюкозы в миллиметровом диапазоне волн и проблема контроля ее содержания в крови / В.В. Мериакри, Е.Е. Чиграй, И.П. Никитин, М.П. Пархоменко // Крымико. – 2005. – С. 853–854.
6. Назарчук Л.Ю. Відновлення параметрів біологічних середовищ за функцією коефіцієнта відбиття Л.Ю. Назарчук // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 1(36). – С. 65–74.

Надійшла 16.5.2012 р.

Рецензент: д.т.н. Манойлов В.П.

УДК 621.317.73

В.В. МАРТИНЮК, Д.А. МАКАРИШКІН, М.В. МАРТИНЮК

Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКЛИВОСТІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

Наведені результати частотних залежностей комплексної діелектричної проникливості і тангенса кута діелектричних втрат суперконденсатора при повільних релаксаційних процесах.

Results of frequency dependences of complex dielectric permittivity and dielectric loss tangent of the supercapacitor are given at sluggish relaxation processes.

Ключові слова: суперконденсатор, тангенс кута діелектричних втрат, час релаксації, комплексна діелектрична проникливість.

Вступ

Суперконденсатори, які відомі як конденсатори з подвійним електричним шаром, іоністори, ультраконденсатори, гібридні конденсатори та електрохімічні конденсатори – це відносно нове покоління електрохімічних приладів збереження енергії з точки зору широкого практичного використання. Електрохімічні суперконденсатори здатні перекрити практично увесь діапазон по величині питомої енергії та питомої потужності, який раніше поділяв традиційні типи енергонакопичувальних конденсаторів та акумуляторів. Використання таких джерел струму дозволяє оптимізувати габарити та масу радіоелектронної апаратури, а також вирішувати проблеми в області створення електромобілів нового покоління [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В суперконденсаторах енергія накопичується в процесі зарядки за рахунок поляризації подвійних електричних шарів на границях розділу анод/електроліт та катод/електроліт [1]. Подвійний електричний шар представляє собою конденсатор, одна з обкладинок якого є заряджена поверхня електрода, а друга – шар іонів протилежного знаку в електроліті (іонного провідника) [2]. Зусиллями Гої, Штерна та Фрумкіна створена класична теорія будови та властивостей подвійного електричного шару у водяних електролітах.