

Твердотельная электроника

УДК 621.372.41

Ю.В. Діденко¹, І.В. Пацьора², Д.Д. Татарчук¹, канд. техн. наук

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», вул. Політехнічна, 16, м. Київ, 03056, Україна.

² Технічний університет Дрездена, вул. Моммсенштрассе, 15, м. Дрезден, 01069, Німеччина.

Температурні властивості композитів типу метал–полімер у мікрохвильовому діапазоні

На підставі співвідношення Ліхтенеккера отримано аналітичні вирази для температурних залежностей діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат композитних матеріалів типу метал–полімер. Наведено результати експериментального дослідження температурних властивостей таких матеріалів. Експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними даними. Бібл. 7, рис. 3.

Ключові слова: композитний матеріал; діелектрична проникність; тангенс кута діелектричних втрат; температурні залежності; мікрохвильовий діапазон; рівняння Ліхтенеккера.

I. Вступ

Розвиток інформаційних технологій великою мірою залежить від електронних систем обробки інформації. У даний час інтенсивно використовується гігагерцовий діапазон частот. Мобільна телефонія працює на частотах близьких до 2 ГГц, радары – на частотах 3 – 40 ГГц. У перспективі місцевий телефонний зв'язок освоїть частотний діапазон близько 60 ГГц, автомобільні радары працюють на частотах порядку 80 ГГц, деякі військові радары використовуються у частотній області близько 100 ГГц. Вимоги до якості електронного обладнання весь час підвищуються. Це стосується насамперед надійності, завадостійкості, безпечності використання. Особлива увага приділяється захисту інформації та підвищенню екологічності. На сьогоднішній день розроблено багато методів вирішення вищевведених задач, однак одним із найефективніших все ще залишається екранування, яке дозволяє вирішити такі задачі як захист інформації від несанкціонованого доступу, забезпечення електромагнітної сумісності електронних пристроїв і захист зовнішнього середовища від надлишкового електромагнітного випромінювання [1, 2].

Використовувані екрануючі матеріали не завжди можуть забезпечити необхідний рівень поглинання електромагнітних хвиль. Для розв'язання даної проблеми необхідно використовувати нові матеріали, екрануючі властивості яких були б вищими, ніж у існуючих. Синтез таких матеріалів – актуальна задача сучасного матеріалознавства, перспективним підходом до вирішення якої є використання композитів типу метал–полімер. Змінюючи компонентний склад цих структур, можна керувати їх властивостями у широкому діапазоні [3, 4], що зумовлено особливостями як металічної фази, так і полімерної.

Однак, створення композитних матеріалів зіштовхується із низкою труднощів, пов'язаних із незавершеністю їх комплексних досліджень у різних частотних діапазонах та за різних температур і, як наслідок, відсутністю адекватної моделі таких структур, яка б давала можливість аналізу та прогнозування їх властивостей за різних умов.

Тому, метою даної роботи є дослідження температурних властивостей композитних матеріалів типу метал–полімер у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль.

II. Вплив температури на властивості композитних матеріалів типу метал–полімер

Діелектрична проникність композитного матеріалу може бути обчислена за допомогою співвідношення Ліхтенеккера [5]:

$$\varepsilon_c^* = (\varepsilon_m^*)^{1-q} (\varepsilon_d^*)^q,$$

де ε_c^* – комплексна діелектрична проникність композиту метал–полімер, ε_m^* – комплексна діелектрична проникність матеріалу матриці, ε_d^*

– комплексна діелектрична проникність дисперсної металічної фази, q – об'ємна доля металу у композиті.

$$TK_{\varepsilon_c}^* = \frac{1}{\varepsilon_c^*} \frac{d\varepsilon_c^*}{dT} = \frac{1}{\varepsilon_c^*} \frac{d\left(\left(\varepsilon_m^*\right)^{1-q} \left(\varepsilon_d^*\right)^q\right)}{dT} = \frac{1}{\varepsilon_c^*} \left(\left(\varepsilon_m^*\right)^{(1-q)} \cdot q \cdot \left(\varepsilon_d^*\right)^{(q-1)} \frac{d\varepsilon_d^*}{dT} + \left(\varepsilon_d^*\right)^q \cdot (1-q) \cdot \left(\varepsilon_m^*\right)^{-q} \frac{d\varepsilon_m^*}{dT} \right) =$$

$$= \frac{1}{\varepsilon_c^*} \left(q \cdot \frac{\varepsilon_c^*}{\varepsilon_d^*} \frac{d\varepsilon_d^*}{dT} + (1-q) \cdot \frac{\varepsilon_c^*}{\varepsilon_m^*} \frac{d\varepsilon_m^*}{dT} \right) = q \cdot TK_{\varepsilon_d}^* + (1-q) \cdot TK_{\varepsilon_m}^* \quad (1)$$

Виходячи з виразу (1), для дійсної та уявної частин маємо:

$$TK_{\varepsilon_c}' = q \cdot TK_{\varepsilon_d}' + (1-q) \cdot TK_{\varepsilon_m}', \quad (2)$$

$$TK_{\varepsilon_c}'' = q \cdot TK_{\varepsilon_d}'' + (1-q) \cdot TK_{\varepsilon_m}'', \quad (3)$$

де ε_d' , ε_d'' – дійсна та уявна частини комплексної діелектричної проникності дисперсної металічної фази відповідно, ε_m' , ε_m'' – дійсна та уявна частини комплексної діелектричної проникності матеріалу матриці відповідно.

Враховуючи, що $\varepsilon_d^* = 1 + j \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0}$, а $\sigma = \frac{1}{\rho}$, де j

– уявна одиниця ($\sqrt{-1}$), σ – провідність металу, ω – колова частота, ε_0 – діелектрична стала, ρ – питомий опір металу, отримаємо співвідношення для TK_{ε_d} :

$$TK_{\varepsilon_d} = \frac{\rho j}{\rho \omega \varepsilon_0 + j} \frac{d}{dT} \left(\frac{1}{\rho} \right) =$$

$$= \frac{\rho j}{\rho \omega \varepsilon_0 + j} \left(-\frac{1}{\rho^2} \frac{d(\rho)}{dT} \right) =$$

$$= \frac{j}{\rho \omega \varepsilon_0 + j} (-TK\rho),$$

де $TK\rho$ – температурний коефіцієнт питомого опору.

Помноживши чисельник і знаменник на величину комплексно спряжену до знаменника та беручи до уваги, що для металу в мікрохвильовому діапазоні $(\rho \omega \varepsilon_0)^2 \ll 1$:

$$TK_{\varepsilon_d} \approx (j\rho \omega \varepsilon_0 + 1)(-TK\rho).$$

Розділимо дійсну та уявну частини:

$$TK_{\varepsilon_d}' \approx -TK\rho. \quad (4)$$

$$TK_{\varepsilon_d}'' \approx \rho \omega \varepsilon_0 (-TK\rho). \quad (5)$$

У результаті на основі формул (2) – (5) отримаємо вираз для температурного коефіцієнту дійсної частини діелектричної проникності композиту:

Для температурного коефіцієнту діелектричної проникності можна записати:

$$TK_{\varepsilon_c}' = -q \cdot TK\rho + (1-q) \cdot TK_{\varepsilon_m}'.$$

У роботі [6] показано, що

$$tg(\delta_c) = tg \left(q \frac{\varepsilon_d''}{\varepsilon_d'} + (1-q) \frac{\varepsilon_m''}{\varepsilon_m'} \right),$$

де $tg(\delta_c)$ – тангенс кута діелектричних втрат у композиті.

Враховуючи, що $q \frac{\varepsilon_d''}{\varepsilon_d'} \ll 1$, $(1-q) \frac{\varepsilon_m''}{\varepsilon_m'} \ll 1$, мо-

жемо для тангенса кута діелектричних втрат композита типу метал–полімер приблизно записати:

$$tg(\delta_c) = q \frac{\varepsilon_d''}{\varepsilon_d'} + (1-q) \frac{\varepsilon_m''}{\varepsilon_m'}. \quad (6)$$

Тоді на основі рівняння (6) та визначення температурного коефіцієнта тангенса кута діелектричних втрат отримаємо:

$$TKtg(\delta_c) = \frac{1}{tg(\delta_c)} \frac{d \left(q \frac{\varepsilon_d''}{\varepsilon_d'} + (1-q) \frac{\varepsilon_m''}{\varepsilon_m'} \right)}{dT} =$$

$$= \frac{qtg(\delta_d)}{tg(\delta_c)} TKtg(\delta_d) + \frac{(1-q)tg(\delta_m)}{tg(\delta_c)} TKtg(\delta_m).$$

Враховуючи, що $tg(\delta_d) = \frac{\varepsilon_d''}{\varepsilon_d'}$, для $TKtg(\delta_d)$

можна записати:

$$TKtg(\delta_d) = \frac{\varepsilon_d''}{\varepsilon_d'} \frac{d}{dT} \left(\frac{\varepsilon_d''}{\varepsilon_d'} \right) =$$

$$= \frac{1}{\varepsilon_d''} \frac{d}{dT} (\varepsilon_d'') - \frac{1}{\varepsilon_d'} \frac{d}{dT} (\varepsilon_d') =$$

$$= TK_{\varepsilon_d}'' - TK_{\varepsilon_d}' \quad (8)$$

Підставимо до рівняння (8) вирази (4) та (5):

$$TKtg(\delta_d) = (1 - \rho \omega \varepsilon_0) TK\rho.$$

Оскільки у мікрохвильовому діапазоні для металу $\rho\omega\epsilon_0 \ll 1$, то:

$$TKtg(\delta_d) \approx TK\rho. \quad (9)$$

Тоді, на основі рівняння (7) з урахуванням формули (9), отримаємо вираз для температурного коефіцієнта тангенса кута діелектричних втрат у композиті типу метал–полімер:

$$TKtg(\delta_c) = \frac{qtg(\delta_d)}{tg(\delta_c)}TK\rho + \frac{(1-q)tg(\delta_m)}{tg(\delta_c)}TKtg(\delta_m).$$

III. Результати експериментальних досліджень

Для перевірки отриманих теоретичних результатів було проведено експериментальне дослідження температурних залежностей діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат композитних матеріалів у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль.

Зразки металодіелектричних композитних матеріалів було виготовлено методом електро-механічного перемішування металічних частинок з матеріалом матриці. Затвердіння зразків відбувалось за кімнатної температури. Як матеріал матриці було використано полімери із низькою діелектричною проникністю ($\epsilon^* = 2,73 - j0,2$), металічні вclusions являли собою алюмінієві гранули розміром 60...800 нм.

Властивості структур метал–діелектрик досліджували за допомогою панорамного вимірювача (рис. 1) шляхом визначення коефіцієнту відбиття (параметр S_{11}) та коефіцієнту проходження (параметр S_{21}) досліджуваних зразків [7], розміщених у роз'ємному хвилеводі.

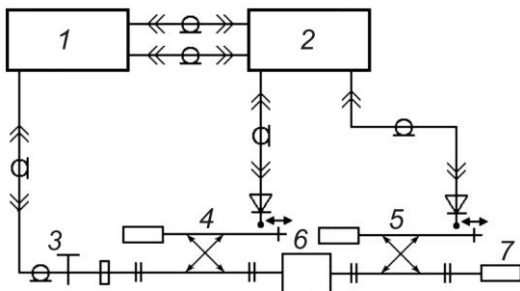


Рис. 1. Структурна схема панорамного вимірювача: 1 – генератор НВЧ; 2 – індикатор ослаблення; 3 – коаксціальний хвилевід; 4 – напрямлений відгалужувач «падаюча хвиля»; 5 – напрямлений відгалужувач «відбита хвиля»; 6 – вимірювальний блок із зразком; 7 – узгоджене навантаження

Отримані теоретичні та експериментальні результати представлені на рис. 2 та 3.

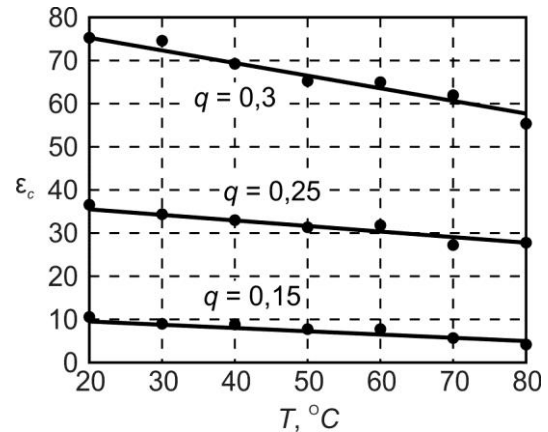


Рис. 2. Графіки температурної залежності дійсної частини діелектричної проникності композитного матеріалу метал–полімер

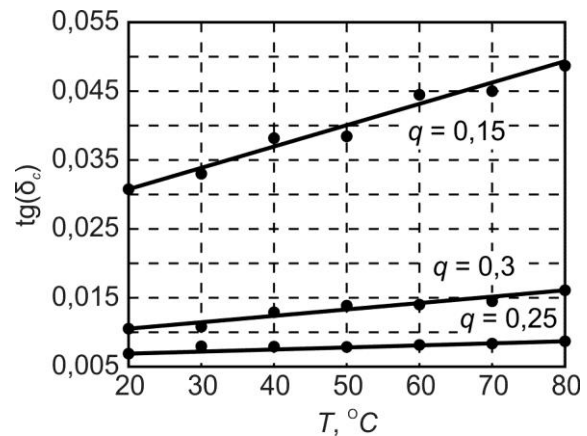


Рис. 3. Графіки температурної залежності тангенса кута діелектричних втрат композитного матеріалу метал–полімер

З рис. 2 та 3 видно, що різниця між теоретичними та експериментальними значеннями діелектричної проникності у всьому діапазоні зміни температури не перевищує 2 %, а для тангенса кута діелектричних втрат – 5 %. Таким чином, розрахунок і експеримент добре узгоджуються, що свідчить про адекватність наведеного підходу.

Висновки

1. Отримані теоретичні вирази для визначення температурних коефіцієнтів діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат композитного матеріалу типу метал–полімер.

2. Проведено експериментальне дослідження температурних залежностей діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат композитних матеріалів у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль. Різниця між теоретичними та експериментальними значеннями діелектричної проникності у всьому діапазоні зміни температури не перевищує 2 %, а для тангенса кута діелектричних втрат – 5 %.

3. Експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними даними, що свідчить про адекватність отриманої математичної моделі.

Список використаних джерел

1. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів. Конспект лекцій / Автор і укладач В. В. Пілінський. – К. : Національний технічний університет України «КПІ», 2007. – 374 с.
Железняк В.К. Защита информации от утечки по техническим каналам / В. К. Железняк. – СПб. : ГУАП, 2006. – 188 с.
3. *Виноградов А.П.* Электродинамика композитных материалов / А. П. Виноградов; под ред. Б.З. Каценеленбаума. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 208 с.
4. *Копань В. С.* Композиційні матеріали : монографія / В. С. Копань. – К. : Унів. вид-во «Пульсари», 2004. – 200 с.
5. *Тареев Б. М.* Физика диэлектрических материалов [текст] : Учеб. пособие для вузов / Б. М. Тареев. – М. : Энергоиздат, 1982. – 320 с.
6. *Tatarchuk D. D.* Frequency dependences of the dielectric parameters of the metal-insulator composites / D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, A. V. Borisov // Физика диэлектриков (Диэлектрики-2014) : Материалы XIII Междунар. конф. (2 – 6 июня 2014 г., Санкт-Петербург, Россия). – СПб. : Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2014. – Т.1. – С. 266 – 269.
7. *Поплавко Ю. М.* Мікрохвильова діелектрична спектроскопія : навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, В. І. Молчанов, В. А. Казміренко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 304 с.

Поступила в редакцію 24 декабря 2015 г.

УДК 621.372.41

Ю.В. Діденко¹, І.В. Пацьора², Д.Д. Татарчук¹, канд. техн. наук

¹ Національний технічний університет України «КПІ»,

вул. Політехнічна, 16, м. Київ, 03056, Україна.

² Технічний університет Дрездена,

вул. Моммсенштрассе, 15, м. Дрезден, 01069, Німеччина.

Температурні властивості композитів типу метал–полімер у мікрохвильовому діапазоні

На підставі співвідношення Ліхтенеккера отримано аналітичні вирази для температурних залежностей діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат композитних матеріалів типу метал–полімер. Наведено результати експериментального дослідження температурних властивостей таких матеріалів. Експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними даними. Бібл. 7, рис. 3.

Ключові слова: композитний матеріал; діелектрична проникність; тангенс кута діелектричних втрат; температурні залежності; мікрохвильовий діапазон; рівняння Ліхтенеккера.

UDC 621.372.41

Y. Didenko¹, I. Patsora², D. Tatarchuk¹, Ph.D.

¹ National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,
st. Polytechnique, 16, Kyiv, 03056, Ukraine.

² Technical University of Dresden,
Mommensenstrasse, 15, 01069, Dresden, Germany.

Temperature properties of composites metal–polymer in the microwave range

On the base of Lihtenecker equation analytical expressions for temperature dependencies of the dielectric constant and of the dielectric loss tangent for metal-polymer composites are obtained. The results of an experimental study of the temperature properties of these materials are given. The experimental results are in the good agreement with theoretical data. References 7, figures 3.

Keywords: composite material; dielectric permittivity; dielectric loss tangent; temperature dependencies; microwave range; Lihtenecker equation.

References

1. *Pilinskii, V. V.* (2007). Electromagnetic compatibility of radio electronic devices. Lecture. Kyiv, NTUU “KPI”. P. 374. (Ukr)
2. *Zhelezniak, V. K.* (2006). Information protection against leakage via technical channels. SPb, GUAP. P. 188. (Rus)
3. *Vinogradov, A. P.* (2001). Electrodynamics of composite materials. Moscow, Editorial URSS. P. 208. (Rus)
4. *Kopan, V. S.* (2004). Composite materials. Kyiv, Pulsary. P. 200. (Ukr)
5. *Tareev, B. M.* (1982). Physics of dielectric materials. Moscow, Energoizdat. P. 320. (Rus)
6. *Tatarchuk, D. D., Didenko, Y. V., Borisov, A. V.* (2014). Frequency dependences of the dielectric parameters of the metal-insulator composites. Physics of dielectrics (Dielectrics–2014) : Proc. of XIII Int. Conf. (June 2 – 6, 2014, St. Petersburg, Russia). Vol. 1. PP. 266 – 269.
7. *Poplavko, Y. M., Molchanov, V. I., Kazmirenko, V. A.* (2011). Microwave dielectric spectroscopy. Kyiv, NTUU “KPI”. P. 304. (Ukr)