

УДК 621.382

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-10

Мазур К. С.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПОГЛИНАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

У даній роботі запропоновано математичну модель багатошарового мікрохвильового поглинального покриття та проведено аналіз його основних характеристик. Визначено теоретичну залежність коефіцієнту відбивання від основних характеристик матеріалу. Досліджено вплив діелектричної та магнітної проникностей на коефіцієнт відбиття запропонованої системи, а також визначено оптимальні параметри системи для ефективного поглинання електромагнітних хвиль у діапазоні 2–18 ГГц. Проаналізовано механізм поглинання електромагнітної енергії в діелектричному матеріалі в заданому частотному діапазоні. Побудовано та проаналізовано залежності комплексних діелектричної та магнітної проникностей модельного матеріалу. Побудовано залежності коефіцієнту відбивання системи вакуум-матеріал-ідеальний провідник. Аналіз експериментальних досліджень виявив потенційно перспективні композитні матеріали, зокрема графенову піну (CGF), що демонструє високий рівень поглинання. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення складу та механічних властивостей таких матеріалів.

Ключові слова: мікрохвильовий поглинальний матеріал, коефіцієнт відбиття, математична модель, комплексна діелектрична проникність, комплексна магнітна проникність, графен

Постановка проблеми. Протягом останніх десятиліть можна спостерігати, що кількість прикладів застосування пристроїв мікрохвильового діапазону невпинно зростає. Цей стрімкий розвиток приводить до значущості проблеми захисту від електромагнітного випромінювання. Саме мікрохвильові поглинальні матеріали відіграють ключову роль для різноманітних застосувань: для створення антен, радарів, систем зв'язку, систем захисту від електромагнітних перешкод, стелс-технологій для оборонних застосувань, а також захисту біологічних об'єктів від шкідливих мікрохвильових та терагерцових пристроїв.

Аналіз останніх досліджень. На даний момент існує велика кількість поглинальних матеріалів. У комерційному доступі зазвичай переважають феритові пластини, завдяки високому рівню електромагнітних втрат в них. Проте вони мають дуже високу густину, тому їх застосування обмежене в легких конструкціях. Розроблено велику кількість композитних матеріалів, а також значним інтересом серед науковців протягом останніх десятиліть користуються наноструктурні матеріали. Проте, варто зазначити, що ці матеріали мають хоча б один із трьох недоліків:

- недостатня ефективність в широкому діапазоні частот [1];
- значна маса/об'єм матеріалу [2];
- висока вартість виготовлення через складність технологічного процесу [3].

Незважаючи на дуже значний прогрес, більшість поглинальних матеріалів мікрохвильового діапазону мають обмежену ефективність у широкому частотному діапазоні або ж мають вимоги до великої товщини матеріалу. Для прикладу, найефективніші сучасні матеріали мають наступні переваги та недоліки:

- композити, у складі яких переважають ферити, мають коефіцієнт поглинання менше 10 дБ у широкому частотному діапазоні, проте мають також високу густину [4];
- CdS-MWCNTs мають коефіцієнт поглинання менше 10 дБ у діапазоні частот 8...12 ГГц виключно за підвищених температур (50...250 °C) [5];
- вуглецеві стільники (Carbon Honeycomb) мають коефіцієнт поглинання менше 10 дБ у діапазоні частот 2...18 ГГц [6];
- Fe-CNTs мають коефіцієнт поглинання менше 10 дБ у діапазоні частот 12...14 ГГц [7].

Тому актуальною є проблема знаходження нових підходів для розробки матеріалів з покращеними характеристиками. У даній статті запропоновано математичну модель мікрохвильового поглинального покриття, проаналізовано, якими мають бути діелектричні та магнітні характеристики цього матеріалу, та проаналізовано деякі матеріали, що можуть бути використані для створення нового матеріалу мікрохвильового поглинального покриття.

Мета роботи. Створення математичної моделі мікрохвильового поглинального матеріалу та оцінка можливості її реалізації.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо систему, схематично зображену на рисунку 1.

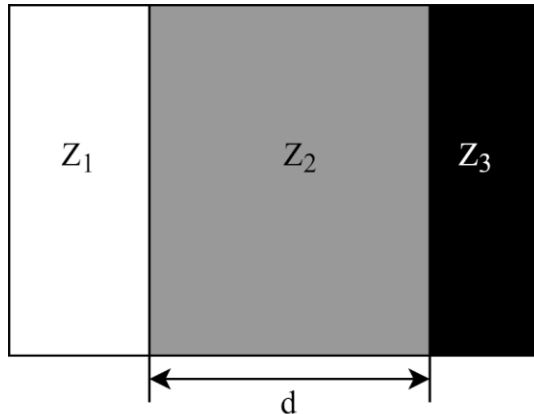


Рисунок 1 – Схема одношарового покриття

На металічну поверхню з імпедансом $Z_3 = 0$ нанесено шар поглинального матеріалу з імпедансом $Z_2 = Z_{in}$. Утворений зразок поміщено в середовище (повітря) з імпедансом $Z_1 = Z_0 = 377 \text{ Ом}$.

Відповідно до теорії довгих ліній, коефіцієнт відбиття такого поглинального матеріалу визначається як коефіцієнт відбиття лінії [8]:

$$R = 20 \lg \left(\left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \right), \quad (1)$$

де Z_{in} – імпеданс входу системи метал–поглинальний матеріал, Z_0 – імпеданс повітря.

Визначимо вхідний опір поглинального матеріалу [9]:

$$Z_{in} = Z_w \frac{(Z_w \operatorname{th}(\gamma d) + Z_{load})}{Z_w + Z_{load} \operatorname{th}(\gamma d)}, \quad (2)$$

де Z_w – імпеданс сегменту лінії, γ – стала поглинання лінії, що визначається як [9]

$$\gamma = j \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon^* \mu^*}. \quad (3)$$

Враховавши, що для металу $Z_{load} = Z_3$, отримуємо:

$$Z_{in} = Z_w \operatorname{th}(\gamma d). \quad (4)$$

Оскільки $Z_w = Z_0 \sqrt{\frac{\mu^*}{\varepsilon^*}}$ [8], маємо:

$$R = 20 \lg \left(\left| \frac{\sqrt{\mu^*} \operatorname{th}(\gamma d) - \sqrt{\varepsilon^*}}{\sqrt{\mu^*} \operatorname{th}(\gamma d) + \sqrt{\varepsilon^*}} \right| \right). \quad (5)$$

Враховавши вираз (3), маємо загальну формулу для коефіцієнту відбиття:

$$R = 20 \lg \left(\frac{\left| \sqrt{\mu^*} \operatorname{th} \left(j \frac{\omega d}{c} \sqrt{\varepsilon^* \mu^*} \right) - \sqrt{\varepsilon^*} \right|}{\left| \sqrt{\mu^*} \operatorname{th} \left(j \frac{\omega d}{c} \sqrt{\varepsilon^* \mu^*} \right) + \sqrt{\varepsilon^*} \right|} \right). \quad (6)$$

Отже, коефіцієнт відбиття є функцією, що залежить від комплексних діелектричної та магнітної проникностей поглинального матеріалу, частоти, а також товщини матеріалу. Діелектрична та магнітна проникності є функціями частоти:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega), \quad (7)$$

$$\mu^*(\omega) = \mu'(\omega) - j\mu''(\omega). \quad (8)$$

Підставивши вирази (7) та (8) у рівняння (6), отримуємо остаточну формулу:

$$R = 20 \lg \left(\frac{\left| \sqrt{\mu^*(\omega)} \operatorname{th} \left(j \frac{\omega d}{c} \sqrt{\varepsilon^*(\omega) \mu^*(\omega)} \right) - \sqrt{\varepsilon^*(\omega)} \right|}{\left| \sqrt{\mu^*(\omega)} \operatorname{th} \left(j \frac{\omega d}{c} \sqrt{\varepsilon^*(\omega) \mu^*(\omega)} \right) + \sqrt{\varepsilon^*(\omega)} \right|} \right). \quad (9)$$

Враховуючи попередню формулу (9), можна прийти до висновку, що задача моделювання мікрохвильового поглинального матеріалу зводиться до задачі із визначення частотних залежностей діелектричної (7) та магнітної (8) проникностей матеріалу. Перед тим як моделювати характеристики діелектричного матеріалу слід сформулювати вимоги до цього матеріалу:

1. Для практичного застосування поглинального матеріалу, його шар має бути тонким. Літературний огляд [10] показує, що сучасні поглинальні матеріали мають проектуватися за максимальної товщини матеріалу в 2 мм;

2. Оскільки більшість прикладних застосувань сьогодення охоплюють частотні діапазони S, C, X, Ku [11] то частотний діапазон визначимо на рівні 2...18 ГГц;

3. Вимоги до поглинальних властивостей матеріалу. Матеріал повинен мати мінімальне відбиття – максимальне поглинання. Літературний огляд [12] показує, що матеріал можна використовувати як поглинальний, коли коефіцієнт відбиття встановлюється на рівні нижче – 10 дБ.

Для моделювання діелектричних залежностей матеріалу слід проаналізувати механізми втрат у діелектрику. Існує три основних механізми діелектричних втрат [8]:

1. Безінерційна електропровідність;
2. Теплова поляризація (модель релаксатора);
3. Пружна поляризація (модель осцилятора).

Зазвичай матеріали, які використовуються для поглинальних мікрохвильових покриттів, є релаксаторами. Це пояснюється тим, що в мікрохвильовому діапазоні безінерційна електропровідність не спостерігається – цей механізм втрат діє в значно нижчому частотному діапазоні. Механізм пружної поляризації є резонансним – такі матеріали є ефективними під час проектування вузькосмугових загороджувальних фільтрів через різкий спад діелектричної проникності за частот, близьких до резонансної. Цей механізм працює на частотах, що є вищими ніж розглядаються в даній статті. Тому для побудови моделі скористаємось механізмом теплової поляризації (модель релаксатора). У такому випадку комплексна діелектрична проникність описується наступними формулами:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon'(\infty) + \frac{\varepsilon'(0) - \varepsilon'(\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (10)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon''(0) - \varepsilon''(\infty)) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (11)$$

Для моделювання оберемо матеріал з невисоким значенням діелектричної проникності (2...10) в мікрохвильовому діапазоні, оскільки за високих значень діелектричної проникності для зменшення коефіцієнту відбивання (виходячи з формули коефіцієнту відбивання) матеріал повинен мати високе значення і магнітної проникності, що важко досягти. Також під ці параметри підходить велика кількість діелектричних матеріалів, що полегшить задачу з реалізації такого матеріалу в майбутніх дослідженнях.

У результаті моделювання, прийнявши $\varepsilon'(0)=9$, $\varepsilon'(\infty)=2.5$, $\tau=8 \cdot 10^{-10}$ с отримано наступні залежності:

$$\varepsilon'(\omega) = 2.5 + \frac{6.5}{1 + 1.5 \cdot 10^{-16} \omega^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{8 \cdot 10^{-10} \omega}{1 + 1.5 \cdot 10^{-16} \omega^2} \quad (13)$$

Графіки побудованих залежностей зображено на рисунку 2.

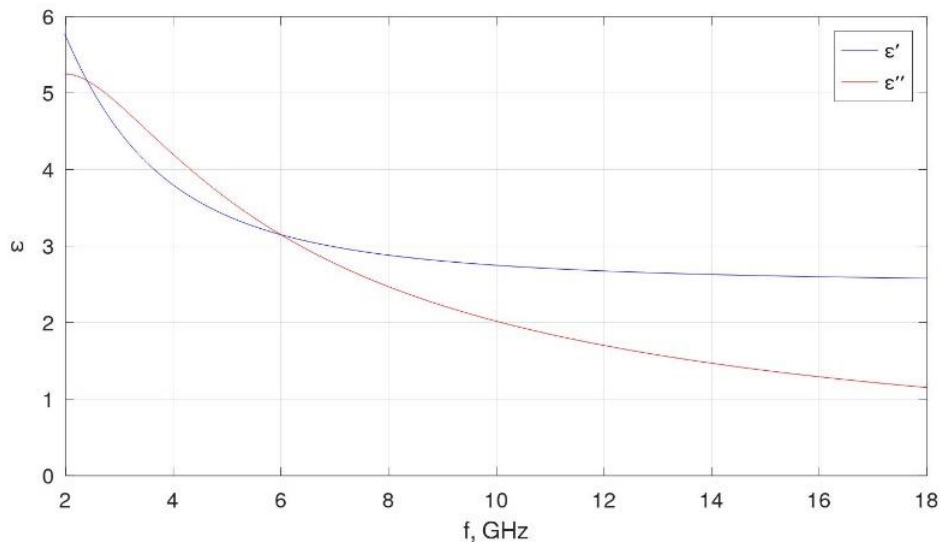


Рисунок 2 – Залежності дійсної (синя лінія) та уявної (червона лінія) частин комплексної діелектричної проникності

Якщо у випадку діелектричної проникності існує декілька основних механізмів поляризації, що можна описати математичними залежностями, то у випадку магнітних характеристик загальну формулу, що визначає частотну залежність магнітної проникності матеріалу, досить важко визначити [8].

Аналіз різних експериментальних досліджень [13,14,15] показує що матеріали зазвичай мають або стабільно низьку магнітну проникність без дисперсії, або ж мають магнітну дисперсію, що має спадний характер (явище ФМР не розглядаємо, оскільки ФМР зазвичай проявляється в феромагнетиках високої густини, що суттєво збільшують масу композитного матеріалу, а самі феромагнетики мають низьку діелектричну проникність).

З огляду на вищезгадане, скористаємось також гіперболічними залежностями для дійсної та уявної частин магнітної проникностей:

$$\mu'(\omega) = a' + \frac{b'}{\omega}, \quad (14)$$

$$\mu''(\omega) = a'' + \frac{b''}{\omega}, \quad (15)$$

де a', b', a'', b'' – сталі величини.

Для того щоб отримати коефіцієнт відбивання менше 10дБ, з урахуванням виразів (12) та (13) залежності дійсної та уявної частин комплексної магнітної проникності повинні мати вигляд:

$$\mu'(\omega) = 1 + \frac{3 \cdot 10^{10}}{\omega}, \quad (16)$$

$$\mu''(\omega) = \frac{10^{11}}{\omega}. \quad (17)$$

Графіки побудованих залежностей зображено на рисунку 3.

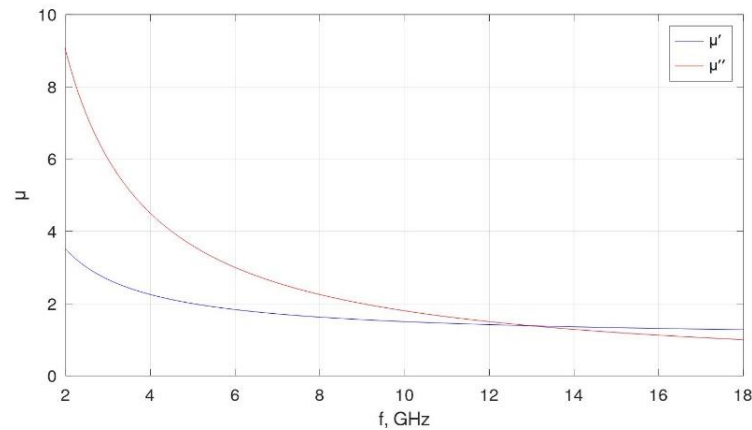


Рисунок 3 – Залежності дійсної (синя лінія) та уявної (червона лінія) частин комплексної магнітної проникності

Використовуючи формулу (9), змодельємо коефіцієнт відбиття отриманого матеріалу (рис. 4):

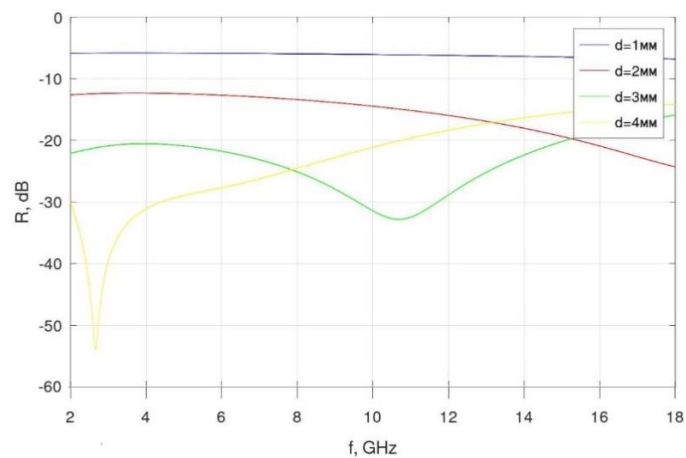


Рисунок 4 – Коефіцієнти відбиття змодельованого матеріалу для різних товщин матеріалу

Отримані результати моделювання (рис. 4) показують, що за прийнятих модельних значень ε та μ частотна залежність коефіцієнта відбиття відповідає поставленим умовам. Внаслідок зменшення товщини спостерігається менше затухання електромагнітної хвилі в матеріалі, що приводить до зменшення коефіцієнту поглинання і, відповідно, збільшення і коефіцієнту відбиття. За товщини матеріалу 2 мм коефіцієнт відбиття перебуває на рівні нижче -10 дБ, що відповідає вимогам мікрохвильового поглинального матеріалу.

На основі отриманої моделі було проаналізовано експериментальні дослідження на наявність матеріалів, що потенційно можуть задовольняти дану модель за характеристиками діелектричної/магнітної проникностей. Слід зауважити, що магнітна проникність має сягати доволі високих значень, що можливо за наявності феромагнітних матеріалів в композиті. Зокрема, у статті [16] проаналізовано матеріал на основі Со, С та парафіну, що демонструє багатообіцяючі результати (коефіцієнт відбиття менше -10 дБ) – проте парафін не є надійним матеріалом для покриття, а заміна парафіну епоксидною смолою призвела до суттєвих погіршень характеристик. Також слід зазначити, що магнітна проникність цього матеріалу має дуже низькі значення за високих значень діелектричної проникності, що не відповідає запропонованій моделі.

У статті [17] проаналізовано CGF – матеріал на основі графену, що відповідає запропонованим значенням діелектричної проникності (2...10) в мікрохвильовому діапазоні, а також має високий рівень діелектричних втрат ($\tan \delta$ сягає 1,3). У статті не наведено значень магнітної проникності матеріалу, проте матеріал CG7F-400 показує значення коефіцієнту відбиття $-40...-10$ дБ у діапазоні частот 2...18 ГГц, що може відповідати запропонованій моделі. На рисунках 5–8 наведені порівняльні графіки змодельованих і реальних значень дійсних/уявних частин комплексних діелектричної та магнітної проникностей :

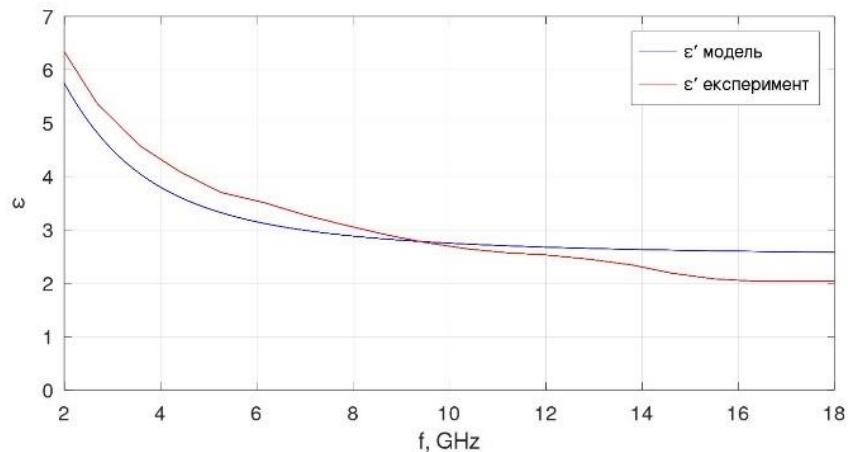


Рисунок 5 – Залежності змодельованої (синя лінія) та експериментальної (червона лінія) дійсних частин комплексної діелектричної проникності

Графіки показують, що моделі дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності мають дуже близькі значення. У випадках магнітної проникності значення дійсної частини дуже схоже до значення моделі, проте уявна частина (експеримент) свідчить про те, що мають місце піки поглинання за частот близьких до 6 та 11 ГГц. Це означає, що модель комплексної частини магнітної проникності потребує врахування додаткових факторів.

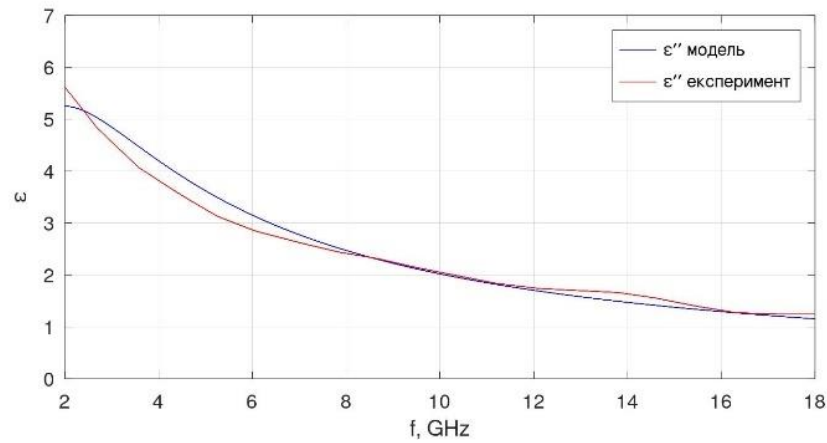


Рисунок 6 – Залежності змодельованої (синя лінія) та експериментальної (червона лінія) уявних частин комплексної діелектричної проникності

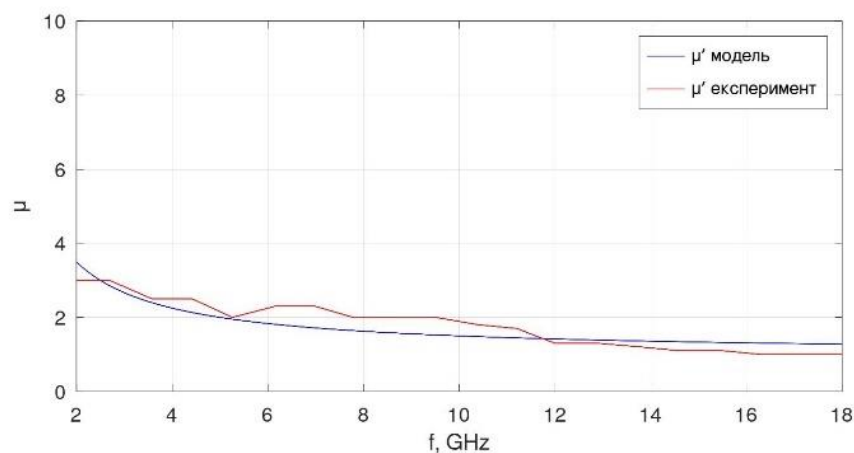


Рисунок 7 – Залежності змодельованої (синя лінія) та експериментальної (червона лінія) дійсних частин комплексної магнітної проникності

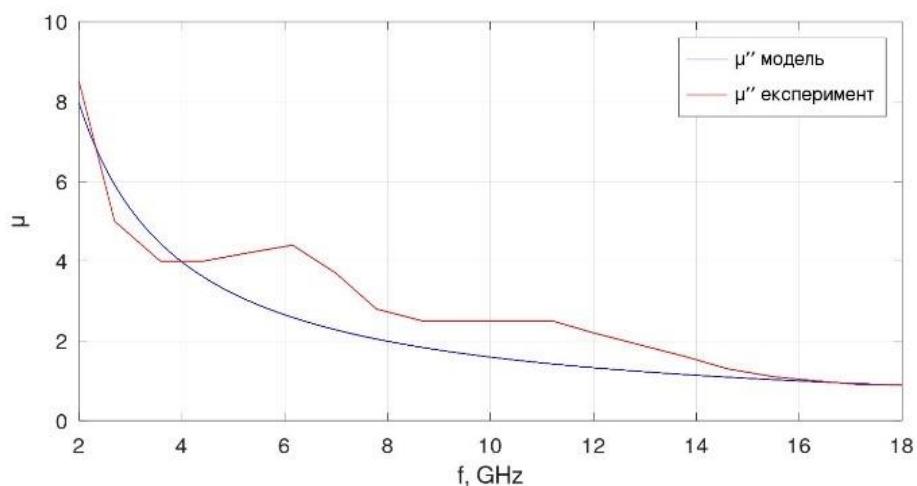


Рисунок 8 – Залежності змодельованої (синя лінія) та експериментальної (червона лінія) уявних частин комплексної магнітної проникності

Враховуючи, що матеріал є крихким, а додавання епоксидної смоли (як у попередньому проаналізованому варіанті) може призвести до погіршення частотних характеристик або ж порушення структури матеріалу, модель потребує доопрацювань з урахуванням другого шару матеріалу, що гарантував би міцність структури за мінімальної товщини та маси. Також відкритим залишається питання, чому графенова

піна має такий високий рівень магнітних втрат за немагнітних властивостей карбону? Автор пояснює це еквівалентною індуктивністю утвореної пористої структури матеріалу, що може свідчити про індуктивні можливості й інших пористих матеріалів.

Висновки. У даній роботі було запропоновано математичну модель мікрохвильового поглинального покриття та проведено аналіз основних характеристик, що впливають на його ефективність. На основі отриманих розрахунків було встановлено, що коефіцієнт відбиття матеріалу визначається комплексними діелектричною та магнітною проникностями, частотою електромагнітної хвилі та товщиною шару. В досліджуваному діапазоні частот 2...18 ГГц дійсна частина комплексної діелектричної проникності має варіюватися в межах 6...2,5, уявна частина – 5...1. Дійсна частина магнітної проникності має бути в межах 4...1, уявна – 9...1. Аналіз експериментальних досліджень показав, що потенційно перспективними матеріалами для реалізації запропонованої моделі є композитні матеріали на основі графенової піни (CGF). Вони демонструють високий рівень поглинання електромагнітного випромінювання у широкому діапазоні частот, проте мають обмеження у вигляді крихкості та можливого погіршення характеристик за додавання зв'язувальних компонентів. Також були розглянуті матеріали на основі Со, С та парафіну, які показали багатообіцяючі результати, однак їх використання також обмежене через недостатню механічну стабільність. Загалом, результати дослідження підтвердили актуальність розробки нових підходів до створення ефективних мікрохвильових поглинальних матеріалів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію складу композитних матеріалів та пошук альтернативних зв'язувальних компонентів, що не погіршують поглинальні характеристики матеріалу.

Інформаційні джерела

1. Elmahaishi M. F., Azis R. S., Ismail I., Muhammad F. D. A review on electromagnetic microwave absorption properties: their materials and performance. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 20. P. 2188–2220.
2. Houbi A., Zharmenov A. A., Yomen A., Bagasharova Z. T., Mirzalieva S., Kadyrakunov K. Microwave absorbing properties of ferrites and their composites: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. Vol. 529, No 167839.
3. Sahoo P., Saini L., Dixit A. Microwave-absorbing materials for stealth application: a holistic overview. *Oxford Open Materials Science*. 2023. Vol. 3, No 1. P. 1–4.
4. Baoji Miao et al. Scalable synthesis of 2D Ti₂CTx MXene and molybdenum disulfide composites with excellent microwave absorbing performance. *Advanced Composite Materials*. 2023. Vol. 61, No 42114.
5. Lu, M., Wang, X., Cao, W., Yuan, J., Cao, M. Carbon nanotube-CdS core-shell nanowires with tunable and high-efficiency microwave absorption at elevated temperature. *Nanotechnology*, 2015, 27(6), 065702. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/6/065702>
6. Khurram A., Naveed A., Rakha S., Peiheng Z., Arshad M. Optimization of the Carbon Coating of Honeycomb Cores for Broadband Microwave Absorption. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2014. Vol. 56, No. 5. P. 1061-1066..
7. W.Q. Guo et al. Highly-improved microwave absorption performance of LaFeO₃/Fe@CNTs nanocomposites through in-situ synthesis of Fe@CNTs. *Ceramics International*. 2025. Vol. 51, No 1. P. 764-776.
8. Дробахін О. О., Гнатушенко В. В., Рябчій В. Д., Салтиков Д. Ю. Основи теорії мікрохвильових кіл : навч. посіб. Дніпро : РВВ ДНУ, 2011. 76 с.
9. Поплавко Ю. М., Воронов С. О., Якименко Ю. І. Фізичне матеріалознавство Ч. 3. Провідники та магнетики: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 372 с.
10. Didenko Y., Orlov A., D. Tatarchuk and Y. Poplavko. Fundamental Limitations in the Properties of Microwave Protective Component // 2024 IEEE 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) materials, Kyiv, Ukraine, May 13-16 2024, P. 56-61.
11. Cheng Y., Wang W., Cao Y., Wang H. Graphene-Based Materials toward Microwave and Terahertz Absorbing Stealth Technologies. *Advanced Optical Materials*. 2019. Vol. 7, No. 8(1801318).
12. Didenko Y., Orlov A., D. Tatarchuk and Y. Poplavko. Metamaterials for Microwave Absorption and Reflection Control // 2024 IEEE 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) materials, Kyiv, Ukraine, May 13-16 2024, P. 1-6.

13. Liang Y.-J., Zhang L., Chen M., Fan L., Liao W., Xun Y., Fu L. Anisotropic shaped Fe_3O_4 nanoparticles: Microwave-assisted thermal decomposition synthesis and their electromagnetic properties. AIP Advances. 2020. Vol. 10, No. 8(085208).
14. Folgueras L. C., Alves M. A. and Rezende M. C. Dielectric properties of microwave absorbing sheets produced with silicone and polyaniline. Materials Research. 2010. Vol. 13. No. 2. P. 211-218.
15. Feng W. et al. Ti_3C_2 MXene: a promising microwave absorbing material. RSC Advances. 2018. Vol. 8, No. 5. P. 2398–2403.
16. Y. Wang, Y. Wu, Y. Zhang, Y. Yan, and X. Wang. Graphene/carbon nanotube/polyaniline ternary nanocomposite with excellent electromagnetic absorption properties. Carbon. 2014. Vol. 79. P. 94–101.
17. Chen H, et al. Synergistically assembled MWCNT/graphene foam with highly efficient microwave absorption in both C and X bands. Carbon. 2017. Vol. 124. P. 506-514.

Mazur K.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF A MICROWAVE ABSORBING MATERIAL

In this paper, a mathematical model of a multilayer microwave absorbing coating is proposed, and an analysis of its main characteristics is carried out. The theoretical dependence of the reflection coefficient on the main material characteristics has been determined. The influence of dielectric and magnetic permeabilities on the reflection coefficient of the proposed system has been studied, and optimal system parameters for effective absorption of electromagnetic waves in the frequency range of 2–18 GHz have been identified. The mechanism of electromagnetic energy absorption in a dielectric material within the specified frequency range has been analyzed. Dependencies of the complex dielectric and magnetic permeabilities of the model material have been constructed and analyzed. Reflection coefficient dependencies of the vacuum-material-ideal conductor system have been constructed. The analysis of experimental studies revealed potentially promising composite materials, in particular, graphene foam (CGF), which demonstrates a high level of absorption. Further research should focus on improving the composition and mechanical properties of such materials.

Keywords: microwave absorbing material, reflection coefficient, mathematical model, complex dielectric permittivity, complex magnetic permeability, graphene.