

Badania symulacyjne właściwości elektromagnetycznych planarnej struktury metamateriałowej SRR-podłoże dielektryczne w zakresie mikrofalowym

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki symulacji oddziaływania mikrofalowego promieniowania elektromagnetycznego z planarną strukturą metamateriałową rozszczepionego rezonatora pierścieniowego SSR (Split-Ring Resonator). Do symulacji zastosowano środowisko CST Studio umożliwiające rozwiązywanie zagadnień polowych w szerokim zakresie częstotliwości. Wyznaczono współczynniki odbicia, absorpcji i transmisji promieniowania mikrofalowego dla struktury SRR-podłoże dielektryczne w zakresie od 1 GHz do 20 GHz oraz odpowiadające im zespolone przenikalności elektryczną i magnetyczną. Wyniki symulacji wykazały, że proces absorpcji promieniowania mikrofalowego dla struktury SRR-podłoże dielektryczne ma charakter rezonansowy. Największy współczynnik absorpcji (około 95 %) występuje dla częstotliwości około 2,75 GHz, 7,7 GHz i 9 GHz. Otrzymane rezultaty sugerują, że pojedyncza mała struktura metamateriałowa typu SRR-podłoże dielektryczne, wykazująca silne właściwości absorpcyjne, może być przydatna do budowy dużych absorberów promieniowania mikrofalowego.

Abstract. This paper presents results of the numerical simulation of interaction of the microwave plane wave with a planar metamaterial structure SRR-dielectric substrate. The simulation was carried out using the electromagnetic solver Microwave Studio by CST. The absorption, reflection and transmission coefficients of the SRR-dielectric substrate structure in the range of 1 – 20 GHz were determined. The corresponding complex electric permittivity and complex magnetic permeability were also calculated. The results showed that the absorption of the microwaves by the SRR-dielectric substrate structure exhibits a resonance character. It was found that the highest resonance peak-type values (about 95 %) of the absorption coefficient occurred for frequencies of about 2.75 GHz, 7.7 GHz and 9 GHz. The SRR-dielectric substrate structure studied in this work seems to be a good candidate for building the large-scale microwave absorbers. (*Simulation studies of the electromagnetic properties of a planar metamaterial SRR-dielectric substrate structure in the microwave range*)

Słowa kluczowe: absorbery promieniowania elektromagnetycznego, mikrofalowy rezonator SRR, metamateriały, oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego ze strukturami metamateriałowymi.

Keywords: absorbers of electromagnetic radiation, microwave resonator SRR, metamaterials, interaction of electromagnetic radiation with metamaterial structures.

Wprowadzenie

W ostatnim czasie wzrosło zainteresowanie nowymi materiałami pod kątem ich przydatności do zastosowania jako elementy absorbujące lub odbijające niepożądane mikrofalowe promieniowanie elektromagnetyczne. Przyczyną tego jest konieczność ochrony cywilnych oraz wojskowych infrastruktur i systemów elektronicznych, które mogą stać się obiektami ataków terrorystycznych i woj-skowych z użyciem silnych sygnałów mikrofalowych. Poszukiwania nowych materiałów absorpcyjno-odbiciowych kierunkowane są szczególnie na tzw. metamateriały mikro-falowe, których niestandardowe właściwości elektro-magnetyczne są mało znane i rozpowszechnione praktycznie.

Pod względem geometrii metamateriały dzielimy na objętościowe i planarne [1]. Sposób oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego ze strukturą metamateriałową silnie zależy od jej kształtu i wymiarów charakterystycznych oraz elementów składowych i ich parametrów materiałowych. Wymiary struktury metamateriałowej są znacznie mniejsze od długości fali promieniowania elektromagnetycznego. Generalnie oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego ze strukturą metamateriałową zależy od jego częstotliwości. Oddziaływanie to może mieć charakter rezonansowy lub nierzona-sowsy (szerokopasmowy) a najczęściej mieszany [2].

W niniejszej pracy przedstawiamy wyniki numerycznych badań symulacyjnych parametrów elektromagnetycznych wybranej struktury metamateriałowej pod kątem jej właściwości absorpcyjnych i odbijających promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie mikrofalowym od 1 GHz do 20 GHz. Do symulacji wybrano zmodyfikowaną wersję jednej ze znanych planarnych mikrofalowych struktur metamateriałowych, występującą w literaturze pod nazwą struktury rozszczepionego rezonatora pierścieniowego SRR (Split-Ring Resonator) [3]. W badaniach symulacyjnych użyty został program CST Studio w wersji Student.

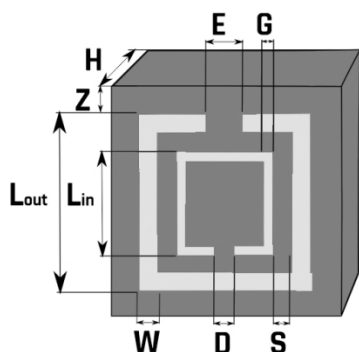
Wybrana struktura metamateriałowa

W niniejszej pracy zasymulowano oddziaływanie promieniowania mikrofalowego z pojedynczą planarną strukturą SRR (Split-Ring Resonator) o stosunkowo silnych właściwościach absorpcyjno-odbiciowych w szerokim paśmie częstotliwościowym [4-9]. Taka pojedyncza struktura planarna może stanowić element składowy większego elementu mikrofalowego o właściwościach absorpcyjno-odbiciowych.

Typowa pojedyncza planarna struktura metamateriałowa SRR składa się z cienkiej warstwy metalicznej o określonym kształcie, stanowiącej rezonator, umieszczonej na podłożu dielektrycznym oraz silnie przewodzącej cienkiej metalowej płytce znajdującej się po przeciwnej stronie podłoża dielektrycznego. Zadaniem metalowej płytki w typowej pojedynczej planarnej strukturze SRR jest eliminacja transmisji promieniowania przez tę strukturę. Badana w tej pracy struktura SRR została zmodyfikowana w taki sposób, że nie posiadała metalowej płytki na swojej tylnej ścianie. Strukturę tę nazwaliśmy strukturą SRR-podłoże dielektryczne. Dzięki tej modyfikacji możliwe było wykonanie nie tylko badań współczynników absorpcji i odbicia padającego promieniowania elektromagnetycznego, ale także współczynnika transmisji promieniowania przez tę strukturę.

Schemat geometryczny badanej struktury metamateriałowej przedstawiony jest na rys. 1. Strukturę SRR stanowią dwa kwadratowe pierścienie ze szczelinami, utworzone ze ścieżek miedzianych o grubości 35µm, nałożonych na prostopadłościenną podłoże dielektryczne FR-4. Przenikalności elektryczna i magnetyczna dielektryka FR-4 wynoszą w zakresie częstotliwości od 1 GHz do 20 GHz odpowiednio $\epsilon_d^* = 4,3 - j0,11$ i $\mu_d = 1$ [10].

Wymiary struktury SRR-podłoże dielektryczne zestawione są w tabeli 1.



Rys.1. Schemat geometryczny planarnej metalicznej struktury SRR (kolor jaśniejszy) na podłożu dielektrycznym FR-4 (kolor ciemniejszy) – bez tylnej metalowej płytki

Tabela 1. Wymiary struktury SRR-podłoże dielektryczne

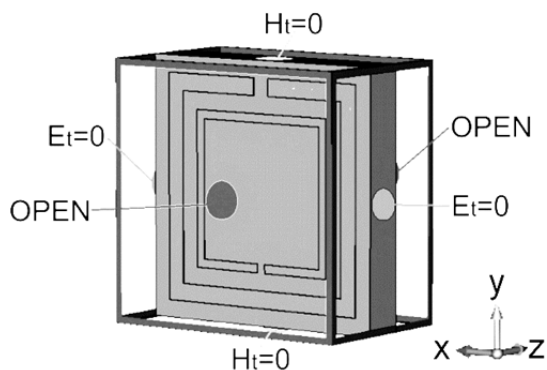
Oznaczenie	Wartość [mm]
H	5
L _{in}	22
L _{out}	26
D	1
S	2
Z	2
W	2
G	1
E	2

Właściwości elektromagnetyczne poszczególnych elementów badanej struktury SRR-podłoże dielektryczne, tj. struktury metalicznej i podłoża dielektrycznego zależą od ich geometrii (wymiarów i położenia) i właściwości materiałowych. W związku z tym należy oczekiwać, że właściwości elektromagnetyczne badanej struktury SRR-podłoże dielektryczne będą zależęć od częstotliwości padającego na nią promieniowania elektromagnetycznego.

Metoda symulacyjna

W badaniach symulacyjnych użyty został program CST Studio w wersji Student wyposażony w moduł MW&RF&Optical do obliczeń wysokoczęstotliwościowych pól elektromagnetycznych [11].

Procedura symulacyjna polegała na umieszczeniu badanej planarnej struktury metamateriałowej SRR-podłoże dielektryczne w wirtualnym torze propagacyjnym elektromagnetycznej fali płaskiej o natężeniu pola elektrycznego $E = 649,5$ V/m i natężeniu pola magnetycznego $H = 1,72$ A/m. Szkic toru propagacyjnego i przyjęte w nim warunki brzegowe przedstawiono na rys. 2.



Rys.2. Tor propagacyjny i warunki brzegowe. Kierunek propagacji wzdłuż osi z.

W ogólności promieniowanie elektromagnetyczne padające na strukturę SRR-podłoże dielektryczne zostaje

zaabsorbowane, odbite i transmitowane przez tę strukturę. W programie CST Studio, symulującym te procesy, zostają wyznaczone tzw. współczynniki macierzy rozproszenia S promieniowania padającego na strukturę SRR-podłoże dielektryczne [9]. Znając wartości współczynników macierzy rozproszenia S_{11} , S_{12} , S_{21} oraz S_{22} można obliczyć wartości współczynników absorpcji A, odbicia R i transmisji T promieniowania padającego na badaną strukturę, a następnie względne zespolone przenikalności elektryczną $\epsilon_M^* = \epsilon_M' - j\epsilon_M''$ i magnetyczną $\mu_M^* = \mu_M' - j\mu_M''$ badanej struktury, korzystając z algorytmu Nicolsona-Rossa-Weira [12]. Wielkości ϵ_M' i ϵ_M'' są odpowiednio częścią rzeczywistą i urojoną przenikalności elektrycznej, natomiast μ_M' i μ_M'' są odpowiednio częścią rzeczywistą i urojoną przenikalności magnetycznej badanej struktury.

Wyniki badań symulacyjnych

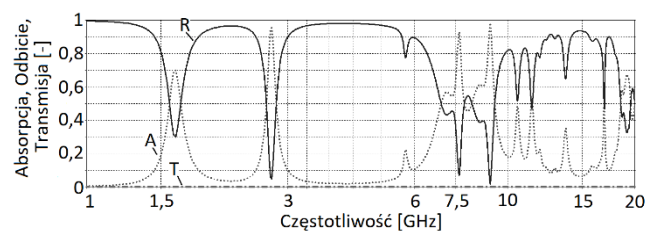
Wyniki badań symulacyjnych zaprezentowane są na rys. 3 - 5.

Na rys. 3 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe współczynników absorpcji A, transmisji T i odbicia R struktury SRR-podłoże dielektryczne w zakresie częstotliwości od 1 GHz do 20 GHz.

Z rys. 3 wynika, że w zakresie tym występują cztery stosunkowo wąskie pasma absorpcyjne badanej struktury metamateriałowej. Maksima w tych pasmach są wynikiem występowania czterech rezonansów plazmonowych, wzbudzanych na powierzchni struktury metamateriałowej przez płaskie fale elektromagnetyczne o odpowiednich częstotliwościach (1,63 GHz, 2,75 GHz, 7,7 GHz i 9 GHz). Zjawisko rezonansu plazmonowego polega na występowaniu polarytonów plazmonów powierzchniowych (SPP- ang. surface plasmon polaritons), które są poprzecznymi falami magnetycznymi rozchodzącymi się na granicy metal-dielektryk [13]. Dla powyższych częstotliwości rezonansowych współczynniki absorpcji promieniowania osiągnęły odpowiednio wartości: A = 0,7, 0,95, 0,93 i 0,98.

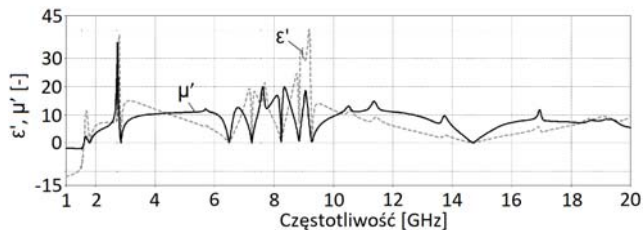
Jak wynika z rys. 3 struktura charakteryzuje się stosunkowo szerokimi pasmami częstotliwości o dużym współczynniku odbicia (powyżej R = 0,90 dla częstotliwości od około 1,85 GHz do 2,52 GHz oraz od około 2,98 GHz do 5,62 GHz).

Mimo nieużycia w badanej strukturze SRR-podłoże dielektryczne silnie przewodzącej metalowej płytki po przeciwnej stronie podłoża dielektrycznego (zwyczajowo stosowanej w tradycyjnych metamateriałach SRR), wartości współczynnika transmisji promieniowania są stosunkowo niewielkie i nie przekraczają wartości $T=6 \cdot 10^{-5}$ (rys. 3) w całym przebadanym pasmie częstotliwości, co jest zgodne z wynikami opisanymi w pracach [14, 15]. Otrzymany wynik pokazuje, że nieobecność metalowej płytki na tylnej ścianie podłoża dielektrycznego w badanej strukturze SRR-podłoże dielektryczne niewiele wpływa na właściwości transmisyjne struktury. W obu przypadkach, z płytką metalową lub bez niej właściwości transmisyjne struktury SRR są podobne.

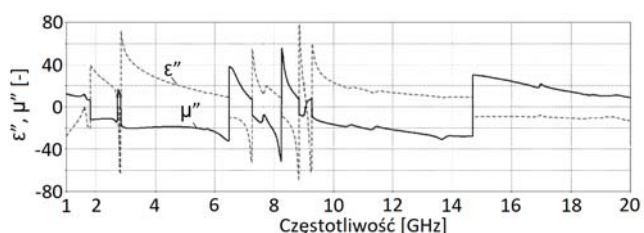


Rys. 3. Współczynniki absorpcji (A), odbicia (R) i transmisji (T) promieniowania elektromagnetycznego dla badanej struktury SRR-podłoże dielektryczne w funkcji częstotliwości

W procesie symulacyjnym obliczone zostały również części rzeczywiste i urojone współczynników przenikalności elektrycznej ϵ'_M i ϵ''_M i magnetycznej μ'_M i μ''_M . Rys. 4 przedstawia części rzeczywiste współczynników przenikalności elektrycznej ϵ'_M i magnetycznej μ'_M , natomiast rys. 5 przedstawia części urojone współczynników przenikalności elektrycznej ϵ''_M i magnetycznej μ''_M .



Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowe wyznaczonych wartości części rzeczywistych przenikalności elektrycznej ϵ' i magnetycznej μ' badanej struktury SRR-podłoże dielektryczne



Rys. 5. Charakterystyka częstotliwościowa wyznaczonych wartości części urojonych przenikalności elektrycznej ϵ'' i magnetycznej μ'' badanej struktury SRR-podłoże dielektryczne

Z rys. 4 i 5 wynika, że dla częstotliwości rezonansowych 1,63 GHz i 2,75 GHz części urojone zespolonego współczynnika przenikalności elektrycznej ϵ'' przyjmują wartości ujemne, natomiast części rzeczywiste μ' i urojone μ'' zespolonego współczynnika przenikalności magnetycznej są dodatnie. Z kolei dla częstotliwości rezonansowych 7,7 GHz i 9 GHz sytuacja jest odwrotna: części rzeczywiste ϵ' i urojone ϵ'' zespolonego współczynnika przenikalności elektrycznej przyjmują wartości dodatnie natomiast części urojone μ'' zespolonego współczynnika przenikalności magnetycznej są ujemne.

Wnioski

Charakterystyki współczynników odbicia, transmisji i absorpcji, otrzymane w wyniku wykonanej symulacji numerycznej w środowisku CST Studio wykazały, że badana struktura SRR-podłoże dielektryczne charakteryzuje się silnymi właściwościami absorpcyjno-odbiciowymi promieniowania mikrofalowego w przedziale od 1 GHz do 20 GHz. Właściwości absorpcyjne struktury SRR-podłoże dielektryczne mają charakter rezonansowy (współczynnik absorpcji jest duży dla kilku częstotliwości), natomiast właściwości odbiciowe struktury mają raczej naturę pasmową.

Wykonane badania symulacyjne umożliwiły wyznaczenie liczbowych wartości współczynników absorpcji, odbicia i transmisji dla planarnej struktury metamateriałowej SRR-podłoże dielektryczne. Współczynnik absorpcji tej struktury wynosi ponad $A = 90\%$ dla częstotliwości 2,75 GHz, 7,7 GHz oraz 9 GHz. Natomiast wartości współczynnika odbicia wynoszą powyżej $R = 0,90$ dla częstotliwości od około 1,85 GHz do 2,52 GHz oraz od około 2,98 GHz do 5,62 GHz.

Wartości współczynnika transmisji są stosunkowo niewielkie i nie przekraczają $6 \cdot 10^{-5}$ w badanym zakresie częstotliwości.

Wyniki badań pojedynczej małej struktury metamateriałowej typu SRR-podłoże dielektryczne, wykazującej silne właściwości absorpcyjne promieniowania elektromagnetycznego wskazują na to, że struktura taka może być przydatna do projektowania a następnie budowy dużych absorberów mikrofalowych.

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2022 nr projektu 006/RID/2018/19 kwota finansowania 11 870 000 zł.

Autorzy: mgr inż. Magdalena Budnarowska, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: m.budnarowska@we.umg.edu.pl;

prof. dr hab. inż. Jerzy Mizeraczyk, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: j.mizeraczyk@we.umg.edu.pl;

dr inż. Ryszard Studański, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: r.studanski@we.umg.edu.pl;

dr inż. Damian Bisewski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: d.bisewski@we.umg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Smith, D. R., Vier, D. C., Koschny, T., & Soukoulis, C. M. (2005). Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. *Physical review E*, 71(3), 036617.
- [2] Watts, C. M., Liu, X., & Padilla, W. J. (2012). Metamaterial electromagnetic wave absorbers. *Advanced materials*, 24(23), OP98-OP120.
- [3] Pendry, J. B. (2000). Negative refraction makes a perfect lens. *Physical review letters*, 85(18), 3966.
- [4] Capolino, F. (2009). Applications of metamaterials. CRC press.
- [5] Gay-Balmaz, P., & Martin, O. J. (2002). Electromagnetic resonances in individual and coupled split-ring resonators. *Journal of applied physics*, 92(5), 2929-2936.
- [6] Naoui, S., Latrach, L., & Gharsallah, A. (2016). Equivalent circuit model of double Split ring resonators. *Microw Opt Technol Lett*, 11(1), 1-6.
- [7] Lai, Y. C., Chen, C. K., Huang, T. Y., Un, I. W., Yang, Y. H., & Yen, T. J. (2011). Enriching the Symmetry of Maxwell Equations through Unprecedented Magnetic Responses of Artificial Metamaterials and Their Revolutionary Applications. *Symmetry*, 3(2), 283-304.
- [8] Singh, S. K., Azad, P., Akhtar, M. J., & Kar, K. K. (2017). High-sensitive nitrogen dioxide and ethanol gas sensor using a reduced graphene oxide-loaded double split ring resonator. *Materials Research Express*, 4(8), 086301.
- [9] Zhu, W. (2018). Electromagnetic Metamaterial Absorbers: From Narrowband to Broadband
- [10] Djordjevic, A. R., Biljić, R. M., Likař-Smiljanic, V. D., & Sarkar, T. K. (2001). Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 43(4), 662-667
- [11] www.cst.com
- [12] Rothwell, E. J., Frasca, J. L., Ellison, S. M., Chahal, P., & Ouedraogo, R. O. (2016). Analysis of the Nicolson-Ross-Weir method for characterizing the electromagnetic properties of engineered materials. *Progress In Electromagnetics Research*, 157, 31-47
- [13] Singh, S. K., Azad, P., Akhtar, M. J., & Kar, K. K. (2017). High-sensitive nitrogen dioxide and ethanol gas sensor using a reduced graphene oxide-loaded double split ring resonator. *Materials Research Express*, 4(8), 086301
- [14] Bayindir, M., Aydin, K., Ozbay, E., Markoš, P., & Soukoulis, C. M. (2002). Transmission properties of composite metamaterials in free space. *Applied Physics Letters*, 81(1), 120-122
- [15] Markoš, P., & Soukoulis, C. M. (2002). Numerical studies of left-handed materials and arrays of split ring resonators. *Physical Review E*, 65(3), 036622