

Oddziaływanie płaskiej fali elektromagnetycznej z metapowierzchnią złożoną z rezonatorów SRR 2,5 GHz

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki numerycznej symulacji oddziaływania płaskiej fali elektromagnetycznej z metapowierzchnią zbudowaną z pojedynczych rozszczepionych rezonatorów pierścieniowych SRR (Split-Ring Resonator) o częstotliwości rezonansowej 2,5 GHz (znajdującej się m.in. w paśmie LTE/WiFi obecnym w środowisku elektromagnetycznym). Obliczenia numeryczne wykonano w środowisku CST Studio dedykowanym rozwiązywaniu zagadnień pola elektromagnetycznego. Symulacje oddziaływania płaskiej fali elektromagnetycznej z metapowierzchnią SRR wykonano dla odległości między pojedynczymi strukturami metamateriałowymi SRR wynoszącej $\lambda/20$, gdzie $\lambda = 119,916$ mm (odpowiadającej częstotliwości $f = 2,5$ GHz). W symulacji zastosowano nowe wizualizacyjne podejście do analizy i sposobu opisu oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z badaną strukturą metamateriałową. Obliczenia współczynników absorpcji, odbicia i transmisji płaskiej fali elektromagnetycznej padającej na metapowierzchnię SRR wykazały, że powierzchnia metamateriałowa SRR jest strukturą silnie odbijającą promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości równej częstotliwości rezonansu magnetycznego struktury. Obliczenia te zostały potwierdzone przez wizualizację zjawiska odbicia płaskiej fali elektromagnetycznej od metapowierzchni SRR. Zastosowana w tej pracy metoda numeryczna wydaje się być atrakcyjna dla wizualizacyjnego sposobu opisu zjawisk elektromagnetycznych w metamateriałach.

Abstract. Results of the numerical simulation of the interaction of a plane electromagnetic wave with a metasurface consisting of split-ring resonator (SRR) unit cells of a resonant frequency $f = 2.5$ GHz (located, among others, in the LTE / WiFi band present in the electromagnetic environment) are presented in this paper. The numerical calculations were performed using the CST Studio solver dedicated to solving electromagnetic problems. The simulations of the interaction of the plane electromagnetic wave with the SRR metasurface were performed for a distance between the SRR metamaterial unit cells equal to $\lambda/20$, where $\lambda = 119.916$ mm (corresponding to $f = 2.5$ GHz). A new visualization approach has been introduced in this work to present effects of the interaction of the electromagnetic radiation with the metamaterial structure. The calculations of the absorption, reflection and transmission coefficients of the incident plane electromagnetic wave showed that the SRR metasurface strongly reflects the plane electromagnetic wave at a frequency equal to the magnetic resonance frequency of the SRR metasurface. These calculations were confirmed by visualizing the phenomenon of plane electromagnetic wave reflection from the SRR metasurface. The numerical method used in this work seems to be attractive for the visualization of the electromagnetic phenomena in metamaterials. (**The numerical simulation of the interaction of a plane electromagnetic wave with a metasurface consisting of split-ring resonator**)

Słowa kluczowe: rezonator, metamateriały, harvester elektromagnetyczny, pole elektromagnetyczne, metapowierzchnia, wizualizacja komputerowa.

Keywords: resonator, metamaterials, harvester, electromagnetic field, metasurface, computer visualization.

Wprowadzenie

W ostatnim trzyletniu ogromny wysiłek badawczy ukierunkowany był na metamateriały z powodu ich niezwykle oddziaływania z falami elektromagnetycznymi (także akustycznymi). W roku 2003 Science zaliczył metamateriały do 10 największych przełomowych odkryć naukowych dziesięciolecia. Obecnie metamateriały są nadal jedną z najszybciej rozwijających się tematów badawczych.

Metamateriały są sztucznie wytworzonymi strukturami materiałowymi składającymi się z pojedynczych komórek (unit cells) o wymiarach mniejszych od długości fali elektromagnetycznej, z którą dany metamateriał ma oddziaływać. Wykazują zupełnie inne właściwości elektromagnetyczne niż materiały występujące w środowisku naturalnym. Niezwykłe właściwości elektromagnetyczne metamateriałów wynikają z właściwości ich komórek składowych oraz zbudowanej z nich struktury. Struktury metamateriałowe mogą występować w postaci 2-wymiarowej jako tzw. powierzchnie metamateriałowe (metapowierzchnie) lub w postaci 3-wymiarowej o różnej geometrii przestrzennej. Właściwości elektromagnetyczne struktur metamateriałowych zależą głównie od ich kształtu, geometrii, wymiarów i parametrów materiałowych oraz stosunku wymiaru charakterystycznego pojedynczej struktury metamateriałowej do długości fali elektromagnetycznej.

Niespotykanymi w naturze właściwościami elektromagnetycznymi metamateriałów są ujemny współczynnik załamania fali [1, 2], sztuczny magnetyzm [3], superogniskowanie fali [4] i elektromagnetyczne maskowanie (cloaking) [5]. Lista aktualnych i potencjalnych zastosowań tych właściwości jest długa (np. [6-12]). Metamateriały znajdują zastosowanie w różnych

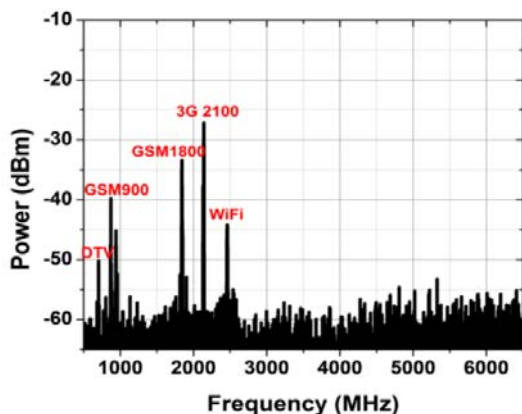
dziedzinach, m.in. w infrastrukturze bezpieczeństwa publicznego, telekomunikacji wysokoczęstotliwościowej, detekcji sensorowej, technice falowodowej i antenowej, w energetyce solarnej itd. Nową dziedziną, w której znajdują zastosowanie metamateriały jest pozyskiwanie energii ze środowiska w ramach niezwykle dynamicznie rozwijającej się technologii bezprzewodowego transferu energii (WPT - Wireless Power Transfer). Technologia ta korzysta z różnych rodzajów energii występujących w środowisku, począwszy od energii słonecznej i energii cieplnej poprzez energię kinetyczną aż do energii fal elektromagnetycznych (głównie radiowych i mikrofalowych).

W ostatnich czasach udział energii elektromagnetycznej w bezprzewodowym transferze energii znacznie rośnie. Rys. 1 przedstawia widmo mocy pola elektromagnetycznego w kampusie Uniwersytetu Xidian w Chinach. Wynika z niego, że energia pola elektromagnetycznego w tym środowisku osiąga największe wartości na częstotliwościach, na których pracują systemy komunikacji bezprzewodowej LTE/WiFi [13]. Te wszechobecne źródła energii stanowią ogromny zasób ogólnie dostępnej energii elektromagnetycznej. Strukturami zdolnymi do pozyskiwania tej energii są m.in. metamateriały elektromagnetyczne [14, 15].

Aktualnie nasze zainteresowania naukowe ukierunkowane są na badania przydatności metapowierzchni zbudowanych z pojedynczych struktur metamateriałowych SRR [16] do pozyskiwania energii elektromagnetycznej ze środowiska. Zajmujemy się metapowierzchniami złożonymi z pojedynczych struktur SRR o tak dobranych wymiarach, aby ich rezonans magnetyczny (ujemna wartość μ) [17] występował na częstotliwości mikrofalowej równej około 2,5 GHz. Jak widać z rys. 1 w zakresie częstotliwości około 2,5 GHz

dostępny jest zasób energii elektromagnetycznej (kilka mW/m²), którą można pozyskać ze środowiska LAN/WiFi.

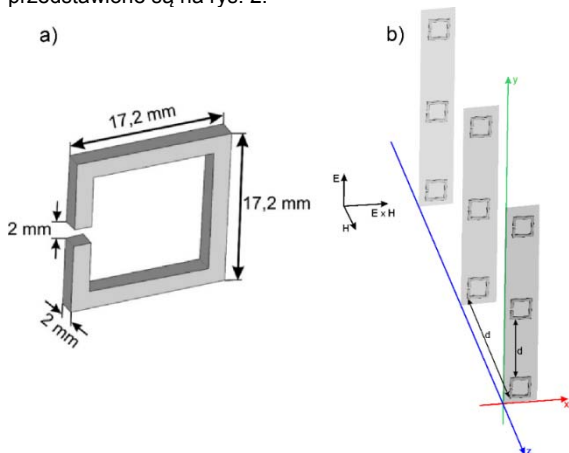
Istnieje bogata literatura [np. 18-21] przedstawiająca wyniki wieloaspektowych badań metamateriałowych struktur SRR. W niniejszej pracy przedstawiamy wyniki komputerowej symulacji wizualizacji oddziaływania płaskiej fali elektromagnetycznej z metapowierzchnią SRR. W bogatej literaturze dotyczącej metamateriałowych struktur SRR nie znaleźliśmy podobnego sposobu analizy i opisu oddziaływania fali elektromagnetycznej z tymi strukturami.



Rys. 1. Widmo mocy pola elektromagnetycznego w kampusie Uniwersytetu Xidian w Chinach [1]

Wybrana struktura metamateriałowa

Geometryczny schemat pojedynczej struktury SRR oraz poglądowe położenie metapowierzchni SRR w przestrzeni przedstawione są na rys. 2.



Rys. 2. Schemat geometryczny pojedynczej struktury SRR (a) oraz poglądowe położenie metapowierzchni SRR w przestrzeni (b); d – odległość między pojedynczymi strukturami SRR w przestrzeni. Płaska fala elektromagnetyczna propaguje w kierunku + x. Wektor pola elektrycznego E skierowany jest w kierunku y.

Typową dla metamateriałów pojedynczą strukturą SRR jest metalowy pierścień ze szczeliną, który jako element elektromagnetyczny jest rezonatorem magnetycznym [17]. W naszych badaniach pojedynczym pierścieniem SRR była struktura o przekroju kwadratowym, wykonana z drutu o nieskończenie wielkiej przewodności (tzw. Perfect Electric Conductor - PEC) – rys. 2a. Przekrój drutu był kwadratem o boku 2 mm. Długość ramienia struktury SRR wynosiła 17,2 mm. Szczelina w pierścieniu SRR wykonana została na środku jednego z jego ramion. Szerokość szczeliny wynosiła 2 mm.

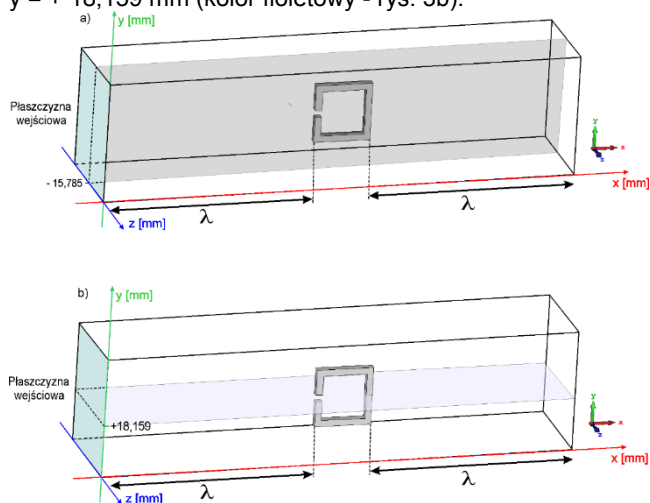
W badanej metapowierzchni SRR odległości między pojedynczymi strukturami SRR wynosiły $d = \lambda/20$, gdzie długość fali $\lambda = 119,916$ mm, odpowiadała wybranej częstotliwości rezonansowej $f = 2,5$ GHz (rys. 2b).

Metoda symulacyjna

W badaniach symulacyjnych zastosowano program CST Studio wyposażony w moduł MW&RF&Optical do modelowania i kompleksowych symulacji wysokoczęstotliwościowych pól elektromagnetycznych obiektów 3D [22].

Elektromagnetyczna fala płaska padająca na metapowierzchnię może zostać przez nią zaabsorbowana, odbita i przetransmitowana. Program CST studio umożliwi ilościową symulację tych procesów poprzez wyznaczenie tzw. współczynników macierzy rozproszenia S promieniowania padającego na badaną metapowierzchnię. 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 fali płaskiej padającej na metapowierzchnię [23-26].

Procedura symulacyjna wizualizacji oddziaływania pola elektromagnetycznego z metapowierzchnią SRR polegała na umieszczeniu pojedynczej struktury SRR w komórce obliczeniowej o wymiarach x (- 110,442 mm, + 146,761 mm), y (+ 6,567, + 29,751 mm) i z (- 19,775 mm, - 11,795 mm) - rys. 3. W programie CST Studio pojedyncza struktura SRR została zmnożona w osiach y i z, tworząc wirtualną metapowierzchnię SRR (rys. 2b). W zmnożonej strukturze SRR odległości między pojedynczymi rezonatorami SRR wynosiły $\lambda/20$, przy czym $\lambda = 119,916$ mm (odpowiadająca częstotliwości $f = 2,5$ GHz). Następnie przystąpiono do symulacji reakcji metapowierzchni SRR na działanie płaskiej fali elektromagnetycznej w zakresie częstotliwości od 0 GHz do 4 GHz. W tym celu w płaszczyźnie wejściowej komórki obliczeniowej x = - 110,442 mm umieszczono falę płaską o mocy 1 W (natężenie pola elektrycznego $E = 1427$ V/m, natężenie pola magnetycznego $H = 3,788$ A/m), propagującą w kierunku + x (rys. 3). Długość komórki obliczeniowej w kierunku x obejmowała jedną długość fali λ przed czołem i za tylną ścianą metapowierzchni. Wynikiem symulacji były rozkłady pola elektrycznego E i pola magnetycznego H w przestrzeni 3D od x = - 110,442 mm do x = + 146,761 mm. W niniejszej publikacji przedstawiamy jedynie rozkłady pola elektrycznego w płaszczyźnie xy dla z = - 15,785 mm (kolor szary - rys. 3a) i pola magnetycznego w płaszczyźnie xz dla y = + 18,159 mm (kolor fioletowy - rys. 3b).

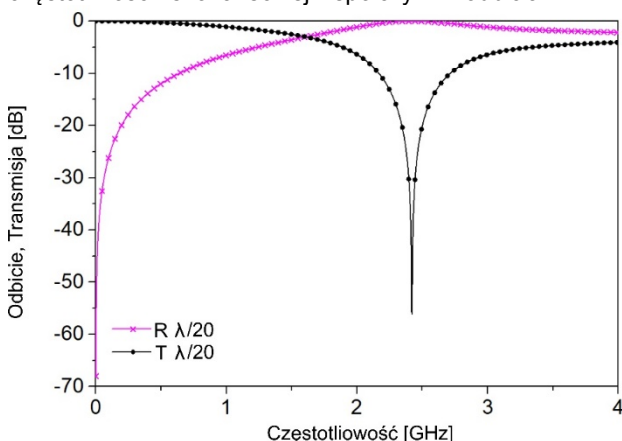


Rys. 3. Komórki obliczeniowe oraz płaszczyzny, w których na rys. 5 i rys. 6 zaprezentowano rozkłady pola elektrycznego E (płaszczyzna xy - (a)) i pola magnetycznego H (płaszczyzna xz - (b))

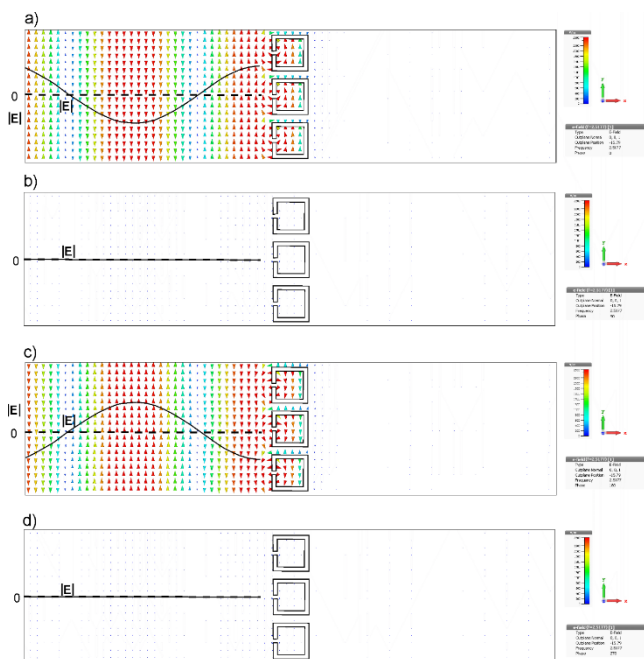
Wyniki badań symulacyjnych

Wyniki badań symulacyjnych zaprezentowane są na rys. 4, 5 i 6. Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe współczynników odbicia R i transmisji T badanej metapowierzchni SRR w zakresie częstotliwości od 0 do 4 GHz. Współczynnik absorpcji A badanej metapowierzchni wynosi zero w całym przebadanym paśmie częstotliwości.

Z rys. 4 wynika, że w zakresie od 0 do 4 GHz występuje jedno pasmo odbiciowe badanej metapowierzchni. Maksimum współczynnika transmisji T fali elektromagnetycznej w tym paśmie, wynoszące praktycznie zero, jest wynikiem występowania rezonansu magnetycznego wywołanego przez płaską falę elektromagnetyczną o częstotliwości 2,5177 GHz. Dla częstotliwości rezonansowej współczynnik odbicia R = 1.



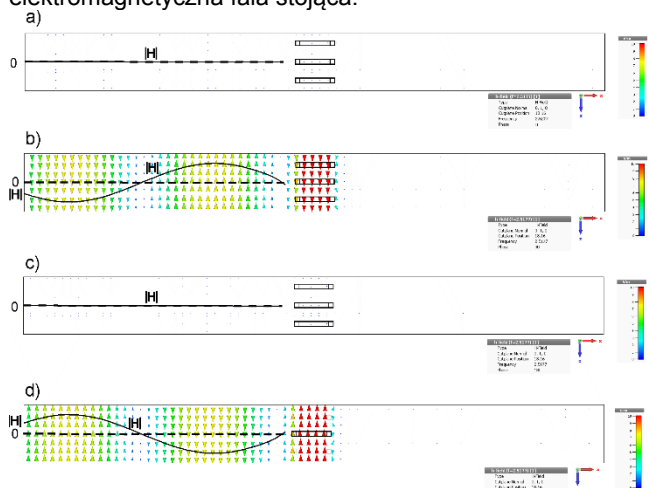
Rys. 4. Współczynniki odbicia R i transmisji T płaskiej fali elektromagnetycznej oddziaływającej z metapowierzchnią SRR w funkcji częstotliwości



Rys. 5. Rozkład natężenia pola elektrycznego E w płaszczyźnie xy dla $z = -15,785$ mm dla częstotliwości $f = 2,5177$ GHz odpowiadającej rezonansowi magnetycznemu. Odległość między strukturami d wynosi $\lambda/20 = 5,996$ mm (λ odpowiada częstotliwości $f = 2,5$ GHz). Płaska fala elektromagnetyczna propaguje w kierunku +x. Faza 0° (a), faza 90° (b), faza 180° (c) i faza 270° (d). Linie ciągłe przed strukturą SRR przedstawiają moduł natężenia pola elektrycznego |E| dla różnych faz (typowe zachowanie się fali stojącej).

Całkowite odbicie płaskiej fali elektromagnetycznej od metapowierzchni SRR dla częstotliwości rezonansowej $f = 2,5177$ GHz (rys. 4) sugeruje, że metapowierzchnia SRR oddziałuje z padającą na nią płaską falą elektromagnetyczną podobnie jak nieskończenie wielka płaszczyzna z doskonałego przewodnika, czyli całkowicie odbija falę padającą. Wiadomo, że w wyniku oddziaływania fali płaskiej z płaszczyzną metalową powstaje fala stojąca w obszarze przed płaszczyzną metalową jako rezultat nałożenia się fali padającej i odbitej. A zatem, wykonana przez nas w tej pracy symulacja wizualizacji oddziaływania elektromagnetycznej fali płaskiej z metapowierzchnią SRR powinna potwierdzić istnienie fali stojącej w obszarze przed metapowierzchnią SRR.

Z rozkładów pola elektrycznego w płaszczyźnie xy i pola magnetycznego w płaszczyźnie xz zaprezentowanych na rys. 5 i 6 wynika, że dla częstotliwości $f = 2,5177$ GHz odpowiadającej rezonansowi magnetycznemu następuje całkowite odbicie fali padającej od metapowierzchni SRR. Za metapowierzchnią SRR natężenie promieniowania elektromagnetycznego wynosi praktycznie zero. Natomiast przed badaną metapowierzchnią SRR powstaje elektromagnetyczna fala stojąca.



Rys. 6. Rozkład natężenia pola magnetycznego H w płaszczyźnie xz dla $y = +18,159$ mm dla częstotliwości $f = 2,5177$ GHz odpowiadającej rezonansowi magnetycznemu. Odległość między strukturami d wynosi $\lambda/20 = 5,996$ mm (odpowiadająca częstotliwości $f = 2,5$ GHz). Płaska fala elektromagnetyczna pada w kierunku +x. Faza 0° (a), faza 90° (b), faza 180° (c) i faza 270° (d). Linie ciągłe przed strukturą SRR przedstawiają moduł natężenia pola magnetycznego |H| dla różnych faz (typowe zachowanie się fali stojącej).

A zatem, wykonana symulacja wizualizacji oddziaływania płaskiej fali elektromagnetycznej z metapowierzchnią SRR potwierdza fakt całkowitego odbicia fali od metapowierzchni SRR dla częstotliwości rezonansowej. Poza tym potwierdza kumulację pól elektrycznego i magnetycznego we wnętrzu pojedynczych komórek SRR. Jest to atrakcyjna cecha metapowierzchni SRR, biorąc pod uwagę analizowaną przez nas przydatność struktury SRR jako harwestera energii elektromagnetycznej.

Wnioski

Rozkłady pola elektrycznego i pola magnetycznego otrzymane w wyniku wykonanej symulacji numerycznej w środowisku CST Studio wykazały, że badana metapowierzchnia złożona z pojedynczych struktur SRR charakteryzuje się silnymi właściwościami elektromagnetycznymi o charakterze rezonansowym.

Wykonane badania symulacyjne umożliwiły

wyznaczenie częstotliwości rezonansu magnetycznego metastruktury SRR dla odległości między pojedynczymi strukturami SRR wynoszącymi $d = \lambda/20$ dla $\lambda = 119,916$ mm ($f = 2,5$ GHz). Rezonans magnetyczny badanej metastruktury SRR występuje na częstotliwości $f = 2,5177$ GHz.

Jak wykazały obliczenia współczynników absorpcji, odbicia i transmisji, badana metapowierzchnia SRR całkowicie odbija padającą na nią płaską falę elektromagnetyczną o częstotliwości rezonansowej, podobnie jak nieskończenie duża płaszczyzna z doskonałego przewodnika. Z tą różnicą, że w przypadku nieskończenie dużej płaszczyzny z doskonałego przewodnika nie jest to zjawisko rezonansowe.

Zjawisko całkowitego odbicia płaskiej fali elektromagnetycznej od metapowierzchni SRR na częstotliwości rezonansu magnetycznego zostało potwierdzone przez wykonaną przez nas komputerową symulację zjawiska oddziaływania fali płaskiej z metapowierzchnią SRR. Metoda ta wydaje się być atrakcyjna jako wizualizacyjny sposób opisu zjawisk elektromagnetycznych w metamateriałach.

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;

LITERATURA

- [1] V.G. Veselago. (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , Sov Phys. Usp., 10, 509-514.
- [2] ShalaeV, V. M. (2007). Optical negative-index metamaterials. Nature photonics, 1(1), 41-48.
- [3] Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 47(11), 2075-2084.
- [4] Pendry, J. B. (2000). Negative refraction makes a perfect lens. Physical review letters, 85(18), 3966.
- [5] Linden, S., Enkrich, C., Wegener, M., Zhou, J., Koschny, T., & Soukoulis, C. M. (2004). Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz. Science, 306(5700), 1351-1353.
- [6] Capolino, F. (2017). Applications of metamaterials. CRC press.
- [7] Rukhlenko, I. D., Belov, P. A., Litchinitser, N. M., & Boltasseva, A. (2012). Modern trends in metamaterial applications. Adv. OptoElectron, 2012, 514270.
- [8] Gangwar, K., & Gangwar, R. P. S. (2014). Metamaterials: Characteristics, process and applications. Advance in Electronic and Electric Engineering, 4(1), 97-106.
- [9] Singh, G., & Marwaha, A. (2015). A review of metamaterials and its applications.
- [10] Buriak, I. A., Zhurba, V. O., Vorobjov, G. S., Kulizhko, V. R., Kononov, O. K., & Rybalko, O. (2016). Metamaterials: Theory, classification and application strategies. Журнал нано-та електронної фізики, (8, № 4 (2)), 04088-1.
- [11] R. Uppal. (2018). Metamaterials promise simple machines, superlenses, superfast optical networks, EMI suppression and wireless charging. <https://idstch.com/technology/materials/metamaterials-promise-simple-machines-superlenses-superfast-optical-networks-emi-suppression-wireless-charging/>.
- [12] Jung, J., Park, H., Park, J., Chang, T., & Shin, J. (2020). Broadband metamaterials and metasurfaces: a review from the perspectives of materials and devices. Nanophotonics, 1(ahead-of-print).
- [13] Zhang, X., Liu, H., & Li, L. (2018). Electromagnetic power harvester using wide-angle and polarization-insensitive metasurfaces. Applied Sciences, 8(4), 497.
- [14] Almoneef, T. S., & Ramahi, O. M. (2015). Metamaterial electromagnetic energy harvester with near unity efficiency. Applied Physics Letters, 106(15), 153902.
- [15] Almoneef, T. S., & Ramahi, O. M. (2015). Metamaterial electromagnetic energy harvester with near unity efficiency. Applied Physics Letters, 106(15), 153902.
- [16] Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., & Schultz, S. (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Physical review letters, 84(18), 4184.
- [17] Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S. (2001). Experimental verification of a negative index of refraction. science, 292(5514), 77-79.
- [18] Padilla, W. J., Taylor, A. J., Highstrete, C., Lee, M., & Averitt, R. D. (2006). Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies. Physical review letters, 96(10), 107401.
- [19] Marqués, R., Mesa, F., Martel, J., & Medina, F. (2003). Comparative analysis of edge-and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design-theory and experiments. IEEE Transactions on antennas and propagation, 51(10), 2572-2581.
- [20] Liu, N., Guo, H., Fu, L., Kaiser, S., Schweizer, H., & Giessen, H. (2008). Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies. Nature materials, 7(1), 31-37.
- [21] Klein, M. W., Enkrich, C., Wegener, M., & Linden, S. (2006). Second-harmonic generation from magnetic metamaterials. Science, 313(5786), 502-504.
- [22] www.cst.com.
- [23] Kim, Y. J., Yoo, Y. J., Kim, K. W., Rhee, J. Y., Kim, Y. H., & Lee, Y. (2015). Dual broadband metamaterial absorber. Optics express, 23(4), 3861-3868.
- [24] Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. (2008). Perfect metamaterial absorber. Physical review letters, 100(20), 207402.
- [25] Liu, X., Zhao, Q., Lan, C., & Zhou, J. (2013). Isotropic Mie resonance-based metamaterial perfect absorber. Applied Physics Letters, 103(3), 031910.
- [26] Xiong, X., Jiang, S. C., Hu, Y. H., Peng, R. W., & Wang, M. (2013). Structured metal film as a perfect absorber. Advanced Materials, 25(29), 3994-4000.