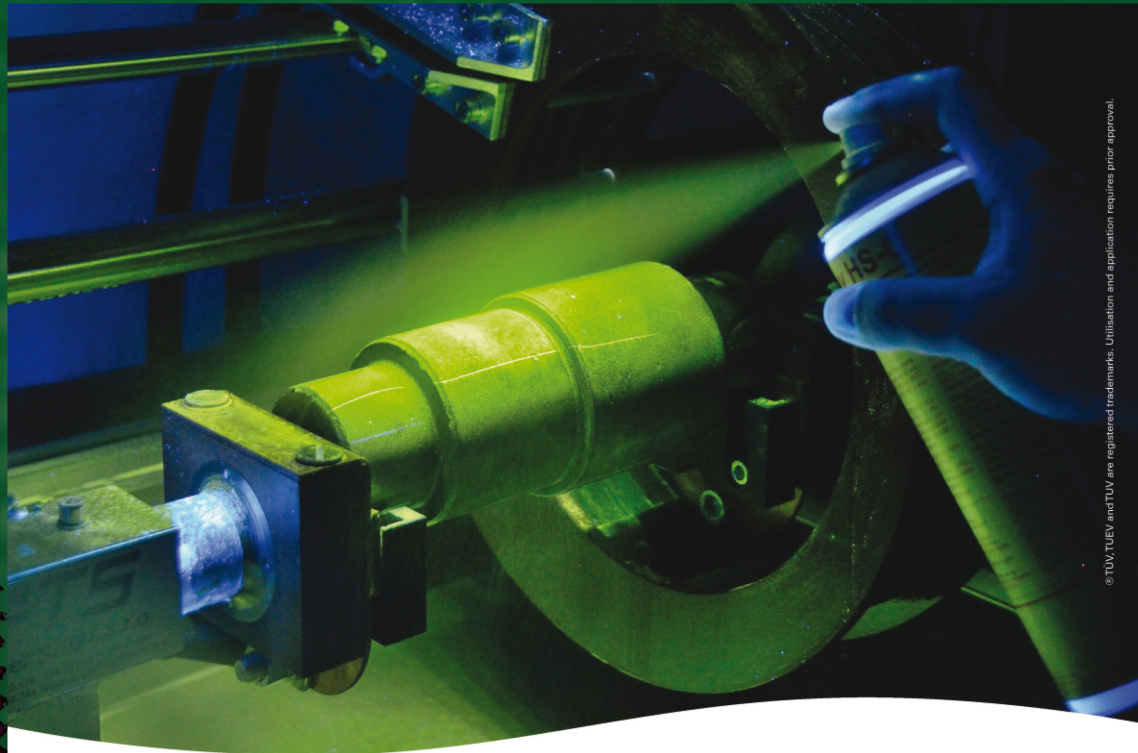


Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2020 i Diagnostyka

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics



© TÜV, TÜV and TÜV are registered trademarks. Utilisation and application requires prior approval.

Szkolenia, egzaminy
i certyfikacja personelu NDT



AC 195



VT



MT



PT



UT



RT



ET

NOWOŚĆ – SZKOLENIA DOFINANSOWANE!

www.tuv.pl

 **TÜVRheinland®**
Precisely Right.



Badania Nieniszczące i Diagnostyka
Agenda Wydawnicza SIMP
ul. Sabaly 11a, 71-341 Szczecin
e-mail: wydawnictwo@ptbnid.pl
www.bnid.pl

ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF

Tomasz Chady

Z-CA REDAKTORA NACZELNEGO DS. NAUKOWYCH /

DEPUTE EDITOR-IN-CHIEF OF SCIENTIFIC AFFAIRS

Jerzy Nowacki

Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF

Adam Sajek

Ryszard Pakos

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY

Dr Sławomir Mackiewicz, Dr Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH

Mgr Bogdan Piekarczyk, Mgr Marta Wojas

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ

/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH

Dr Grzegorz Jezierski, Mgr Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ

/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH

Dr Krzysztof Dragan, Mgr Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS

Dr Bogusław Ładecki,

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Ryszard Sikora, *Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Przewodniczący/President*

Prof. Krishnan Balasubramaniam, *Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India*

Prof. Alexander Balitskii, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Gilmar F. Batalha, *University of Sao Paulo, Brasil*

Prof. Leonard J. Bond, *Iowa State University, USA*

Dr Pierre Calmon, *CEA, France*

Prof. Ermanno Cardelli, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Zhenmao Chen, *Xi'an Jiaotong University, China*

Prof. Leszek A. Dobrzański, *World Academy of Materials and Manufacturing Eng., Polska*

Dr Hubert Drzeniek, *AMIL Werkstofftechnologie GmbH, Germany*

Prof. Antonio Faba, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Nikolaos Gouskos, *University of Athens, Greece*

Mgr Paweł Grześkowiak, *UDT, Polska*

Prof. Jerzy Hoła, *Politechnika Wrocławska, Polska*

Prof. Jolanta Janczak-Rusch, *Empa, Switzerland*

Mgr Ryszard Jawor, *Ryszard Jawor Usługi NDT, Polska*

Dr Grzegorz Jezierski, *Politechnika Opolska, Polska*

Inż. Sławomir Józwiak, *NDT Systems, Polska*

Mgr Pablo Katchadjian, *National Atomic Energy Commission of Argentina, Argentina*

Mgr Jan Kielczyk, *Energomontaż-Północ, Polska*

Mgr Jacek Kozłowski, *TEST PLB, Polska*

Prof. Marc Kreutzbruck, *University of Stuttgart, Germany*

Dr. Jochen Kurz, *DB Systemtechnik GmbH, Germany*

Mgr Marek Lipnicki, *KOLI, Polska*

Prof. Leonid M. Lobanow, *Paton Welding Institute, Ukraine*

Dr Sławomir Mackiewicz, *NDT SOFT, Polska*

Dr Wojciech Manaj, *Instytut Lotnictwa, Polska*

Dr Tadeusz Morawski, *Usługi Techniczne i Ekonomiczne "Level", Polska*

Prof. Zinovy T. Nazarchuk, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Dr Ryszard Nowicki, *GE Energy, Polska*

Prof. Mohachiro Oka, *Oita National College of Technology, Japan*

Dr Jolanta Radziszewska-Wolińska, *Instytut Kolejnictwa, Polska*

Prof. Helena Maria Geirinhas Ramos, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Joao M A Rebello, *Federal University of Rio de Janeiro, Brasil*

Prof. Artur Lopes Ribeiro, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Maria Helena Robert, *University of Campinas, Brasil*

Dr hab. Maciej Roskosz, *Politechnika Śląska, Polska*

Prof. Leonard Runkiewicz, *Instytut Techniki Budowlanej, Polska*

Prof. Krzysztof Schabowicz, *Politechnika Wrocławska, Polska*

Prof. Valentyn R. Skalskyy, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Jacek Stania, *Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, Polska*

Prof. Jacek Szelażek, *IPPT PAN, Polska*

Prof. Andrzej Szymański, *Politechnika Śląska, Polska*

Dr Marek Śliwowski, *NDTEST Warszawa, Polska*

Prof. Antonello Tamburrino, *University of Cassino and Southern Lazio, Italia*

Prof. Yuji Tsuchida, *Oita University, Japan*

Prof. Andrzej Tytko, *AGH Kraków, Polska*

Prof. Lalita Udpa, *Michigan State University, USA*

Prof. Gábor Vértessy, *Hungarian Academy of Sciences, Hungary*

Dr Grzegorz Wojas, *UDT, Polska*

Prof. Sławomir Wronka, *Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska*

Prof. Chunguang Xu, *Beijing Institute of Technology, China*

Prof. Noritaka Yusa, *Tohoku University, Japan*

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 1-4/2020

ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755)

VOLUMEN 5

SPIS TREŚCI

Redakcja BNiD

Słowo wstępne 2

Dariusz WOJDAŁA

48. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących 5

Gerd DOBMANN

Quo Vadis NDT? – A Forecast of the Future* 6

Tadeusz STEPINSKI

Badanie kotew kopalnianych przy użyciu fal prowadzonych* 18

Bogusław ŁADECKI

Przedwczesne uszkodzenie zmęczeniowe wału ze stali nierdzewnej
gatunku X46Cr13* 28

Przemysław ŁOPATO, Michał HERBKO

Badanie wpływu mechanicznego odkształcenia metapowierzchni bazującej
na komplementarnym rezonatorze pierścieniowym na jej właściwości
rezonansowe w zakresie mikrofalowym i terahercowym* 32

Bogusław ŁADECKI

Badania diagnostyczne przyczyn awarii wytłaczarki przemysłowej
do tworzyw sztucznych $\varnothing 90^*$ 38

Informacje dla Autorów i Czytelników 42

* Artykuł recenzowany

REKLAMY NA OKŁADCE

TÜV Rheinland 1

TÜV Rheinland 43

REKLAMY W NUMERZE

49. KKBN 4

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiD



Przemysław Łopato*, Michał Herbko

Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Badanie wpływu mechanicznego odkształcenia metapowierzchni bazującej na komplementarnym rezonatorze pierścieniowym na jej właściwości rezonansowe w zakresie mikrofalowym i terahercowym

Investigation of the impact of mechanical deformation of a complementary ring resonator based metasurface on its resonance properties in microwave and terahertz frequency range

STRESZCZENIE

Metamateriały znajdują coraz większe zastosowanie w wielu gałęziach nauki i przemysłu. Składają się z matrycy elementów strukturalnych (komórek) o wymiarach kilkukrotnie mniejszych niż długość fali elektromagnetycznej, przy jakiej mają pracować. Ich unikalne właściwości rezonansowe można stosunkowo łatwo kontrolować przez odpowiednie zaprojektowanie geometrii elementów strukturalnych. Odstępstwa od tej geometrii wpływają na stan rezonansu, co może być wykorzystane do określenia np. stopnia deformacji. W niniejszej pracy przeanalizowano wpływ odkształcenia metapowierzchni powodowanego przez zewnętrzne wymuszenie mechaniczne (rozciąganie) na rezonansową charakterystykę częstotliwościową w zakresie mikrofalowym i terahercowym. Opracowano modele numeryczne metapowierzchni o elemencie strukturalnym w postaci rezonatora z rozdzielonymi pierścieniami (ang. split ring resonator, SRR) oraz określono zmiany częstotliwości rezonansowych wywołane działaniem zewnętrznej siły rozciągającej. Uzyskane liniowe zależności pomiędzy zmianą częstotliwości a stopniem deformacji struktury metapowierzchni pozwalają na wykorzystanie w przyszłości tej technologii w bezprzewodowym monitoringu strukturalnym (ang. structural health monitoring, SHM).

Słowa kluczowe: fale elektromagnetyczne; metapowierzchnia; rezonator z rozdzielonymi pierścieniami (SRR); deformacja; monitoring strukturalny (SHM).

ABSTRACT

Metamaterials are increasingly used in many branches of science and industry. They consist of a matrix of cells / elements with dimensions several times smaller than the operating wavelength. Their unique resonance properties can be relatively easily controlled by properly designing the geometry of their structural elements (cells). Deviations from this geometry affect the state of resonance which can be used to determine the degree of deformation. In this work, the effect of metasurface deformation caused by external mechanical excitation (stretching) on the resonance frequency in the microwave and terahertz range has been analyzed. Numerical models of the metasurfaces with a structural element in the form of split ring resonators (SRR) were developed and changes in resonance frequencies caused by external tensile force were determined. Obtained linear relationships between the change in frequency and the degree of deformation of the metasurface structure allow for the use of this technology in the future in wireless structural health monitoring (SHM).

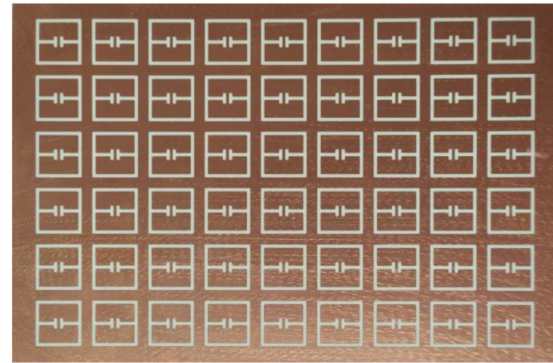
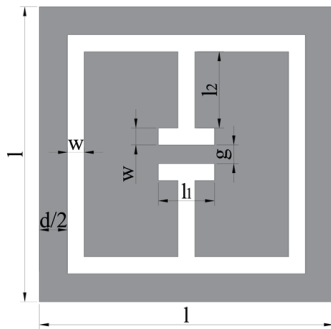
Keywords: electromagnetic waves; metasurface; split ring resonator (SRR); deformation; structural health monitoring (SHM).

1. Wstęp

Zastosowanie metamateriałów w różnych dziedzinach nauki i techniki stało się coraz bardziej popularne. Tym sposobem implementowane są urządzenia pasywne w technice mikrofalowej, terahercowej i optycznej. Metamateriały wykorzystywane już były do projektowania selektywnych filtrów, absorberów promieniowania

elektromagnetycznego w powyższych zakresach częstotliwościowych, polaryzatorów, soczewek, anten i różnego rodzaju czujników, w tym przetworników do badań nieniszczących [1-6]. Jednakże ciekawe i nie do końca zbadane właściwości metamateriałów skłaniają do poszukiwania innych potencjalnych zastosowań.

*Autor korespondencyjny. E-mail: plopat@zut.edu.pl



Rys. 1. Badana metapowierzchnia: wymiary komplementarnego elementu strukturalnego (lewa strona) oraz zdjęcie metapowierzchni dla zakresu mikrofalowego (prawa strona).

Fig. 1. Evaluated metasurface: structural element dimensions (left side) and photo of the microwave range metasurface (right side).

Metamateriały to struktury sztuczne, stworzone przez człowieka, które umożliwiają uzyskanie właściwości materiałowych niewystępujących w naturze, np. ujemny współczynnik refrakcji n , a w konsekwencji ujemne przenikalności elektryczne ϵ_r i magnetyczne μ_r [7-9]. Składają się z 2- lub 3-wymiarowej matrycy elementów strukturalnych (komórek) o wymiarach kilkunastokrotnie mniejszych niż długość fali elektromagnetycznej, przy jakiej mają pracować. Ich unikalne właściwości rezonansowe można stosunkowo łatwo kontrolować przez odpowiednie zaprojektowanie geometrii elementów strukturalnych.

Ze względu na uproszczony proces wytwarzania, szczególnie struktury płaskie zwane metapowierzchniami (ang. metasurfaces, MS), podlegają bardzo szybkiemu rozwojowi. W literaturze istnieje wiele badań dotyczących właściwości różnych metapowierzchni, ale niewiele jest prac związanych z analizą wpływu deformacji konstrukcji na ich właściwości [10-11].

W tym artykule zaprojektowano struktury metapowierzchni bazujące na elemencie strukturalnym w postaci komplementarnego rezonatora z rozdzielonymi pierścieniami (ang. split ring resonator, SRR) [12] dla częstotliwości rezonansowej w zakresie mikrofalowym (10 GHz) oraz w zakresie terahercowym (1,7 THz). Opracowano trójwymiarowe modele numeryczne oraz przeprowadzono eksperyment polegający na odkształceniu metapowierzchni za pomocą sił zewnętrznych o różnych wartościach. Na koniec wyznaczono zależność pomiędzy zmianą częstotliwości rezonansowej, a stopniem deformacji struktury metapowierzchni oraz wyznaczono wrażliwość na zniekształcenia geometryczne analizowanych struktur.

Zbadanie wpływu odkształcenia geometrii metapowierzchni na jej właściwości może w przyszłości skutkować opracowaniem bezprzewodowych czujników odkształceń o dużej czułości pracujących w systemach monitoringu strukturalnego SHM. W systemach takich czujniki odkształceń/naprężeń stanowią znaczną część ogólnej liczby wszystkich czujników [13].

2. Projektowanie metapowierzchni i model numeryczny

Element strukturalny (SRR) zastosowany w tej pracy przedstawiony jest na Rys. 1. Element składa się z dwóch części o kształcie C (prostokątna wersja rezonatora z rozdzielonymi pierścieniami) połączonych jedną szczeliną (struktura „CO”). W przypadku obu zakresów częstotliwości komórki zostały zaprojektowane za pomocą procesu optymalizacyjnego: poszukiwany był zestaw wartości parametrów geometrycznych (przedstawionych na Rys. 1), przy którym częstotliwość rezonansowa wynosi 10 GHz dla modelu mikrofalowego i 1,7 THz dla modelu terahercowego. Funkcją celu była różnica pomiędzy częstotliwością wyznaczoną dla danego punktu przestrzeni projektowej, a częstotliwością docelową. Uzyskane w ten sposób wymiary przedstawiono w Tab. 1. Ponadto, w Tab. 2

Tab. 1. Wymiary zaprojektowanego elementu strukturalnego.

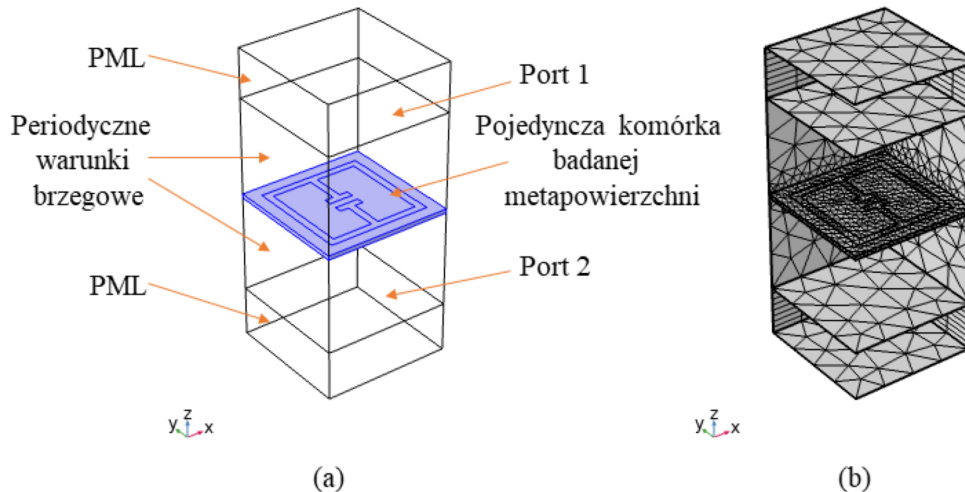
Tab. 1. The dimensions of designed unit cells.

Parametr	Metapowierzchnia mikrofalowa	Metapowierzchnia terahercowa
d	3,00 mm	9,00 μm
l	15,74 mm	36,00 μm
l ₁	3,00 mm	10,80 μm
l ₂	4,07 mm	7,00 μm
w	0,90 mm	3,00 μm
g	1,00 mm	1,00 μm

Tab. 2. Właściwości materiału dielektrycznego.

Tab. 2. Dielectric material properties.

Parametr	Metapowierzchnia mikrofalowa - Rogers RO4003c	Metapowierzchnia terahercowa - polipropylen
Względna przenikalność elektryczna ϵ_r	3,55	2,25
Moduł Younga E	19,550 GPa	1,847 GPa
Liczba Poissona	0.127	0.42



Rys. 2. Model numeryczny: (a) geometria modelu i opis; (b) siatka obliczeniowa.

Fig. 2. Numerical model: (a) model geometry and description; (b) computational mesh.

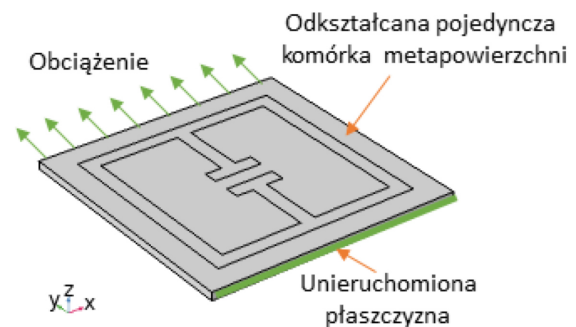
przedstawiono właściwości materiałów dielektrycznych wykorzystanych jako podkłady, na których realizowano metapowierzchnie. W przypadku struktury mikrofalowej wykorzystano w tym celu laminat mikrofalowy Rogers RO4003c zapewniający dużą stabilność temperaturową i wymiarową (zmiany wymiarów i przenikalności dielektrycznej wywołane zmianami temperatury są pomijalne). W przypadku metapowierzchni działającej w terahercowym zakresie częstotliwości zastosowano polipropylen.

Częstotliwość rezonansowa dla zadanej geometrii wyznaczana była za pomocą opracowanego modelu numerycznego. Zastosowano w tym celu środowisko Comsol Multiphysics wykorzystujące metodę elementów skończonych MES (ang. finite element method, FEM). Geometria i siatka obliczeniowa trójwymiarowego modelu przedstawiona została na Rys.2. Wzbudzenie i wykrywanie fali elektromagnetycznej realizowane jest przez porty nadawczo-odbiorcze. Płaski front falowy jest generowany przez port 1, natomiast oba porty odbierają pole rozproszone (Port 1 dla współczynnika odbicia S_{11} i Port 2 dla określenia współczynnika transmisji S_{21} , gdzie S to macierz parametrów rozproszenia powszechnie wykorzystywana w technice mikrofalowej). W przypadku planowanej analizy nie było potrzeby modelowania całej struktury metapowierzchni. W proponowanym modelu wykorzystano okresowe warunki brzegowe Floqueta. Zastosowano je w przypadku wszystkich zewnętrznych granic równoległych do osi Z . W wyniku tego działania, z punktu widzenia portów nadawczo-odbiorczych, badana struktura widziana będzie jako nieskończona dwuwymiarowa matryca podstawowych elementów strukturalnych. W konsekwencji umożliwia to znaczne zmniejszenie rozmiaru siatki elementów skończonych wykorzystywanych do obliczeń i tym samym uproszczenie modelu numerycznego. To założenie ogranicza dziedzinę potencjalnych deformacji geometrii do płaskich (w płaszczyźnie $x-y$). Takie uproszczenie modelu jest

dopuszczalne, co zostało udowodnione we wcześniejszej pracy [14], poprzez porównanie modelowanych i zmierzonych odpowiedzi częstotliwościowych współczynnika odbicia S_{11} . Na górze i na dole domeny obliczeniowej znajdują się warstwy doskonale absorbujące PML (ang. perfectly matched layers). Ich celem jest umożliwienie zamodelowania rozchodzenia się fali elektromagnetycznej do nieskończoności przy zastosowaniu skończonego rozmiaru badanego obszaru. Modele obliczono w dziedzinie częstotliwości dla pasma częstotliwości 8–12 GHz (model mikrofalowy) i dla pasma 1,0–2,5 THz (model terahercowy).

Analiza przeprowadzona w ramach eksperymentu dotyczy wpływu deformacji powierzchni wywołanej przez zewnętrzne siły mechaniczne. W tym przypadku jedna z granic bocznych (krawędzi) metapowierzchni jest unieruchomiona w przestrzeni (x, y, z) , podczas gdy przeciwna jest obciążona siłą zewnętrzną, jak pokazano na Rys. 3. W rozważanym modelu występują dwa zagadnienia: mechaniczne i elektromagnetyczne.

Przy zastosowanych mocach wzbudzanego pola elektromagnetycznego ($P < 10 \text{ mW}$) wpływ indukowanych prądów na geometrię układu (np. w wyniku rozszerzalności



Rys. 3. Model mechaniczny.

Fig. 3. Mechanical model.

cieplnej) jest pomijalny. W związku z tym, w pierwszej kolejności rozwiązywany jest problem mechaniczny - wyznaczenie geometrii zdeformowanej przez zastosowanie zewnętrznego wymuszenia mechanicznego. Następnie rozwiązany zostaje problem elektromagnetyczny wysokiej częstotliwości na podstawie odkształconej geometrii uzyskanej w poprzednim kroku. W trakcie analizy numerycznej rozwiązywane są następujące równania [15]:

$$\nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_v = 0$$

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma_c}{\omega\epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0$$

gdzie: \mathbf{E} - wektor natężenia pola elektrycznego, μ_r - przenikalność magnetyczna względna, ϵ_r - przenikalność elektryczna względna, σ_c - konduktywność elektryczna, k_0 - liczba falowa, ω - pulsacja, \mathbf{S} - naprężenie, \mathbf{F}_v - siła na jednostkę objętości.

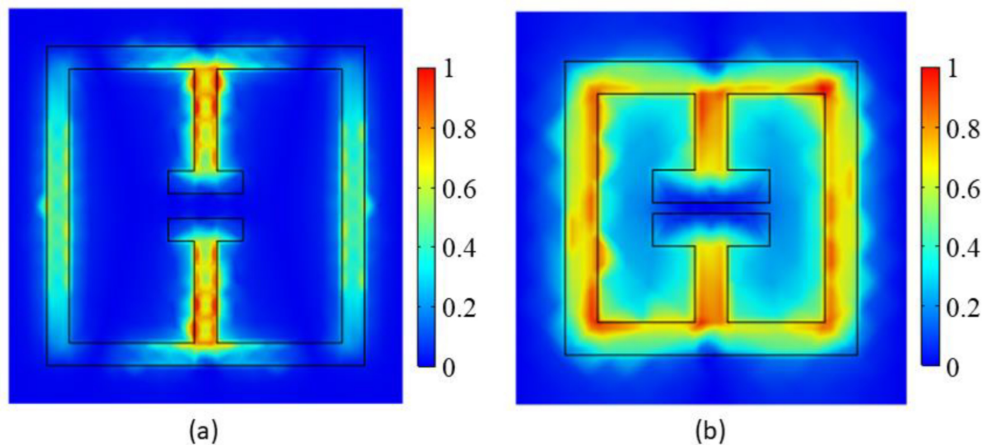
Siatka obliczeniowa używana podczas obliczeń numerycznych składa się:

- z 9796 elementów czworobocznych, 2436 elementów brzegowych i 404 elementów krawędziowych - dla modelu mikrofalowego;
- z 8509 elementów czworobocznych, 2358 elementów brzegowych i 372 elementów krawędziowych - dla modelu terahercowego.

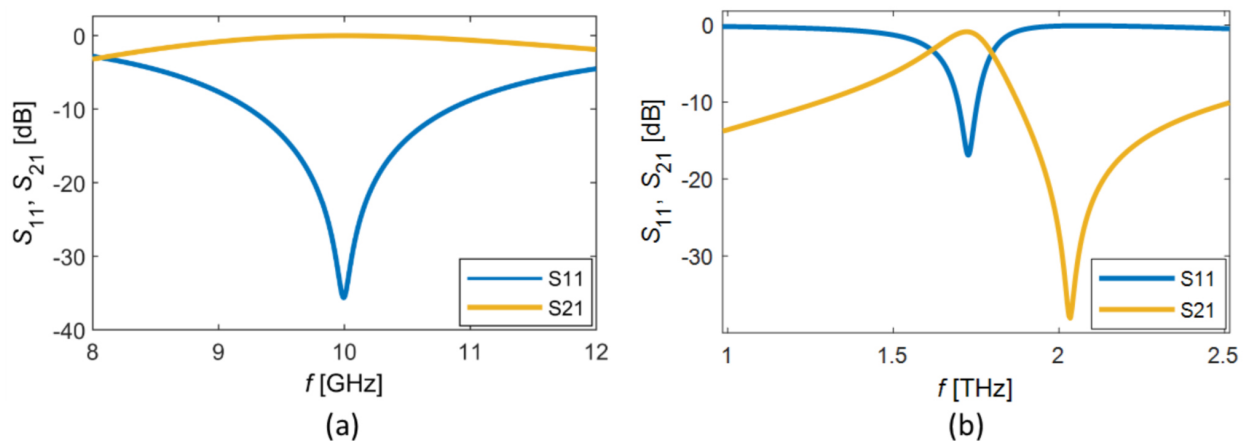
Tak mała liczba elementów wynika ze wspomnianego wcześniej zastosowania okresowych warunków brzegowych Floqueta.

3. Wyniki eksperymentu i wnioski

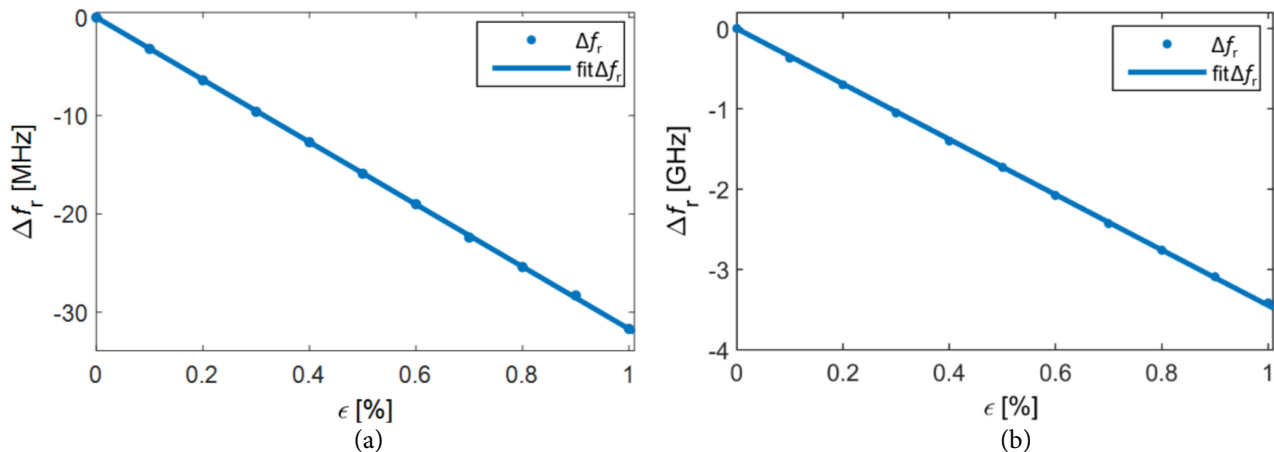
Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono na Rys. 4 i Rys. 5. Zgodnie z oczekiwaniami pole elektryczne rozkłada się w elementach strukturalnych tylko w pobliżu miejsc, w których warstwa przewodnika jest usuwana podczas procesu technologicznego. Na Rys. 5 przedstawiono odpowiedzi częstotliwościowe parametrów macierzy rozpraszania: współczynnika odbicia S_{11} oraz



Rys. 4. Unormowane pole elektryczne dla częstotliwości rezonansowej: (a) model mikrofalowy; (b) model terahercowy.
Fig. 4. Normalized electric field for resonant frequency: (a) microwave model; (b) terahertz model.



Rys. 5. Obliczone współczynniki odbicia S_{11} i transmisji S_{21} : (a) model mikrofalowy; (b) model terahercowy.
Fig. 5. Calculated reflection coefficient S_{11} and transmission coefficient S_{21} : (a) microwave model; (b) terahertz model.



Rys. 6. Przesunięcie częstotliwości rezonansowej wywołane odkształceniem: (a) model mikrofalowy; (b) model terahercowy.
Fig. 6. Resonant frequency shift caused by deformation: (a) microwave model; (b) terahertz model.

współczynnika transmisji S_{21} . W obu przypadkach w analizowanych zakresach częstotliwościowych współczynniki odbicia charakteryzują się stanami rezonansowymi dla projektowanych wartości częstotliwości rezonansowych. W stanie rezonansu wartość współczynnika odbicia jest najmniejsza. W tym przypadku fala elektromagnetyczna częściowo jest zaabsorbowana przez metapowierzchnię, a częściowo przez nią przenika i jest pochłaniana przez warstwę PML znajdującą się za portem 2. Odpowiada to stosunkowo wysokiej wartości współczynników transmisji występujących dla częstotliwości rezonansowych.

W przeprowadzonym eksperymencie zwiększano wartość wymuszenia mechanicznego działającego na metapowierzchnię, co w konsekwencji prowadziło do zwiększenia stopnia ich deformacji. Zastosowanie naprężenia w kierunku y (patrz Rys.3) powoduje zwiększenie wszystkich parametrów geometrycznych w kierunku y i zmniejszenie w kierunku x i z (zmiany grubości i długości odpowiednich szczelin). W wyniku powyższego działania nieznacznie zmienia się rozkład pola elektromagnetycznego oraz rozptył zaindukowanego prądu, a w konsekwencji również przesunięciu ulega charakterystyka częstotliwościowa. Zwiększanie deformacji w kierunku zgodnym z osią y (jak na Rys.3) powoduje zmniejszenie się częstotliwości rezonansowej. Na Rys. 6. przedstawiono uzyskaną liniową zależność pomiędzy bezwzględną zmianą częstotliwości Δf_r a względnym odkształceniem ϵ . Efekt ten występuje również w przypadku deformacji pojedynczych rezonatorów mikropaskowych o kształcie prostokątnym, kołowym i fraktalnym [15-17].

Uzyskane wrażliwości na deformację wyniosły dla modelu mikrofalowego i terahercowego odpowiednio: 31 MHz/1% i 3,5 GHz/1%. Duże różnice wynikają z różnych częstotliwości rezonansowych, na które zostały zaprojektowane badane struktury. Amplituda współczynnika odbicia w stanie rezonansu praktycznie nie zmieniała się pod wpływem zewnętrznego wymuszenia mechanicznego (zmiana poniżej 0,1 dB).

W artykule przedstawiono badanie wpływu deformacji

struktury metapowierzchni wywołane rozciąganiem na jej własności rezonansowe. Opracowano modele numeryczne metapowierzchni o elemencie strukturalnym w postaci komplementarnych rezonatorów z rozdzielonymi pierścieniami (SRR) oraz określono zmiany częstotliwości rezonansowych wywołane działaniem zewnętrznej siły rozciągającej. Uzyskane liniowe zależności pomiędzy zmianą częstotliwości, a stopniem deformacji struktury metapowierzchni pozwalają na wykorzystanie w przyszłości tej technologii w bezprzewodowym monitoringu strukturalnym (SHM).

Podziękowania

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego „Badanie wpływu nieregularności i deformacji struktury metapowierzchni na ich właściwości odbiciowe dla fal elektromagnetycznych w mikrofalowym i terahercowym pasmie częstotliwości” o nr 2018/02/X/ST7/02459, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

4. Literatura

- [1] A. Ebrahimi, W. Withayachumnankul, S. Al-Sarawi, D. Abbott, “High-sensitivity metamaterial-inspired sensor for microfluidic dielectric characterization” IEEE Sensors Journal, no. 14, pp. 1345–1351, 2014.
- [2] Y. Zhang, J. Zhao, J. Cao, B. Mao, “Microwave Metamaterial Absorber for Non-Destructive Sensing Applications of Grain” Sensors, vol. 18, no. 6, 1912, pp. 1-10, 2018.
- [3] A. Savin, R. Steigmann, A. Bruma, R. Sturm, “An Electromagnetic Sensor with a Metamaterial Lens for Nondestructive Evaluation of Composite Materials” Sensors, vol. 15, no. 7, pp. 15903–15920, 2015.
- [4] A.P. Saghati, J.S. Batra, J. Kameoka, K. Entesari, “A metamaterial-inspired wideband microwave interferometry sensor for dielectric spectroscopy of liquid chemicals” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 65, no. 7, pp. 2558–2571, 2017.
- [5] A. M. Gargari, M. H. Zarifi, L. Markley, “Passive Matched Mushroom Structure for a High Sensitivity Low Profile Antenna-Based Material Detection System” IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 15, pp. 6154 – 6162, 2019.

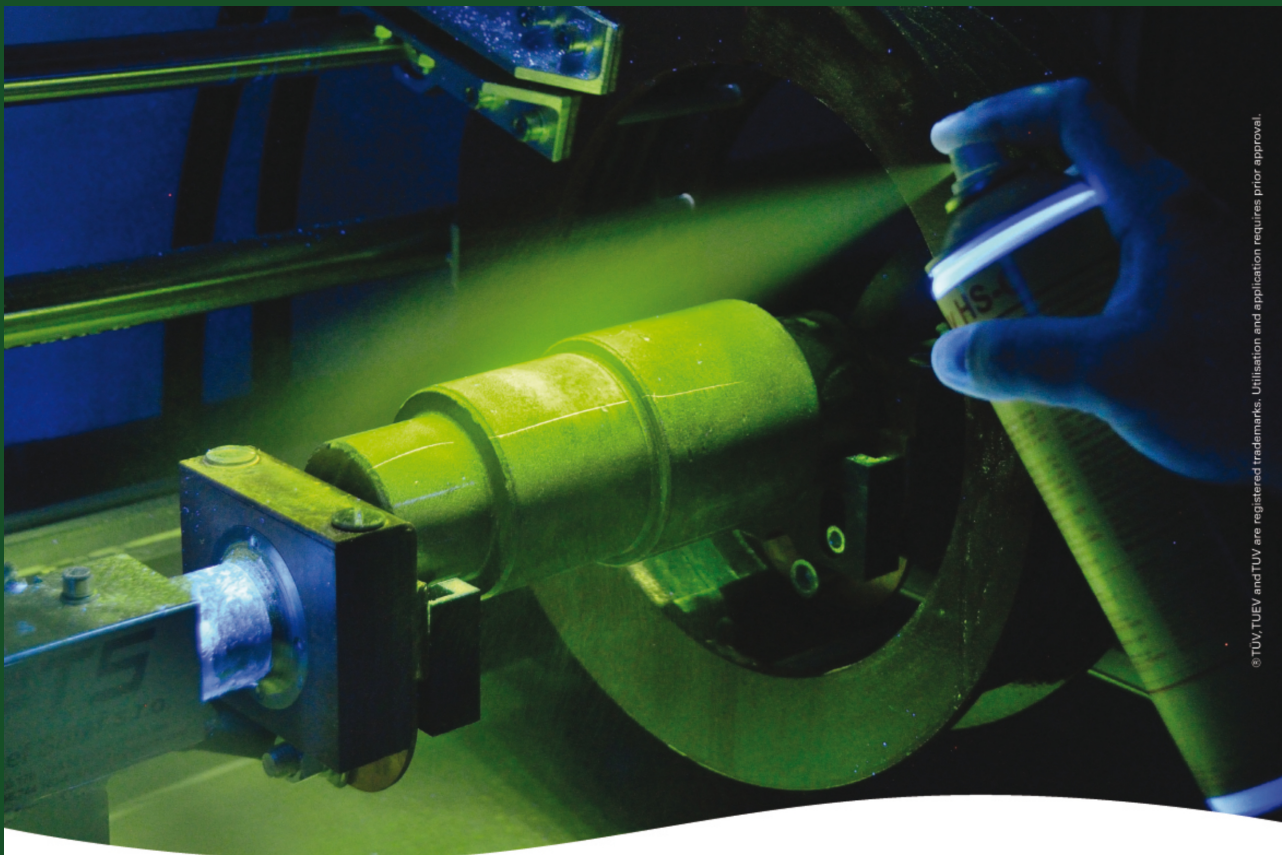
- [6] A. A. Saleh, A. S. Abdullah, "High Gain Circular Patch Antenna Using Metamaterial Supperstrate for DSRS System Applications" *Journal of Telecommunications*, vol. 27, no. 2, pp. 1–6, 2014.
- [7] W. Withayachumnankul; D. Abbott, "Metamaterials in the Terahertz Regime" *IEEE Photonics Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 99–118, 2009.
- [8] G. Oliveri, D. H. Werner, A. Massa, "Reconfigurable electromagnetics through metamaterials—A review" *Proc. IEEE*, no. 103, pp. 1034–1056, 2015.
- [9] R. Marques, F. Martin, M. Sorolla, "Metamaterials with Negative Parameters - Theory, Design, and Microwave Applications", John Wiley & Sons, Hoboken, 2008.
- [10] Y. Yu, Y.-S. Lin, "Multi-functional terahertz metamaterial using symmetrical and asymmetrical electric split-ring resonator" *Results in Physics*, no. 13, 102321, 2019.
- [11] B. Butrylo, A. Steckiewicz, "Characterization of properties and magnetic field distribution in conductive thin-film laminar materials" *Proceedings of the Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuits Theory*, Gliwice - Ustron, Poland, 16-19. 05. 2018.
- [12] H. Tao, C. M. Bingham, A. C. Strikwerda, D. Pilon, D. Shrekenhamer, N. I. Landy, K. Fan, X. Zhang, W. J. Padilla, R. D. Averitt, "Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization" *Physical Review B*, no. 78, 241103(R), pp.1-4, 2008.
- [13] .Q. Ni, K.Y. Wong, "Integrating bridge structural health monitoring and condition-based maintenance management" in *Proceedings of the 4th International Workshop on Civil Structural*, Berlin, Germany, 6–8 November 2012.
- [14] P. Lopato, M. Herbko, "Evaluation of Selected Metasurfaces' Sensitivity to Planar Geometry Distortions" *Applied Sciences*, vol. 10, no. 1, 261 pp. 1–12, 2020.
- [15] M. Herbko, P. Lopato, "Double patch sensor for identification of stress level and direction" *Int J RF Microw Comput Aided Eng.*, vol. 29, no. 12, Article number e21977, pp. 1–10, 2019.
- [16] U. Tata, H. Huang, R.L. Carter, J.C. Chiao "Exploiting a patch antenna for strain measurements," *Measurement Science and Technology*, vol. 20 pp. 1-7, 2009.
- [17] A. Benchirouf, R. Zichner, C. Muller, O. Kanoun, "Electromagnetic Simulation of Flexible Strain Sensor based Microstrip Patch Antenna," *International Journal of Microwave and Optical Technology*, vol 6-I, pp.397-401, 2015.
- [18] P. Lopato, M. Herbko, "A Circular Microstrip Antenna Sensor for Direction Sensitive Strain Evaluation" *Sensors*, vol. 18, no. 1, 310, pp. 1–11, 2018.
- [19] N. Sharama, V.V. Thakare, "Analysis of Microstrip Rectangular Patch Antenna as a Strain Sensor," *International of Research in Electronic and Communication Technology*,2(2), pp.17-19, 2015.
- [20] W. Wang, H. Ge , T. Liu T., Liu M., "Study of Patch Antennas for Strain Measurement," *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVIII)*, vol.40, pp. 313-321, 2015
- [21] M. Herbko, P. Lopato, "Microstrip Patch Strain Sensor Miniaturization Using Sierpinski Curve Fractal Geometry" *Sensors*, vol. 19, no. 18, 3989, pp. 1–13, 2019.



Dr hab. inż. Przemysław Łopato, jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Jego zainteresowania badawcze obejmują techniki terahercowe i mikrofalowe w zastosowaniach sensorycznych i w badaniach nieniszczących, badanie właściwości elektromagnetycznych materiałów, metamateriały. Brał udział w kilku krajowych i międzynarodowych projektach badawczych. W 2014 roku otrzymał stypendium Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców. Obecnie kieruje pracami Laboratorium Anten i Technik Wysokich Częstotliwości.



Mgr inż. Michał Herbko, urodził się w 1992r. w Szczecinie. Uzyskał stopnie inżyniera oraz magistra na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Obecnie jest asystentem w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki. Zainteresowania naukowe obejmują technikę mikrofalową oraz terahercową, czujniki odkształceń i structural health monitoring.



© TÜV, TÜV and TÜV are registered trademarks. Utilisation and application requires prior approval.

Szkolenia, egzaminy i certyfikacja personelu NDT



AC 195



NOWOŚĆ – SZKOLENIA DOFINANSOWANE!

www.tuv.pl

 **TÜVRheinland®**
Precisely Right.