

MIKROTALASNI STEREOMETAMATERIJALI: ELEKTROMAGNETSKE OSOBINE I REKONFIGURABILNOST

Vojislav Milošević, *Institut za Fiziku Beograd*, vojislav@ipb.ac.rs
Branka Jokanović, *Institut za Fiziku Beograd*, brankaj@ipb.ac.rs
Branko Kolundžija, *Elektrotehnički fakultet Beograd*, kol@etf.rs

Apstrakt – U ovom radu je koncept stereometamaterijala, koji je korišćen na terahercnom opsegu, primenjen u mikrotalasima. Kao stereometamaterijal je predložena struktura koja se sastoji od dva para split-ring rezonatora koju su realizovani na različitim stranama supstrata i spregnuti sa mikrostrip vodom. Pokazano je da se karakteristike ovakve strukture mogu menjati u širokom opsegu ukoliko se split-ring rezonatori međusobno rotiraju za 90 i 180 stepeni. Na osnovu ekstrahovanih efektivnih parametara može se zaključiti da koncept stereometamaterijala nudi dodatni stepen slobode u dizajnu mikrotalasnih kola, jer se elektronskim putem može menjati položaj procepa na rezonatorima i tako značajno uticati na njihove performanse.

1. UVOD

U savremenim bežičnim komunikacionim sistemima prisutna je stalna potreba za poboljšanjem performansi mikrotalasnih kola koja se nalaze u sklopu komunikacionih uređaja. Neki od zahteva koji se postavljaju pred ova kola pri projektovanju su istovremeni rad na više frekvencijskih opsega, mogućnost elektronske rekonfigurabilnosti odnosno promene parametara kola u realnom vremenu, kao i kompaktne dimenzije i mala električna dužina. Standardne tehnike projektovanja nailaze na velike teškoće u težnjama da zadovolje ove zahteve. Jedno od potencijalnih rešenja, koje poslednjih desetak godina zaokuplja veliku pažnju međunarodne i domaće naučne javnosti, jeste primena metamaterijala u projektovanju mikrotalasnih kola.

Metamaterijali su veštačke periodične strukture čije elektromagnetske osobine zavise od oblika i rasporeda elemenata ubačenih u osnovni materijal, a ne od osobina samog materijala. Pažljivim izborom jediničnih ćelija mogu se dobiti osobine kakve ne postoje u prirodi, efektivni parametri mogu biti proizvoljno veliki ili mali, pa čak i negativni. Postoji posebna klasa metamaterijala kod kojih su i permutivnost i permeabilnost istovremeno negativne, što za posledicu ima da se faza talasa prostire u smeru suprotnom od prostiranja energije, a talasni vektor i vektori električnog i magnetskog polja čine trojku vektora leve orijentacije, pa se ovi materijali nazivaju *left-handed* [1]. Takođe, koeficijent refrakcije kod ovakvih metamaterijala je negativan. U radu ćemo pokazati da uslov da su permutivnost i permeabilnost istovremeno negativni nije neophodan da bi indeks refrakcije bio negativan, kako se dugo smatralo.

Stereometamaterijali su prvi put predloženi kao novi koncept u fotonici od strane N. Liu i drugih [4]. Inspirisani su postojanjem stereoizomera u hemiji, odnosno jedinjenja koja imaju istu hemijsku formulu, sastavljena su od istih atoma, ali s drugačijim prostornim rasporedom usled čega imaju drugačije osobine. Ideja se sastoji u tome da, korišćenjem identičnih elemenata, ali promenom njihovog relativnog položaja u prostoru, utičemo na njihovu električnu i

magnetsku interakciju, i time omogućimo veću slobodu u projektovanju struktura s željenim odzivom.

2. NEGATIVNI INDEKS REFRAKCIJE

Posebna klasa metamaterijala su *left-handed* metamaterijali, u kojima su vektori električnog i magnetskog polja vezani pravilom leve ruke, a fazna brzina je negativna. Ekvivalentan uslov je da je realni deo indeksa refrakcije negativan. Fizičke pojave kao što su Snelov zakon, Vavilov-Černikovljevo zračenje, Doplerov efekat i neke druge u ovakvim materijalima su „obrnute“, što ih čini jako zanimljivim za potencijalnu primenu.

Postavlja se pitanje kada će realni deo indeksa refrakcije biti negativan. Pokazaćemo da je Veselagov uslov da su permutivnost i permeabilnost istovremeno negativne suviše strog, i da je moguće dobiti *left-handed* materijal kada to nije ispunjeno. Posmatrajmo talas koji se prostire u smeru z-ose. Ako zavisnost od vremena definišemo kao $e^{j\omega t}$, zavisnost od z koordinate biće $e^{-\gamma z}$, gde je $\gamma = \alpha + j\beta$ kompleksni koeficijent prostiranja. Između γ i indeksa refrakcije možemo uspostaviti sledeću vezu [2]:

$$\gamma = jn \frac{\omega}{c}, \quad (1)$$

iz čega sledi:

$$n_{Re} = +\frac{c}{\omega}\beta \text{ i } n_{Im} = -\frac{c}{\omega}\alpha. \quad (2)$$

Pošto u pasivnoj sredini talas mora da slabi u smeru svog prostiranja, zaključujemo da važi $\alpha > 0$, iz čega sledi uslov

$$n_{Im} < 0. \quad (3)$$

S druge strane, za n_{Re} ne postoje neka fizička ograničenja. Veza indeksa refrakcije s permutivnošću i permeabilnošću data je jednostavnom relacijom: $n^2 = \epsilon\mu$. Ako izjednačimo realni i imaginarni deo ove jednačine imamo sistem:

$$n_{Re}^2 - n_{Im}^2 = \epsilon_{Re}\mu_{Re} - \epsilon_{Im}\mu_{Im}, \quad (4)$$

$$2n_{Re}n_{Im} = \epsilon_{Re}\mu_{Im} + \epsilon_{Im}\mu_{Re}. \quad (5)$$

Ako pažljivo pogledamo drugu jednačinu, vidimo da nema potrebe da rešavamo sistem, već iz uslova (3) direktno dobijamo da je $n_{Re} < 0$ ekvivalentno sa

$$\epsilon_{Re}\mu_{Im} + \epsilon_{Im}\mu_{Re} > 0. \quad (6)$$

Na osnovu [3], ovom uslovu je ekvivalentan

$$\epsilon_{Re}|\mu| + \mu_{Re}|\epsilon| < 0. \quad (7)$$

Vidimo da nije neophodno da istovremeno važi i $\epsilon_{Re} < 0$ i $\mu_{Re} < 0$ da bi indeks refrakcije bio negativan. Uzimajući ovo u obzir, opseg u kome je n negativno možemo podeliti na dva dela:

- SNG (single negative) – samo jedan od parametara ϵ_{Re} i μ_{Re} je negativan;
- DNG (double negative) – oba parametra ϵ_{Re} i μ_{Re} su negativni.

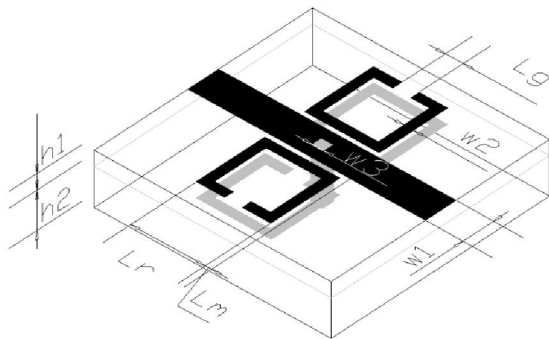
Ovaj zaključak je značajan u fotonici, zato što je na visokim učestanostima teško istovremeno realizovati negativnu permitivnost i permeabilnost.

3. ANALIZIRANA STRUKTURA

Koncept stereometamaterijala primenili smo na strukturu predloženu u [5]. Struktura se sastoji od dva para split ring rezonatora (SRR) koji su realizovani na različitim stranama supstrata i spregnuti s mikrostrip vodom. Struktura je realizovana na dvoslojnom dielektriku, različitih debljina i dielektričkih konstanti. Na mestu sprezanja split ring rezonatora s mikrostrip vodom nalazi se vija kojom je vod uzemljen na masu. Izgled strukture koja predstavlja jediničnu ćeliju stereometamaterijala prikazan je na slici 1, s najznačajnijim dimenzijama.

Ova struktura je interesantna kao stereometamaterijal zato što se sastoji od četiri split ring rezonatora, koji imaju različit položaj u prostoru, tako da je moguće ostvariti veliki broj kombinacija rotiranjem prstenova za 90 i 180 stepeni.

Jedna od prednosti ovakvog voda ogleda se u tome što se ne koriste diskretne komponente, pa se lako može implementirati na fotolitografskom tehnikom, a moguće je i realizovati ga na višim učestanostima skaliranjem svih elemenata strukture.

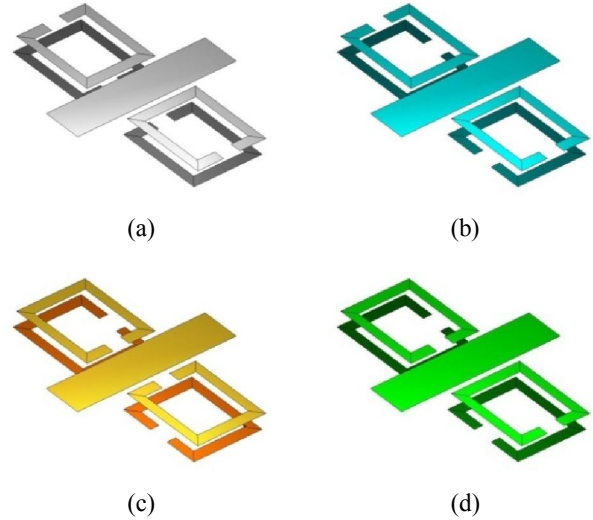


Slika 1. Izgled jedinične ćelije ($h_1=0,635mm$, $h_2=1,5748mm$, $\epsilon_{r1}=10,2$, $\epsilon_{r2}=2,2$, $L_r=3,15mm$, $L_m=0,25mm$, $L_g=0,75mm$, $W_1=1,4mm$, $W_2=0,4mm$, $W_3=0,5mm$, $S=0,2mm$).

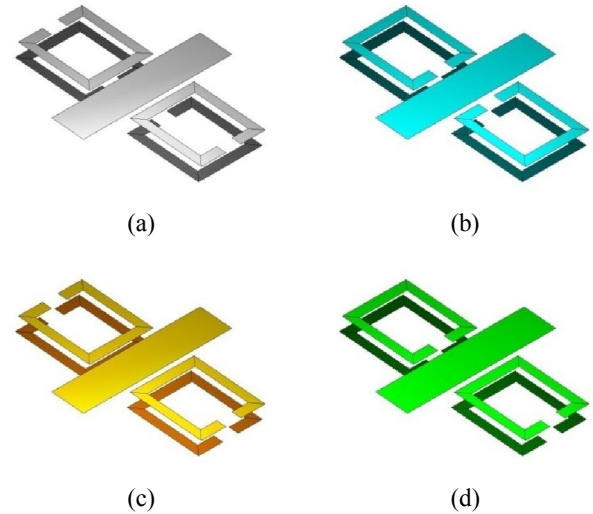
Skup tzv. „stereoizomera“ dobijamo tako što rotiramo određene prstenove (oko svoje ose) za 90 ili 180 stepeni. Primetimo da, za razliku od [3], ovde ne igra ulogu samo međusobni položaj prstenova, već i njihov položaj u odnosu na vod, zbog promene kapacitivnosti usled sprege. Neke moguće varijante su prikazane na slici 2. Zbog jasnoće slika vija je izostavljena, kao i metalizovana ravan. Svetlijom bojom prikazan je izgled provodnika na vrhu gornjeg sloja dielektrika, a tamnijom na vrhu donjeg.

Treba primetiti da rotacija prstena u svim ovim slučajevima predstavlja u suštini samo premeštanje procepa na različite ivice istog prstena, tako da je moguće realizovati ovu „rotaciju“ elektronskim putem, postavljanjem prekidačkih PiN dioda koje bi, prema potrebi, otvarale ili zatvarale odgovarajuće procepe. Ovakav pristup omogućio bi

kreiranje elektronski rekonfigurabilnih metamaterijala, čije elektromagnetske osobine bismo mogli menjati u realnom vremenu i prilagođavati trenutnim potrebama.



Slika 2. Stereoizomeri nastali rotacijom split ring rezonatora u donjem sloju za 90 stepeni u odnosu na slučaj a



Slika 3. Stereoizomeri nastali rotacijom split ring rezonatora za 180 stepeni u odnosu na slučaj a

4. REZULTATI

Predložene strukture su modelovane i simulirane u programskom paketu WIPL-D. Kao rezultat simulacije dobijaju se s-parametri jedinične ćelije. Koristeći teoriju efektivnog medijuma (pošto je talasna dužina mnogo veća od dimenzija ćelije), možemo zameniti predložene vodove ekvivalentnim mikrostrip vodom, koji ima istu visinu, dužinu i širinu trake, ali na homogenom dielektriku parametara ϵ_{eff} i μ_{eff} . Parametri ekvivalentnog voda, koeficijent refleksije na spoju, Γ , i koeficijent prostiranja, γ , vezani su sa s-parametrima preko sledećih relacija, poznatih kao Nicolson-Ross-Weir izvođenje [6]:

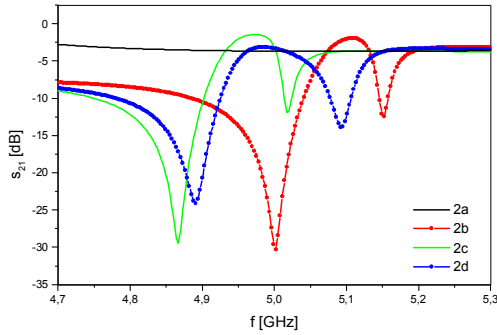
$$\Gamma = k \pm \sqrt{k^2 - 1}, k = \frac{s_{11}^2 - s_{21}^2 + 1}{2s_{11}}, \quad (8)$$

$$\gamma = \pm \frac{1}{L} \cosh^{-1} \frac{1 - s_{11}^2 + s_{21}^2}{2s_{21}}. \quad (9)$$

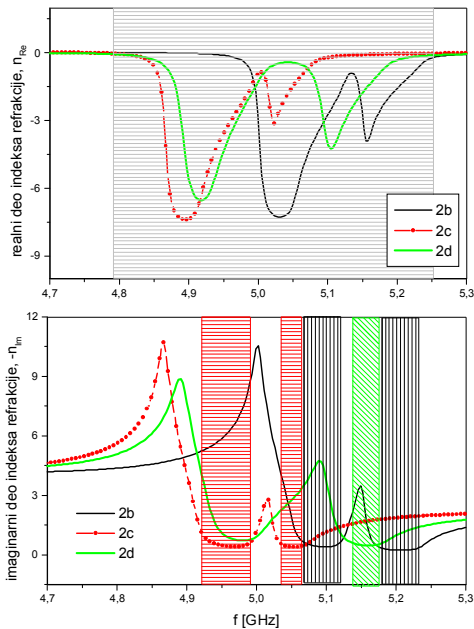
Kada znamo ove vrednosti, određivanje parametara dielektrika je jednostavno [4].

Stereometamaterijali nastali rotacijom SRR za 90 stepeni

Korišćenjem gornjeg postupka ekstrahovani su parametri za strukture na slici 2b, 2c, i 2d, kod kojih su split ring rezonatori na donjem sloju rotirani za 90 stepeni u odnosu na osnovni slučaj sa slike 2a, tako da je sačuvana simetrija prema ulaznim portovima. Na slici 4 prikazani su koeficijenti transmisije S_{21} , gde se vidi da su propusni opsezi znatno uži u odnosu na osnovni slučaj i pomereni za 500 MHz ka višim učestanostima. Takođe se vidi da je S_{21} za slučaj 2d predstavlja približno superpoziciju odziva transmisija za slučajeve b i c, što se moglo zaključiti i iz same strukture te jedinične ćelije, kod koje prstenovi s jedne strane mikrostrip voda odgovaraju slučaju b, a s druge strane slučaju 2c.



Slika 4. Koeficijent transmisije S_{21}



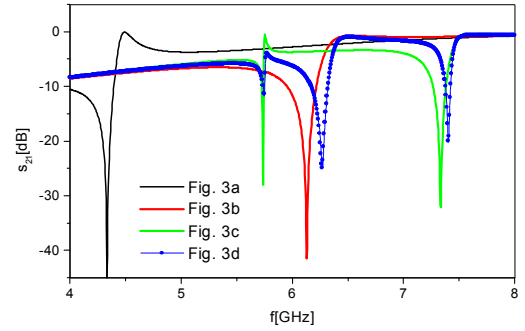
Slika 5. Realni i imaginarni deo indeksa refrakcije

Na slici 5 prikazan je ekstrahovani realni (n_{Re}) i imaginarni deo (n_{Im}) indeksa refrakcije. Na slici gde je

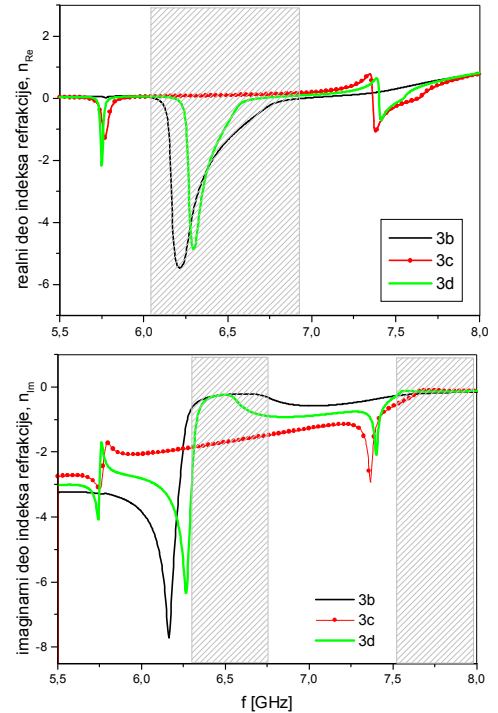
prikazan n_{Re} , šrafirana je zona gde je indeks refrakcije negativan za slučaj 2d, koji je najširokopojasniji. Na slici gde je prikazan $-n_{Im}$, šrafirani pravougaonici označavaju oblasti sa minimalnim vrednostima, koje odgovaraju opsezima učestanosti gde je indeks refrakcije dvostruko negativan, tj. i ϵ_{Re} i μ_{Re} su negativni.

Stereometamaterijali nastali rotacijom SRR za 180 stepeni

Na slici 6 prikazan je koeficijent transmisije S_{21} za sve strukture prikazane na slici 3. Vidi se da okretanjem prstenova za 180 stepeni rezonantne učestanosti se znatno pomeraju u odnosu na osnovni slučaj i javljaju se u opsegu od 5,5 do 7 GHz. Takođe, koeficijent transmisije za slučaj 3d je približno superpozicija koeficijenta transmisije za slučajeve 3b i 3c, što se može zaključiti i iz same geometrije strukture.



Slika 6. Koeficijent transmisije S_{21}



Slika 7. Realni i imaginarni deo koeficijenta refrakcije

Na slici 7 prikazan je ekstrahovani realni (n_{Re}) i imaginarni deo (n_{Im}) indeksa refrakcije. Na slici gde je prikazan n_{Re} , šrafirana je zona gde je indeks refrakcije negativan za slučaj 3b, koji je najširokopojasniji. Na slici gde je prikazan $-n_{Im}$, šrafirani pravougaonici označavaju oblasti sa minimalnim vrednostima, koje odgovaraju opsezima

učestanosti gde je indeks refrakcije dvostruko negativan, tj. i ϵ_{Re} i μ_{Re} su negativni.

ZAKLJUČAK

U radu smo razmatrali nove strukture za vođenje talasa, projektovane u štampanoj tehnici na mikrotalasnim učestanostima, koje ispoljavaju negativan indeks refrakcije u određenim opsezima. Pokazali smo da simultano $\epsilon_{Re} < 0$ i $\mu_{Re} < 0$ nije neophodan uslov da bi realni deo indeksa refrakcije bio negativan. Strukture smo dobili rotiranjem određenih prstenova osnovne strukture sa slike 2a i 3a.

Rotiranjem za 90 stepeni radni opseg osnovne strukture, koji se nalazi na učestanosti od oko 4,5 GHz premešta se na učestanosti od 4,9 do 5,1 GHz, zavisno od konkretne strukture (2b, 2c ili 2v), dakle radi se o promeni učestanosti od 13%. Međutim, radni opseg ovih struktura je uži nego kod osnovne.

Rotiranjem za 180 stepeni radni opseg se drastičnije pomera i dolazi na učestanosti od 5,7 do 7,5 GHz, zavisno od konkretne strukture (3b, 3c ili 3d), dakle radi se o promeni učestanosti od 66%. Pritom je širina opsega ovih struktura uporediva s onom u osnovnom slučaju.

Pokazano je da minimalne vrednosti imaginarnog dela indeksa refrakcije odgovaraju DNG opsezima, što se slaže s našim simulacijama koeficijenta transmisije. Naime, koeficijent transmisije je veći u DNG opsezima u odnosu na SNG. Takođe, pokazano je da su slučajevi 2d i 3d približno superpozicija slučajeva 2b i 2c, i 3b i 3c, respektivno, što nas navodi na zaključak da se radni opseg strukture može povećati kombinovanjem više jediničnih ćelija.

Kao najvažniji rezultat rada, pokazali smo da se rotiranjem prstenova u split ring rezonatorima s-parametri kao i efektivni elektromagnetski parametri menjaju u širokom frekvencijskom opsegu. Kako je rotaciju moguće efektivno izvesti umetanjem prekidačkih PiN dioda u procepe, na ovaj način se otvara put za kreiranje elektronski rekonfigurabilnih metamaterijala, i njihovu primenu u mikrotalasnim kolima nove generacije.

ZAHVALNOST

Ovaj rad je delimično finansiran sredstvima Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj preko projekta osnovnih istraživanja 141003 kao i projekta tehnološkog razvoja TR-11009.

REFERENCE

- [1] B. Jakanović, V. Crnojević-Bengin, „Metamaterijali i njihova primena u bežičnim sistemima“, *Telekomunikacije*, broj 3, jul 2009, str. 57-70
- [2] L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media*, 2nd ed, New York: Pergamon, 1982.
- [3] R.A. Depine, A. Lakhtakia “A New Condition to Identify Isotropic Dielectric-Magnetic Materials Displaying Negative Phase Velocity”, in *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, vol. 41, no. 4, pp. 315-316.
- [4] N. Liu, H. Liu, S. Zhu and H. Giessen, „Stereometamaterials“, *Nature Photonics*, 2009, vol. 3, 157-162.
- [5] Shau-Gang Mao, Shiou-Li Chen, Chen-Wei Huang, „Effective Electromagnetic Parameters of Novel Distributed Left-Handed Microstrip Lines“, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 2005, vol. 53, no. 4, pp. 1515-1521
- [6] S. Ponjavić, B. Jakanović, „Ekstrakcija efektivnih elektromagnetskih parametara za strukturu sa split-ring rezonatorima“, *Zbornik radova LIII konferencije ETRAN-a*, Vrnjačka Banja, 15-18. jun 2009.

Abstract – In this paper the concept of stereometamaterials, typically utilized in the terahertz range, is utilized in the microwave. As a stereometamaterial we proposed a structure consisting of two pairs of split ring resonators realized on different sides of the substrate and coupled with a microstrip transmission line. It is shown that such structures can be varied in a wide range if the split ring resonators are mutually rotated 90 and 180 degrees. According to the extracted effective parameters we conclude that the concept of stereometamaterials offers an additional degree of freedom in the design of microwave circuits, since one is able to electronically change the position of the split in the resonators and thus significantly influence their performance.

MICROWAVE STEREOMETAMATERIALS: ELECTROMAGNETIC PROPERTIES AND RECONFIGURABILITY

Vojislav Milošević, Branka Jakanović, Branko
Kolundžija