

NOVI DIZAJN ENZ KANALA NA X-OPSEGU SA PROMENLJIVOM UČESTANOŠĆU TUNELOVANJA

Miranda Mitrović, Branka Jokanović, Institut za fiziku, Beograd, miranda@ipb.ac.rs

Sadržaj – U ovom radu je prikazan novi dizajn uskog talasovodnog kanala sa efektivnom permitivnošću bliskom nuli (ϵ -near-zero, ENZ) koji radi na X-opsegu. Struktura se sastoji od dva ulazna penasta talasovoda postavljena na dielektrični supstrat koji ujedno služi i kao ENZ kanal. Duž kanala su napravljeni longitudinalni prorezi promenljive dužine, kako bismo mogli da pomeramo frekvenciju tunelovanja (zeroth-order resonance, ZOR) i Fabry-Perot-ove rezonansu. Promenom dužine proreza možemo pomerati ZOR rezonansu ka nižim frekvencijama, do granične učestanosti ulaznih talasovoda (tj. od 9.34 GHz do 8.76 GHz, odnosno 6,6% opsega). U simulacijama su uzeti u obzir realni gubici u dielektrcima i metalu kako bi se simulirani rezultati mogli direktno uporediti sa izmerenim.

1. UVOD

Interesovanje za metamaterijale čija je dielektrična permitivnost bliska nuli (ϵ -near-zero, ENZ metamaterijali) je u značajnom porastu u poslednjih nekoliko godina. Silverinha i Engheta [1] su 2006. predložili strukturu za tunelovanje energije sastavljenu od dva parallel-plate talasovoda povezana veoma uskim kanalom. U tom radu su naglasili da se ENZ metamaterijali mogu koristiti za poboljšanje efikasnosti transmisije u talasovodima sa diskontinuitetima ili savijenim pod ostrim uglom, kao i za koncentrisanje energije na prostoru dimenzija manjih od talasne dužine. U ovim terijskim proučavanjima nisu uzeti u obzir realni gubici u korišćenim dielektrcima i metalnim oblogama, čiji je uticaj na transmisiju kroz uzak ENZ kanal prikazan u našem prethodnom radu [2].

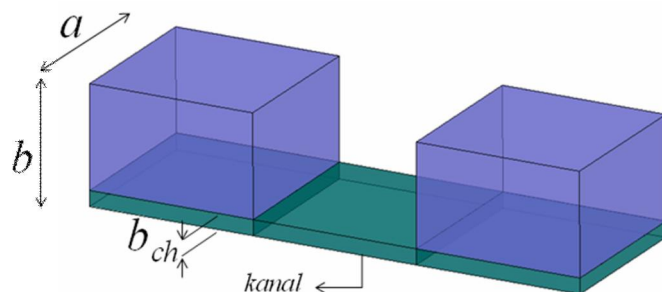
Postoji nekoliko eksperimenata koji potvrđuju ovu teoriju u mikrotalasnom opsegu. Edwards je sa saradnicima 2008. godine [3] napravio eksperiment na 1.47GHz sa kanalom ispunjenim vazduhom, dok je Liu sa saradnicima iste godine [4] koristio strukturu sa split-ring rezonatorima postavljenim na unutrašnji zid kanala. Ova struktura je dosta komplikovanija, ali joj je radni opseg na nešto višoj frekvenciji – oko 8GHz. U toku prošle godine pojavila su se još dva zanimljiva pristupa realizaciji ENZ metamaterijala. Murthy je sa saradnicima [5] realizovao integrabilno ENZ kolo pomoću mikrostrip tehnologije. Tunelovanje energije je podešeno na 2.6 GHz tako što su korišćeni dva mikrostrip voda sa različitim vrednostima debljine supstrata. Ista grupa je takođe [6] iskoristila SIW (Substrate Integrated Waveguide) tehnologiju kako bi realizovala ENZ kanal. Struktura radi na frekvenciji od 5.36 GHz i može se koristiti za karakterizaciju dielektrične konstante sa visokom osetljivošću.

U ovom radu je predložena nova, jednostavna konstrukcija ENZ kanala kako bi se eksperimentalno ispitalo tunelovanje energije kroz uzak ENZ kanal. Struktura se sastoji od metalizovanog dielektričnog supstrata koji služi kao kanal i kao podloga za dva ulazna penasta talasovoda. Ispitana je i mogućnost pomeranja ZOR i Fabry-Perot-ove rezonanse pomoću dva longitudinalna slota promenljive dužine postavljena duž donje strane ENZ kanala.

2. NOVI DIZAJN ENZ TALASOVODA

Kako bismo uprostili dizajn ENZ talasovoda koristili smo standardni mikrotalasni dielektrični supstrat malog tangensa salbljenja koji može imati tačno određenu debljinu vrednosti između 0.1 mm i 1.5 mm. Ovaj supstrat ujedno služi i kao nosač ulaznih talasovoda napravljenih od penastog dielektrika ROHACELL-a koji se veoma lako seče i oblikuje. Struktura koju predlažemo radi u opsegu 8.2-12.4 GHz.

Izgled ovakvog ENZ talasovoda prikazan je na sl.1. Struktura ima dimenzije $a=11\text{mm}$, $b=6.508\text{mm}$ i $b_{ch}=0.508\text{mm}$, dielektrik korišćen u kanalu je CuFlon ($\epsilon_r=2.1$ i $\text{tg}\delta=0.001$), a u uvodnim talasovodima je ROHACELL 200WF ($\epsilon_r(f=10\text{ GHz})=2.86$ i $\text{tg}\delta(f=10\text{ GHz})=0.047$). Teflonski supstrat ima bakarnu metalizaciju sa obe strane (osim na mestima gde su postavljeni uvodnici od penastog dielektrika ROHACELL-a) čija je provodnost $\sigma=58\text{MS/m}$ i hrapavost $r_{ms}=2.4$ (tipična vrednost za elektrodeponovani bakar). Ulazni talasovodi su ubačeni u aluminijumske ($\sigma=38\text{MS/m}$) flanšne koje će služiti kao zidovi talasovoda.



Slika 1: Novi dizajn ENZ talasovoda.

U slučaju kada je $b_{ch} \ll b$ (Sl.1.) moguće je prostiranje TE_{10} moda u pravougaonom talasovodu posmatrati kao prostiranje TEM moda u parallel-plate talasovodu sa efektivnom permitivnošću ϵ_{eff} [3], tako da možemo napisati sledeću jednačinu:

$$\beta_{\text{TE}_{10}}^{ch} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \cong \beta_{\text{TEM}}^{ch} = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}{c}, \quad (1)$$

gde je

$$k = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_{rch}}}{c} \quad (2)$$

Oдавде možemo izvesti izraz za efektivnu permitivnost u talasovodnom kanalu:

$$\epsilon_{\text{eff}} \cong \epsilon_{rch} - \frac{c^2}{4f^2 a^2} \quad (3)$$

Ovde je c brzina svetlosti, a ϵ_{rch} relativna dielektrična konstanta dielektrika u kanalu. Može se videti da ϵ_{eff} postaje jednako nuli na graničnoj učestanosti za kanal, što nam daje mogućnost da ovakvu strukturu posmatramo kao ENZ

metamaterijal u blizini ove frekvencije. Upravo na ovoj frekvenciji se i odvija tunelovanje energije kroz kanal:

$$f_{tun} \cong f_{TE_{10}}^{ch} = \frac{c}{2a\sqrt{\epsilon_{rch}}} \quad (4)$$

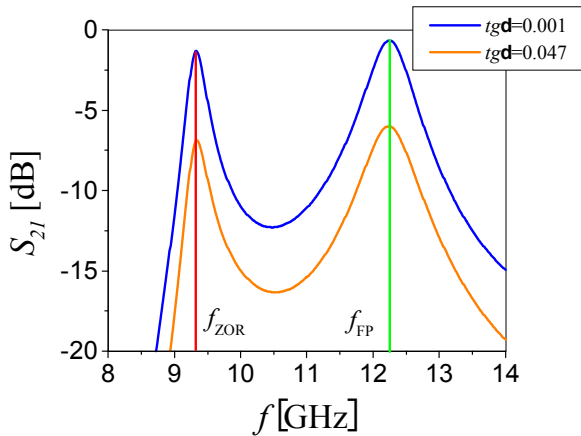
Ova frekvencija bi trebalo da se nalazi unutar propusnog opsega ulaznih talasovoda, te iz ovog uslova dobijamo da relativna dielektrična konstanta uvodnika mora biti veća nego u kanalu:

$$f_{TE_{10}}^w < f_{tun} < f_{TE_{20}}^w \quad (5)$$

$$\frac{c}{2a\sqrt{\epsilon_{rw}}} < \frac{c}{2a\sqrt{\epsilon_{rch}}} < \frac{c}{a\sqrt{\epsilon_{rw}}} \quad (6)$$

$$\frac{\epsilon_{rw}}{4} < \epsilon_{rch} < \epsilon_{rw} \quad (7)$$

Na Sl.2 je prikazana transmisija za ENZ kanal u slučaju kada su uračunati realni gubici u korišćenom ROHACELL-u za datu frekvenciju, uporedo sa slučajem u kome je za isti materijal zadat tangens gubitaka $tg\delta=0.001$. Prvi transmisioni maksimum se javlja na frekvenciji $f_{tun}=9.34\text{GHz}$ i pripisuje se rezonansi nultog reda (zeroth-order resonance, ZOR) (Sl.2). Ovo je frekvencija na kojoj se odvija tunelovanje energije kroz kanal budući da je efektivna permitivnost u kanalu tada jednaka nuli. Drugi transmisioni maksimum se javlja na frekvenciji $f_{FP}=12.24\text{GHz}$ i označava se kao Fabry-Perot-ova (FP) rezonansa. Ova rezonansa jako zavisi od dužine ENZ kanala, što nije slučaj sa ZOR rezonansom.

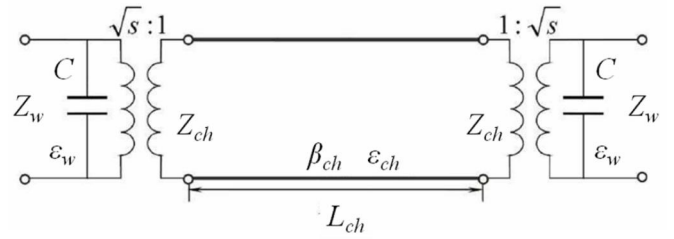


Slika 2: Transmisioni koeficijent u ENZ talasovodu sa naznačenom ZOR i Fabry-Perot-ovom frekvencijom za ROHACELL sa tangensom gubitaka 0.047, odnosno 0.001. Za metalizaciju je korišćen bakar provodnosti $\sigma=58\text{MS/m}$ i hrapavosti $rms=2.4$ (tipična vrednost za elektrodeponovani bakar)

Kao što je već naglašeno, u ovim simulacijama su uzeti u obzir realni gubici u dielektricima i metalnim oblogama, i zato je vrednost transmisije u ovom slučaju dosta mala. To je posledica toga što ROHACELL na frekvenciji od 10 GHz ima dosta visok tangens gubitaka ($tg\delta^{(f=10\text{ GHz})}=0.047$). Budući da nam je u ovom trenutku jedino taj materijal dostupan (sa ispunjenim ostalim željenim karakteristikama – visoka relativna dielektrična konstanta, lakoća obrade i montiranja), odlučili smo da nastavimo rad sa njim, ali su poređenja radi dati rezultati simulacije za slučaj kada bi tangens gubitaka primio vrednost kao kod nekog standardnog mikrotalasnog supstrata. Takođe, u ovom slučaju dimenzije su izabrane tako da dominiraju gubici u

dielektriku ($b_{ch}/b=0.078$), odnosno izabran je režim u kome gubici u metalu još uvek nisu u drastičnom porastu, što se događa kada odnos b_{ch}/b padne ispod određene vrednosti ($b_{ch}/b=0.029$ za ZOR i $b_{ch}/b=0.023$ za Fabry-Perot-ovu rezonansu). Više o tome pisali smo u prethodnom radu [2].

Iako se ulazni talasovodi sastoje od dva različita dielektrika (najvećim delom ROHACELL i mikrotalasni supstrat CuFlon) naše simulacije pokazuju da to nema većeg uticaja na gubitke i neprilagođenje, jer je debljina kanala veoma mala u odnosu na visinu talasovoda, a i dielektrične konstante im se puno ne razlikuju. Simulacije takođe pokazuju da između uvodnih talasovoda i kanal nije potrebna prelazna oblast kako bismo postigli tunelovanje energije. Ovo je donkle kontraintuitivan zaključak s obzirom na diskontinuitet između uvodnika i kanala i različite dielektrike u njima. Ovaj fenomen se može razjasniti proučavanjem ekvivalentnog modela za diskontinuitete u E-ravni pravougaonog talasovoda [7][8]. Pojednostavljeno ekvivalentno kolo prikazano je na Sl.3 [9]:



Slika 3: Ekvivalentni model ENZ kanala

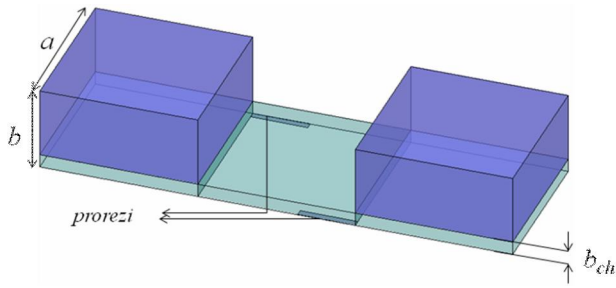
Osnovni TE_{10} mod se prostire i kroz talasovodne uvodnike i kroz ENZ kanal sa konstantom propagacije

$$\beta_{ch(w)} = \sqrt{\omega^2 \mu_0 \epsilon_{ch(w)} - \left(\frac{\pi}{w}\right)^2}, \quad (8)$$

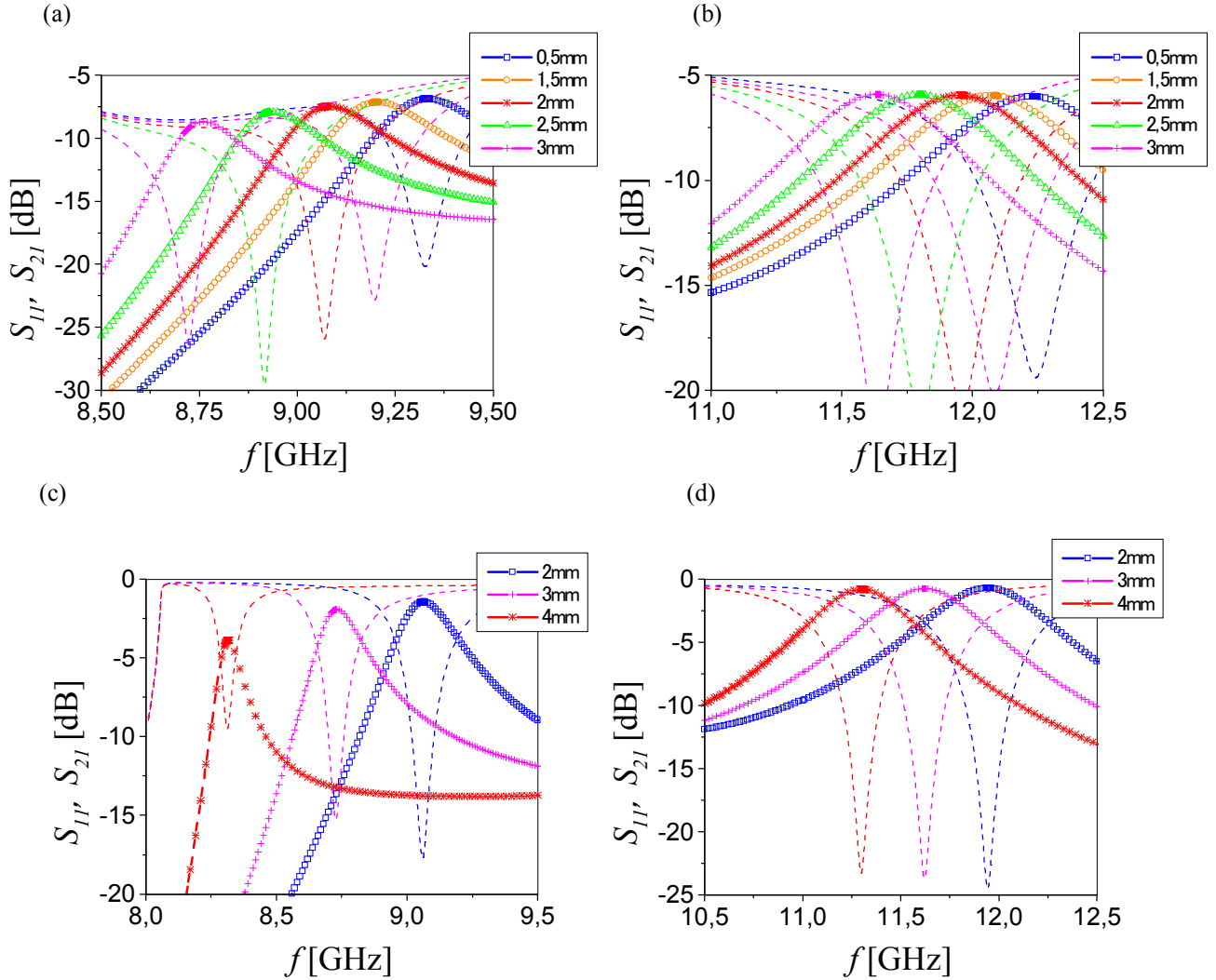
pri čemu je talasna impedansa $Z_{ch(w)} = \omega \mu_0 / \beta_{ch(w)}$ u oblasti kanala, odnosno uvodnika. Za opis promene impedanse korišćen je idealni transformator sa prenosnim odnosom $1:\sqrt{s}$, gde je $s=b_{ch}/b$. U blizini granične učestanosti $\beta \rightarrow \infty$, tako da dužina kanala L_{ch} postaje zanemarljiva. Sa druge strane, kada $s \rightarrow 0$, promena impedanse zavisi od dva transformatora (čiji su prenosni brojevi $1:\sqrt{s}$ i $\sqrt{s}:1$), tako da je preko ENZ kanala omogućeno sprezanje talasovodnih uvodnika istih talasnih impedansi.

3. POMERANJE ZOR I FP REZONANSE POMOĆU LONGITUDINALNIH PROREZA

Iz realcije (4) date u prethodnom odeljku se vidi da učestanost tunelovanja zavisi samo od dielektrične konstante kanala i šire strane talasovoda i da je za datu geometriju fiksna. Ovde smo predložili način za kontinualnu promenu učestanosti tunelovanja pomoću dva longitudinalna proreza postavljena su duž donje metalne obloge uskog kanala (Sl.4).



Slika 4: Longitudinalni prorezi širine 0.5 mm i promenljive dužine postavljeni na donju metalnu oblogu uskog ENZ kanala



Slika 5: Transmisioni (pune linije) i refleksioni (isprekidane linije) koeficijenti za: (a) ZOR i (b) Fabry-Perot-ove frekvencije kada je tangens gubitaka u ROHACELL-u 0.047; (c) ZOR i (d) Fabry-Perot-ove frekvencije kada je tangens gubitaka u ROHACELL-u 0.001

Na ovaj način dolazi i do pomeranja Fabry-Perot-ove frekvencije. Može se pokazati da na osetljivost pomeranja ovih frekvencija utiču kako pozicija proreza, tako i njihova dužina. Veći pomeraj frekvencija imamo ukoliko povećamo dužinu proreza, a slično se dešava i ako proreze postavimo dalje od sredine kanala. Ovo poslednje je jedan razlog što smo proreze postavili na same krajeve kanala; drugi razlog se sastoji u tome što želimo što manje da utičemo na električno polje koje je koncentrisano duž sredine i postepeno opada prema krajevima ENZ kanala. Rezonantne ZOR i Fabry-Perot frekvencije u zavisnosti od dužine proreza date su na Sl. 5(a) i (b) za ROHACELL sa realnim gubicima, odnosno (c) i (d) za dielektrik iste dielektrične konstante i tangensom gubitaka $\tan\delta=0.001$.

Kao što se sa Sl. 5(a) može videti, transmisija na ZOR frekvenciji opada sa porastom dužine slotova usled zračenja, što nije slučaj kod Fabry-Perot-ove rezonanse (Sl. 5(b)). Ovde su gubici jako veliki (-8.7 dB na ZOR, odnosno -5.9 dB za Fabry-Perot rezonansu u slučaju kada je dužina proreza 3mm), što je posledica velikog tangensa gubitaka kod ROHACELL-a 200WF na ovoj frekvenciji. Sa Sl. 5(c) i (d) se može videti da bi slabljenje bilo znatno manje kada bismo posedovali dielektrik iste relativne dielektrične konstante sa manjim tangensom gubitaka (-3.7 dB na ZOR, odnosno -0.7 dB za Fabry-Perot rezonansu u slučaju kada je dužina proreza 4mm). Pošto je slabljenje u ovom slučaju manje, opseg pomeranja ZOR rezonanse se povećava. Za dužinu proreza od 4 mm tunelovanje energije se odvija na

frekvenciji od 8.31 GHz, tako da pomeranje frekvencije za ZOR iznosi 12.4% opsega, dok za Fabry-Perot rezonansu 8.2% opsega.

Treba istaći da longitudinalni prorezi postavljeni duž ENZ kanala veoma malo zrače, što nije slučaj sa sličnim prorezima u standardnom talasovodu, koji predstavljaju zračće elemente i koriste se pri konstrukciji antena.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen novi dizajn ENZ talasovoda koji se sastoji od dva penasta talasovoda postavljena na mikrotalasni dielektrični supstrat koji ujedno služi i kao ENZ kanal. Pokazano je da se korišćenjem ROHACELL-a sa manjim gubicima ($tg\delta=0.001$) može realizovati struktura sa znatno manjim unesenim slabljenjem na ZOR i Fabry-Perot-ovoj rezonansi. Uz pomoć longitudinalnih slotova na donjoj strani kanala postigli smo pomeranje ZOR i Fabry-Perot-ove frekvencije u opsegu od 12.4% i 8.2%, respektivno. U pripremi je eksperiment, tako da ćemo moći da uporedimo izmerene i simulirane vrednost transmisije i refleksije u bliskoj budućnosti.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansiran sredstvima Ministarstva za prosvetu i nauku preko projekta tehnološkog razvoja TR-32024.

LITERATURA

- [1] M. G. Silveirinha and N. Engheta, "Tunnelling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials", *Physical Review Letters*, vol. 97, 157403, 2006.
- [2] M. Mitrović, B. Jokačić, "Field Tunnelling and Losses in Narrow Waveguide Channel", *Microwave Review* **16-2**, pp. 8-13, 2010
- [3] B. Edwards, A. Alù, M. E. Young, M. G. Silveirinha, and N. Engheta, "Experimental verification of epsilon-near-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide", *Physical Review Letters*, vol. 100, 033903, 2008.
- [4] R. Liu, Q. Cheng, T. Hand, J. J. Mock, T. J. Cui, S. A. Cummer, and D. R. Smith, "Experimental demonstration of electromagnetic tunnelling through an epsilon-near-zero metamaterial at microwave frequencies", *Physical Review Letters*, vol. 100, 023903, 2008.
- [5] D. V. B. Murthy, A. Corona-Chávez, and J. L. Olvera-Cervantes, "A novel epsilon near zero (ENZ) tunneling circuit using microstrip technology for high integrability applications", *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 15, pp 65-74, 2010.
- [6] H. Lobato-Morales, A. Corona-Chávez, D. V. B. Murthy, J. Martinez-Brito, L. G. Guerrero-Ojeda, "Experimental dielectric sensing of materials using epsilon-near-zero tunnel in SIW technology", *2010 IEEE MTT-s International Microwave Symposium Digest*, pp. 1644-1647.
- [7] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, New York: McGraw-Hill, 1951.
- [8] T. Rozzi, and M. Mongiardo, "E-Plane Steps in Rectangular Waveguide", *IEEE Trans. Microw. Th. Techn.*, Vol.39, No.8, pp. 1279-1288, 1991
- [9] L. Zhao, Y. G. Ma, and C. K. Ong, "Simulation of Current Experiments on the Tunneling Effect of Narrow ϵ -Near-Zero Channels", [arXiv:0804.4027v1](https://arxiv.org/abs/0804.4027v1)

Abstract – In this paper we propose a novel design of ϵ -near-zero (ENZ) channel operating at X-band. It consists of two input foam waveguides mounted on dielectric substrate that also serves as an ENZ channel. Two longitudinal slots are placed along the channel to shift the frequency of both, zeroth-order and Fabry-Perrot resonances. Changing the slot length it is possible to shift zeroth-order resonance (ZOR) toward lower frequencies, all the way to the cut-off frequency of input waveguides (from 9.34 GHz to 8.76 GHz, i.e. in the range of 6.6 %). Our simulations include the real characteristics of dielectrics and metals used in ENZ channel in order to compare directly measured and simulated characteristics.

NOVEL DESIGN OF TUNABLE ENZ CHANNEL AT X-BAND

Miranda Mitrović, Branka Jokačić