

EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA ŠIROKOPOJASNOG POMERANJA FREKVENCije TUNELOVANJA U SUŽENOM ENZ KANALU

Miranda Mitrović, Branka Jokanović, Nebojša Vojnović, Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu, miranda@ipb.ac.rs

Nagrađeni rad mladog istraživača

Sadržaj – U ovom radu je predstavljena eksperimentalna verifikacija tunelovanja energije kroz uzak talasovodni kanal u kome je efektivna dielektrična permitivnost bliska nuli (ϵ -near-zero, ENZ). Za eksperiment je korišćen novi dizajn kod koga je širina ENZ talasovoda smanjena u odnosu na širinu uvodnika, čime se omogućava da materijal korišćen u ENZ kanalu ima veću dielektričnu konstantu nego u uvodnicima, što do sada nije bio slučaj. Eksperimentalno je proveren i novi metod za pomeranje frekvencije tunelovanja pomoću dva longitudinalna prereza na široj strani kanala. Pomeraj frekvencije tunelovanja posle dodavanja prereza odgovara teorijskim predviđanjima i iznosi $\Delta f = 1.07$ GHz (6.98-5.91 GHz), odnosno 15.3%.

1. UVOD

Tunelovanje energije kroz vrlo uzak kanal dobijen smanjenjem visine pravougaonog talasovoda privlači veliku pažnju naučne zajednice u poslednjih nekoliko godina. Teorijski je pokazano [1] da je moguća transmisija ulaznog signala iz većeg uvodnog talasovoda kroz uzak talasovodni kanal, bez obzira na neprilagođenje izazvano velikim diskontinuitetom u E-ravni. Objasnjeno je [2] da se ovakva neuobičajena transmisija nazvana tunelovanje javlja blizu granične učestanosti u kanalu, kada je njegova efektivna permitivnost bliska nuli (ϵ -near-zero, ENZ). U ovakvoj strukturi talasna dužina teži beskonačnosti, te se prostiranje talasa može smatrati kvazistatičkim, čak i na velikim rastojanjima. Upravo zbog ovoga se ENZ kanal može koristiti za poboljšanje efikasnosti prenosa energije kroz talasovodne diskontinuitete, kao i za konfiniranje energije na prostoru ispod difrakcionog limita.

Izvršeno je nekoliko eksperimenata u mikrotalasnom opsegu u cilju dokazivanja ove teorije, pri čemu je ENZ ponašanje postignuto ili korišćenem disperzione karakteristike pravougaonog talasovoda blizu granične učestanosti [3], ili pomoću *split-ring* rezonatora štampanih na široj unutrašnjoj strani kanala [4].

Kako bi prostiranje bilo moguće, neophodno je da dielektrična permitivnost u ENZ kanalu uvek bude manja nego u ulaznim talasovodima, u slučaju kada im je širina jednaka. Za razliku od frekvencije tunelovanja koja ne zavisi od dužine kanala, ENZ kanal podržava prostiranje na još jednoj frekvenciji koja predstavlja *Fabry-Perot*-ovu (FP) rezonansu, koja veoma izraženo zavisi od dužine kanala.

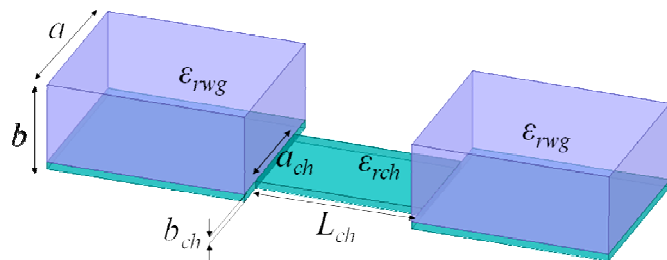
U [5] je predstavljeno kako se menjanjem kapacitivnosti varaktora diode koja je postavljena na sredini kanala može postići nelinearna kontrola frekvencije tunelovanja. Međutim, postignuti frekvencijski pomak je praćen značajnim smanjenjem amplitude transmisije i faktora dobrote za veće kapacitivnosti, što je i glavna mana ovog pristupa.

U ovom radu je prikazana eksperimentalna verifikacija pomeranja frekvencije tunelovanja pomoću longitudinalnih prereza na suženom ENZ kanalu. Primenjen je novi dizajn ENZ talasovoda sa suženim kanalom, kao i novi metod za efikasno pomeranje frekvencije tunelovanja u širokom frekvencijskom opsegu [6]. Pomeranje frekvencije

tunelovanja se postiže promenom dužine dva longitudinalna prereza postavljena na široj strani kanala, što može biti izvedeno i elektronskim putem. Ovakav način pomeranja frekvencije tunelovanja malo utiče na amplitudu koeficijenta transmisije i može se efikasno primeniti na veoma uske kanale, što u [5] nije slučaj.

2. EKSPERIMENTALNI MODEL ENZ TALASOVODA

Izgled ENZ talasovoda koji je korišćen u eksperimentu prikazan je na Sl. 1 sa odgovarajućim dimenzijama: širina $a=22$ mm, širina kanala $a_{ch}=15$ mm, visina $b=11$ mm, visina kanala $b_{ch}=0.508$ mm. ENZ talasovod se sastoji od tankog mikrotalasnog supstrata CuFlon-a ($\epsilon_r=2.1$, $tg\delta=0.001$) koji služi kao ENZ kanal i kao nosač za ulazne talasovode. Upotreba mikrotalasnog supstrata u kanalu je glavna prednost ovog dizajna jer omogućava preciznu kontrolu visine kanala i hrapavosti metala, koji značajno utiču na gubitke prilikom transmisije. Ulazni talasovodi su napravljeni od penastog dielektrika ROHACELL 200 WF ($\epsilon_r=1.22$ and $tg\delta=0.0009$) koji se lako seče i oblikuje. U prethodnim radovima koji se bave ENZ talasovodom je naglašavano da dielektrična permitivnost kanala (ϵ_{rch}) mora biti manja od dielektrične permitivnosti u uvodnim talasovodima (ϵ_{rwg}) kako bi tunelovanje energije bilo moguće. U ovom radu, međutim, prikazujemo dizajn ENZ talasovoda kod koga je ϵ_{rch} veće od ϵ_{rwg} , što zahteva da širina kanala bude manja od širine uvodnih talasovoda.



Sl.1. ENZ kanal čija je širina manja od širine uvodnih talasovoda.

Prostiranje TE_{10} moda u uskom kanalu je prema [3] moguće opisati kao prostiranje TEM moda u *parallel-plate* talasovodu sa efektivnom permitivnošću ϵ_{eff} :

$$\beta_{TE_{10}} = \sqrt{k^2 - (\pi/a)^2} = \beta_{TEM} = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c}, \quad (1)$$

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

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

Ovde je c brzina svetlosti u vakuumu, a ϵ_{rch} relativna dielektrična konstanta u kanalu. Može se videti da na

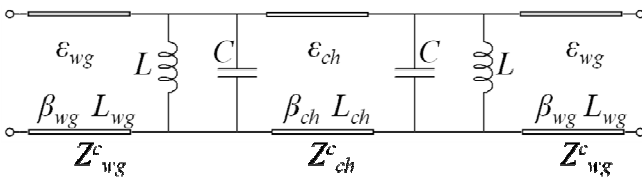
graničnoj učestanosti u kanalu ϵ_{reff} postaje jednako nuli, što je ujedno i frekvencija na kojoj se odvija tunelovanje energije:

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

Frekvencijski opseg u kom je omogućeno tunelovanje energije neposredno zavisi od dielektrične permitivnosti i širine kanala, koji zbog toga moraju imati vrednosti iz opsega određenog na sledeći način:

$$f_{TE_{10}}^{\text{wg}} < f_{\text{tun}} < f_{TE_{20}}^{\text{wg}} \Rightarrow a_{\text{wg}}^2 \epsilon_{\text{rwg}} / 4 \leq a_{\text{ch}}^2 \epsilon_{\text{rch}} \leq a_{\text{wg}}^2 \epsilon_{\text{rwg}}. \quad (5)$$

Ekvivalentno električno kolo za ENZ talasovod prikazano je na Sl. 2 za model sa talasovodnim pristupima. Smanjenje visine talasovoda (diskontinuitet u E-ravni) između ulaznog talasovoda i kanala se modeluje paralelno vezanom kapacitivnošću C [7] a smanjenje širine talasovoda (step u H-ravni) se modeluje paralelno vezanom induktivnošću L [7].



Sl.2. Ekvivalentno električno kolo ENZ talasovoda kod koga je širina kanala a_{ch} manja od širine ulaznih talasovoda a_{wg} .

Ovde je konstanta propagacije β u ulaznim talasovodima i kanalu data izrazom:

$$\beta_{\text{ch(wg)}} = \sqrt{\omega^2 \mu_0 \epsilon_{\text{ch(wg)}} - (\pi / a_{\text{ch(wg)}})^2}, \quad (6)$$

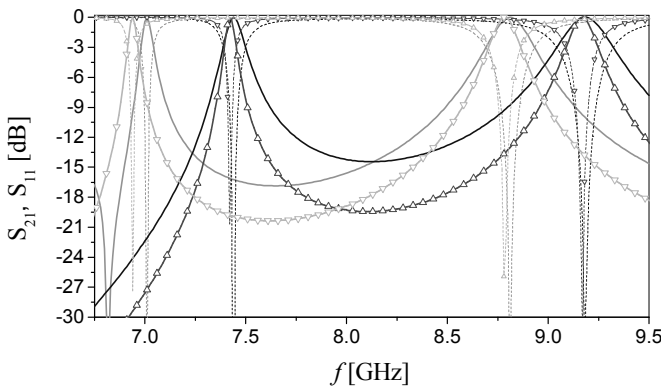
U ekvivalentnoj šemi je umesto talasne impedanse talasovoda i kanala korišćena ekvivalentna karakteristična impedansa koja je definisana kao:

$$Z_{\text{ch(wg)}}^c = 2 \frac{b_{\text{ch(wg)}}}{a_{\text{ch(wg)}}} Z_{\text{ch(wg)}}^w. \quad (7)$$

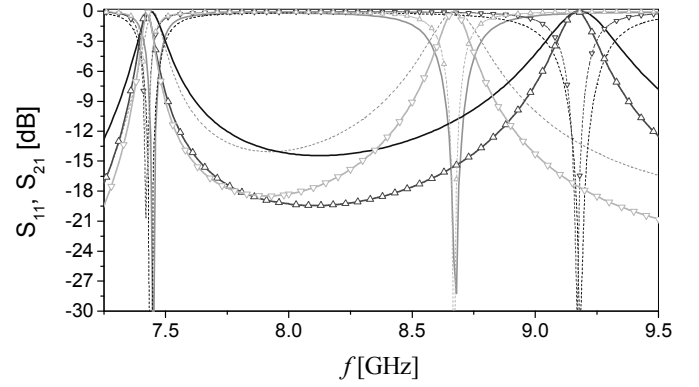
pri čemu je:

$$Z_{\text{ch(wg)}}^w = \omega \mu_0 / \beta_{\text{ch(wg)}}, \quad (8)$$

Na Sl.3. prikazano je poređenje S_{11} i S_{21} parametara dobijenih pomoću ekvivalentnog modela, odnosno *full-wave* simulacije za različite širine kanala, dok je na Sl. 4 prikazano poređenje za različite dužine kanala:



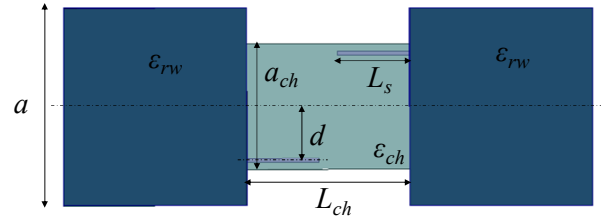
Sl.3. Poređenje S_{11} (isprekidane linije) i S_{21} (pune linije) parametara dobijenih pomoću *full-wave* simulacije (linije sa trouglićima), odnosno ekvivalentnog modela (bez markera). Svetle linije odgovaraju širini kanala $a_{\text{ch}}=15$ mm, a tamne su za slučaj $a_{\text{ch}}=14$ mm.



Sl.4. Poređenje S_{11} (isprekidane linije) i S_{21} (pune linije) parametara dobijenih pomoću *full-wave* simulacije (linije sa trouglićima), odnosno ekvivalentnog modela (bez markera). Svetle linije odgovaraju dužini kanala $L_{\text{ch}}=22$ mm, a tamne su za slučaj $L_{\text{ch}}=18$ mm.

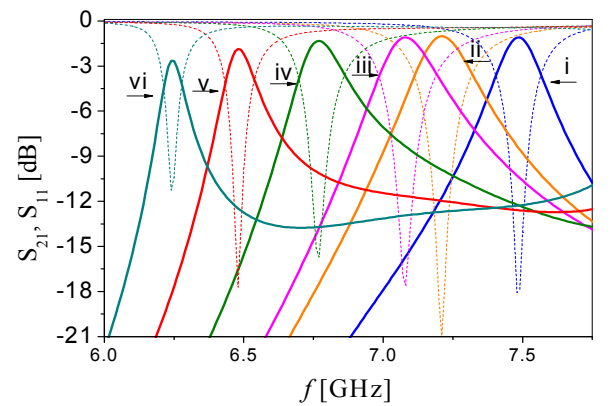
3. POMERANJE FREKVENCIJE TUNELOVANJA POMOĆU LONGITUDINALNIH PROREZA

Prema izrazu (4) frekvencija tunelovanja zavisi samo od širine pravougaonog talasovoda i dielektrične permitivnosti u kanalu, te je nepromenljiva za datu geometriju. U ovom radu, međutim, pokazujemo kako je moguće pomerati frekvenciju tunelovanja koristeći dva kratka longitudinalna proreza ($L_s = \lambda_0/7$) postavljena na širu stranu kanala, kao što se može videti na Sl. 5:



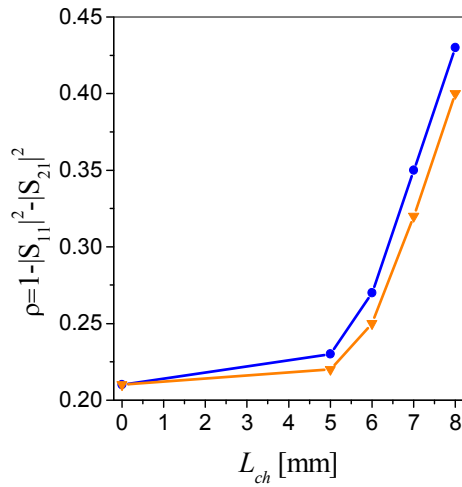
Sl.5. ENZ kanal sa prorezima za pomeranje frekvencije tunelovanja dužine L_s .

Širina proreza je 0.5 mm, a njihova dužina i položaj se menjaju kako bi se ispitala optimalne vrednosti za najbolju osetljivost pomeranja frekvencije tunelovanja. Simulirani S_{11} i S_{21} parametri u okolini frekvencije tunelovanja su prikazani na Sl. 6 za različite dužine proreza L_s i slučaj kada je ofset proreza $d=6$ mm:



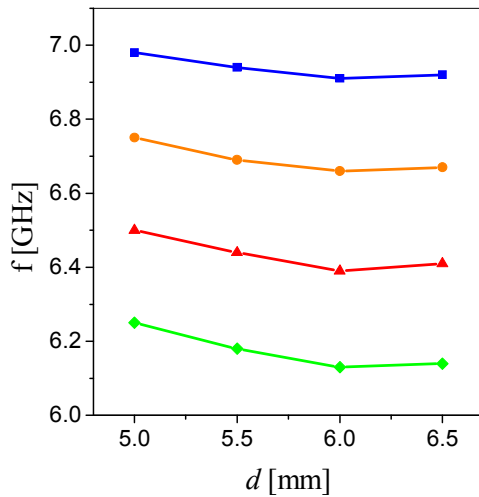
Sl.6. Simulirani S_{21} i S_{11} parametri za slučaj bez proreza i za proreze različitih dužina: i) bez proreza, ii) $L_s=4$ mm, iii) $L_s=5$ mm, iv) $L_s=6$ mm, v) $L_s=7$ mm i vi) $L_s=8$ mm. Širina proreza je 0.5 mm, a ofset $d=6$ mm.

Pomeranje frekvencije tunelovanja iznosi $\Delta f = 1.24$ GHz (7.48-6.24 GHz), što daje pomeraž od 16.6%, sa smanjenjem amplitude od 1.5 dB. Zavisnost gubitaka ρ od dužine proreza data je na Sl. 7. Jasno se vidi da ukupno slabljenje raste što su prorezi duži, a uzrok tome su zračenje iz otvorenih proreza, kao i slabije prilagodjenje.



Sl.7. Gubici u ENZ kanalu na frekvenciji tunelovanja u zavisnosti od dužine proreza za ofset $d=6.5$ mm (tamna linija) i $d=5$ mm (svetla linija).

Opseg pomeranja frekvencije tunelovanja ne zavisi samo od dužine proreza, već i od njihovog položaja u odnosu na sredinu kanala (ofseta). Na Sl. 8 je data zavisnost frekvencije tunelovanja od ofseta proreza, za različite dužine proreza. Ofset $d=6.5$ mm odgovara slučaju kada se prorezi nalaze uz samu ivicu kanala, i sa grafika se može videti da je osetljivost najbolja kada su prorezi ipak malo odmaknuti od ivice (ofset $d=6$ mm).

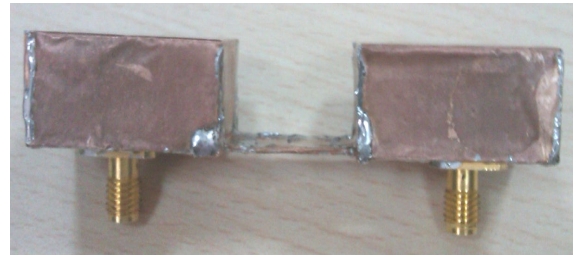


Sl.8. Zavisnost frekvencije tunelovanja od ofseta proreza d za dužine kanala $L_s=5, 6, 7$ i 8 mm gledano odozgo na dole.

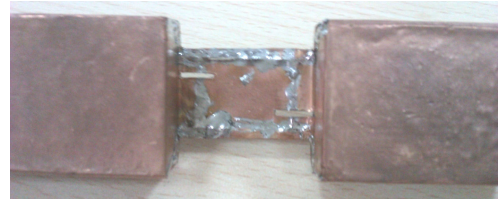
4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Za potrebe eksperimenta ulazni talasovodi su pobuđeni koaksijalnim konektorima čiji je položaj (rastojanje u odnosu na kanal i kratki spoj), kao i dužina pinova koji ulaze u unutrašnjost uvodnika optimizovani tako da se dobije najbolje prilagođenje u okolini frekvencije tunelovanja. Eksperimentalni model sa koaksijalnim konektorima prikazan

je na Sl. 9, a na Sl. 10 su prikazani prorezi na široj strani ENZ kanala.

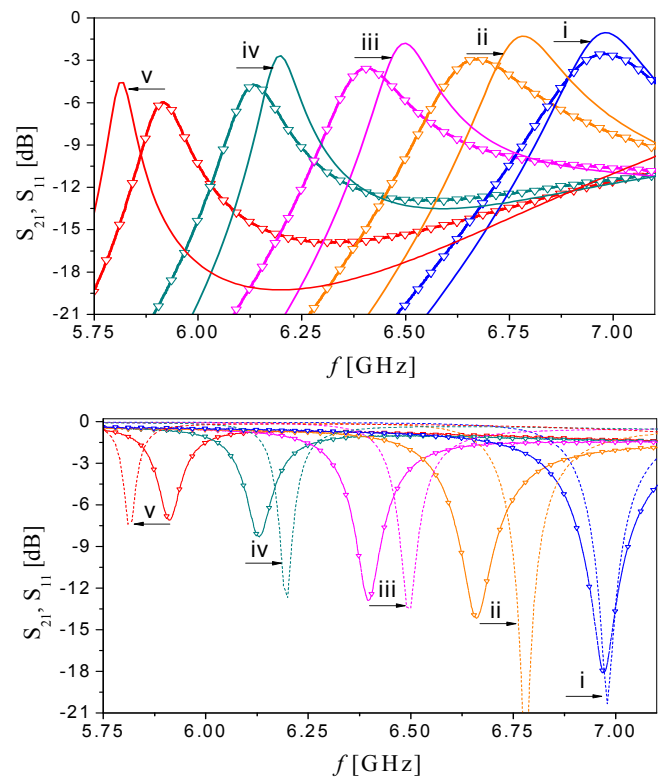


Sl.9. Fabrikovani ENZ talasovod sa koaksijalnim konektorima.



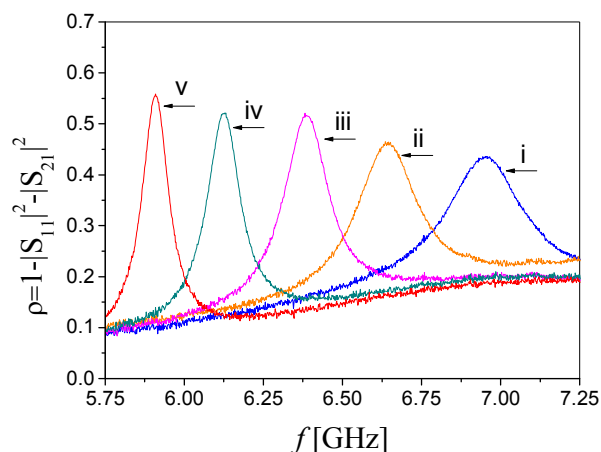
Sl.10. Prikaz proreza na široj strani ENZ kanala. Ofset proreza je $d=6$ mm.

U fabrikovanom modelu je za kanal korišćen CuFlon debljine 0.504 mm, koji ujedno služi i kao nosač za uvodne talasovode napravljene od penastog dielektrika ROHACELL-a. Po završetku eksperimenta se pokazalo da lepak koji je korišćen pri izradi menja dielektričnu konstantu u kanalu, tako da su eksperimentalni rezultati upoređeni sa saimuliranim pri čemu je zadato da je $\epsilon_{rch}=2.4$ (umesto 2.1). Na Sl. 11 su dati upoređeni S_{21} i S_{11} parametri:



Sl.11. S_{11} i S_{21} parametri dobijeni eksperimentalno (linije označene trougličima) i pomoću simulacije (linije bez markera) za različite dužine proreza: i) bez proreza, ii) $L_s=4$ mm, iii) $L_s=5.5$ mm, iv) $L_s=6.6$ mm i v) $L_s=8$ mm.

Na Sl. 12 su prikazani izmereni gubici u ENZ kanalu:



Sl.12. Izmereni gubici u ENZ kanalu. Oznake za vrednosti dužine kanala su iste kao za Sl. 11.

Ako se eksperimentalni gubici sa Sl. 12 uporede sa simuliranim gubicima na Sl. 7, vidi se da su eksperimentalni gubici već na početku, odnosno u slučaju bez proreza, oko dva puta veći od simuliranih, ali da ne rastu tako brzo sa postavljanjem i produživanjem proreza. To nam govori da zračenje usled otvaranja proreza ima malog udela u ukupnim gubicima, odnosno da su veliki eksperimentalni gubici uglavnom posledica nesavršenosti ručne izrade modela, što ćemo u narednim eksperimentima nastojati da poboljšamo.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su prikazani eksperimentalni rezultati koji potvrđuju tunelovanje energije kroz uzak ENZ talasovod. Za fabrikaciju modela korišćen je novi dizajn ENZ talasovoda, kao i novi metod za pomeranje frekvencije tunelovanja. Dobijeno je dobro slaganje eksperimentalnih podataka sa teorijskim predviđanjima. Pomeraj frekvencije iznosi $\Delta f = 1.07$ GHz (6.98-5.91 GHz), odnosno 15.3%.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansiran sredstvima Ministarstva za prosvetu i nauku preko projekta tehnološkog razvoja TR32024 i III 45016.

LITERATURA

- [1] M. G. Silveirinha and N. Engheta, "Tunnelling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials", *Phys. Rev. Letters*, vol. 97, 157403, 2006.
- [2] A. Alu, M. G. Silveirinha, A. Salandrino, and N. Engheta, "Epsilon-near-zero metamaterials and electromagnetic sources: tailoring the radiation phase pattern", *Phys. Rev. B*, vol. 75, 155410, 2007.
- [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", *Phys. Rev. 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", *Phys. Rev. Letters*, vol. 100, 023903, 2008.
- [5] D. A. Powell, A. Alù, B. Edwards, A. Vakil, Y. S. Kivshar, and N. Engheta, "Nonlinear control of tunnelling through an epsilon-near-zero channel", *Phys. Rev. B*, vol. 79, 245135, 2009.
- [6] M. Mitrović, B. Jakanović, "Novi dizajn ENZ kanala na X-opsegu sa promenljivom učestanošću tunelovanja", *Zbornik 55. Konferencije za ETRAN*, Teslić, Republika Srpska, 6-9. juna 2010.
- [7] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, New York: McGraw-Hill, 1951.

Abstract – In this paper experimental verification of energy tunneling through narrow waveguide channel with effective permittivity close to zero (ϵ -near-zero, ENZ) has been presented. Novel design with ENZ channel width smaller than the width of the input waveguides was used for this experiment. This means that the permittivity in channel can be lower than in input waveguides, which was not the case in investigations so far. Also, a novel method of tuning the tunneling frequency by means of two longitudinal slots on the broad side of ENZ channel was experimentally confirmed. The tunneling frequency shift after introducing slots is in a good agreement with theoretical prediction and is $\Delta f = 1.07$ GHz (6.98-5.91 GHz), which is 15.3% of tuning range.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF WIDEBAND TUNING OF THE TUNNELING FREQUENCY IN NARROWED ENZ CHANNEL

Miranda Mitrović, Branka Jakanović, Nebojša Vojnović