

Širokopojasno pomeranje frekvencije tunelovanja u suženom talasovodnom kanalu u kome je efektivna permitivnost bliska nuli (epsilon-near-zero, ENZ).

Руководилац пројекта: др Бранка Јокановић

Одговорно лице: др Бранка Јокановић

Аутори: Миранда Митровић, Небојша Војновић, др Бранка Јокановић, Институт за физику, Београд

Развијено: у оквиру пројекта технолошког развоја ТР-32024 Реконфигурабилне, мултибанд и скениране антене на бази метаматеријала за бежичне комуникационе системе и сензоре

Година: 2012

Примена: 2013

Кратак опис

Реализован је нови, компактни, широкопојасни прелаз микрострип-таласовод за Х-опсег. Предложени склоп се једноставно користи јер не захтева електрични контакт са зидовима таласовода. Особине овог прелаза су много боље од свих до сада публикованих прелаза из исте класе. Слагање између симулираних и измерених резултата је изврсно.

Техничке карактеристике:

Прелаз микрострип-таласовод за Х-опсег је реализован на RO3010 супстрату диелектричне константе 10.2 и тангенса губитака 0.0035. Реализовани прелаз има прилагођење боље од -15dB у 73% Х-опсега, док је у преко 89% Х-опсега прилагођење боље од -10dB. Унесено слабљење је -0.35dB на централној фреквенцији Х-опсега.

Техничке могућности:

Реализовани прелаз микрострип-таласовод не захтева ослонац између две половине правоугаоног таласовода, нити контакт са странама таласовода. Због тога је овај прелаз толерантнији на грешке у сечењу супстрата. У поређењу са Kaneda-овим прелазом[1], овај прелаз задржава све добре карактеристике које се тичу доброг прилагођења, једноставности израде и монтирања, али је робуснији у односу на толеранцију грешака у производњи. Додатно, овај прелаз има и мање унесено слабљење у односу на Kaneda-ов прелаз који је реализован на истом супстрату

Реализатори: Институт за физику, Београд

Корисници: Институт за физику, Београд

Подтип решења: M85 – Лабораторијски прототип

Стање у свету

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 doskontinuitetom u

E-равни. Objašnjeno je [2] da se ovakva neuobičajena transmisija nazvana tunelovanje javlja blizu granične učestanosti u kanalu, kada je njegova efektivna permitivnost bliska nuli (*epsilon-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.

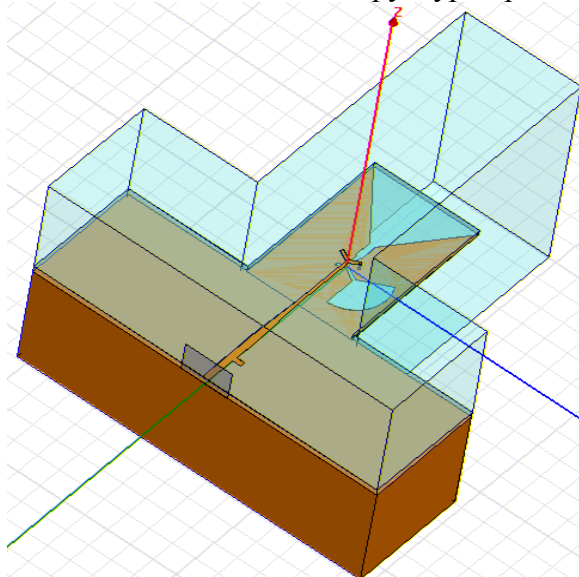
Izvršeno je nekoliko eksperimenata u mikrotalasnom opsegu u cilju dokazivanja ove teorije, pri čemu je ENZ ponašanje postignuto ili korišćenem disperzione karakteristike pravougaonog talasovoda blizu granične učestanosti [3], ili pomoću *split-ring* rezonatora štampanih na široj unutrašnjoj strani kanala [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 varaktor diode koja je postavljena na sredini kanala može postići nelinearna kontrola frekvencije tunelovanja. Međutim, postignuti frekvenzijski pomak je praćen značajnim smanjenjem amplitude transmisije i faktora dobrote za veće kapacitivnosti, što je i glavna mana ovog pristupa.

Прелаз микрострип-таласовод са двоструким-У балуном

Прелаз микрострип-таласовод са двоструким-У балуном се састоји од модификованог двоструког-У микрострип-слот балуна и врло кратке слот антене са линеарним тејпером (LTSA), који су смештени у Е-равни правоугаоног таласовода. Прелаз је пројектован тако да је ширина супстрата ужа од висине (b) таласовода, тако да су карактеристике поновљиве, чак и када су грешке при опсецању супстрата реда $150\mu\text{m}$. Такође, због саме природе прелаза није потребно да се супстрат умеће између две половине таласовода нити је потребан кратак спој на таласоводу који је на одређеном растојању од сонде, као код прелаза коаксијални вод-таласовод. Изглед структуре приказан је на Сл.1..

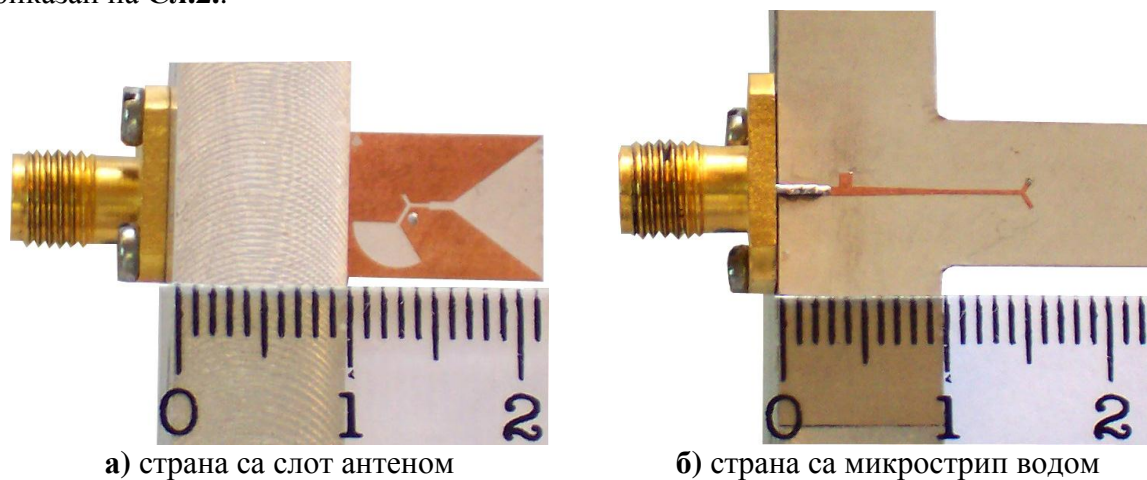


Слика 1. Изглед прелаза са двоструким-У балуном

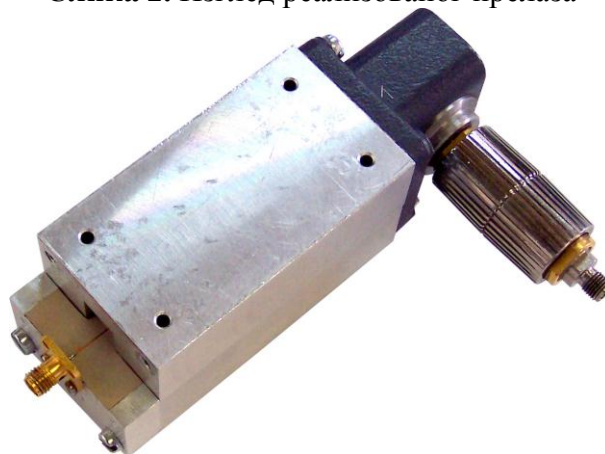
Прелаз је реализован за Х-опсег на супстрату RO3010 дебљине $h=0.635\text{mm}$ ($\epsilon_r=10.2$ i $tg\delta=0.0035$) и има унесено слабљење 0.35dB на средини опсега. Овако мало слабљење,

Kaneda прелаз има тек на керамичком супстрату са $tg\delta=0.0002$. Што се тиче рефлексије, она је испод -12dB у 36% опсега (рачунато у односу на централну учестаност). Двоструки-Y балун је реализован са водовима импедансе 75Ω , при чему је круг, који представља отворен вод на слот линији, замењен кружним исечком под углом $\alpha=60^\circ$. Ово је било неопходно због ограниченог простора у таласоводу, а балун и не мора да буде ултраширокопојасан, јер је прелаз за X-опсег (око пола октаве). Коначне дужине отворених и краткоспојених секција балуна добијене су оптимизацијом у програмском пакету Ansoft HFSS [3]. Између улазног микрострип вода импедансе 50Ω и балуна налази се трансформатор импедансе који је пројектован као линеарни тејпер на дужини од 5mm . Између слот линије на излазу балуна и слот антене се налази $\lambda/4$ -ски трансформатор импедансе који трансформише излазну импедансу балуна од 75Ω на импедансу слот антене од 125Ω . Коначна дужина овог трансформатора такође је добијена оптимизацијом.

Слот антена је прво пројектована са експоненцијалним тејпером, а затим су пробане разне варијанте тејпера. Циљ је био да се добије што широкопојаснији прелаз са најмањом дужином антене. Најбољи резултати су добијени са линеарним тејпером дужине $L_a=18\text{mm}$, при чему је ширина супстрата одговарала висини таласовода. Запажено је да мале грешке у ширини супстрата и до $20\mu\text{m}$ доводе до појаве резонанси у пропусном опсегу. Да би се ово избегло, дужина антене је оптимизована тако да ширина супстрата буде ужа од висине таласовода. Најбоља вредност је добијена када је супстрат широк $W_s=9.22\text{mm}$, а дужина антене $L_a=5.66\text{mm}$. Изглед пројектованог прелаза је приказан на Сл.2..



Слика 2. Изглед реализованог прелаза

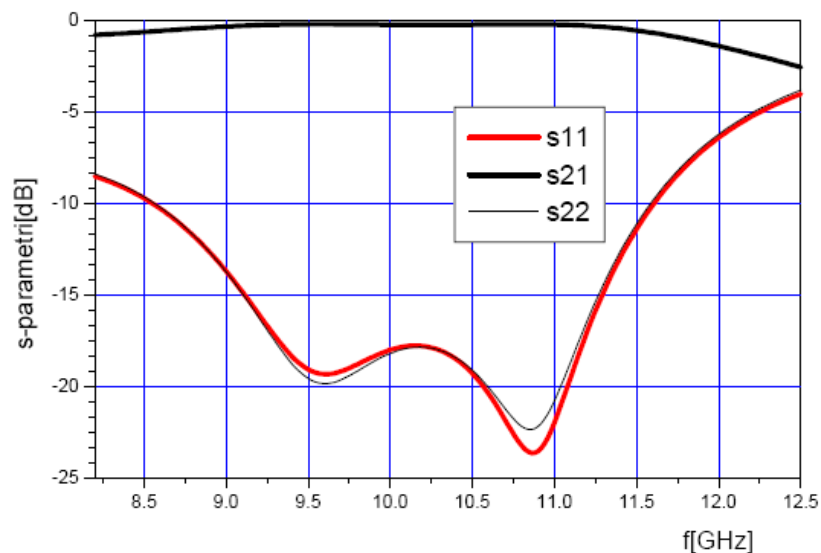


Слика 3. Део мерне апаратуре са прелазом монтираним у правоугаони таласовод. Са

друге стране таласовода је прелаз таласовод-коаксијални вод којим се везује на анализатор мреже.

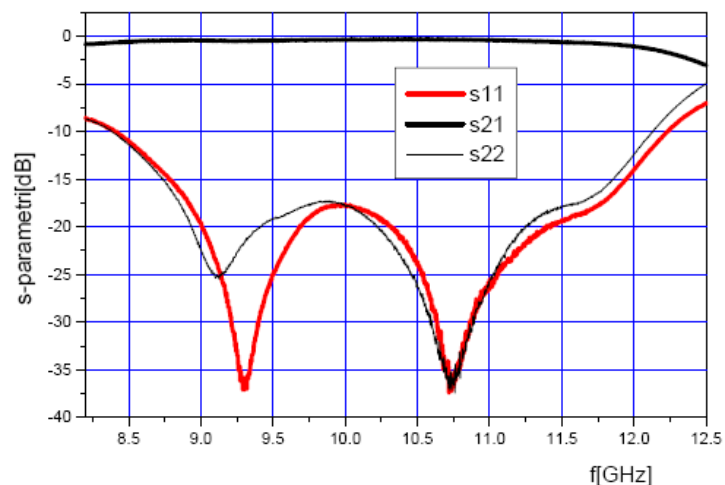
На **Сл.2.6)** се на улазном воду види стуб који служи за додатно подешавање рефлексије. После завршене оптимизације кључних параметара прелаза помоћу овог стуба је добијено додатно смањење рефлексије за 2- 3dB на средини опсега. Димензије стуба су поновљиве и не треба их подешавати при реализацији. Са слике се може видети да је дужина прелаза у таласоводу око 13mm ($Lwg=13.35mm$), док је ван таласовода дужина прелаза (шири део) једнака 10mm. Прелаз је у том делу залепљен за метални држач и монтира се на таласовод помоћу два завртња са доње стране металног држача, као што је показано на **Сл.3.**

На **Сл.4.** су показани симулирани *s*-параметри прелаза на Хопсегу, код кога је на приступу 1 SMA конектор, а на приступу 2 таласовод. На основу симулираних резултата види се да је рефлексија боља од -10dB у 50.9% X-опсега, а боља од -15dB у 71.4% опсега.



Слика 4. Симулирани S-параметри прелаза

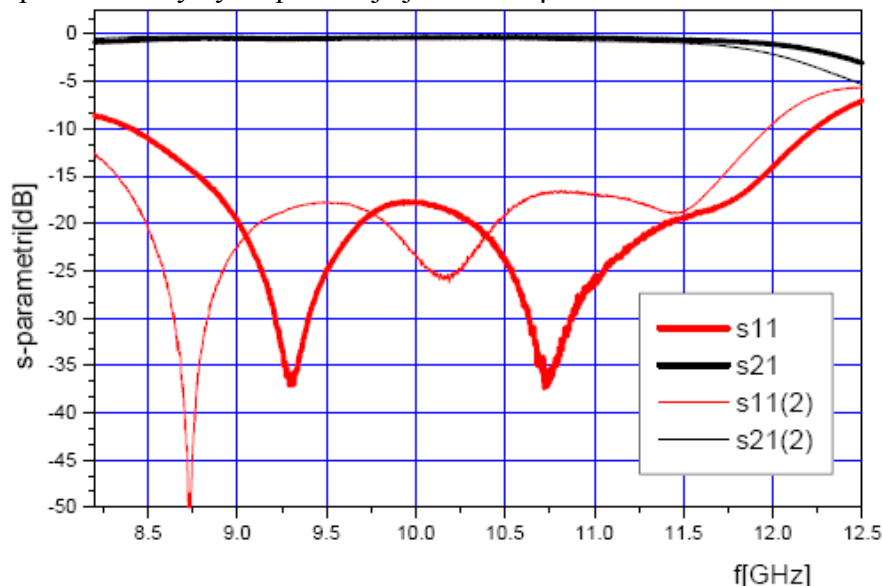
Прелаз који је монтиран као на **Сл.3.** мерен је на анализатору мреже PNA E8634A Agilent Technologies применом TRL калибрације. На тај начин је елиминисан утицај коаксијалног прелаза на таласовод, па се измерене карактеристике односе на прелаз који има таласоводни приступ са једне стране, а са друге SMA конектор на микрострип воду, што одговара и условима при симулацији. На **Сл.5.** су приказани измерени S-параметри прелаза.



Слика 5. Измерене карактеристике прелаза

Са Сл. 5. се види да је у односу на централну учестаност X-опсега рефлексија испод -15dB у 31.6%, испод -12dB у 35.7%, док је испод -10dB у 38.3%. Како је циљ био да се реализује прелаз који би покрио цео X-опсег, од интереса је да се остварени резултати прикажу у односу на ширину X-опсега. Тако је рефлексија боља од -10dB у 89% X-опсега, боља од -12dB у 83.1% опсега и боља од -15dB у 78.7%. За разлику од Kaneda прелаза код кога је мало унесено слабљење једино остварљиво на керамичком супстрату, иначе је реда 0.9dB на средини опсега, овде је са супстратом RO3010 измерено слабљење на средини опсега 0.35dB, док је на 12.5GHz 3.05dB, што се добро слаже са вредношћу добијеном при симулацији од 2.57dB.

На Сл.6. приказано је поређење резултата два прелаза од којих је са (2) означен прелаз са грешком при опсецању супстрата која је око 150 μ m.



Слика 6. Утицај толеранција при опсецању супстрата

Са слике се види да уколико се супстрат који улази у таласовод опсече тако да му ширина није $W_s=9.22\text{mm}$, већ $W_s=9.07\text{mm}$, све карактеристике се померају ка нижим учестаностима при чему је опсег у коме је рефлексија испод -10dB 87.7% X-опсега, а

испод -15dB у 78.7% опсега што је и нешто шири опсег него кад се тачно исече. Међутим, слабљење на крају опсега се повећава на 5.38dB због померања карактеристика ка нижим учестаностима, али и ово је знатно боље од Kaneda прелаза код кога је слабљење на крају опсега веће од 10dB. Треба напоменути да су код реализованих прелаза добијени шири пропусни опсези у односу на симулацију, јер се при опсецању супстрата увек јављају грешке које су око 30-50 μ m.

Техничке карактеристике

- димензије прелаза: 13.35mm x 10(5)mm x 9.22mm
- радна учестаност: 8GHz -12GHz (X-опсег)
- унесено слабљење на централној фреквенцији: -0.35dB
- прилагођење: мање од -10dB на 89% X-опсега, односно мање од -12dB на 83% X-опсега, односно мање од -15dB на 73% X-опсега
- супстрат: Duroid RO3010

Примена

Пројектован је прелаз микрострип-таласовод Е-типа за X-опсег. Овај прелаз не захтева монтажу између две половине правоугаоног таласовода, нити контакт са странама таласовода. Због тога је овај прелаз отпорнији на грешке у сечењу супстрата. Остале предности су: мале димензије, добро прилагођење и мало унесено слабљење.

Референце:

- [1] L. J. Lavedan, *Design of waveguide-to-microstrip transition specially suited to millimeter-wave applications*, *Electron. Lett.*, vol. 13, no. 20, pp. 604–605, Sept. 1977.
- [2] N. Kaneda, Y. Qian, and T. Itoh, *A broad-band microstrip-to-waveguide transition using quasi-Yagi antenna*, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 4, pp. 2562-2567, Dec 1999.
- [3] *HFSS, Software and User's Manual*