

# MINIJATURNI CMOS REZONATORI NA BAZI HILBERTOVE FRAKTALNE KRIVE

Nikolina Janković, *Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija*, [nikolina@uns.ac.rs](mailto:nikolina@uns.ac.rs)  
Jovanče Trajković, *Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija*, [jovance.trajkovic@gmail.com](mailto:jovance.trajkovic@gmail.com)  
Vesna Crnojević-Bengin, *Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija*, [bengin@uns.ac.rs](mailto:bengin@uns.ac.rs)

**Sadržaj** – U ovom radu prikazani su rezonatori na bazi Hilbertove fraktalne krive realizovani u 0.18 $\mu$ m CMOS tehnologiji sa poboljšanim performansama u odnosu na performanse do sada predloženih rezonatora. Rezonatori se karakterišu veoma jednostavnom strukturom pošto su realizovani kao jednoslojni, planarni rezonatori bez korišćenja via.

## 1. UVOD

Usled veoma brzog razvoja komunikacionih sistema postoji stalna potreba za poboljšanjem performansi mikrotalasnih komponenti kao i za povećanjem nivoa integrisanosti elektronskih kola. Zahvaljujući pouzdanosti i niskoj ceni proizvodnje, CMOS tehnologija je idealna za *system-on-chip* rešenja koji se karakterišu dobrim karakteristikama i visokim nivoom integracije elektronskih sistema.

*System-on-chip* strukture podrazumevaju integraciju aktivnih i pasivnih kola u isti sistem i najveću prepreku daljem poboljšanju njihovih performansi predstavljaju pasivne komponente koje, pored toga što zauzimaju najveći deo površine čipa, unose i velike gubitke. Naime, zbog postojanja silicijumskog poluprovodnog supstrata u CMOS tehnologiji koji se karakteriše malom ali konačnom provodnošću, značajan deo energije odlazi u supstrat što uzrokuje velika slabljenja. Takođe, ovi gubici su praćeni gubicima u aluminijskom provodniku.

Do sada je prodloženo nekoliko načina da se redukuje energija koja odlazi u supstrat kao što su jonska implantacija [1], *micromachining* tehnika [2] i korišćenje debelog izolacionog sloja, [3]. Međutim, ovi nestandardni procesi zahtevaju dodatne korake u proizvodnji što fabrikaciju čini skupljom i kompleksnijom.

Najjednostavniji način za smanjenje gubitaka podrazumeva korišćenje najnižeg metalnog sloja u CMOS strukturi kao zaštitnog sloja između pasivne komponente i silicijumskog supstrata. Na taj način se formira povratna strujna putanja i minimizuje električno polje koje curi u silicijumsku oblast, [4].

Pored redukovanja gubitaka, bitan aspekt prilikom projektovanja CMOS pasivnih kola je i njihova minijaturizacija. Kada su u pitanju rezonatori i filtri, jedan od metoda minijaturizacije predstavlja primenu različitih efekata kao što je efekat usporenja talasa, [5]. Sa druge strane, konvencionalne metode minijaturizacije podrazumevaju savijanje linija kako bi rezonator zauzeo što manju površinu, [6]-[8].

Do sada predloženi CMOS rezonatori uglavnom su namenjeni radu na učestanostima višim od 40GHz i imaju veoma širok propusni opseg, a samim tim i nizak faktor dobrote.

Fraktalne krive poseduju osobinu ispunjavanja prostora, tj. posle beskonačnog broja iteracija, one postaju beskonačno duge i u potpunosti ispunjavaju konačnu oblast u kojoj su definisane. Ova osobina čini fraktalne krive dobrim kandidatima za minijaturizaciju rezonatora.

U ovom radu prikazani su rezonatori na bazi Hilbertove fraktalne krive trećeg, odnosno četvrtog reda realizovani u 0.18 $\mu$ m CMOS tehnologiji. Ovi rezonatori pokazuju znatno bolje osobine kada su u pitanju ukupne dimenzije i ponašanje u nepropusnom opsegu od do sada predloženih CMOS rezonatora.

## 2. FRAKTALNE KRIVE

Pronalazačem fraktala se smatra Gilbert Peano koji je krajem 19. veka konstruisao neprekidnu krivu koja prolazi kroz svaku tačku nekog kvadrata, [9]. Fraktalne krive se generišu sukcesivnim zamenjivanjem određenog geometrijskog oblika drugim geometrijskim oblikom koji uglavnom predstavlja skaliranu kopiju prvog oblika. Nakon svake iteracije dobija se fraktalna kriva višeg reda koja je duža od prethodne i koja bolje popunjava prostor u kojem se generiše. Osobina popunjavanja prostora omogućava minijaturizaciju pasivnih mikrotalasnih kola jer, teorijski, primena fraktalnih krivi omogućava projektovanje beskonačno dugačke linije na konačnoj površini.

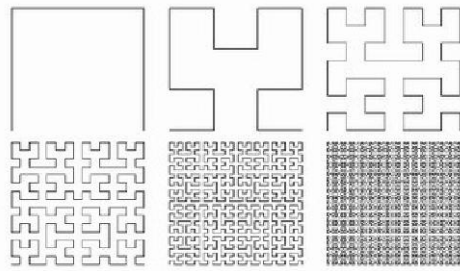
Fraktalne krive se karakterišu fraktalnom dimenzijom, odnosno dimenzijom koja nije celobrojna. Njena vrednost je veća od 1, a manja od 2 i predstavlja meru mogućnosti popunjavanja prostora fraktalne krive.

Zbog tehnoloških ograničenja kao što je najmanja debljina linije dostupna u procesu fabrikacije, fraktalne krive ne mogu fizički da se realizuju. Stoga se umesto fraktala koriste pre-fraktali – fraktalne krive konačnog reda čije linije imaju konačnu širinu.

Slika 1 prikazuje prvih šest iteracija Hilbertove fraktalne krive. Svaka sledeća iteracija se sastoji od četiri kopije prethodne iteracije koje su međusobno povezane linijskim segmentima. Nakon beskonačnog broja iteracija Hilbertova fraktalna kriva u potpunosti popunjava kvadratnu površinu.

Hilbertova fraktalna kriva je otvorena kriva čiji se krajevi nalaze na suprotnim stranama što ovu krivu čini pogodnom za primenu u krajevima spregnutim mikrostrip

rezonatorima. Takođe, njena dimenzija je jednaka 2, odnosno najveća moguća kada su u pitanju fraktalne krive. Sa ovom idejom predloženi su minijaturni rezonatori na bazi višestrukih dvodimenzionalnih Hilbertovih fraktalnih krivih realizovani u standardnoj mikrostrip tehnologiji, [10].



Sl. 1. Prvih šest iteracija Hilbertove fraktalne krive

### 3. CMOS 0.18 $\mu$ m TEHNOLOGIJA

Poprečni presek 0.18 $\mu$ m CMOS strukture prikazan je na slici 2.



Sl. 2. Poprečni presek 0.18 $\mu$ m CMOS strukture

Struktura se sastoji od šest provodnih slojeva (M6-M1) koji omogućavaju fleksibilno projektovanje kola. Njihova debljina iznosi 0.5 $\mu$ m, odnosno 2 $\mu$ m koliko iznosi debljina najvišeg sloja. Provodni slojevi su odvojeni dielektričnim slojevima silicijum-dioksida debljine 0.85 $\mu$ m i relativne permitivnosti od 3.9.

Silicijumski supstrat se karakteriše provodnošću od 10S/m što je osnovni uzrok velikih gubitaka koji se javljaju u CMOS pasivnim kolima u milimetarskom opsegu učestanosti.

Najjednostavniji način za smanjenje gubitaka podrazumeva korišćenje najnižeg metalnog sloja u CMOS strukturi kao zaštitnog sloja između pasivne komponente i silicijumskog supstrata. Na taj način se formira povratna strujna putanja i minimizuje električno polje koje curi u silicijumsku oblast.

Međutim, debljina provodnog sloja M1 iznosi 0.5 $\mu$ m i na visokim učestanostima je jednaka dubini prodiranja elektromagnetskog talasa pa deo energije i pored zaštitnog sloja curi u silicijumsku oblast.

Prilikom projektovanja CMOS pasivnih kola koja se baziraju na mikrostrip strukturama potrebno je u konačne dimenzije strukture uračunati i površinu koju zauzimaju *dummy* pečevi. Ove strukture predstavljaju metalne pečeve koji su u elektromagnetskom smislu neaktivni, a koriste se

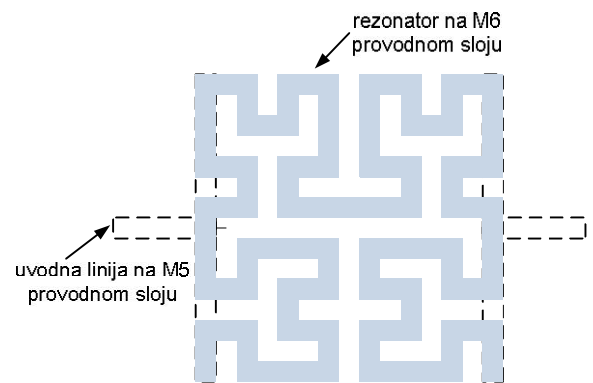
kako bi se izbegle neželjene interakcije između slojeva, deformiteti u strukturi u smislu debljine slojeva i odstupanja od projektovanih dimenzija.

### 4. KONFIGURACIJE I ODZIVI REZONATORA

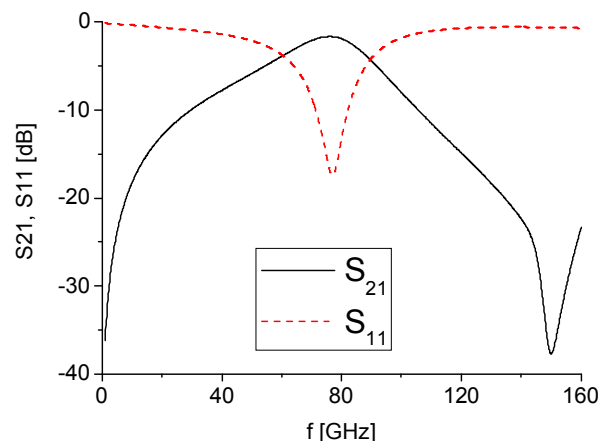
Predloženi rezonatori realizovani su na najvišem provodnom sloju CMOS strukture. Uvodne linije se nalaze na M5 provodnom sloju radi pojačane sprege sa rezonatorom, dok se najniži provodni sloj koristi za izolaciju rezonatora od silicijumskog supstrata.

Slika 3 prikazuje rezonator sa Hilbertovom fraktalnom krivom trećeg reda čiji su širina linija i procepi između linija jednaki i iznose 10 $\mu$ m, a površina koju zauzima rezonator jednaka 0.15x0.15mm<sup>2</sup>.

Na slici 4 se može videti da se rezonator karakteriše eliptičkim odzivom i da njegova rezonantna učestanost iznosi 75.9GHz, a minimalno uneseno slabljenje -1.62dB. Takođe, pol se nalazi na učestanosti od 150GHz i u velikoj meri poboljšava selektivnost rezonatora i sužava njegov propusni opseg.



Sl. 3. Rezonator na bazi Hilbertove fraktalne krive trećeg reda

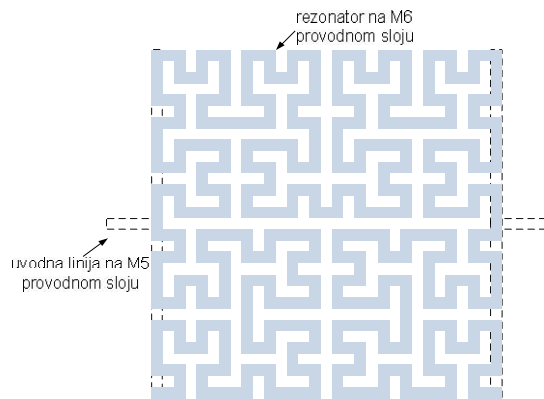


Sl. 4. Odziv rezonatora na bazi Hilbertove fraktalne krive trećeg reda

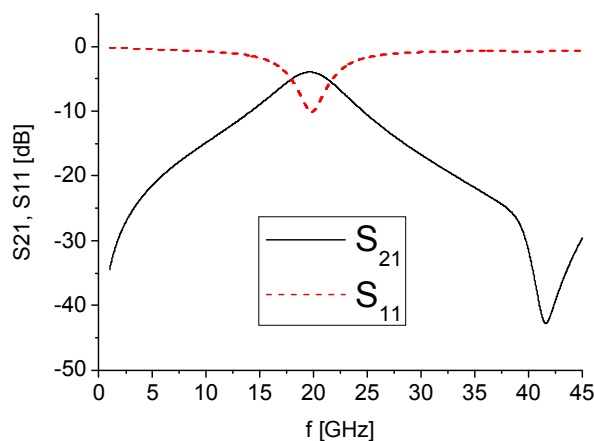
Pol u odzivu rezonatora se javlja usled složene strukture rezonatora. Naime, Hilbertova fraktalna kriva trećeg reda se sastoji od četiri fraktalne krive drugog reda, odnosno rezonator se može posmatrati kao struktura koju čine četiri jednostavnija rezonatora. Pored direktne, između ovih rezonatora postoje i međusprege koje uzrokuju pojavu pola.

Iako se ovaj rezonator karakteriše izuzetno malom površinom koju zauzima, njegova radna učestanost je relativno visoka. Radi snižavanja rezonantne učestanosti, realizovan je rezonator koji je baziran na Hilbertovoj fraktalnoj krivoj četvrtog reda. Ovaj rezonator se sastoji od četiri rezonatora sa krivom trećeg reda, i samim tim ima četiri puta veću dužinu i površinu.

Izgled i odziv rezonatora sa Hilbertovom fraktalnom krivom četvrtog reda prikazani su na slikama 5 i 6. Shodno povećanju dimezija, radna učestanost rezonatora je smanjena 3.87 puta i iznosi 19.59GHz. Takođe, i minimalno uneseno slabljenje je povećano i u ovom slučaju iznosi -3.96dB. Kao i u prethodnom slučaju, rezonator ima eliptički odziv, odnosno karakteriše se polom koji se nalazi na 41.96GHz i posledica je složene strukture rezonatora.



Sl. 5. Rezonator na bazi Hilbertove fraktalne krive četvrtog reda



Sl. 6. Odziv rezonatora na bazi Hilbertove fraktalne krive četvrtog reda

Rezonatori bazirani na Hilbertovoj fraktalnoj krivoj imaju veoma jednostavnu strukturu pošto su realizovani u jednom provodnom sloju i bez korišćenja via. Takođe, njihovi odzivi su eliptički i zbog postojanja pola njihovi propusni opsezi su suženi, a selektivnost poboljšana.

Prednost predloženih rezonatora leži i u činjenici da se promenom širine linije i razmaka između njih može menjati rezonantna učestanost, a da se pritom ukupna površina koju rezonator zauzima ne menja.

S obzirom da su do sada predloženi rezonatori uglavnom namenjeni radu na učestanostima višim od 40GHz, prednost rezonatora baziranog na Hilbertovoj fraktalnoj krivoj četvrtog

reda je i relativno niska rezonantna učestanost uz iste ili manje ukupne dimezije u odnosu na predložene rezonatore.

U poređenju sa strukturom iz [6], čija je rezonantna učestanost jednaka 22GHz, Hilbertov rezonator zauzima manju površinu i radi na nešto nižoj učestanosti. Takođe, zahvaljujući polu ima bolju selektivnost i užu propusni opseg, pa samim tim i veći faktor dobrote.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su rezonatori bazirani na Hilbertovoj fraktalnoj krivoj realizovani u 0.18 $\mu$ m CMOS tehnologiji.

Rezonatori imaju veoma jednostavnu strukturu pošto su realizovani korišćenjem samo jednog provodnog sloja, odnosno bez korišćenja via i višeslojnih struktura.

Zbog strukture fraktalne krive rezonatori imaju eliptički odziv, a samim tim i bolju selektivnost.

Prednost predloženih rezonatora leži i u činjenici da se promenom širine linije i razmaka između njih može menjati rezonantna učestanost, a da se pritom ukupna površina koju rezonator zauzima ne menja.

S obzirom da su do sada predloženi CMOS rezonatori uglavnom namenjeni radu na učestanostima višim od 40GHz, prednost rezonatora na bazi Hilbertove fraktalne krive četvrtog reda se ogleda i u znatno nižoj rezonantnoj učestanosti uz iste ili manje ukupne dimezije u odnosu na predložane rezonatore.

## LITERATURA

- [1] A. Chin, K. Lee, B.C. Lin, and S. Horong, "Picosecond photoresponse of carriers in Si ion-implanted Si," *Appl. Phys. Letters*, vol. 69, no. 5, pp. 653–655, July 1996.
- [2] T.M. Weller, K.J. Herrick, and L.P.B. Katehi, "Quasi-static design technique for mm-wave micromachined filters with lumped elements and series stubs," *IEEE Trans. on MTT*, vol. 45, no. 6, pp. 931–938, June 1997.
- [3] C.-M. Nam and Y.-S. Kwon, "Coplanar waveguides on silicon substrate with thick oxidized porous silicon (OPS) layer," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 8, no. 11, pp. 369–371, November 1998.
- [4] T.S.D. Cheung and J.R. Long, "Shielded passive devices for silicon-based monolithic microwave and millimeter-wave integrated circuits," *IEEE Journal of Solid State Circuits*, vol. 41, no. 5, pp. 1183–1200, May 2006.
- [5] M. K. Chirala and C. Nguyen, "A novel CMOS hairpin resonator using slow-wave structure," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 527–529, August 2005.
- [6] S. Lin, L. Yang, and X. Sun, "A compacted CMOS K-band bandpass filter using meandering thin film microstrip and UC-PBG structures," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 3, pp. 871–874, March 2009.
- [7] S. Sun, J. Shi, L. Zhu, S. C. Rustagi, and Koen Mouthaan, "Millimeter-Wave Bandpass Filters by Standard 0.18- $\mu$ m CMOS Technology," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 28, no. 3, pp. 220–222, March 2007.

- [8] C. Liu, C. Hsu, C. Chen, and H. Chuang, "60-GHz bandpass filter with ACMRC resonator fabricated using 0.18 $\mu$ m CMOS technology," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 3, pp. 597-600, March 2009.
- [9] G. Peano, "Sur une courbe qui remplit toute une aire plane," *Math. Ann.*, vol. 36, pp. 157–160, 1890.
- [10] V. Crnojević-Bengin, "Novel compact microstrip resonators with multiple 2-D Hilbert fractal curves," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, no. 2, pp. 270-273, February 2006.

**Abstract** – *In this paper compact CMOS resonators based on the Hilbert fractal curve that outperforms other CMOS resonator configurations are presented. The resonators have very simple structure since they are realised using only one conductive layer, i.e. without vias and multilayer structures.*

### **COMPACT CMOS RESONATORS BASED ON THE HILBERT FRACTAL CURVE**

Nikolina Janković, Jovanče Trajković, Vesna Crnojević-  
Bengin