

# Šumne performanse debeloslojnih otpornika trimovanih energijom visokonaponskih impulsa

Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović

IRITEL a.d. Beograd

Beograd, Republika Srbija

[zdravkos@iritel.com](mailto:zdravkos@iritel.com); [inam@iritel.com](mailto:inam@iritel.com)

**Sažetak**—Savremene primene debeloslojne tehnologije u realizaciji C-MEMS naprava i savremenih komunikacionih sistema zahtevaju upotrebu debeloslojnih otpornika redukovanih dimenzija, strožih tolerancija i sve masovnije primenu ukopanih komponenti. Za takve primene koristi se podešavanje vrednosti otpornosti otpornika energijom visokonaponskih impulsa. U radu su prikazani rezultati analize veze šuma i strukturnih promena izazvanih ovom alternativnom metodom trimovanja zasnovane na standardnom merenju indeksa šuma i šumom redukovanoj pokretljivosti - parametru koji povezuje transportne i šumne karakteristike otpornika.

**Ključne reči**- debeloslojni otpornik; trimovanje energijom visokonaponskih impulsa; otpornost; indeks šuma; šumom redukovana pokretljivost; bezdimenzioni parametar.

## I. UVOD

Debeloslojna tehnologija je u širokoj upotrebi već decenijama zahvaljujući pouzdanim performansama debeloslojnih kola koja se koriste i u komercijalnim i u specijalizovanim elektronskim napravama i sistemima. Tokom godina svoje mesto je našla u realizaciji osetljivih telekomunikacionih sistema i u različitim senzorskim primenama. Kada se pojavila tehnologija mikro-elektromehaničkih sistema (MEMS), debeloslojna tehnologija je pronašla svoje mesto u realizaciji keramičkih MEMS naprava (C-MEMS) koje su nešto većih dimenzija od standardnih MEMS naprava na bazi silicijuma i koje se obično koriste u ekstremnim radnim uslovima. Keramičke MEMS naprave u kombinaciji sa debeloslojnom tehnologijom se ne koriste samo za realizaciju senzorskih i aktuatorskih elemenata već i u realizaciji elektronskih kola za procesiranje signala. Kod ovih primena posebno značajnu ulogu imaju debeloslojni otpornici koji se koriste i kao senzorski i kao otporni elementi. Nove primene su obično praćene i strožim zahtevima koji se postavljaju pred otporne komponente kao što su smanjenje dimenzija, strože tolerancije i sve masovnija primena ukopanih komponenti. Standardne procedure trimovanja kao što su abrazivno i lasersko trimovanje morale su biti zamenjene alternativnom metodom – trimovanjem pomoću energije visokonaponskih impulsa (tzv. HVP trimovanje) koje omogućava precizno podešavanje vrednosti otpornosti bez narušavanja integriteta površine otpornika. Znanje stečeno

tokom višegodišnjih eksperimentalnih i teorijskih istraživanja vezanih za nepoželjno visokonaponsko naprezanje debeloslojnih otpornika [1-3] je poslužilo kao osnova za evaluaciju efekata koje kod debeloslojnih otpornika izaziva metoda trimovanja energijom visokonaponskih impulsa. Za razliku od do sada objavljenih radova vezanih za ovu tematiku koji su se bavili driftom otpornosti, karakterizacijom električnih svojstava i stabilnošću otpornika [4-7], ovaj rad ima za cilj uspostavljanje veze između šuma i strukturnih promena izazvanih primenom ove alternativne metode korišćenjem merenja indeksa šuma i šumom redukovane pokretljivosti, parametra koji povezuje transportne i šumne karakteristike otpornika. Metoda evaluacije zasnovana na merenju indeksa šuma debeloslojnih otpornika je prikazana u poglavlju II, uslovi eksperimenta su dati u poglavlju III dok su rezultati i diskusija predstavljeni u poglavlju IV.

## II. METODA EVALUACIJE

U našim ranijim istraživanjima pouzdanosti debeloslojnih otpornika razvili smo model koji se zasniva na standardnim merenjima otpornosti i indeksa šuma i koji je u upotrebu uveo dva nova parametra: bezdimenzioni parametar  $C_R$  i šumom redukovanu pokretljivost  $\mu_{oH}$  [8]. Poznato je da se indeks šuma, izražen u dB, definiše relacijom:

$$NI = 20 \log \frac{\sqrt{\langle V^2 \rangle}}{V}, \quad (1)$$

gde su  $\langle V^2 \rangle$  srednja vrednost kvadrata napona šuma izraženog u  $\mu V$  za opseg frekvencija  $B$  i  $V$  primenjeni jednosmerni napon na otporniku izražen u  $V$ . Centralna frekvencija je 1 kHz koja je geometrijska sredina 3 dB – graničnih frekvencija propusnog filtra mernog uređaja. Spektralna gustina napona šuma je tada opisana jednačinom:

$$S_{ni} = 10^{-12} \frac{V^2}{B} 10^{\frac{NI}{10}}. \quad (2)$$

Bezdimenzioni parametar  $C_R$  je povezan sa šumnim karakteristikama otpornika sledećim izrazom:

$$C_R = B \frac{S_{ni} - 4kTR}{V^2 \log(f_2/f_1)}, \quad (3)$$

gde je  $B$  propusni opseg sistema,  $4kTR$  spektralna gustina termičkog šuma,  $V$  primenjeni napon na test otporniku, a  $f_1$  i  $f_2$  granične učestanosti propusnog opsega.

Šumom redukovana pokretljivost  $\mu_{aH}$  je parametar koji zavisi od parametara sloja, a njegovu vezu sa šumnim karakteristikama otpornika određuje parametar  $C_R$ :

$$\mu_{aH} = \frac{C_R l^2}{qR}, \quad (4)$$

gde je  $l$  dužina otpornika,  $q$  naelektrisanje nosilaca i  $R$  otpornost uzorka.

Šumom redukovanu pokretljivost možemo izraziti i pomoću strukturnih i geometrijskih parametara ukoliko usvojimo sledeće pretpostavke:

1. U debelom otpornom sloju ne postoje kontakti između provodnih čestica, već su sve provodne čestice od susednih odvojene tankom staklenom barijerom širine  $s$ ;
2. Dominantan mehanizam provođenja je tunelovanje, te ukupnu otpornost debeloslojnog otpornika određuju barijerene otpornosti struktura provodna čestica–staklena barijera–provodna čestica koje se formiraju tokom procesa sinterovanja [9, 10]:

$$R = \frac{K_B}{M} R_B = \frac{K_B}{M} \frac{h^2 s}{q^2 A (2mq\Phi_B)^{1/2}} \times \exp \left[ \left( \frac{32\pi^2 mqs^2 \Phi_B}{h^2} \right)^{1/2} \right], \quad (5)$$

gde je  $K_B$  broj staklenih barijera u jednom od  $M$  provodnih lanaca,  $R_B$  barijerna otpornost,  $q$  i  $m$  naelektrisanje elektrona i njegova efektivna masa, respektivno,  $h$  Plankova konstanta,  $\Phi_B$  visina potencijalne barijere i  $A$  površina kroz koju se vrši tunelovanje

3. Dominantan  $1/f$  šum je posledica modulacije barijere Najkvistovim šumom, i u tom slučaju je relativna spektralna gustina napona šuma u debeloslojnom otporniku [9]:

$$\frac{S_V(f)}{V^2} = \frac{1}{N_B} \frac{S_{VBN}}{V_B^2} = \frac{C_R}{f}, \quad (6)$$

gde je  $S_{VBN}/V_B^2$  relativna spektralna gustina napona šuma usled modulacije Najkvistovim šumom,  $N_B$  broj staklenih barijera u otporniku i  $V_B$  napon na krajevima barijere.

Šumom redukovana pokretljivost se tada može izraziti u obliku:

$$\mu_{aH} = \frac{4\pi m q^2 k T l^2 (2mq)^{1/2}}{3h^4 K_B^2} \frac{1}{\Phi_B^{1/2}} \text{tg} \delta \frac{As}{C} \times \exp \left[ - \left( \frac{32\pi^2 mqs^2 \Phi_B}{h^2} \right)^{1/2} \right], \quad (7)$$

gde je  $k$  Bolcmanova konstanta,  $T$  apsolutna temperatura,  $\text{tg} \delta$  tangens gubitaka u izolatoru i  $C$  kapacitivnost strukture provodna čestica–staklena barijera–provodna čestica.

Imajući u vidu da se  $\mu_{aH}$  može izračunati na osnovu merenja šuma i otpornosti i da uključuje šumne i transportne karakteristike debelog sloja, ovaj parametar može biti upotrebljen kao indikator kvaliteta i pouzdanosti debeloslojnih otpornika. Pošto šumne i transportne karakteristike zavise od strukture debelog filma, to je ovaj parametar istovremeno povezan i sa strukturnim osobinama filma.

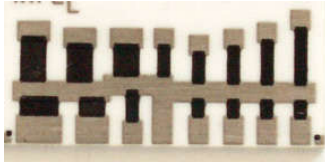
Na osnovu izmerenih vrednosti otpornosti i indeksa šuma serije test uzoraka debeloslojnih otpornika izloženih trimovanju energijom visokonaponskih impulsa računaju se vrednosti bezdimenzionog parametra  $C_R$  i šumom redukovane pokretljivosti  $\mu_{aH}$ . Pošto merenje indeksa šuma predstavlja standardnu metodu ocene karakteristika debelog otpornog sloja to je korelacija ovog parametra sa strukturnim promenama izazvanim trimovanjem energijom visokonaponskih impulsa značajna sa aspekta povezivanja šumnih, transportnih i strukturnih karakteristika otpornika. Promene na nivou mikrostrukture izazvane trimovanjem se tako mogu registrovati promenama vrednosti otpornosti i indeksa šuma, a samim tim i šumom redukovane pokretljivosti  $\mu_{aH}$  koja zavisi od strukturnih i geometrijskih, a preko bezdimenzionog parametra  $C_R$  i od šumnih karakteristika sloja.

### III. EKSPERIMENT

Analiza uticaja efekata trimovanja debeloslojnih otpornika energijom visokonaponskih impulsa na šumne parametre otpornih struktura je izvedena pomoću serije test uzoraka koji su formirani na keramičkim alumina (96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) supstratima konvencionalnim tehnikama sitoštampe. Komercijalno raspoloživom otpornom pastom slojne otpornosti 10 k $\Omega$ /sq formirani su debeloslojni otpornici različitih geometrija u kombinaciji sa PdAg provodnom pastom. Posle procesa sitoštampe vlažni slojevi su bili nivelisani na sobnoj temperaturi u trajanju od 15 min, da bi potom bili sušeni u tunelskoj infracrvenoj sušnici u 15 min ciklusu na temperaturi od 150 °C. Provodni sloj je žaren u 30 min ciklusu, dok su otporni slojevi žareni u standardnom ciklusu od 60 min sa maksimalnom temperaturom žarenja od 850 °C u trajanju od 10 min. Fotografija test uzoraka je prikazana na slici 1.

Da bi se analizirali efekti trimovanja debeloslojnih otpornika energijom visokonaponskih impulsa za njihovo generisanje upotrebljen je Haefely P6T generator impulsa. Merenja otpornosti su izvršena pomoću uređaja HP34401A. Za merenje indeksa šuma pri 1kHz korišćen je Quan-Tech Resistor Test Set, Model 315B. Uslovi eksperimenta su odabrani tako da se obezbedi postepena promena vrednosti otpornosti bez mogućnosti pojave katastrofalnih otkaza.

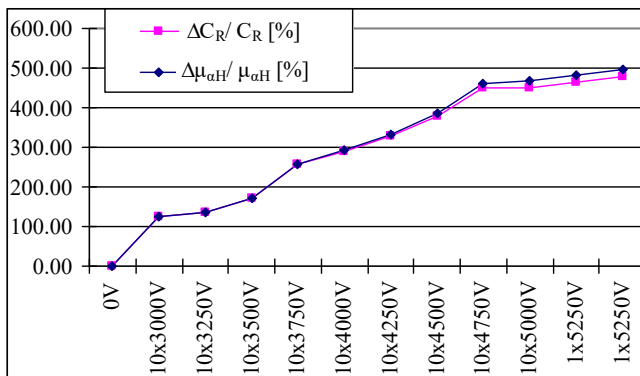
Vazno je istaći da su za eksperimentalno istraživanje izabrani otpornici slojne otpornosti 10 kΩ/sq, zbog svog odnosa provodne i staklene faze. Oni objedinjuju efekte primećene kod otpornika realizovanih pastama nižih i viših slojnih otpornosti i kod njih se se svaka vrsta promene na nivou bilo makro ili mikrostrukture tačnije registruje posmatranjem promene parametara šuma nego merenjima otpornosti.



Slika 1. Test uzorci debeloslojnih otpornika različitih geometrija

#### IV. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 2 i u tabeli 1 su prikazani tipični rezultati za relativne promene vrednosti parametara  $C_R$  i  $\mu_{aH}$  izazvane trimovanjem energijom visokonaponskih impulsa test otpornika slojne otpornosti 10 kΩ/sq. Na slici 2 je uočljiva neznatna razlika između relativnih promena ovih parametara usled izvršenog procesa trimovanja. Brojne vrednosti koje odgovaraju vrednostima sa slike 2, a koje su date u tabeli 1, ukazuju na činjenicu da na izmenu ova dva parametra u najvećoj meri utiče izmena šumnih karakteristika prouzrokovana visokonaponskim impulsnim tretmanom.



Slika 2. Rezultati za relativne promene bezdimenzionog parametra  $C_R$  i šumom redukovane pokretljivosti  $\mu_{aH}$  računatih na osnovu izmerenih vrednosti otpornosti i indeksa šuma debeloslojnog otpornika slojne otpornosti 10kΩ/sq trimovanog energijom visokonaponskih impulsa

Niskofrekventni šum u debeloslojnim otpornicima je posledica fluktuacija u procesu transporta naelektrisanja. Naime, izvori niskofrekventnog šuma u debeloslojnim otpornicima su same provodne čestice, sinterovani kontakti između susednih provodnih čestica i strukture provodna čestica–staklena barijera–provodna čestica. Rezultati dobijeni merenjem indeksa šuma su pokazali da indeks šuma raste prilikom trimovanja energijom visokonaponskih impulsa. Čini se da visokonaponsko trimovanje dovodi do izmene zauzetosti centara zahvata koji ne učestvuju u provođenju, ali prisustvo naelektrisanja na njima menja potencijalnu barijeru strukture

provodna čestica–staklena barijera–provodna čestica modulišući provođenje. U pitanju su izmene na nivou mikrostrukture otpornika. Zbog kontrolisane primene energije impulsa ne dolazi do makrostrukturnih promena tj. ne dolazi do narušavanja integriteta debelog otpornog sloja. Tako imamo da je izmena parametara  $C_R$  i  $\mu_{aH}$  znatno izraženija nego izmerena promena otpornosti što potvrđuje pretpostavku da je niskofrekventni šum mnogo osetljiviji na promene na nivou mikrostrukture nego otpornost.

TABELA I. PROMENE VREDNOSTI OTPORNOSTI, BEZDIMENZIONOG PARAMETRA  $C_R$  I ŠUMOM REDUKOVANE POKRETLJIVOSTI  $\mu_{aH}$  SA TRIMOVANJEM ENERGIJOM VISOKONAPONSKIH IMPULSA OTPORNIKA SLOJNE OTPORNOSTI 10kΩ/sq

$R(k\Omega)$	$\Delta R/R$ (%)	$C_R$	$\mu_{aH}$ ( $cm^2/Vs$ )	$\Delta C_R/C_R$ (%)	$\Delta \mu_{aH} / \mu_{aH}$ (%)
33.84	0	$5.33 \cdot 10^{-14}$	1.57	0	0
33.81	-0.09	$1.19 \cdot 10^{-13}$	3.53	124.25	124.45
33.8	-0.12	$1.25 \cdot 10^{-13}$	3.70	134.83	135.11
33.78	-0.18	$1.44 \cdot 10^{-13}$	4.25	169.67	170.15
33.72	-0.35	$1.89 \cdot 10^{-13}$	5.62	255.59	256.86
33.65	-0.56	$2.08 \cdot 10^{-13}$	6.17	289.93	292.13
33.56	-0.83	$2.28 \cdot 10^{-13}$	6.79	327.58	331.14
33.41	-1.27	$2.56 \cdot 10^{-13}$	7.65	379.79	385.96
33.15	-2.04	$2.94 \cdot 10^{-13}$	8.85	450.92	462.38
32.85	-2.92	$2.94 \cdot 10^{-13}$	8.943	450.92	467.52
32.83	-2.98	$3 \cdot 10^{-13}$	9.15	463.76	481.10
32.81	-3.04	$3.07 \cdot 10^{-13}$	9.369	476.90	495.01

Promena parametara šuma prilikom trimovanja otpornika različitih slojnih otpornosti zavisi od razlika na nivou njihovih mikrostrukture. To se može objasniti razlikama u prostornim raspodelama centara zahvata unutar otpornika sa različitim odnosima provodne i staklene faze pošto je utvrđeno da je uticaj kontakata između susednih provodnih čestica na niskofrekventni šum zanemarljiv. Stoga, rezultati dobijeni izračunavanjem parametara  $C_R$  i  $\mu_{aH}$ , pošto objedinjuju strukturne, geometrijske i šumne parametre otpornika mogu biti jasan pokazatelj promena koje trimovanje energijom visokonaponskih impulsa izaziva kod debeloslojnih otpornika različitih slojnih otpornosti.

U radu su prikazani rezultati dobijeni merenjem otpornosti i indeksa šuma debeloslojnih otpornika trimovanih energijom visokonaponskih impulsa. Utvrđeno je postojanje veze između promena otpornosti i niskofrekventnog šuma i dejstva visokonaponskog tretmana. Pokazano je da je niskofrekventni šum, izražen preko indeksa šuma, mnogo osetljiviji na dejstvo trimovanja otpornika koje dovodi do promena na nivou mikrostrukture nego otpornost. Pošto merenje indeksa šuma u proizvodnim uslovima predstavlja standardnu metodu ocene karakteristika debeloslojnih otpornika to je potvrđena korelacija ovog parametra sa promenama šumnih performansi otpornika izloženih ovoj alternativnoj metodi trimovanja što je značajno sa aspekta povezivanja šumnih, transportnih i strukturnih karakteristika otpornika. Na osnovu merenja otpornosti i indeksa šuma računane su vrednosti šumom redukovane pokretljivosti  $\mu_{aH}$  i bezdimenzionog parametra  $C_R$  kao indikatora promena na nivou mikrostrukture debeloslojnih otpornika, s tim što  $\mu_{aH}$  zavisi i od strukturnih i od geometrijskih parametara sloja te se može upotrebiti kao osnovni parametar za ocenu karakteristika otpornika.

Dalja kvantitativna analiza dobijenih rezultata mogla bi rezultovati novom metodom kojom bi se pratilo dejstvo trimovanja energijom visokonaponskih impulsa na debeloslojne otpornike zato što savremene primene ovih otpornika pored preciznih vrednosti otpornosti zahtevaju i zadovoljavajuće šumne karakteristike. Na taj način bi se mogao optimizovati proces trimovanja – od izbora odgovarajućih otpornih sastava do preciznog definisanja parametara procesa čime bi se ostvarile optimalne vrednosti otpornika i sa aspekta otpornosti i sa aspekta šumnih performansi.

#### ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan zahvaljujući podršci Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru angažovanja na projektima III44003 i III45007.

- [1] I. Stanimirović, M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, "High-Voltage Pulse Stressing of Thick-Film Resistors and Noise", *Microelectronics Reliability*, 43, pp. 905-911, 2003.
- [2] I. Stanimirović, M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, "Multiple High-Voltage Pulse Stressing of Conventional Thick-Film Resistors", *Microelectronics Reliability*, 47, pp. 2242-2248, 2007.
- [3] Z. Stanimirović, M.M. Jevtić, I. Stanimirović, "Simultaneous Mechanical and Electrical Straining of Conventional Thick-Film Resistors", *Microelectronics Reliability*, 48, pp. 59-67, 2008.
- [4] Z. Stanimirović, I. Stanimirović, "Effects of High Voltage Pulse Trimming on Structural Properties of Thick-Film Resistors", *Science of Sintering*, accepted for publication on March 03, 2016.
- [5] C. Grimaldi, T. Maeder, S. Strassler, "A random resistor network model of voltage trimming", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 37, pp. 2170-2174, 2004.
- [6] A. Dziedzic, A. Kolek, W. Ehrhardt, H. Thust, "Advanced electrical and stability characterization of untrimmed and variously trimmed thick-film and LTCC resistors", *Microelectronics Reliability*, 46, pp. 352-359, 2006.
- [7] B. RamBabu, K.V. Subramaniam, B. Poornaiah, Y. Srinivasa Rao: "Effect of Pulse Voltage Trimming on Different Characteristics of Polymer Thick Film Resistors", *Procedia Materials Science*, 6, pp. 1083-1090, 2014.
- [8] M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, I. Stanimirović, "Evaluation of thick-film structural parameters based on noise index measurements", *Microelectronics Reliability*, 41, pp. 59-66, 2001.
- [9] A. Kusy, A. Szpytma, "On 1/f Noise in RuO<sub>2</sub>-based Thick Resistive Films", *Solid-State Electronics*, 29, pp. 657-665, 1986.
- [10] I. Mrak, M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, "Low-frequency Noise in Thick-film Structures Caused by Traps in Glass Barriers", *Microelectronics Reliability*, 38, pp. 1569-1576, 1998.

#### ABSTRACT

Contemporary applications of thick-film resistors are imposing stricter requirements regarding their dimensions, tolerances and increasing use of buried components. For these reasons resistance adjustment using trimming by energy of high-voltage pulses is being used. In this paper correlation between noise and structural changes induced by this alternative trimming method is established using noise index measurements and the noise reduced mobility.

#### NOISE PERFORMANCES OF HVP TRIMMED TFRs

Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović