

Uticaj trimovanja energijom visokonaponskih impulsa na spektar šuma debeloslojnih otpornika

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović
Institut za telekomunikacije i elektroniku IRITEL a.d. Beograd
Beograd, Republika Srbija
inam@iritel.com; zdravkos@iritel.com

Sažetak — U radu su prikazani eksperimentalni rezultati istraživanja uticaja trimovanja energijom visokonaponskih impulsa na spektar šuma debeloslojnih otpornika slojnih otpornosti $10 \text{ k}\Omega/\square$. U cilju realizacije eksperimenta realizovana je serija test uzoraka koja je trimovana visokonaponskim impulsima rastućih amplituda iz opsega 3000 – 5250 V. Na osnovu izvršenih merenja otpornosti i spektara šuma utvrđeno je da su parametri šuma veoma osetljivi na mikrostrukturne promene izazvane procesom trimovanja šuma što je veoma važno sa aspekta realizacije i primene debelih otpornih slojeva.

Ključne riječi – *Debeloslojni otpornici; trimovanje energijom visokonaponskih impulsa; otpornost, spektar šuma; parametar fitovanja.*

I. UVOD

Savremene primene debeloslojne tehnologije pred debeloslojne otpornike postavljaju stroge zahteve. Smanjenje dimenzija otpornika, stabilne i precizne vrednosti otpornosti, uske tolerancije, sve češća upotreba ukopanih komponenti su samo neki od zahteva koji se postavljaju pred debele otporne slojeve. Pošto se otpornici formiraju konvencionalnim procesom sito štampe na keramičkim alumina podlogama, nije moguće izbeći rasipanje vrednosti otpornosti što je posledica nestabilnih uslova žarenja i varijacija u debljini štampanih otpornih slojeva. Iz tog razloga je proces trimovanja tj. finog podešavanja vrednosti otpornosti jedan od najvažnijih koraka u realizaciji debeloslojnih naprava koje u sebi sadrže debeloslojne otpornike.

Do pojave ukopanih otpornika i primene debeloslojne tehnologije u realizaciji savremenih senzorskih i MEMS naprava, za podešavanje vrednosti otpornosti se najčešće koristilo lasersko trimovanje koje je zamenilo znatno nepreciznije abrazivno trimovanje. Lasersko trimovanje omogućava precizno podešavanje vrednosti otpornosti, daje čist rez ali ima nekoliko veoma bitnih nedostataka. Postojanje minimalnih dimenzija otpornika koji se na ovaj način mogu trimovati predstavlja ograničenje kada je u pitanju minijaturizacija ovog tipa komponenti. Pored toga, lasersko trimovanje dovodi do narušavanja integriteta komponente i tom tehnikom se ne mogu trimovati ukopani debeloslojni otpornici. Za razliku od laserskog trimovanja otpornika, trimovanje energijom visokonaponskih impulsa omogućava kontrolisano podešavanje otpornosti bez obzira na dimenzije i poziciju debeloslojnog otpornika pri čemu ne odvodi do narušavanja integriteta otpornog sloja.

Za razliku od ranije objavljenih radova koji su se bavili mehanizmima provođenja i električnom stabilnošću trimovanih debeloslojnih otpornika [1-2], rezultati prikazani u ovom radu su deo opsežnog istraživanja koje je za temu imalo šumne performanse trimovanih debelih otpornih slojeva [3-7]. Istraživanje je obuhvatilo analizu uticaja trimovanja energijom visokonaponskih impulsa na strukturne karakteristike trimovanih otpornika [3-4]. Utvrđeno je postojanje veze između promena vrednosti otpornosti i parametara niskofrekventnog šuma sa izmenama mehanizama provođenja u otpornicima usled dejstva trimovanja visokonaponskim impulsima. Pored toga, razmatran je i uticaj ove vrste trimovanja na primarne geometrijske, fizičke i tehnološke parametre debelih otpornih slojeva [5]. Tom prilikom je predložen metod evaluacije zasnovan na merenjima otpornosti i indeksa šuma koji je doveo do iznalaženja potencijalnih uzroka primećenih mikro i makro strukturnih promena i definisanja za to odgovornih primarnih parametara strukture. Istražen je i uticaj visokonaponskog trimovanja na indikatore kvaliteta debeloslojnih otpornika, na bezdimenzioni parametar C_R i šumom redukovanoj pokretljivosti, koji zavise od strukturnih i geometrijskih karakteristika otpornika [6-7].

Za razliku od prethodno objavljenih rezultata koji su se uglavnom zasnivali na merenjima otpornosti i indeksa šuma, u ovom radu su objavljeni eksperimentalni rezultati istraživanja uticaja trimovanja energijom visokonaponskih impulsa na spektar šuma debeloslojnih otpornika. Rezultati ovog istraživanja, prikazani u radu, zaokružuju sveobuhvatnu analizu uticaja ove vrste trimovanja na debele otporne slojeve koja se zasniva na merenjima otpornosti i niskofrekventnog šuma tj. na merenjima indeksa šuma i šumnoj spektrometriji.

II. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DOKUSIJA

Veza između strukturnih karakteristika debeloslojnih otpornika trimovanih energijom visokonaponskih impulsa i niskofrekventnog šuma može biti ustanovljena primenom šumne spektrometrije. Za potrebe eksperimentalnog istraživanja realizovana je serija debeloslojnih test otpornika slojne otpornosti $10 \text{ k}\Omega/\square$, širine 1 mm i dužine 3 mm (sl. 1). Debeloslojni otpornici su realizovani standardnim tehnikama sito štampe na keramičkoj alumina podlozi (96% Al_2O_3). Za njihovu realizaciju je upotrebljena komercijalno raspoloživa debeloslojna otporna pasta sa oznakom DuPont QM84. Kontakti su formirani provodnom pastom paladijum/srebro sa oznakom DuPont QM21. Po štampanju, svaki od vlažnih

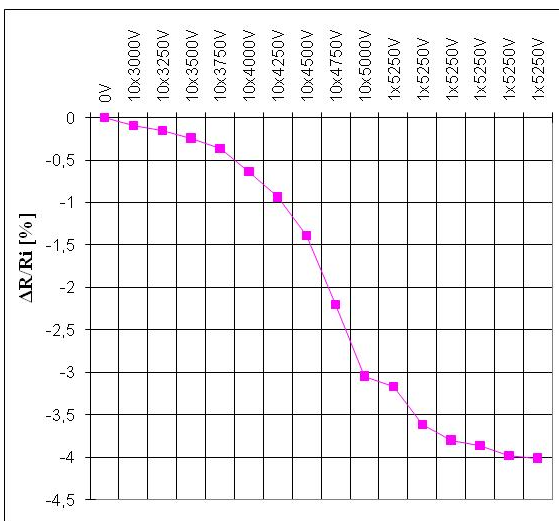
slojeva je 15 min nivelisan na sobnoj temperaturi, a zatim sušen u konvejskoj infracrvenoj sušnici u ciklusu od 15 min na temperaturi od 150 °C. Ostvarene su debljine suvih otpornih slojeva 25±3 μm. Svi formirani slojevi su žareni u ciklusima od po 30 min sa maksimalnim temperaturama žarenja od 850 °C u trajanju od 10 min.



Slika 1. Fotografija debeloslojnih otpornika slojne otpornosti 10 kΩ/□ upotrebljenih u eksperimentalnom istraživanju

Debeloslojni test otpornici su trimovani energijom visokonaponskih impulsa generisanih generatorom impulsa Haefely P6T. Otpornici su izlagani serijama od po 10 visokonaponskih impulsa rastućih amplituda iz opsega 3000-5000V, a potom pojedinačnim impulsima amplitude 5250V. Tokom eksperimenta merene su vrednosti otpornosti i spektra šuma. Merenja otpornosti su vršena uređajem HP34401A, dok su za merenja spektra šuma upotrebljeni nanovoltni pojačavač Mod. 103A, Keithley i dinamički analizator signala HP-3561B. Sva merenja su vršena na sobnoj temperaturi.

Kao ilustracija izvršenog eksperimenta na slici 2 je prikazana relativna opromena otpornosti debeloslojnog otpornika početne otpornosti 33,17 kΩ. Uočena je postepena promena vrednosti otpornosti tokom procesa trimovanja usled promena mehanizama provođenja [3-7].



Slika 2. Relativna promena otpornosti debeloslojnog otpornika slojne otpornosti $R_{sl}=10\text{ k}\Omega/\square$ i inicijalne otpornosti $R=33,17\text{ k}\Omega$

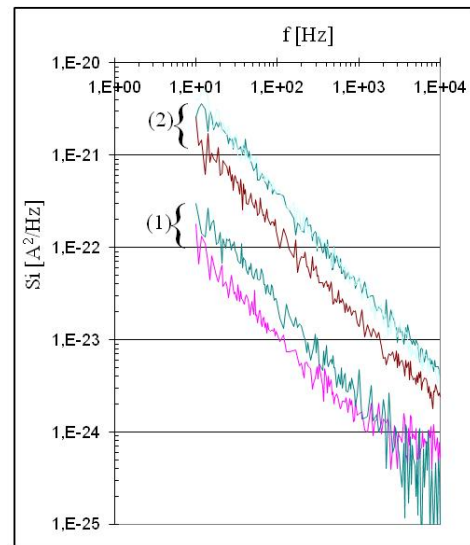
Pošto su izvori niskofrekventnog šuma u debelim otpornim filmovima u vezi sa prisutnim mehanizmima provođenja [8], efekti dejstva energije visokonaponskih impulsa na performanse otpornika se mogu uočiti i na osnovu merenja spektra šuma. Na slici 3 je prikazan spektar šuma pre i posle

izvršenog procesa trimovanja debeloslojnog otpornika energijom visokonaponskih impulsa.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata prikazanih na slici 3 i sledećeg teorijskog izraza:

$$S_i(f) = A_0 + \frac{B_0}{f^\gamma} + \sum_i \frac{C_i}{2\pi f_{Ci} (1 + f^2/f_{Ci}^2)}, \quad (1)$$

izvedena je procedura fitovanja. Prvi član $A_0 = 4k_B T/R$ predstavlja termički šum gde su R otpornost debeloslojnog otpornika, T apsolutna temperatura i k_B Bolcmanova konstanta. Drugi član izraza predstavlja doprinos $1/f$ šuma sa parametrima B_0 i γ . Suma spektara šuma Lorencovog oblika sa parametrima C_i i f_{Ci} predstavljena je trećim članom izraza (1).



Slika 3. Eksperimentalni rezultati za spektar šuma pre {1} i posle {2} izvršenog procesa trimovanja energijom visokonaponskih impulsa debeloslojnog otpornika $R_{sl}=10\text{ k}\Omega/\square$ i inicijalne otpornosti $R=33,17\text{ k}\Omega$

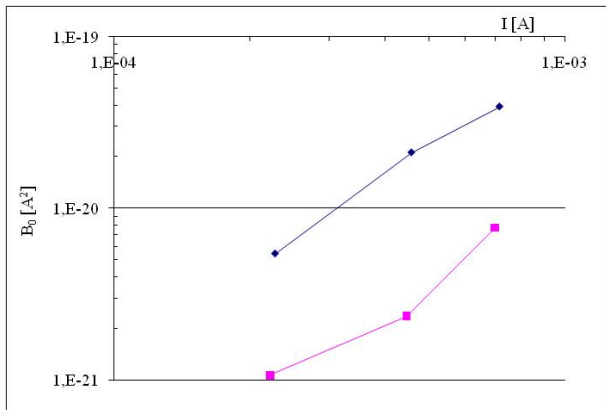
Sa slike 3 se jasno može uočiti dominantan doprinos $1/f$ šuma ukupnom spektru šuma. $1/f$ šum se u debeloslojnim otpornim strukturama javlja kao posledica:

- fluktuacija kontaktnih otpornosti u slučaju provođenja kroz kontakte između susednih provodnih čestica
- fluktuacija otpornosti samih provodnih čestica koje učestvuju u provođenju
- fluktuacija visina potencijalnih barijera zbog Nikvistovog šuma u staklenim barijerama koje se formiraju tokom procesa žarenja između provodnih čestica koje nisu u kontaktu
- fluktuacija zauzetosti klopki u staklenim barijerama nosiocima naelektrisanja koji učestvuju u procesima provođenja.

Osetljivost dominantnog $1/f$ šuma na dejstvo trimovanja otpornika energijom visokonaponskih impulsa se može utvrditi na osnovu vrednosti parametra fitovanja B_0 pre i posle izvršenog procesa trimovanja. Parametar $\gamma=1$ i ne menja se sa visokonaponskim tretmanom. Na slici 4 je prikazana strujna zavisnost parametara fitovanja $1/f$ šuma B_0 pre i posle izvršenog procesa trimovanja energijom visokonaponskih

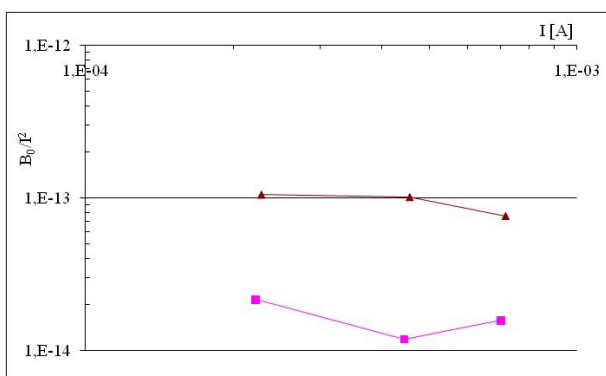
impulsa debeloslojnjog otpornika inicijalne otpornosti $R = 33,17 \text{ k}\Omega$. Uočeno je da vrednost parametra B_0 raste usled trimovanja.

Slično se može zaključiti i na osnovu slike 5 na kojoj je prikazana normalizovana amplituda niskofrekventnog šuma koja je bezdimenziona. Na osnovu rezultata prikazanih na ovim dvema slikama može se zaključiti da $1/f$ šum raste za približno red veličine usled izvršenog procesa trimovanja.



Slika 4. Strujna zavisnost parametara fitovanja $1/f$ šuma B_0 pre (■) i posle (◆) izvršenog procesa trimovanja energijom visokonaponskih impulsa debeloslojnjog otpornika $R_{0i} = 10 \text{ k}\Omega/\square$ i inicijalne otpornosti $R = 33,17 \text{ k}\Omega$

Parametar fitovanja B_0 je proporcionalan veličini I^x pri čemu do rasta eksponenta x tokom procesa trimovanja debeloslojnih otpornika energijom visokonaponskih impulsa dolazi usled porasta ukupnog šuma otpornika. Ukupni šum se menja zbog doprinosa šuma koji nastaje kao posledica fluktuacija pokretljivosti nosilaca naelektrisanja u kontaktima između susednih provodnih čestica i klasterima čestica koje nastaju tokom formiranja otpornika procesom žarenja kao i usled fluktuacija zauzetosti klopki u staklenim barijerama nosiocima naelektrisanja. Izmena naelektrisanja unutar staklenih barijera i mikrostrukturne promene usled kojih se menja koncentracija klopki u njima ima veći uticaj na spektar šuma nego na vrednost otpornosti trimovanog otpornika.



Slika 5. Normalizovana amplituda niskofrekventnog šuma pre (■) i posle (▲) izvršenog procesa trimovanja energijom visokonaponskih impulsa debeloslojnjog otpornika $R_{0i} = 10 \text{ k}\Omega/\square$ i inicijalne otpornosti $R = 33,17 \text{ k}\Omega$

Pošto je niskofrekventni šum u debelim otpornim filmovima posledica fluktuacija transporta naelektrisanja, rezultati šumne spektrometrije pre i posle izvršenog procesa trimovanja energijom visokonaponskih impulsa su pokazali slaganje sa rezultatima dobijenim merenjem otpornosti. Pokazano je i da su pokazali parametri šuma veoma osetljivi na mikrostrukturne promene izazvane procesom trimovanja. Zabeležena osetljivost parametara šuma je veoma važna sa aspekta realizacije i primene debelih otpornih slojeva jer se šumnom spektrometrijom može detaljno pratiti kako svaki pojedinačni impuls deluje na mikrostrukturu otpornika obezbeđujući istovremeno željenu vrednost otpornosti i adekvatnu pouzdanost komponente. Na taj način se poznavanjem mehanizama koji se tokom visokonaponskog tretmana dešavaju u otpornim slojevima može uticati ne samo na vrednost otpornosti već i na očekivane šumne performanse otpornika u cilju optimizacije procesa trimovanja.

III. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani eksperimentalni rezultati istraživanja uticaja trimovanja energijom visokonaponskih impulsa na spektar šuma debeloslojnih otpornika. Za potrebe eksperimenta komercijalno raspoloživom otpornom pastom je realizovana serija debeloslojnih test otpornika slojne otpornosti $10 \text{ k}\Omega/\square$. Izvršena su merenja vrednosti otpornosti i spektara šuma debelih otpornih slojeva pre i posle izvršenog procesa trimovanja visokonaponskim impulsima rastućih amplituda iz opsega $3000 - 5250 \text{ V}$. Eksperimentalni podaci su pokazali da mikrostrukturne promene izazvane procesom trimovanja utiču na dominantni $1/f$ šum otpornika čija se otpornost ireverzibilno menja visokonaponskim tretmanom. Proces trimovanja dovodi do porasta nivoa šuma što je ilustrovano analizom izmene parametara fitovanja B_0 pre i posle izvršenog procesa trimovanja. Pokazano je da vrednost amplitude niskofrekventnog šuma raste sa izvršenim trimovanjem za red veličine i da izmena uslova provođenja do koje dolazi visokonaponskim tretmanom u većoj meri menja šumne performanse otpornika nego vrednosti otpornosti. Iz tog razloga je šumna spektrometrija važan pokazatelj izmena koje se dešavaju u debelim otpornim slojevima prilikom trimovanja otpornika energijom visokonaponskih impulsa i može poslušiti kao indikator pouzdanosti komponente. Dobijeni rezultati su potvrdili da je ova vrsta trimovanja validna alternativa laserskom trimovanju te da se mogu ostvariti precizne vrednosti otpornosti bez narušavanja integriteta komponente uz podešavanje amplitude i učestanosti impulsa da bi se ostvarile optimalne šumne performanse trimovanih debeloslojnih otpornika.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] T. Tobita, H. Takasago, K. Kariya, "Investigation of Conduction Mechanism in Thick Film Resistors Trimmed by the Pulse Voltage Method", IEEE Trans. on Comp., Hyb., and Manufact. Techn., Vol. 15, No. 4, pp. 583-589, August, 1992.

- [2] A. Dziedzic, A. Kolek, W. Ehrhardt, H. Thust, "Advanced electrical stability characterization of untrimmed and variously trimmed thick-film and LTCC resistors", *Microelectronics Reliability*, 46, pp. 352-359, 2006.
- [3] Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović, Trimovanje debeloslojnih otpornika energijom visokonaponskih impulsa, *Proceedings*, ISBN 978-99955-763-9-4, Vol.15, KST-3.9, pp. 379-382, INFOTEH, Jahorina, Republic of Srpska, March 2016.
- [4] Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović, "Effects of High Voltage Pulse Trimming on Structural Properties of Thick-Film Resistors", *Science of Sintering*, 49, UDK 621.316.8; 532.74, doi: 10.2298/SOS1701091S, pp. 91-98, 2017.
- [5] Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović, "Influence of HVP trimming on primary parameters of thick resistive films", *J Mater Sci: Mater Electron*, Vol. 28, ISSN:0957-4522, doi:10.1007/s10854-017-6504-7, pp.8002-8010, 2017.
- [6] Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović, Šumne performanse debeloslojnih otpornika trimovanih energijom visokonaponskih impulsa, *Proceedings*, INFOTEH, ISBN 978-99976-710-0-4, Vol. 16, P-2-2, pp. 323-326, Jahorina, Republic of Srpska, March 2017.
- [7] Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović, Influence of High Voltage Pulse Trimming on Thick-Film Resistor Quality Indicators, in *Proceedings of 30th International Conference on Microelectronics - MIEL 2017*, ISBN 978-1-5386-2562-0, pp. 179-181, Niš, Serbia, October 9th-11th, 2017.
- [8] Milan M. Jevtić, Zdravko Stanimirović, Ivanka Mrak, Low-Frequency Noise in Thick-Film Resistors due to Two-Step Tunneling Process in

Insulator Layer of Elemental MIM Cell, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*, Vol. 22, No. 01, p. 120, DOI: 10.1109/6144.759361, March, 1999.

ABSTRACT

In this paper results from a study of high-voltage pulse trimming effects on noise spectra of thick-film resistors based on resistor composition with $10 \text{ k}\Omega/\square$ sheet resistance are presented. For experimental purposes, a series of thick-film resistors was realized and exhibited to high-voltage pulse trimming process using high-voltage pulses with increasing amplitudes from the 3000 to 5250 V range. Based on resistance and noise spectra measurements it was found that noise parameters are very sensitive to micro structural changes caused by the trimming process. This is of the great importance from the aspect of both formation and exploitation of thick resistive films.

EFFECTS OF HIGH-VOLTAGE PULSE TRIMMING ON NOISE SPECTRA OF THICK-FILM RESISTORS

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović