

PRIMENA 3D PLANARNOG RRN MODELA U ANALIZI DEGRADACIJA DEBELOSLOJNIH OTPORNIKA IZLOŽENIH VISOKONAPONSKOM IMPULSNOM NAPREZANJU

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović, IRITEL, Beograd

Sadržaj - U radu je predstavljena primena 3D planarnog RRN modela u analizi degradacija debeloslojnih otpornika izazvanih visokonaponskim impulsnim naprežanjem. Rezultati kompjuterske simulacije su upoređeni sa eksperimentalnim rezultatima za debeloslojne otpornike slojnih otpornosti $10\text{k}\Omega/\square$ i $100\text{k}\Omega/\square$. Pokazano je da visokonaponski impulsni tretman dovodi do ireverzibilnog pada otpornosti otpornika uslovljenog izmenama na nivou mikrostrukture otpornika. Predložene su smernice daljih istraživanja vezane za analizu katastrofalnih otkaza debeloslojnih otpornika izloženih ovoj vrsti naprežanja.

1. UVOD

Brojni radovi su se proteklih godina bavili različitim problemima vezanim za razumevanje kompleksne strukture debeloslojnih otpornika i mehanizama provođenja u njima. Pored toga, različiti uslovi njihove primene su doveli do potrebe da se ispita i njihovo ponašanje u uslovima naprežanja – naročito visokonaponskog impulsnog naprežanja. Više radova se bavilo efektima visokonaponskog impulsnog trimovanja debeloslojnih otpornika [1] i analizom ponašanja specifičnih niskoomskih debeloslojnih zaštitnih otpornika koji se koriste u telekomunikacionim sistemima kao zaštita u ekstremnim uslovima rada kao što su udari groma [2,3], ali je malo pažnje bilo posvećeno uticaju visokonaponskog impulsnog naprežanja na strukturu i performanse standardnih debeloslojnih otpornika koji se masovno koriste u realizaciji savremenih komunikacionih sistema. U ovom radu će biti prikazana primena našeg 3D planarnog RRN modela u analizi degradacija standardnih debeloslojnih otpornika izloženih ovakvom vidu naprežanja a dobijeni rezultati će biti upoređeni sa eksperimentalnim rezultatima koji su delimično bili analizirani u [4]. Kratak prikaz modela i kompjuterska simulacija upotrebljena u analizi će biti opisani u poglavlju 2, dok će u poglavlju 3 biti prikazani eksperimentalni rezultati i njihovo tumačenje zasnovano na kompjuterskoj simulaciji debeloslojnih otpornika kao slučajnih otpornih mreža (3D planarni RRN model).

2. 3D PLANARNI RRN MODEL I KOMPJUTERSKA SIMULACIJA

3D planarni RRN model se zasniva na pozicionom modelu sa dvostrukom perkolacijom. Reč je o rešetki čija svaka pozicija sa aspekta zauzetosti provodnom česticom može biti zauzeta ili slobodna (na toj poziciji se nalazi staklo kao rezultat slučajne prostorne raspodele čestica provodnika i stakla tokom procesa sinterovanja). Dve susedne zauzete pozicije mogu biti povezane ili kontaktnom ili barijernom otpornošću (deterministički model transporta naelektrisanja u

debeloslojnim otpornicima) te se kao rezultat dobija slučajna mreža provodnih čestica koja čini osnovu našeg modela – elementarna ćelija RRN tj. elementarna dvodimenziona matrica sa N^2 elemenata. Tako kompjuterski generisan debeloslojni otpornik sačinjavaju elementarne ćelije RRN kojima se aproksimira slučajni i prostorno neravnomerni raspored staklene i provodne faze te se mogu uočiti veće staklene oblasti kao i izvesni broj provodnih lanaca koje čine susedne provodne čestice koje su u kontaktu ili su razdvojene tankom staklenom barijerom. Blok dijagram kompjuterske simulacije debeloslojnog otpornika korišćenjem ovog modela dat je u [5]. Važno je naglasiti da parametri determinističkog modela u ovakav kombinovani model uvode mikrostrukturne, a parametri pozicionog modela sa dvostrukom perkolacijom makrostrukturne karakteristike debeloslojnog otpornika i da samo kombinacija ovih modela pruža realnu sliku i mogućnost kompjuterske simulacije ovih otpornika što je od izuzetnog značaja u proučavanju degradacionih procesa i mehanizama otkaza u uslovima naprežanja.

3. EKSPERIMENT I SIMULACIJA – DISKUSIJA

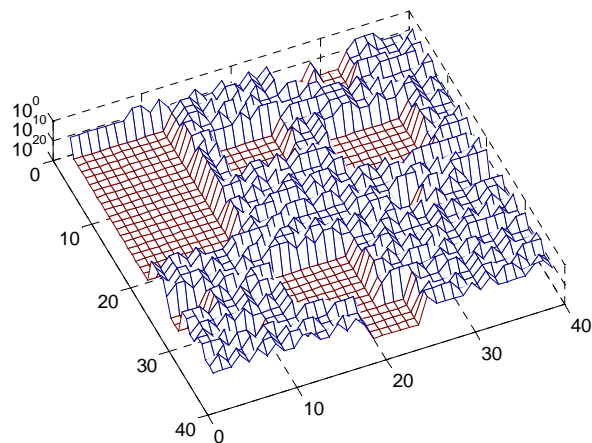
U prethodnim radovima smo se bavili analizom ponašanja debeloslojnih otpornika izloženih dejstvu visokonaponskih impulsa [4,6], pri čemu smo merenja vršili na test uzorcima različite geometrije otpornika realizovanim standardnom tehnikom sitoštampe DuPont otpornih i provodnih pasta na alumina keramiku. Otpornici su izlagani $100/700\mu\text{s}$ impulsima generisanim Haefely generatorom impulsa pri čemu su neki od otpornika degradirali a neki doživeli katastrofalan otkaz. Detaljan opis eksperimenta i merenja dat je u [4]. Dobijeni rezultati, prikazani u tabeli 1, su pokazali da se degradacija debeloslojnih otpornika manifestuje kao ireverzibilna promena otpornosti tj. otpornost testiranih otpornika opada nakon dejstva visokonaponskih impulsa, a konačne izmene otpornosti su male - reda veličine nekoliko procenata.

Tabela 1. Parametri otpornika pre (i) i posle (s) visokonaponskog impulsnog naprežanja

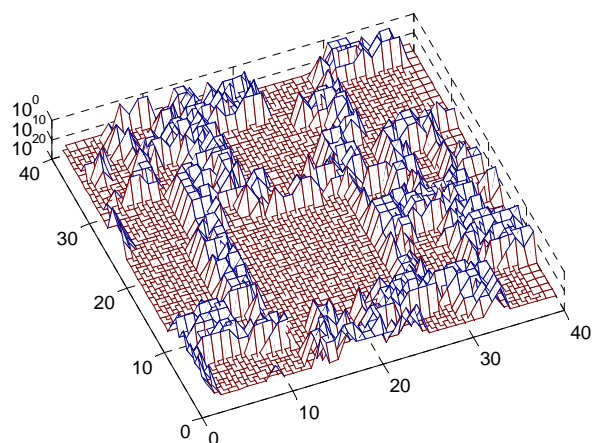
R_{\square} ($\text{k}\Omega/\square$)	10	100
R_N ($\text{k}\Omega$)	16	220
\overline{R}_i ($\text{k}\Omega$)	15.942	220.060
\overline{R}_s ($\text{k}\Omega$)	15.490	217.650
ΔR (%)	3	1
\overline{R}_{Bi} ($\text{M}\Omega$)	13.29	286
\overline{R}_{Bs} ($\text{M}\Omega$)	13.34	286.6

U tabeli su dati sledeći parametri otpornika dobijeni na osnovu niza izvršenih eksperimentalnih merenja: R_{\square} – slojna otpornost, \overline{R}_i – srednja vrednost otpornosti za seriju testiranih otpornika pre visokonaponskog impulsnog napreznja, \overline{R}_s – srednja vrednost otpornosti za seriju testiranih otpornika posle visokonaponskog impulsnog napreznja, $\overline{\Delta R}$ – srednja vrednost izmene otpornosti pre i posle visokonaponskog impulsnog tretmana. Pored ovih parametara u tabeli se nalaze i parametri koji su rezultat niza kompjuterskih simulacija: \overline{R}_{Bi} – srednja vrednost barijerne otpornosti pre i \overline{R}_{Bs} – srednja vrednost barijerne otpornosti posle visokonaponskog impulsnog napreznja. Za tumačenje eksperimentalnih rezultata upotrebljen je 3D planarni RRN model aproksimacije debeloslojnih otpornika slučajnom otpornom mrežom (RRN - Random Resistor Network) koja je kombinacija perkolacionog i determinističkog pristupa tumačenju strukture i transportnih procesa u ovim otpornicima. Perkolaciona teorija se odnosi na slučajnu prostornu raspodelu staklenih i provodnih čestica, dok deterministička teorija uvodi transport naelektrisanja pomoću lanaca provodnih čestica pri čemu su mehanizmi provođenja provođenje kroz metalne čestice i sinterovane kontakte i tunelovanje kroz staklene barijere. Kompjuterskom simulacijom su generisane elementarne ćelije RRN koje su, raspoređene 3D planarno, dale sliku celih debeloslojnih otpornika pre i posle izlaganja visokonaponskom impulsnom napreznju. Na slici 1 je dat prikaz dve elementarne ćelije debeloslojnih otpornika simuliranih tako da odgovaraju vrednostima datim u eksperimentu (tabela 1) pre dejstva visokonaponskih impulsa. Jasno se vidi da otpornici realizovani pastama većih slojnih otpornosti, u ovom slučaju $100\text{k}\Omega/\square$ (sl. 1.b), imaju manji faktor ispune provodne faze, te da je većina provodnih čestica okružena staklenom fazom tako da je dominantan mehanizam provođenja višestepeno tunelovanje kroz staklene barijere. Otpornici realizovani pastama nižih slojnih otpornosti, u ovom slučaju $10\text{k}\Omega/\square$ (sl.1.a), imaju manji faktor ispune staklene faze, stvarajući tako šire provodne oblasti u kojima pored tunelovanja značajnije figurišu i provođenje kroz provodne klustere čestica i sinterovane kontakte. Dobijeni rezultati upućuju na zaključak da je dejstvo visokonaponskih impulsa rezultovalo ireverzibilnom promenom otpornosti nastalom usled promena uslova provođenja, a razlike u promeni otpornosti za otpornike realizovane pastama različitih slojnih otpornosti se mogu dovesti u vezu sa različitim zapreminskim udelima provodnih čestica. Kada je u pitanju promena uslova provođenja, električno polje na nivou jedne metal-izolator-metal ćelije nije dovoljno veliko da izazove proboj dielektrika i dovede do povećanja broja kontakata između susednih provodnih čestica. Realnije je da do ovako neznatnog pada otpornosti dolazi zbog promene barijernih otpornosti, odnosno da visokonaponski impulsi dovode do promene naelektrisanja unutar izolatorskog sloja metal-izolator-metal ćelija ili do mikrostrukturnih promena usled kojih dolazi do izmene zauzetosti centara zahvata u staklenim barijerama koji se formiraju tokom procesa sinterovanja kao posledica prisustva primesa u staklu. Moguće je i prevođenje pojedinih neprovodnih lanaca u provodno stanje čime se smanjuje otpornost otpornika. U tabeli 1 su date srednje

vrednosti izmene barijernih otpornosti dobijene kompjuterskom simulacijom koje potvrđuju navedene pretpostavke.



(a)



(b)

Sl.1. Elementarne ćelije RRN dimenzija 40×40 dobijene kompjuterskom simulacijom – (a) $R_{\square}=10\text{k}\Omega/\square$, (b) $R_{\square}=100\text{k}\Omega/\square$ (udubljena – staklo, izbočine – pozicije provodnih čestica)

Prilikom visokonaponskog impulsnog napreznja debeloslojnih otpornika moguća je i pojava izvesnog broja katastrofalnih otkaza koji se mogu manifestovati na različite načine što otvara nove mogućnosti za primenu 3D planarnog RRN modela u analizi degradacija debeloslojnih otpornika izloženih visokonaponskom impulsnom napreznju. Neki od modova katastrofalnih otkaza mogu biti vidljiva oštećenja otpornika kao što je npr. odvajanje dela otpornika usled prisustva nečistoća unetih tokom procesa sitoštampe, a može doći i do makrostrukturnih i mikrostrukturnih promena kao što su izmena debljine otpornog sloja u oblasti defekta ili migracija provodnika npr. srebra iz kontaktne oblasti provodnik-otpornik što može dovesti do formiranja površinskog sloja sa povećanom koncentracijom provodnih čestica. Dalja istraživanja će se kretati u smeru kompjuterskih simulacija ovih otpornika pri čemu će se pojavni oblici defekata unositi u model preko izmena na nivou elementarnih RRN ćelija bilo kao uniformnih promena na nivou celog

otpornika ili kao izmena na pojedinačnim ili ograničenom broju elementarnih RRN ćelija. Ovakve simulacije mogu rezultovati i predikcijom ponašanja debeloslojnih otpornika izloženih dejstvu visokonaponskog impulsnog naprežanja, a u kombinaciji sa analizom parametara šuma pružiti najvažnije informacije sa aspekta pouzdanosti performansi u čitavom spektru primena ovih otpornika u osetljivim telekomunikacionim uređajima.

4. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena primena 3D planarnog RRN modela u analizi degradacija debeloslojnih otpornika izloženih visokonaponskom impulsnom naprežanju. Dat je kratak prikaz ovog modela koji predstavlja kombinaciju perkolacionog i determinističkog pristupa tumačenju strukture i transportnih procesa u debeloslojnim otpornicima. Ukratko je opisana kompjuterska simulacija koja je upotrebljena u analizi efekata koje je visokonaponsko impulsno naprežanje imalo na otpornike slojnih otpornosti $10\Omega/\square$ i $100k\Omega/\square$. Dobijeni rezultati su upoređeni sa eksperimentalnim rezultatima i ilustrovani prikazom dve elementarne RRN ćelije koje odgovaraju posmatranim otpornicima. Pokazano je da dejstvo visokonaponskih impulsa rezultuje ireverzibilnom promenom otpornosti do koje dolazi usled promena na nivou mikrostrukture. Menjaju se uslovi provođenja, tj. dolazi do promene barijernih otpornosti metal-izolator-metal ćelija otpornika, a razlike u vrednostima izmena otpornosti se vezuju za različit zapreminski udeo provodnih čestica u otpornicima različitih slojnih otpornosti. Predložene su smernice daljih istraživanja koja bi se bavila kompjuterskom simulacijom različitih modova katastrofalnih otkaza debeloslojnih otpornika izloženih visokonaponskom impulsnom naprežanju, što bi moglo poslužiti u predikciji ponašanja ovih otpornika u ekstremnim radnim uslovima.

LITERATURA

[1] W. Ehrhardt, "Thrust Trimming of Thick-Film-Resistors by Energy of High Voltage Pulses and its influence on microstructure", in Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conference, Satrasbourg, France, 2001.

[2] S.Vasudevan, "Low Ohm Thick Film Resistors for Surge Protection", *Advancing Microelectronics*, May-June 1996, pp.12-19.

[3] M.F. Barker, "Low Ohm Resistor Series for Optimum Performance in High Voltage Surge Applications", *Microelectronics International*, No. 43, 1997, pp. 22-26.

[4] I. Stanimirović, M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, "Ocena uticaja visokonaponskih impulsa na debeloslojne otpornike pomoću merenja indeksa šuma", Zbornik radova, XLVII ETRAN, Herceg Novi, 2003, pp. 245-248.

[5] Z. Stanimirović, I. Stanimirović, "Kompjuterska simulacija debeloslojnih otpornika kao slučajnih otpornih mreža", Prijavljen za XLIX ETRAN, Budva, 2005.

[6] I. Stanimirović, M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, "High-voltage pulse stressing of thick-film resistors and noise", *Microelectronics Reliability*, 43, 2003, pp. 905-911.

Abstract – In this paper the application of 3D planar RRN model in degradation analysis of thick-film resistors caused by high-voltage pulse stressing is presented. Results obtained using computer simulations are compared with experimental results for thick-film resistors with $10k\Omega/\square$ and $100k\Omega/\square$ sheet resistances. It is shown that high-voltage pulse stressing causes irreversible decrease in resistance of the thick-film resistor due to microstructural changes. Outlines for further investigations are suggested related to analysis of catastrophically failed thick-film resistors subjected to this kind of stressing.

APPLICATION OF 3D PLANAR RRN MODEL IN DEGRADATION ANALYSIS OF THICK-FILM RESISTORS SUBJECTED TO HIGH-VOLTAGE PULSE STRESSING

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović