

Kompjuterska simulacija TFR kao elemenata za detekciju mehaničkog naprezanja

Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović

IRITEL a.d. Beograd
Beograd, Republika Srbija
zdravkos@iritel.com; inam@iritel.com

Sažetak— U današnje vreme, neki od mikroelektromehaničkih sistema (MEMS) zahtevaju primenu keramičkih materijala u kombinaciji sa tehnologijom debelog filma. U nekim od senzorskih MEMS aplikacija često se, usled svoje osetljivosti na naprezanje, koriste debeloslojni otpornici (TFR). Iz tog razloga smo u radu predstavili kompjutersku simulaciju TFR kao elemenata za detekciju mehaničkog naprezanja zasnovanu na rezultatima naših teorijskih i eksperimentalnih istraživanja i našem prethodno razvijenom modelu slučajne otporne mreže. Pokazano je da TFR mogu biti upotrebljeni u detekciji mehaničkog naprezanja i da prikazani model adekvatno opisuje ponašanje mehanički napregnutih TFR.

Ključne reči—Debeloslojni otpornik (TFR); kompjuterska simulacija; mehaničko naprezanje; mehanizmi provođenja; širina staklene barijere.

I. UVOD

Sa pojavom mikroelektromehaničkih sistema debeloslojni otpornici (TFR) su ponovo dobili na značaju. U pitanju su tzv. C-MEMS mikrostrukture (“ceramic MEMS”) koje predstavljaju alternativu silicijumskim MEMS napravama [1]. Iako značajno većih dimenzija od standardnih, C-MEMS naprave su našle primenu u mnoštvu aplikacija uključujući i primene u ekstremnim radnim uslovima. Bilo da se radi strukturama formiranim na alumina keramici (96% Al_2O_3) ili LTCC strukturama (LTCC – “low-temperature co-fired ceramic”), reč je napravama koje omogućavaju realizaciju senzorskih i aktuatorskih elemenata na istoj podlozi zajedno sa elementima kola za procesiranje signala što ih čini izuzetno konkurentnim na MEMS tržištu. Kada je reč o senzorskim primenama, TFR se mogu upotrebiti kao elementi za detekciju mehaničkog naprezanja zahvaljujući činjenici da pod dejstvom mehaničkog naprezanja reverzibilno menjaju otpornost. Efekat piezootpornosti kod TFR je primećen ranih 1970-ih godina prilikom zaštitnog zatapanja debeloslojnih elektronskih kola i tek nekoliko godina kasnije su počeli da se pojavljuju radovi koji su se iscrpnije bavili ovom tematikom. U poslednjih desetak godina istraživanja su se odnosila na proučavanje uticaja mehaničkog naprezanja na TFR [2-4] i razvoj novih debeloslojnih materijala naročito razvijanih za senzorske primene [5, 6]. Novija istraživanja su ukazala na mogućnost da se konvencionalni TFR usled svoje osetljivosti na mehaničko naprezanje iskoriste u senzorskim aplikacijama. Konvencionalni TFR imaju prilično izražen piezootporni efekat koji je obično nepoželjna pojava kod standardnih primena i

upravo to je iniciralo da više pažnje posvetimo mogućnosti primene TFR kao elemenata za detekciju mehaničkog naprezanja. U ovom radu će biti predstavljena kompjuterska simulacija TFR isloženih mehaničkom naprezanju, zasnovana na našem prethodno razvijenom modelu slučajne otporne mreže [7] u kombinaciji sa odgovarajućim rezultatima naših teorijskih i eksperimentalnih istraživanja [8, 9]. Simulacija ima za cilj da utvrdi mogućnost primene TFR kao elemenata za detekciju mehaničkog naprezanja.

II. EFEKTI MEHANIČKOG NAPREZANJA - MODEL

Promena otpornosti debeloslojnih otpornika usled izlaganja mehaničkom naprezanju nastaje usled:

- promene dimenzija otpornika i
- promena na nivou mikrostrukture.

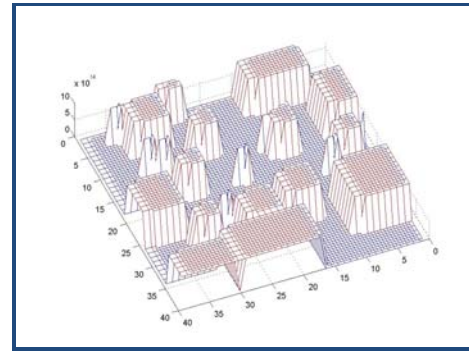
Prilikom eksperimentalnog istraživanja performansi konvencionalnih TFR izloženih mehaničkom naprezanju [8] utvrđeno je da je promena otpornosti dominantno uslovljena promenama na nivou mikrostrukture. Ukoliko se primenjeno naprezanje definiše kao relativna promena dužine otpornika, $\varepsilon = \Delta l/l$, onda je faktor naprezanja TFR dat formulom:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \quad (1)$$

Eksperimentalno je utvrđeno da su se u uslovima koji su bliski realnim (izvijanje podloge do $400\mu\text{m}$) srednje vrednosti faktora naprezanja kretale između 3,2 i 14,5. Više vrednosti faktora naprezanja potiču od pomena na nivou mikrostrukture [6]. U debeloslojnim otpornim materijalima se transport naelektrisanja vrši pomoću složene provodne mreže koja nastaje tokom sinterovanja čestica metal-oksida okruženih staklom. Tokom naših prethodnih istraživanja TFR razvijen je model slučajne otporne mreže baziran na determinističkom modelu u kombinaciji sa pozicionim modelom sa dvostrukom perkolacijom [8]. Deterministički model opisuje TFR kao mrežu provodnih lanaca u kojima su neke od čestica metal-oksida u kontaktu a neke razdvojene tankom staklenom barijerom pri čemu se formiraju metal-izolator-metal strukture (Sl. 1.a). Provođenje se tako vrši provođenjem kroz provodne čestice i sinterovane kontakte dnjih i tunelovanjem kroz staklene barijere. Ukoliko se pretpostavi da se TFR sastoji od M paralelnih provodnih lanaca tada je ukupna otpornost TFR data kao [9]:

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

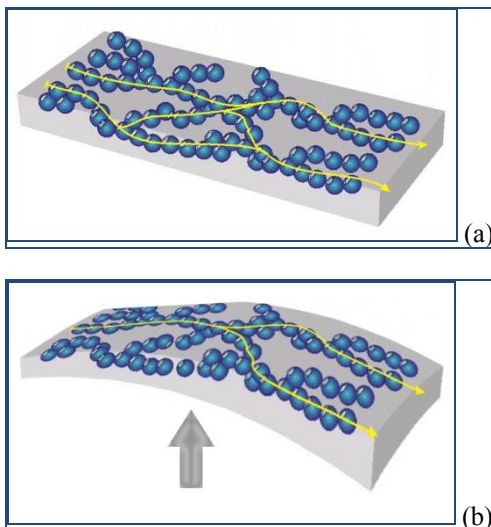
gde se prvi član odnosi na udeo barijernih, a drugi član na udeo kontaktnih otpornosti u ukupnoj otpornosti otpornika. K_B i K_C su brojevi barijera i kontakata, respektivno, q i m su apsolutno naelektrisanje elektrona i njegova efektivna masa, h je Plankova konstanta, s i Φ_B su širina staklene barijere i njena visina u odnosu na Fermijevu energiju, $A = \pi a^2$ je površina poprečnog preseka barijere i ρ specifična otpornost kontakta. Pozicioni model sa dvostrukom perkolacijom definiše zauzetost pozicija unutar rešetke TFR. Svaka pozicija može biti zauzeta provodnom česticom sa verovatnoćom p_1 ili slobodna sa verovatnoćom $1-p_1$. Dve susedne zauzete pozicije mogu biti povezane kontaktnom otpornošću sa verovatnoćom $p_2 = N_C / (N_C + N_B)$ ili barijernom otpornošću sa verovatnoćom $1-p_2$ pri čemu su N_B i N_C brojevi barijernih i kontaktnih otpornosti, respektivno. TFR se zaviso od dimenzija sastoji od određenog broja elementarnih dvodimenzionalnih matrica sa N^2 elemenata (Sl. 2). Unutar matrice slobodne i zauzete pozicije označavaju brojevi 0 i 1, respektivno. Na početku simulacije neke od pozicija matrice zauzimaju čestice metal-oksida eksperimentalno utvrđene srednje vrednosti prečnika za posmatrani TFR. Potom, generator slučajnih brojeva sa uniformnom raspodelom iz opsega (0,1) pozicionira kontaktne i barijerne otpornosti. Nakon toga se generatorom slučajnih brojeva sa uniformnom raspodelom određuju koordinate čestica stakla i sa tih pozicija se uklanjaju kontaktne i barijerne otpornosti. Prečnik staklene čestice se određuje generatorom slučajnih brojeva sa normalnom raspodelom pri čemu su donja i gornja granična vrednost definisane eksperimentalno utvrđenim dimenzijama čestica stakla. Na osnovu ovako definisanih matrica dobija se ukupna otpornost željenog TFR. Kompjuterski simulirana elementarna ćelija otpornika slojne otpornosti $10k\Omega/\square$ prikazana je na slici 2.



Slika 2. Kompjuterski simulirana elementarna ćelija otpornika slojne otpornosti $10k\Omega/\square$ na kojoj izbočeni delovi ćelije predstavljaju pozicije čestica metal-oksida

III. REZULTATI KOMPJUTERSKE SIMULACIJE I DISKUSIJA

Kompjuterska simulacija TFR kao elemenata za detekciju mehaničkog naprezanja izvršena je na osnovu prethodno opisanog modela i eksperimentalnih rezultata dobijenih biheviornalnom analizom TFR izloženih mehaničkom naprezanju [7]. Biheviornalna analiza je rezultirala zaljučkom da je provođenje tunelovanjem kroz staklene barijere osetljivije na mehaničko naprezanje nego provođenje kroz čestice metal-oksida i kontakte između njih iz razloga što je provodna faza mnogo čvršća od izolacione (RuO_2 ima visoku vrednost modula elastičnosti, $B \approx 270GPa$, a staklena faza ima vrednost B približno reda veličine 40-80GPa zaviso od sastava). To znači da ovaj tip naprezanja TFR dovodi do izmene barijernih otpornosti menjajući širinu staklene barijere pošto mehaničko naprezanje ne utiče na broj kontakata, broj i visinu barijera. Da bi izvršili kompjutersku simulaciju TFR odabrali smo niz prethodno dobijenih eksperimentalnih rezultata. U pitanju su rezultati dobijeni ispitivanjima TFR slojnih otpornosti $10k\Omega/\square$ i $100k\Omega/\square$, centralno pozicioniranih na alumina podlozi, širine otpornika 1mm, dužine 2mm, 4mm i 6mm. Ispitivani TFR su bili izloženi mehaničkom naprezanju od $400\mu m$. Na osnovu vrednosti otpornosti nenapregnutih otpornika u kombinaciji sa parametrima simulirana je mikrostruktura otpornika – broj i prostorni raspored kontakata i barijernih otpornosti. Potom je, za isti prostorni raspored barijera i kontakata, simulirana mikrostruktura napregnutih otpornika na osnovu eksperimentalno utvrđenih procentualnih promena otpornosti nakon mehaničkog naprezanja. Vrednosti parametara upotrebljenih u simulaciji su uz rezultate dobijene simulacijom datu Tabeli I. Pošto mehaničko naprezanje dovodi do izmene transporta naelektrisanja tunelovanjem kroz staklene barijere, na slikama 3 i 4 su, kao ilustracija izvršenih simulacija, uporedo prikazane eksperimentalno dobijene vrednosti promena otpornosti TFR i vrednosti promena širina staklenih barijera usled dejstva naprezanja dobijene simulacijom. Sa slika se može uočiti da sa porastom slojne otpornosti, zbog manjeg faktora ispune provodne faze koji određuje dominantne mehanizme provođenja, dolazi do većih izmena otpornosti TFR tj. raste promena širine staklenih barijera. Pored toga, izmena širina barijera raste sa većim promenama dužine napregnutih otpornika. Za otpornike iste slojne otpornosti je uočeno da kraći TFR trpe veću izmenu dužine prilikom naprezanja u odnosu na njihovu ukupnu dužinu te stoga trpe i veće promene širina staklenih barijera.



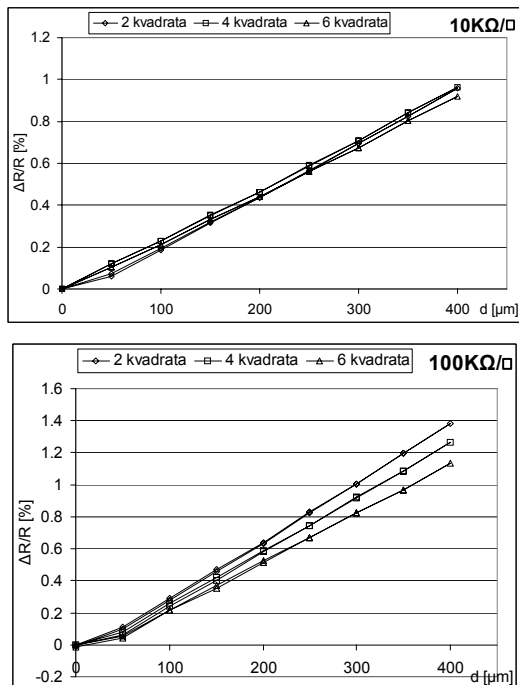
Slika 1. Grafički prikaz transporta naelektrisanja kroz nenapregnut i mehanički napregnut TFR

TABELA I. EKSPERIMENTALNE VREDNOSTI PARAMETARA TFR UPOTREBLJENE U SIMULACIJI [7]

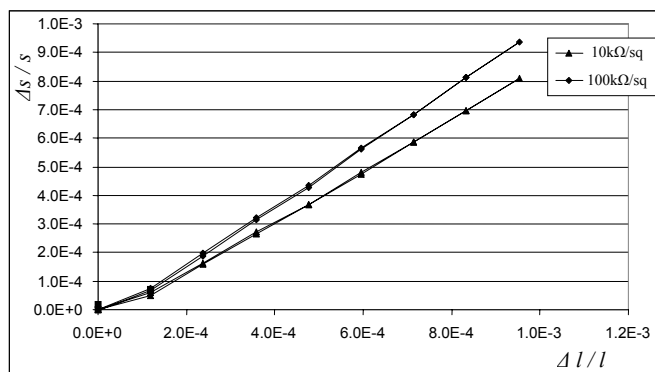
R_{sq} ($k\Omega/sq$)	10	10	10	100	100	100
v_c^a	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
Φ_B (eV)	1	1	1	1	1	1
s (nm)	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
$\overline{R_i}$ ($k\Omega$)	16,59	32,81	50,64	276,51	495,83	704,3
l (mm)	2	4	6	2	4	6
$ \overline{\Delta R} $ (%)	0,958	0,945	0,918	1,381	1,266	1,136
$\overline{\Delta l}$ (μm)	1,905	3,81	5,175	1,905	3,81	5,715
GF	10,06	9,92	9,64	14,5	13,3	11,92

a. v_c - faktor ispunne provodne faze

Pored ovih vrednosti razmatrali i smo faktore napreznja TFR (Tabela I). Eksperimentalni rezultati pokazuju da otpornici viših slojnih otpornosti, koji imaju manji faktor ispunne provodnom fazom, imaju više vrednosti faktora napreznja. TFR slojne otpornosti 100k Ω/sq imaju manji faktor ispunne provodnom fazom od otpornika slojne otpornosti 10k Ω/sq te je kod njih dominantan mehanizam provođenja tunelovanje kroz staklene barijere. Kod debelolajnih otpornika slojne otpornosti 10k Ω/sq je približno podjednako zastupljeno provođenje tunelovanjem kroz staklene barijere i provođenje kroz čestice metal-oksida i sinterovane kontakte između njih.



Slika 3. Procentualna izmena otpornosti TFR izloženih mehaničkom napreznju



Slika 4. Relativne promene širina staklenih barijera u odnosu na relativne promene dužina TFR za otpornike identičnih dužina ($l=2mm$)

Vrednosti faktora napreznja imaju više vrednosti kod TFR veće slojne otpornosti, ali vrednosti GF opadaju sa porastom dužine kod TFR istih slojnih otpornosti. TFR slojne otpornosti 10k Ω/sq imaju stabilnu vrednost faktora napreznja i iz tog razloga mogu biti upotrebljeni kao elementi za detekciju mehaničkog napreznja.

Rezultati simulacije su potvrdili da upotrebljeni model u kombinaciji sa ekeperimentalnim rezultatima može obezbediti adekvatnu analizu ponašanja TFR u uslovima mehaničkog napreznja. Zavisno od primene, može se formirati odgovarajuća baza podataka koja će pored uslova napreznja obuhvatiti i parametre za sve TFR koji će biti upotrebljeni. Na taj način se može predvideti ponašanje napregnutih TFR što se može iskoristiti kao važan podatak u fazi projektovanja ili u predviđanju pouzdanosti sistema. Još jedna potencijalna primena simulacije može biti analiza degradacionih procesa i mehanizama otkaza TFR usled različitih vidova napreznja. Moguće je u elementarne ćelije otpornika uvesti defekte strukture i na taj način predviđati ponašanje naprave u različitim uslovima napreznja. To bi doprinelo optimizaciji performansi i eliminaciji potencijanih problema vezanih za pouzdanost sistema.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazano modelovanje i simulacija konvencionalnih TFR kao elemenata za detekciju mehaničkog napreznja. Upotrebljeni model je definisao prostorni raspored provodne i izolacione faze u ovim kompleksnim heterogenim strukturama čime su određeni mehanizmi provođenja i osnovne karakteristike otpornih slojeva. Da bi se ispitala mogućnost primene konvencionalnih TFR u detekciji napreznja prikazani model je upotrebljen kao osnova kompjuterske simulacije TFR izloženih mehaničkom napreznju. Simulacija se odnosila na TFR slojnih otpornosti 10k Ω/sq i 100k Ω/sq koji su prethodno korišćeni u eksperimtalnim istraživanjima dejstva mehaničkog napreznja na TFR. Dobijeni rezultati su još jednom potvrdili da prilikom mehaničkog napreznja TFR dolazi do reverzibilne promene otpornosti usled izmena u uslovima provođenja. Napreznje dovodi do izmena širina staklenih barijera i na taj način menja uslove provođenja. Pokazano je da konvencionalni TFR mogu biti upotrebljeni kao elementi za detekciju

mehaničkog naprezanja, naročito TFR slojne otpornosti $10\text{k}\Omega/\square$ zbog stabilne vrednosti faktora naprezanja ($GF\sim 10$). Prikazani model se može upotrebiti u predviđanju ponašanja napregnutih TFR kao i različitim fazama projektovanja i analizi pouzdanosti. Imajući u vidu da prikazani model uključuje i mikrostrukturne i makrostrukturne karakteristike TFR, dalja istraživanja mogu biti usmerena ka simulaciji degradacionih procesa u TFR izazvanih neželjenim naprežanjem i eliminaciji potencijalnih problema kada je pouzdanost sistema u pitanju.

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] M. Hrovat, D. Belavič, J. Holc, M. Santo Zarnik, M. Kosec, M. Pavlin, "The application of thick-film technology in C-MEMS", *J. Electroceram.*, 19, 2007, pp. 363-368.
- [2] C. Grimaldi, T. Maeder, P. Ryser, S. Strassler, "Critical behaviour of the piezoresistive response in RuO_2 -glass composites", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 36, 2003, pp. 1341-1348.
- [3] C. Grimaldi, S. Vionnet-Menot, T. Maeder, P. Ryser, "Effect of composition and microstructure on the transport and piezoresistive properties of thick-film resistors", in *Proc. XXVIII Int. Conf. IMAPS, Poland chapter, Poland, 2004*, pp. 35-42.
- [4] B. Puers, W. Sansen, S. Paszczynski, "Assessment of thick-film fabrication method for force (pressure) sensors", *Sens. Actuat.*, 12, 1987, pp. 57-76.
- [5] S. Tankiewicz, B. Morten, M. Prudenziati, Lj. Golonka, "New thick-film material for piezoresistive sensors", *Sens Actuat A*, 95, 2001, pp. 39-45.
- [6] M. Hrovat, D. Belavič, M. Jerlah, "Investigation of Some Thick-Film Resistor Series for Strain Gauges", in *Proc. 23rd International Spring Seminar on Electronics Technology, Hungary, 2000*, pp. 406-410.
- [7] Z. Stanimirović, M.M. Jevtić, I. Stanimirović, "Computer Simulation of Thick-Film Resistors Based on 3D Planar RRN Model", in *Proc. EUROCON, Belgrade, Serbia and Montenegro, 2005*, pp. 1687-1690.
- [8] Z. Stanimirović, M.M. Jevtić, I. Stanimirović, "Simultaneous Mechanical and Electrical Straining of Conventional Thick-Film Resistors", *Microelectronics Reliability*, ISSN 0026-2714, Vol. 48, No. 1, January 2008, pp. 59-67.
- [9] M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, I. Stanimirović, "Evaluation of thick-film structural parameters based on noise index measurements", *Microelectronics Reliability*, vol: 41, 2001, pp. 59-66.

ABSTRACT

Nowadays, some microelectromechanical systems (MEMS) require ceramic materials in combination with thick-film technology. Thick-film resistors (TFRs), due to their strain sensitivity, are often used in some of the strain sensing MEMS applications. In this paper we have presented computer simulation of behavior of mechanically strained TFRs that is based on our previously developed model of the random resistor network. It is shown that TFRs can be used as strain sensing elements and that presented model adequately depicts their behavior under strain.

COMPUTER SIMULATION OF TFR AS A STRAIN SENSING ELEMENT

Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović