

Visokotemperaturski tretman debeloslojnih otpornih struktura

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović

Odeljenje za tehnologije
Institut za elektroniku i telekomunikacije IRITEL a.d. Beograd
Beograd, Republika Srbija
inam@iritel.com; zdravkos@iritel.com

Sažetak—Nove napredne primene debeloslojnih otpornih struktura postavile su pred njih strože zahteve u pogledu dimenzija, performansi i pouzdanosti. Visokotemperaturski tretman ovih struktura ključ je optimalnog formiranja debelih otpornih slojeva. Ne umanjujući važnost izbora materijala i parametara procesa sito-štampe, visokotemperaturski tretman je u najvećoj meri direktno odgovoran za njihove performanse. Pravilnim izborom profila žarenja, kontrolom uslova unutar konvejske peći, maksimalnom temperaturom žarenja i vremenom koje otporne strukture provode na toj temperaturi određujemo prostornu raspodelu staklene i provodne faze što direktno određuje uslove provođenja u strukturi a samim tim i performanse otpornika. Zbog toga je u radu predstavljeno eksperimentalno istraživanje visokotemperaturskog tretmana debeloslojnih otpornih struktura.

Ključne riječi – debeloslojne otporne strukture, uslovi žarenja, otpornost

I. UVOD

Debeloslojni otpornici su već decenijama u širokoj upotrebi u mikroelektronskoj industriji. Umesto da postepeno potpuno nestanu iz upotrebe, novi impuls za njihovu primenu i postepenu evoluciju tehnologije donele su nove, napredne primene. Svo znanje i iskustvo akumulirano tokom decenija primene se sada koristi za realizaciju keramičkih MEMS naprava, savremenih senzora, a u poslednje vreme i za formiranje debeloslojnih mikrogeneratorskih za prikupljanje energije iz okolne sredine [1-3].

Tokom sedamdesetih i osamdesetih godina prošlog veka, u trenutku kada je doživela najveću ekspanziju, debeloslojna tehnologija se uglavnom koristila za realizaciju različitih tipova otpornih mreža i formiranje velikog broja sklopova specifične namene. Važila je za tehnologiju kod koje nije bilo važno detaljno poznavanje prirode i parametara strukture koji se formiraju tokom procesa sito-štampe, sušenja i žarenja debelih slojeva da bi se realizovale optimalne vrednosti otpornosti ili željene funkcije projektovanog sklopa. Savremene primene su neuporedivo zahtevnije u pogledu svakog pojedinačnog koraka realizacije zahtevane strukture – od projektovanja koje je inicijalni korak pa sve do testiranja i finalne kontrole. One zahtevaju detaljno poznavanje svih aspekata formiranja

debeloslojnih struktura, striktnu kontrolu procesa i iscrpno razmatranje pitanja pouzdanosti.

Proces koji je najvažniji za formiranje svih debeloslojnih struktura, sa posebnim naglaskom na otporne strukture, je visokotemperaturski tretman tzv. žarenje. On je direktno odgovoran za performanse debeloslojnih otpornih struktura koje su vremenom postale sve manjih dimenzija, sve uži tolerancija i sa sve strožim zahtevima u pogledu šumnih performansi. U cilju dalje primene konvencionalne debeloslojne tehnologije u zahtevnim novim aplikacijama potrebno je detaljno poznavanje uticaja visokotemperaturskog tretmana na performanse debelih otpornih slojeva. Iz tog razloga je u radu prikazano eksperimentalno istraživanje uticaja visokotemperaturskog tretmana na otpornost debelih otpornih slojeva različitih slojnih otpornosti.

II. EKSPERIMENT

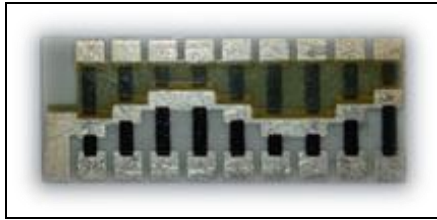
Da bi izvršili analizu uticaja visokotemperaturskog tretmana na otpornost debeloslojnih otpornika, više grupa debeloslojnih otpornih struktura različitih geometrija (Slika 1) je izloženo različitim uslovima žarenja. Svi test uzorci otpornika upotrebljenih u eksperimentu su realizovani na $25,4 \times 12,7 \times 0,65 \text{ mm}^3$ 96% čisto keramičkoj alumina (Al_2O_3) podlozi kompanije Kjosera iz Japana korišćenjem konvencionalnih tehnika sito-štampe.

Otpornici su formirani pomoću komercijalno raspoloživih otpornih pasti iz DuPont HS 80 serije na bazi RuO_2 i $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ [4] nominalnih slojnih otpornosti $1 \text{ k}\Omega/\square$ (HS 8031), $10 \text{ k}\Omega/\square$ (HS 8039) i $100 \text{ k}\Omega/\square$ (HS 8049) u kombinaciji sa Pd/Ag provodnom pastom iz DuPont QM serije sa oznakom QM 21. Pošto je svaka keramička pločica na sebi nosila dve grupe otpornika, jedna grupa na svakoj pločici je bila zaštićena DuPont QQ 550 niskotemperaturskim zaštitinim slojem na bazi stakla.

Konvencionalni proces sito-štampe je izveden korišćenjem mrežice od nerđajućeg čelika gustine 200 otvora po in^2 ($1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$) sa emulzijom debljine 10-12 μm . Provodni sloj je odštampan, osušen i žaren pre štampanja otpornih slojeva. Sito-štampanje su formirani otporni slojevi korišćenjem tri različite otporne paste. Na svakoj podlozi se nalazilo po 18 otpornika iste slojne otpornosti dok su grupe od po 6 otpornika bile istih

dimenzija. Da bi se ostvarila željena debljina suvih otpornih slojeva od 25 μ m, vlažni otporni slojevi su bili debljine 36-38 μ m u zavisnosti od upotrebljene otporne paste.

Nakon izvedenog procesa sito-štampe, svi vlažni slojevi su se nivelisali 15min na sobnoj temperaturi (21°C) i sušili u infracrvenoj konvejserskoj sušnici u ciklusu od 10min na temperaturi od 150°C. Da bi se izbegla pojava plikova, pukotina ili neravnina, suvi otporni slojevi su strogo kontrolisani.



Slika 1. Zaštićeni i nezaštićeni debeloslojni test otpornici upotrebljeni u eksperimentu

Nezaštićeni debeloslojni test otpornici i debeloslojni test otpornici zaštićeni staklenom zaštitom su upotrebljeni u eksperimentalnim istraživanjima. Primarni uslovi žarenja su izabrani u skladu sa preporukama proizvođača otpornih pasti: ciklus u trajanju od 60min sa maksimalnom temperaturom od 850°C u trajanju od 10min [5].

Pošto ključne osobine debelih otpornih slojeva određuju procesi koji se odvijaju tokom žarenja u visokotemperaturskoj zoni konvejserske peći, uslovi žarenja su bili strogo kontrolisani. Brzine protoka vazduha su proveravane i svaka keramička podloga je trpela iste uslove u pogledu protoka vazduha bez obzira na položaj na pokretnoj traci peći. Kontrolni sistem peći je obezbedio tačno podešavanje temperature za svaku zonu pojedinačno i njenu konstantnu vrednost tokom ukupnog visokotemperaturskog tretmana svih uzoraka.

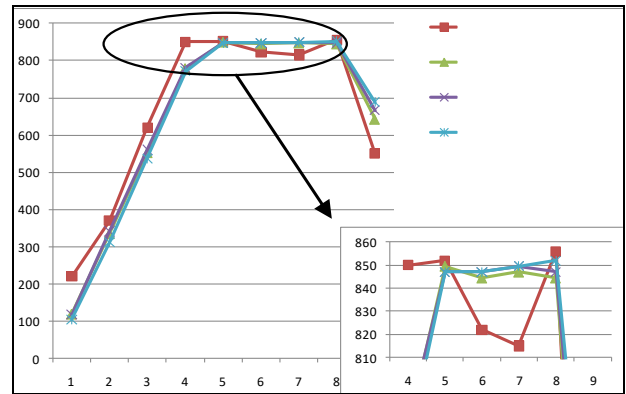
Imajući u vidu da se raspodela temperature neopterećene peći razlikuje od temperaturske raspodele napunjene peći, eksperimentalni rezultati su zabeleženi pri sledećim uslovima:

- obezbeđeno je adekvatno vreme da peć dostigne i stabilizuje zadate temperature u svih 9 zona peći (Slika 2),
- pokretna traka peći je uniformno opterećena test uzorcima,
- pre svakog ciklusa žarenja odgovarajući broj praznih keramičkih podloga je prolazio kroz visokotemperatursku zonu peći da bi bila uspostavljena temperaturna ravnoteža,
- temperaturni profili su kontrolisani pomoću kontrolnih termoparova zakačenih za probne test uzorke (Slika 3).

Pored toga, brzina prolaska test uzoraka kroz peć je bila uniformna obezbeđujući tako adekvatne profile žarenja debeloslojnih otpornika. Detalji procesa žarenja debelih otpornih slojeva su dati u Tabeli 1.

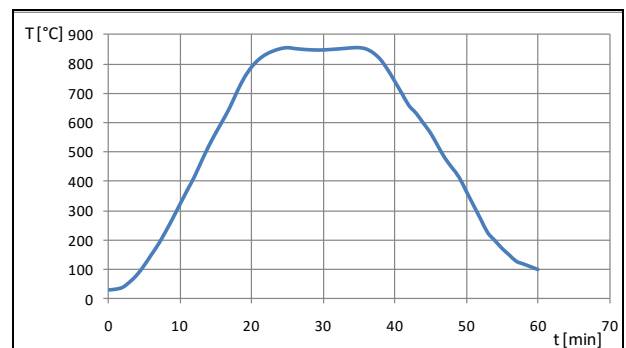
Da bi ispitali uticaj visokotemperaturskog tretmana na parametre debelih otpornih slojeva izabrana su tri profila žarenja pri čemu su otpornici proveli po 10 min na maksimalnoj temperaturi:

- primarni profil preporučen od strane proizvođača upotrebljenih otpornih pasti sa maksimalnom temperaturom od 850°C,
- profil sa nižom maksimalnom temperaturom od preporučene (825°C) i
- profil sa višom maksimalnom temperaturom od preporučene (875°C).



Slika 2. Uspostavljanje primarnog ciklusa žarenja u trajanju od 60min sa boravkom na maksimalnoj temperaturi žarenja u trajanju od 10min (crvena boja - zadate temperature po zonama, zelena boja - temperatura u zoni maksimalne temperature nakon 2.5h, ljubičasta boja - temperatura u zoni maksimalne temperature nakon 3.5h, plava boja- stabilizovana temperatura u zoni maksimalne temperature nakon 4.5h od zadavanja temperatura po zonama)

Za svaki temperaturni profil ispitani su efekti vremena provedenog na maksimalnoj temperaturi za tri vremenska perioda: 5, 10 (preporučeno trajanje [5]) i 15min. Za svaki set parametara žarenja merene su vrednosti otpornosti. Za merenja otpornosti je upotrebljen instrument HP34401A. Sva merenja su vršena na sobnoj temperaturi.



Slika 3. Stabilizovani primarni profil žarenja

TABELA I.

DETALJI VISOKOTEMPERATURSKOG TRETMANA DEBELIH OTPORNIH SLOJEVA: FAZE PROCESA, TEMPERATURE, PROCESI I PITANJA POUZDANOSTI STRUKTURE

FAZA ŽARENJA	TEMPERATURA	PROCES	PITANJA POUZDANOSTI
Uspon do maksimalne temperature žarenja	~ 400 - 500°C	Potpuno sagorevanje preostalih organskih konstituenata u otpornom sloju	Neke čestice organskog konstituenta mogu ostati zarobljene u otpornom sloju.
Uspon do maksimalne temperature žarenja	500 - 850°C	Topljenje staklene faze	Zarobljene čestice organskog konstituenta mogu dovesti do stvaranja mehurića koji mogu uticati na homogenost otpornog sloja a samim tim i narušiti njegove otporne i šumne karakteristike.
Vreme provedeno na maksimalnoj temperaturi žarenja	~ 850°C	Formiranje debeloslojne otporne strukture	Varijacije u maksimalnoj temperaturi žarenja i /ili vremena provedenog u zoni maksimalne temperature može u velikoj meri uticati na formiranje otporne strukture a samim tim i na otporne i šumne performanse otpornika.
Pad sa maksimalne temperature žarenja	850 - 400°C	Očvršćavanje staklene faze	Prebrzo očvršćavanje staklene faze može prouzrokovati stres u debelom otpornom sloju i dovesti do abnormalnih vrednosti parametara šuma.
Pad sa maksimalne temperature žarenja	< 400°C	Relaksacija otporne strukture	Stres indukovani brzim očvršćavanjem staklene faze se može delimično relaksirati tokom ove faze.

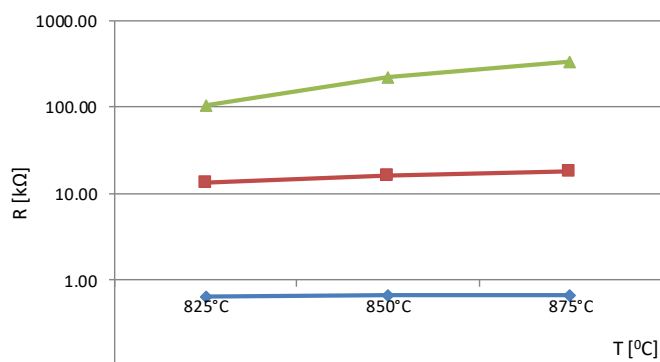
III. REZULTATI I DISKUSIJA

U cilju analize uticaja visokotemperaturnog tretmana na parametre debelih otpornih slojeva različitih dimenzija i slojnih otpornosti odabrane su tri grupe otpornika. U pitanju su otpornici istih dimenzija, slojnih otpornosti $1\text{k}\Omega/\square$, $10\text{k}\Omega/\square$ i $100\text{k}\Omega/\square$ i nominalnih vrednosti otpornosti $0.6\text{k}\Omega$, $16\text{k}\Omega$ i $220\text{k}\Omega$.

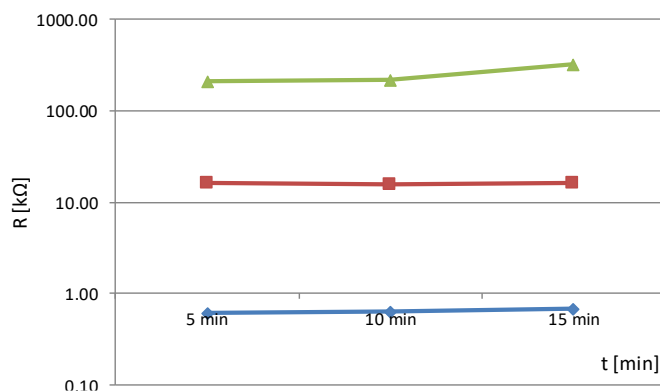
Otpornici su podeljeni na 18 grupa koje su izlagane različitim uslovima žarenja (tri različita temperaturna profila u tajanju od 10min i temperaturni profil sa maksimalnom temperaturom od 850°C u tajanju od 5, 10 i 15min), a potom su vrednosti njihovih otpornosti merene i analizirane. Uočeno je da prisustvo staklene zaštite zbog niske temperature žarenja izolacionog sloja (520°C) ne utiče na izmene vrednosti otpornosti debeloslojnih otpornika.

Slika 4 pokazuje kako maksimalna temperatura žarenja utiče na vrednosti otpornosti otpornika različitih slojnih otpornosti. Jasno je uočljivo da sa porastom slojne otpornosti otpornika raste i osetljivost vrednosti otpornosti na maksimalnu temperaturu žarenja. Na slici 5 je prikazan uticaj vremena provedenog na maksimalnoj temperaturi žarenja na vrednosti otpornosti otpornika. Uočljivo je da vreme provedeno na maksimalnoj temperaturi žarenja najveći uticaj ima na otpornike velike slojne otpornosti ($R_{sl} \geq 100\text{k}\Omega/\square$) kao i da su otpornici osetljiviji na izmene maksimalne temperature žarenja.

Kako se visokotemperaturni tretman odrazio na formiranje strukture otpornika i njihove performanse detaljnije je prikazano u Tabeli 2. Opisan je način kako svaki od primenjenih profila žarenja uticao na formiranje strukture zavisno od slojne otpornosti upotrebene debeloslojne otporne paste i kako se strukturne karakteristike otpornika odražavaju na otpornost formiranih debelih otpornih slojeva.



Slika 4. Srednje vrednosti otpornosti tri serije otpornika nominalnih vrednosti otpornosti 0.6, 16 i $220\text{k}\Omega$ žarenih u ciklusima trajanja 60min sa maksimalnim temperaturama od 825°C , 850°C i 875°C u trajanju od 10min



Slika 5. Srednje vrednosti otpornosti tri serije otpornika nominalnih vrednosti otpornosti 0.6, 16 i $220\text{k}\Omega$ žarenih u ciklusima trajanja 60min sa maksimalnom temperaturom od 850°C u trajanju od 5, 10 i 15min

TABELA II.

ANALIZA DEJSTVA VISOKOTEMPERATURSKOG TRETMANA NA FORMIRANJE DEBELIH OTPORNIH SLOJEVA I NJIHUVU OTPORNOST

I DEO EKSPERIMENTA: t = 10 min, različite maksimalne temperature žarenja			
<i>Promenljivi parametar</i>	<i>Slojna otpornost</i>	<i>Dejstvo na formiranje strukture</i>	<i>Otpornost otpornika</i>
$T_{max}=825^{\circ}C$	$R_{sl}=1k\Omega/\square$	Zbog visokog faktora ispunne provodne faze maksimalna temperatura žarenja ne utiče u značajnoj meri na broj formiranih provodnih lanaca uronjenih u stakleni matriks.	Nema veći uticaj na vrednost otpornosti
$T_{max}=825^{\circ}C$	$R_{sl}=10k\Omega/\square$	Iako otpornici ove slojne otpornosti imaju uravnotežen odnos provodne i staklene faze na ovoj temperaturi određen broj provodnih čestica nije u potpunosti uronjen u stakleni matriks te je broj provodnih lanaca veći od optimalnog.	Vrednost otpornosti neznatno niža od projektovane.
$T_{max}=825^{\circ}C$	$R_{sl}=100k\Omega/\square$	Zbog niskog faktora ispunne provodne faze i velikog sadržaja borosilikatnog stakla na ovoj temperaturi nije došlo do potpunog uranjanja provodne faze u stakleni matriks pa je veći broj provodnih čestica ostao u kontaktu ili razdvojen tankom staklenom barijerom koja omogućava provođenje tunelovanjem što je rezultovalo većim brojem provodnih lanaca u otporniku.	Vrednost otpornosti znatno niža od projektovane.
$T_{max}=850^{\circ}C$	Sve tri slojne otpornosti	Upitanju su optimalne vrednosti maksimalne temperature i vremena žarenja. Broj provodnih lanaca formiranih u debeloslojnim strukturama odgovara faktorima ispunne provodne i staklene faze za svaku od navedenih slojnih otpornosti.	Vrednosti otpornosti bliske projektovanim vrednostima
$T_{max}=875^{\circ}C$	$R_{sl}=1k\Omega/\square$	Zbog visokog faktora ispunne provodne faze maksimalna temperatura žarenja ne utiče u značajnoj meri na broj formiranih provodnih lanaca uronjenih u stakleni matriks.	Nema veći uticaj na vrednost otpornosti
$T_{max}=875^{\circ}C$	$R_{sl}=10k\Omega/\square$	Zbog veće tečljivosti stakla veći broj provodnih čestica biva okružen debljim staklenim barijerama te opada broj formiranih provodnih lanaca jer je u slučaju takvih provodnih čestica onemogućeno direktno i tunelsko provođenje.	Vrednost otpornosti neznatno viša od projektovane.
$T_{max}=875^{\circ}C$	$R_{sl}=100k\Omega/\square$	Zbog niskog faktora ispunne provodne faze i velikog sadržaja borosilikatnog stakla na ovoj temperaturi provodna faza je u većoj meri uronjena u stakleni matriks, provodne čestice su okružene debljim izolacionim slojem koji ne omogućava tunelsko provođenje i smanjuje se broj provodnih lanaca koji učestvuju u provođenju.	Vrednost otpornosti znatno viša od projektovane.
II DEO EKSPERIMENTA: T = 850 °C, različita vremena provedena na maksimalnoj temperaturi žarenja			
<i>Promenljivi parametar</i>	<i>Slojna otpornost otpornika</i>	<i>Dejstvo na formiranje strukture</i>	<i>Otpornost otpornika</i>
t=5min	Sve tri slojne otpornosti	Optimalna temperatura je dovela do formiranja strukture otpornika, a vreme provedeno na ovoj temperaturi nije dovoljno da bi dovelo do dalje prostorne preraspodele provodne faze kojom se menja broj provodnih lanaca.	Nema veći uticaj na vrednost otpornosti
t=10min	Sve tri slojne otpornosti	Upitanju su optimalne vrednosti maksimalne temperature i vremena žarenja. Broj provodnih lanaca formiranih u debeloslojnim strukturama odgovara faktorima ispunne provodne i staklene faze za svaku od navedenih slojnih otpornosti.	Nema veći uticaj na vrednost otpornosti
t=15min	$R_{sl}=1k\Omega/\square$ $R_{sl}=10k\Omega/\square$	Iako duže od optimalnog, vreme provedeno na ovoj temperaturi nije dovelo do dalje preraspodele provodne faze kojom bi se uticalo na broj provodnih lanaca koji utiče na provođenje.	Nema veći uticaj na vrednost otpornosti
t=15min	$R_{sl}=100k\Omega/\square$	Zbog visokog faktora ispunne provodne faze dolazi do preraspodele provodne faze unutar staklenog matriksa te se smanjuje broj provodnih čestica koje učestvuju u provođenju.	Vrednost otpornosti viša od projektovane

IV. ZAKLJUČAK

Žarenje je najvažniji proces u nizu procesa koji učestvuju u formiranju debeloslojnih otpornih struktura. Da bi zadovoljili uske tolerancije, smanjenje dimenzija i zahteve u pogledu pouzdanosti koje donose savremene primene ovih otpornika, potrebno je iscrpno poznavanje uticaja visokotemperaturnog tretmana na njihovu strukturu i performanse. To je važno i sa aspekta korekcije vrednosti otpornosti alternacijom maksimalne temperature žarenja i/ili vremena provedenog na toj temperaturi.

U radu je pokazano da maksimalna temperatura žarenja utiče na strukturu, a samim tim i na vrednosti otpornosti otpornika sa većim faktorima ispunne staklene faze kod kojih je dominantan mehanizam provođenja tunelovanje kroz staklene barijere ($R_{sl} \geq 10k\Omega/\square$). Takođe je pokazano da vreme provedeno na maksimalnoj temperaturi žarenja utiče na vrednost otpornosti otpornika sa visokim faktorom ispunne staklene faze ($R_{sl} \geq 100k\Omega/\square$). Uočeno je da kod ovih otpornika dolazi do preraspodele provodne faze unutar staklenog matriksa čime se menjaju uslovi provođenja u otporniku.

Dalja istraživanja bi mogla biti usmerena ka definisanju parametara strukture koji su odgovorni za ovakvo ponašanje i

načina kako se korekcijom visokotemperaturnog tretmana može uticati na podešavanje pojedinačnih parametara strukture.

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] O. Aleksić, M.V. Nikolić, M. Luković, Z. Stanimirović, I. Stanimirović, L. Sibinoski, "The Response of a Heat Loss Flowmeter in a Water Pipe Under Changing Flow Conditions", IEEE Sensors Journal, Vol. 16, No. 9, pp. 2935 – 2941, May 1, 2016.
- [2] D. Belavić, M. Hrovat, J. Holc, M. Zarnik, M. Kosec, M. Pavlin, "The application of thick-film technology in C-MEMS", Journal of Electroceramics, 19(4), pp. 363-368, 2007.
- [3] N.M. White, P. Glynne-Jones, and S.P. Beeby, "A novel thick-film piezoelectric micro-generator", Smart Mater. Struct, Vol. 10, pp. 850-852, 2001.
- [4] M. Hrovat, D. Belavić, Z. Samardžija, J. Holc, "A characterisation of thick film resistors for strain gauge applications", Journal of Materials Science, Vol. 36, Iss. 11, pp. 2679-2689, 2001.
- [5] DuPont Microcircuit materials, HS80 Resistor Seres Data Sheet, www.dupont.com

ABSTRACT

New advanced applications of thick resistive films require tighter tolerances, improved performances and reliability. High temperature treatment is the key process in formation of these complex structures. Besides materials selection and screen printing process, high temperature treatment is directly responsible for thick-film resistor performances. By choosing optimum firing profile, performing strict control of conveyor furnace operation, choosing the optimum peak temperature and time spent at the peak temperature, we are regulating the space distribution of conducting and glass phase that determines conduction mechanisms in the film and consequentially performances of the resistor. For these reasons this paper gives an insight in experimental investigation of high temperature treatment of thick resistive films.

HIGH TEMPERATURE TREATMENT OF THICK RESISTIVE FILMS

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović