

PREISKAVE DEBELOPLASTNIH UPOROV Z VISOKIMI FAKTORJI GAUGE

Marko Hrovat, Darko Belavič*, Goran Dražič, Janez Holc, Stojan Šoba*
 Institut Jožef Stefan, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija
 * HIPOT Hybrid, Šentjernej

Ključne besede: upori debeloplastni, GF gauge faktorji, TEM mikroskopija elektronska, mikrostrukture, RuO₂ oksid rutenija, analize impedanc, TCR koeficienti uporov temperaturni, Bi₂Ru₂O₇

Povzetek: Mikrostrukture nekaterih komercialnih debeloplastnih uporov z nizkimi in visokimi faktorji gauge smo preiskali s transmisijским elektronskim mikroskopom. Posnetki so pokazali značilno razliko med mikrostrukturno uporovnih materialov z nizkih oziroma visokim faktorjem gauge. Bolj homogen material z veliko majhnih delcev prevodne faze, ki so blizu skupaj, ima nizek faktor gauge, manj homogen, kjer so delci prevodne faze bolj oddaljeni drug od drugega, pa visok faktor gauge. Rezultati kažejo, da ima mikrostruktura debeloplastnih uporov večji vpliv na velikost faktorjev gauge kot sama sestava prevodne faze.

Nekaterim uporovnim materilom, žganim na dielektrikih za večplastna vezja, so močno narasli faktorji gauge, hkrati pa so se povešale plastne upornosti in temperaturni koeficienti upornosti. Preiskave s kompleksno impedančno analizo so nakazale, da med žganjem steklasta faza difundira iz dielektrika v upor in mu spremeni električne karakteristike.

Investigations of Thick Film Resistors with High Gauge Factors

Key words: thick film resistors, gauge factors, GF, TEM, Transmission Electron Microscopy, microstructures, RuO₂ ruthenium oxide, impedance analysis, Temperature coefficient of resistivity, TCR, Bi₂Ru₂O₇

Abstract: The gauge factors (GF) of thick film materials are higher than those of thin metal films and lower than those of semiconductors. Due to their stability and the low temperature coefficient of resistivity (TCR) of thick film materials strain gauges realised in thick film technology offer advantages in some applications over both metal film (low GF, low TCR) and semiconducting elements (high GF, high TCR).

The gauge factors of thick film resistors depend on a conductive phase in the resistor material and increase with increasing sheet resistivity. Gauge factors of thick film resistors based on ruthenates (Bi₂Ru₂O₇ or Pb₂Ru₂O_{6.5}) are usually higher than those of resistors based on RuO₂. However, investigation of microstructure of thick film resistors with low and high GF by TEM indicated, that the microstructure of materials plays an important role. Regardless of the composition of the conductive phase the materials with low gauge factors have many small grains of conductive phase embedded in glass matrix while resistors with high gauge factors have less conductive particles in a given volume of material, and therefore a larger average distance between conducting sites. This is also in accordance with the fact that the gauge factors of thick film resistors increase with increasing sheet resistivity. Higher sheet resistivities mean a lower concentration of the conductive phase, i.e. less particles in a given volume of material and therefore a larger average distance between conducting sites.

The reason why RuO₂ based resistors have ordinarily lower GF is probably the following; RuO₂ powders for thick film resistors are customarily prepared by precipitation of ruthenium compounds, e.g. ruthenium hydroxide from a solution of Ru bearing compounds, while ruthenates are made by high temperature reaction between RuO₂ and, for example, Bi₂O₃, and then milled to decrease particle size. Therefore it is (comparatively) easier to prepare very fine grained RuO₂ powder with a particle size of a few tens of nanometers than fine grained ruthenate powder.

When resistor pastes are fired on or under multilayer dielectrics instead of on alumina substrates, the interaction between the resistor and multilayer material changes the electrical characteristics of the resistors (usually for the worse, as they are optimised for firing on alumina). The possibility of increasing gauge factors of thick film resistors in this way was investigated. For some resistors, fired on multilayer dielectrics, GF increased over 30. However, sheet resistivities, TCR and noise indexes also increased. Examinations with complex impedance analysis, indicated the diffusion of glass phase from multilayer dielectric into resistor during firing. This phase "dilutes" the conductive phase in resistor resulting in increased gauge factors, sheet resistivities and noise indexes.

UVOD

Pri mehanski obremenitvi se električnemu prevodniku spremeni upornost. Ta sprememba upornosti je delno posledica deformacije, to je spremembe dimenzij, delno pa posledica spremembe specifične upornosti zaradi sprememb v mikrostrukturi materiala [1]. Deformacija je relativni podaljšek ali skrček pod vplivom mehanske napetosti. Sprememba upornosti upora dolžine l , širine s in debeline d (preseki upora je produkt širine in dolžine) pri obremenitvi je:

$$dR/R = d\phi/\phi + dl/l - ds/s + dd/d$$

Sprememba upornosti upora zaradi deformacije je vsota "mikrostrukturnega" prispevka (prvi člen enačbe - sprememba specifične upornosti $d\phi/\phi$) in geometrijskega prispevka (ostali členi enačbe).

Faktor gauge materiala GF je definiran kot razmerje med relativno spremembo upornosti in relativno deformacijo. Vrednost faktorja gauge zaradi sprememb dimenzij upora pri deformaciji je med 2 in 2,5, višji faktorji gauge pa so

rezultat sprememb v mikrostrukturi, to je spremembe specifične upornosti materiala.

$$GF = (dR/R) / (dl/l)$$

Faktorji gauge debeloplastnih uporov so višji kot pri tankih kovinskih filmih, kjer so posledica samo geometrijskih sprememb, in nižji kot pri polprevodnikih. Ker so debeloplastni uporovni materiali stabilni, relativno poceni in imajo nizek temperaturni koeficient upornosti, so za nekatere aplikacije pri senzorjih upogiba ali tlaka primernejši tako tenkoplastnih (imajo višje faktorje gauge) kot polprevodnih (nižji TCR) komponent /2,3/. Tipične lastnosti tenkoplastnih, debeloplastnih in polprevodnih materialov, to so faktorji gauge (GF), temperaturni koeficienti upornosti (TCR) in stabilnost, so prikazane v tabeli I /4,5/.

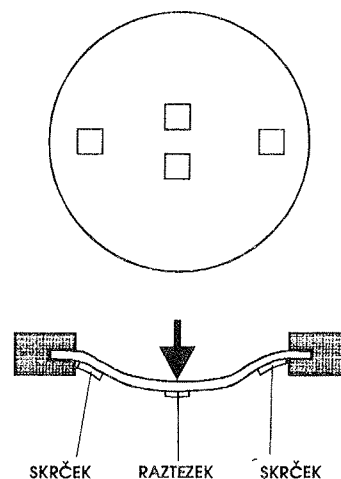
Tabela I Tipične lastnosti materialov za senzorje upogiba /4,5/

Senzor	GF	TRC ($10^{-6}/K$)	Stabilnost
Tenkoplasten	2-5	2-10	Odlična
Debeloplasten	5-20	50-100	Zelo dobra
Polprevoden	50	1500	Dobra

Nekateri avtorji so poročali tudi o razvoju debeloplastnih uporovnih materialov z višjimi faktorji gauge, do 40, ki pa so jih dosegli na račun nekaterih drugih karakteristik, na primer višjega temperaturnega koeficienta upornosti, višjega šuma ali nižje stabilnosti /6,7/. Mimogrede še omenimo, da imajo zelo tenki (nezvezni) kovinski filmi faktorje gauge tudi nekaj 100, vendar se zaradi nestabilnosti in neponovljivosti rezultatov zaenkrat še ne uporabljajo kot senzorji /8,9/.

Pri uporabi za senzorje upogiba se običajno uporabljajo štirje upori, ki so vezani v Wheatstonov most. Zaradi večje občutljivosti je merilni del včasih oblikovan tako, da se dva upora raztezata (upornost naraste), dva se pa krčita (upornost se zniža). Ena od znanih izvedb merilnik pritiska je shematično prikazana na sliki 1 zgoraj /3,10/. Okrogla keramična membrana oziroma substrat, na katerem so natiskani štirje upori, je vpeta ob robu. Pod pritiskom se membrana deformira. Upora na sredini se raztezata (upornost raste), upora bliže oboda pa krčita (upornost pada). To je shematično (in zelo pretirano) narisano spodaj.

Debeloplastni uporovni materiali so (poenostavljeno povedano) zmes prevodnih delcev in stekla. Prevodna faza v današnjih debeloplastnih uporih je na osnovi RuO_2 ali rutenatov, predvsem $Bi_2Ru_2O_7$ za nižje plastne upornosti in $Pb_2Ru_2O_6$ za višje. Po žganju je mikrostruktura "sestavljena" iz prevodnih delcev z nizko specifično upornostjo in skupkov delcev z višjo specifično upornostjo, oboje porazdeljeno v stekleni fazi /11,12/. Nekateri avtorji trdijo, da so skupki delcev in ne posamezni delci RuO_2 ali rutenatov "osnovne enote" električne prevodnosti v debeloplastnih uporih /13/.



Slika 1: Ena od izvedb merilnika pritiska (shematično) /3,10/. Okrogla keramična membrana oziroma substrat, na katerem so natiskani in žgani štirje debeloplastni upori, je vpeta ob robu. Pod pritiskom se membrana deformira. Upora na sredini se raztezata (upornost raste), upora bliže obodu pa krčita (upornost pada).

Za uporabo debeloplastnih uporov za senzorje upogiba je seveda zaželeno, da imajo čim višje faktorje gauge. Podatki v literaturi kažejo, da so faktorji gauge debeloplastnih uporov odvisni od prevodne faze v materialu in da naraščajo s plastno upornostjo /4/. Materiali na osnovi rutenatov imajo v glavnem višje faktorje gauge kot tisti na osnovi RuO_2 .

Gauge faktorji nekaterih komercialnih debeloplastnih uporov s plastnimi upornostmi med 1 kohm/o do 100 kohm/o so prikazani v tabeli II /14/. Prevodna faza v uporih je bila določena z rentgensko praškovno analizo in EDS (Energy Dispersive X-ray Microanalysis). Sestavo uporovne paste 3414 firme Electro Science Labs. je proizvajalec prilagodil za visoke faktorje gauge /5,15/.

Tabela II Nominalne plastne upornosti, sestava prevodne faze in vzdolžni faktorji gauge nekaterih debeloplastnih uporov /14/

Uporovna pasta	Nominalna plastna upornost (ohm/ $\square$)	Prevodna faza	Longitudinalni faktor gauge
Du Pont HS 8031	1 k	RuO_2	2,5
+ Du Pont HS 8029	10 k	$Bi_2Ru_2O_7$	8,5
*Du Pont HS 8041	10 k	RuO_2	3,5
*Du Pont HS 8039	10 k	$Bi_2Ru_2O_7$	11
*+ Heraeus R 8241	10 k	RuO_2	16
+ ESL 3414-A	10 k	$Bi_2Ru_2O_7$	16,5
Du Pont HS 8049	100 k	$Bi_2Ru_2O_7$	12

Iz podatkov v tabeli II vidimo, da faktorji gauge večine uporovnih materialov sledijo "pravilu", da so višji pri višjih plastnih upornostih in pri istih plastnih upornostih višji, kadar so upori na osnovi rutenatov. Zanimiva izjema je pasta 8241 firme Heraeus, ki ima (tako za 3414) najvišji faktor gauge, vendar sta tako rentgenska praškovna analiza kot analiza EDS pokazali, da je na osnovi rutenijevega oksida.

V delu poročamo o mikrostrukturnih preiskavah debeloplastnih uporov s transmissijskim elektronskim mikroskopom (TEM) s ciljem, da ugotovimo možno povezavo med mikrostrukturno materiala in faktorjem gauge. Poleg tega navajamo tudi rezultate meritev faktorjev gauge uporov, ki so bili žgani na plasti dielektrikov za večplastna hibridna vezja. Uporovne paste so namreč prirejene za žganje na Al_2O_3 keramičnih substratih. Če jih žgemo na steklastih dielektrikih, interakcije med uporom in dielektrikom spremenijo (običajno poslabšajo) električne karakteristike uporov [16,17]. Želeli smo ugotoviti, kako te interakcije vplivajo na faktorje gauge.

Za preiskave mikrostruktur s TEM smo izbrali debeloplastne upore HS 8041, HS 8039 in R 8241. Vsi trije imajo nominalno plastno upornost $10 \text{ kohm}/\square$. Kot vidimo v tabeli II, ima HS 8041, ki je na osnovi RuO_2 , nizek faktor gauge, R 8241 na isti osnovi pa visokega. V tabeli II so ti materiali označeni z zvezdico (*). Za testiranje karakteristik uporov, žganih na dielektrikih za večplastna vezja, smo izbrali debeloplastne upore HS 8029, R 8241 in 3414-A, ki imajo vsi razmeroma visoke faktorje gauge. V tabeli II so označeni z znakom plus (+).

EKSPERIMENTALNO DELO

Spremembe upornosti pri deformaciji substrata smo merili na preprosti napravi, ki je prikazana na sliki 2. Debeloplastni upor je obremenjen na nateg. Povezava med deformacijo (ϵ) in upogibom je podana z naslednjo enačbo:

$$\epsilon = \Delta/l = (d \times h \times 6)/L^2$$

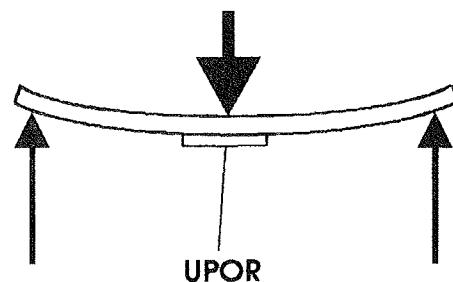
d = debelina substrata (m)

h = upogib (m)

L = razdalja med podporama (m)

V našem primeru je razdalja med podporama 40 mm, debelina substrata, ki se uporablja za izdelavo debeloplastnih hibridnih vezij, pa 0,635 mm. Če je na primer pri upogibu $100 \mu\text{m}$ sprememba upornosti 0,2%, je izračunana vrednost faktorja gauge 8,4.

Upore smo tiskali in žgali pri 850°C na 96% Al_2O_3 substrate. Prevodnik na osnovi Pd/Ag je bil predžgan. Za preiskave mikrostruktur s TEM smo izbrali debeloplastne upore HS 8041, HS 8039 in R 8241 z nominalnimi plastnimi upornostmi $10 \text{ kohm}/\square$. Iz Al_2O_3 keramičnih substratov, na kateri so bili tiskani in žgani upori, smo izrezali diske s premerom 3 mm. Ti so bili stanjšani z brušenjem in jamičastem tanjšanjem do debeline $20 \mu\text{m}$ in nato preluknjani z ionsko erozijo s snopom argonovih ionov.

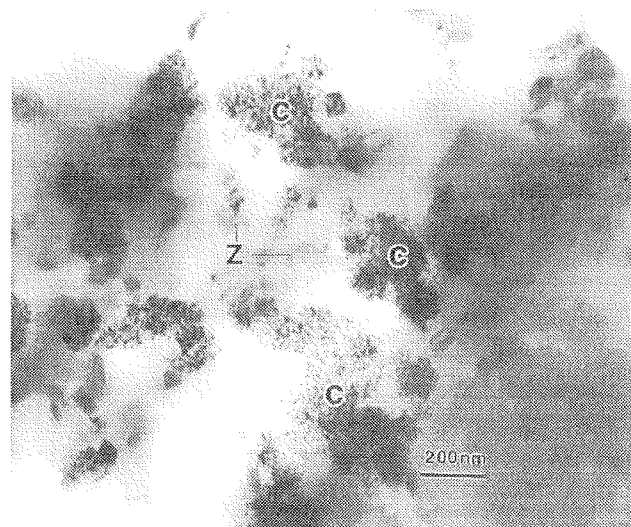


Slika 2: Shematičen prikaz naprave za meritev spremembe upornosti od upogiba keramičnega substrata. Keramični substrat je podprt na obeh straneh, na sredini pa nanj pritiska mikrometrski vijak. Debeloplastni upor je obremenjen na nateg.

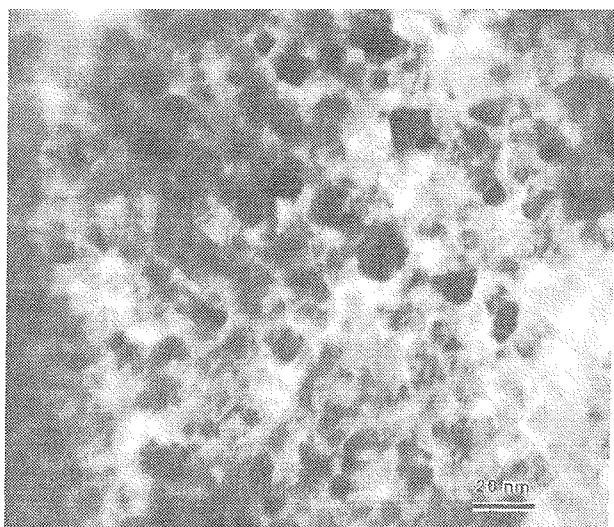
Za preiskave karakteristik uporov na plasteh večplastnih dielektrikov smo najprej natiskali in žgali plast dielektrika, na tej plasti pa debeloplasten upor. Upori so bili HS 8029 (Du Pont, $1 \text{ kohm}/\square$), R 8241 (Heraeus, $10 \text{ kohm}/\square$) in 3414-A (Electro Science Labs., $10 \text{ kohm}/\square$), dielektriki pa 4905 (Electro Science Labs.), 9117 (Heraeus) in 5704 (Du Pont). Izmerili smo faktorje gauge in jih primerjali s faktorji gauge uporov na keramiki.

REZULTATI IN DISKUSIJA

Na slikah 3 in 4 je prikazana mikrostruktura upora HS 8041 pri različnih povečavah. Upor je na osnovi rutenijevega oksida in ima razmeroma nizek faktor gauge 3,5. V stekleni matriki so delci RuO_2 povprečne velikosti okrog 10 nm. Večja zrna velikosti do 100 nm so ZrSiO_4 , ki je med žganjem verjetno izkristaliziral iz steklene faze.

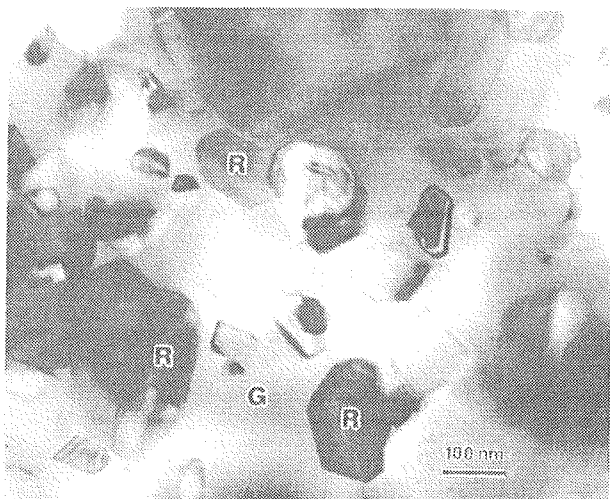


Slika 3: Mikrostruktura upora HS 8041 z nizkim faktorjem gauge ($GF=3,5$). Uporovni material je na osnovi rutenijevega oksida. C - skupki delcev RuO_2 , G - steklasta faza, Z - delci ZrSiO_4 .



Slika 4: Mikrostruktura upora HS 8041 z nizkim faktorjem gauge ($GF=3,5$). V stekleni matriki so delci RuO_2 povprečne velikosti okrog 10 nm.

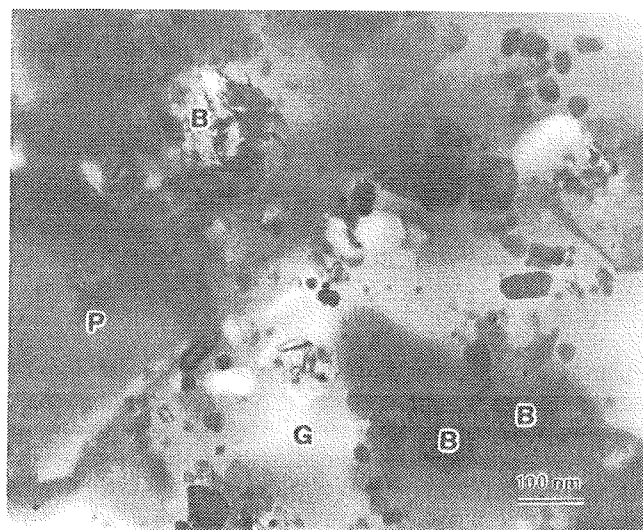
Na sliki 5 je mikrostruktura upora R 8241, ki je prav tako na osnovi rutenijevega oksida in ima visok gauge faktor. V stekleni matriki so zrna RuO_2 velikosti do 200 nm. Na sliki 6 je mikrostruktura upora HS 8039 na osnovi rutenata. V stekleni fazi so zrna $Bi_2Ru_2O_7$ velikosti do 200 nm in nekaj večjih, do 400 nm, zrn $Pb_2Ru_2O_{6,5}$.



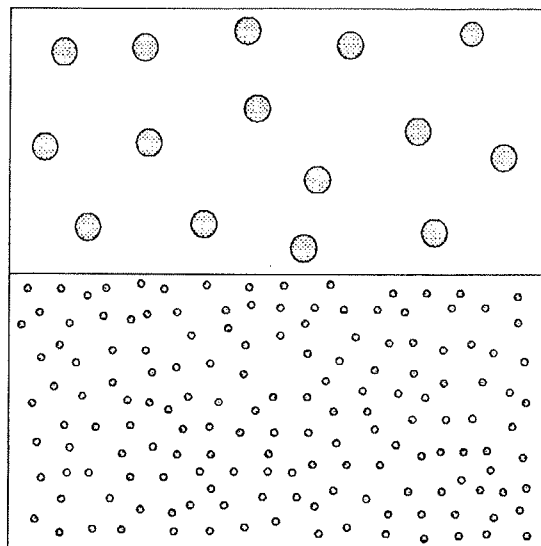
Slika 5: Mikrostruktura upora R 8241 z visokim faktorjem gauge ($GF=16$). Uporovni material je na osnovi rutenijevega oksida. V stekleni matriki so zrna RuO_2 velikosti do 200 nm.
R - zrna RuO_2
G - steklasta faza

Posnetki s TEM kažejo na značilno razliko med mikrostrukturo uporovnih materialov z nizkih oziroma visokim faktorjem gauge. Prevodni delci v uporih z nizkim faktorjem gauge (HS 8041 na osnovi RuO_2) so majhni in blizu skupaj, v uporih z visokim faktorjem gauge (HS 8039 na

osnovi $Bi_2Ru_2O_7$ in R 8241 na osnovi RuO_2) pa so delci za razred večji in bolj oddaljeni drug od drugega. Dvdimenzionalna struktura teh dveh tipov mikrostruktur je shematično predstavljena na sliki 7. Krogci predstavljajo zrna prevodne faze v steklu.



Slika 6: Mikrostruktura upora HS 8039 z razmeroma visokim faktorjem gauge ($GF=11$). Uporovni material je na osnovi bizmutovega rutenata. V stekleni matriki so zrna $Bi_2Ru_2O_7$ velikosti do 200 nm.
B - zrna $Bi_2Ru_2O_7$
P - zrna $Pb_2Ru_2O_{6,5}$
G - Steklasta faza



Slika 7: Shematična dvodimenzionalna struktura dveh tipov mikrostruktur debeloprastnih uporov z visokimi (zgoraj) in nizkimi (spodaj) faktorji gauge. Krogci predstavljajo zrna prevodne faze v steklu. Prevodni delci v uporih z nizkim faktorjem gauge so majhni in blizu skupaj, v uporih z visokim faktorjem gauge pa so delci za razred večji in bolj oddaljeni drug od drugega.

Rezultati mikrostrukturnih preiskav torej kažejo, da ima mikrostruktura debeloplastnih uporov najverjetneje večji vpliv na velikost faktorjev gauge kot sama sestava prevodne faze. Bolj homogen material z veliko majhnih delcev prevodne faze, ki so blizu skupaj, ima nizek faktor gauge, manj homogen, kjer so delci prevodne faze bolj oddaljeni drug od drugega, pa visok faktor gauge. To se tudi ujema s tem, da imajo upori z višjimi plastnimi upornostmi višje faktorje gauge. Višje plastne upornosti pomenijo namreč manjšo koncentracijo prevodne v stekleni fazi in s tem večjo povprečno razdaljo med prevodnimi delci.

Iz dobljenih podatkov lahko sklepamo (oziroma ugibamo), zakaj imajo upori na osnovi rutenijevega oksida v glavnem nižje faktorje gauge kot upori na osnovi rutenatov. Prah rutenijevega oksida se običajno pripravlja s precipitacijo rutenijevih spojin, na primer rutenijevega hidroksida, iz raztopine. Oborjeni delci so navadno zelo majhni. Rutenati pa se pripravljajo z visokotemperaturno reakcijo med RuO_2 in, na primer, Bi_2O_3 . Sintetiziran material se melje, da dobimo delce majhnih dimenzij. Zato je (sorazmerno) lažje pripraviti zelo drobnoznat prah RuO_2 kot rutenatov in iz njega debeloplastne upore s homogeno, "urejeno", mikrostrukturo. Znano je namreč, da so upori z nizkimi gauge faktorji bolj večinoma stabilni in imajo nižji termični šum /18/.

V tabeli III so podani hladni (-25°C do 25°C) in vroči (25°C do 125°C) temperaturni koeficienti upornosti (TCR) in spremembe upornosti po staranju (kuhanje v destilirani vodi, 20 min) debeloplastnih uporov, žganih na Al_2O_3 keramiki ali na dielektrikih, v tabeli IV pa njihove plastne upornosti, indeksi termičnega šuma in faktorji gauge. Faktorji gauge in indeksi termičnega šuma so grafično prikazani na slikah 8 in 9.

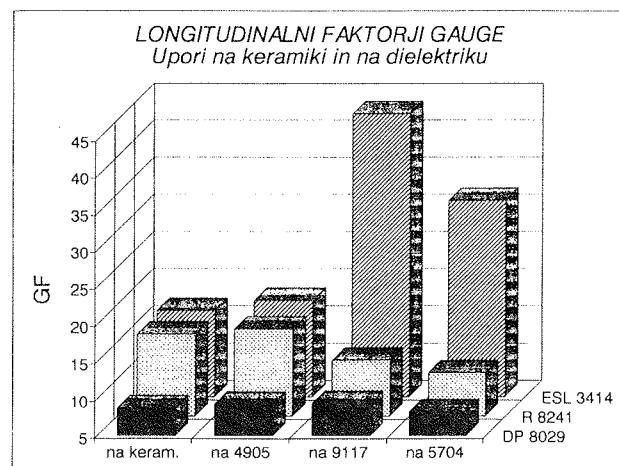
Tabela III Temperaturni koeficienti upornosti in spremembe upornosti po staranju debeloplastnih uporov, žganih na keramiki ali na dielektrikih

Upor	Diel.	Hladen TCR (-25 do 25°C) ($10^{-6}/\text{K}$)	Vroč TCR (25 do 125°C) ($10^{-6}/\text{K}$)	$\Delta R/R$ Vrela voda (%)
Du Pont HS 8029	Al_2O_3	10	50	0,03
	ESL 4905	0	55	<0,01
	Her. 9117	-15	40	0,03
	Du Pont 5704	30	85	0,01
ESL 3414	Al_2O_3	-95	-40	0,13
	ESL 4905	-325	-270	0,12
	Her. 9117	-415	-405	1,14
	Du Pont 5704	-365	-305	1,11
Heraeus R 8241	Al_2O_3	10	50	0,06
	ESL 4905	-45	-15	0,04
	Her. 9117	-25	5	0,04
	Du Pont 5704	50	90	0,04

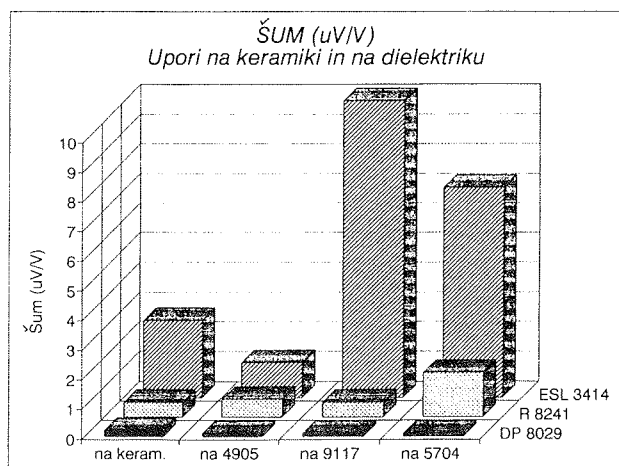
Tabela IV Plastne upornosti, relativne plastne upornosti, indeksi termičnega šuma in faktorji gauge debeloplastnih uporov, žganih na keramiki ali na dielektrikih

Upor	Diel.	Plastna upor. (ohm/ $\square$)	Rel. plast. upor. (%)	Indeks šuma (dB)	Faktor gauge
Du Pont HS 8029	Al_2O_3	1,2 k	100	-14	8,5
	ESL 4905	1,0 k	78	-21	9,0
	Her. 9117	1,6 k	129	-21	9,5
	Du Pont 5704	1,0 k	80	-21	10,5
ESL 3414	Al_2O_3	9,3 k	100	8,3	16,5
	ESL 4905	24,4 k	261	1,5	18,0
	Her. 9117	99,1 k	1061	20	43,0
	Du Pont 5704	26,3 k	282	17	31,5
Heraeus R 8241	Al_2O_3	7,4 k	100	-6,0	16,0
	ESL 4905	18,0 k	243	-4,4	16,5
	Her. 9117	3,4 k	46	-6,0	12,5
	Du Pont 5704	3,3 k	45	-3,5	11,0

Najvišje faktorje gauge smo dobili z uporovno pasto 3414 firme Electro Science Labs., žgano na dielektrikih 5704 (GF preko 30) in na 9177 (GF preko 40). Te vrednosti so blizu vrednostim, dobljenim s posebnimi debeloplastnimi uporovnimi materiali /7/. To povišanje faktorjev gauge, za katerega predpostavljamo, da je posledica interakcije med dielektričnim in uporovnim materialom, pa je povezano, kot vidimo v tabelah III in IV, s poslabšanjem dolgih karakteristik; z zvišanjem plastnih upornosti, temperaturnih koeficientov upornosti in termičnega šuma. Tudi stabilnost teh uporov, žganih na dielektrikih, je slabša.

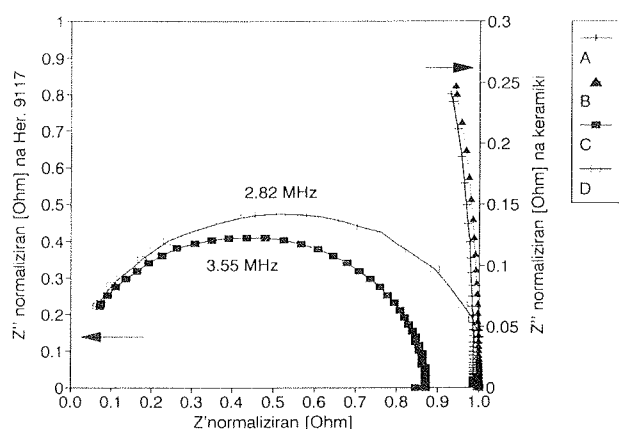


Slika 8: Faktorji gauge debeloplastnih uporov, žganih na Al_2O_3 keramiki in na plasteh dielektrikov



Slika 9: Indeksi termičnega šuma ($\mu V/V$) debeloplastnih uporov, žganih na Al_2O_3 keramiki in na plasteh dielektrikov

Mikrostrukturne razlike med EL 3414 upori, žganimi na Al_2O_3 substratih ali na Heraeus-ovem dielektriku 9117 (najvišji faktor gauge), smo poizkusili ugotoviti z metodo kompleksne impedanace. Ta metoda predpostavlja, da se lahko odziv materiala predstavi kot preprost ekvivalent uporov in kondenzatorjev, povezanih vzporedno ali zaporedno [19]. Na sliki 10 je prikazana kompleksna impedančna analiza nedeformiranih in deformiranih (upogib substrata $100 \mu m$) uporov, merjenih od 5 Hz do 13 MHz.



Slika 10: Kompleksna impedančna analiza (5 Hz do 13 MHz) nedeformiranih in deformiranih (upogib $100 \mu m$) uporov EL 3414, žganih na keramiki in na dielektriku Heraeus 9117. Vrednosti so normalizirane na upornosti nedeformiranih uporov.
A - EL 3414 na keramiki, nedeformiran
B - EL 3414 na keramiki, deformiran
C - EL 3414 na dielektriku, nedeformiran
D - EL 3414 na dielektriku, deformiran

Realni del (Z' , abscisna os) je funkcija sprememb upornosti, imaginarni del (Z'' , ordinatna os) pa sprememb dielektričnih karakteristik med upogibom. Zaradi različnih plastnih upornosti uporov, žganih na keramiki ali na dielektriku, so vrednosti normalizirane na upornosti nedeformiranih uporov. Upori na keramiki se "obnašajo" ko skoraj idealni upori. Upore, žgane na dielektriku, pa lahko opišemo kot vzporedno kombinacijo uporov in kondenzatorjev z maksimumom pri pogoju $\omega C = 1$. Rezultati potrjujejo interakcijo med dielektrikom in uporom med procesom žganja. Predpostavljamo, da je steklo difundiralo iz dielektrika v upor in "razredčilo" prevodno fazo. Posledica so višji faktorji gauge, višja plastna upornost in višji termični šum.

SKLEPI

Mikrostrukturo debeloplastnih uporov z visokimi in nizkimi faktorji gauge smo preiskali z elektronskim vrstičnim mikroskopom. Posnetki s TEM so pokazali značilno razliko med mikrostrukturo obeh tipov uporovnih materialov. Prevodni delci v uporih z nizkim faktorjem gauge so majhni in blizu skupaj, v uporih z visokim faktorjem gauge pa so za razred večji in bolj oddaljeni drug od drugega. Rezultati kažejo, da ima mikrostruktura debeloplastnih uporov večji vpliv na velikost faktorjev gauge kot sama sestava prevodne faze (RuO_2 ali rutenati). Bolj homogen material z veliko majhnih delcev prevodne faze, ki so blizu skupaj, ima nizek faktor gauge, manj homogen, kjer so delci prevodne faze bolj oddaljeni drug od drugega, pa visok faktor gauge.

Ker so debeloplastni upori prirejeni za žganje na Al_2O_3 keramiki, se njihove karakteristike spremenijo, če jih žgemo na dielektrikih za večplastna vezja. Uporom, narejenim z uporovno pasto 3414 firme Electro Science Labs., so faktorji gauge narasli na okrog ali preko 40, če so bili žgani na nekaterih dielektrikih (5704 firme Du ont in 9117 firme Heraeus). Hkrati so se poslabšale druge karakteristike. Narasli so plastne upornosti, temperaturni koeficienti upornosti in termični šum, poslabšala pa se je tudi stabilnost. Rezultati kompleksne impedančne analize so nakazali, da so spremembe karakteristik povezane z difuzijo steklaste faze iz dielektrika v upor med procesom žganja.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se ge. Jarmili Wernig za analize ED in ge. Medeji Gec za pripravo vzorcev za TEM. Ministrstvu za znanost in tehnologijo Republike Slovenije se zahvaljujemo za finančno podporo.

LITERATURA

- /1/ K. Hoffman, An introduction to measurements using strain gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989
- /2/ N. White, A. Cranny, Design and fabrication of thick film sensors, Hybrid Circuits, (12), (1987), 32-35
- /3/ S. Satoh, atoh Y. Takatsuji, F. Katoh, H. Hirata, Thick film pressure sensor using zirconia diaphragm, Proc. 1991 Int. Symp. on Microelectronics ISHM-91, Orlando, 1991, 148-152

- /4/ A. Cattaneo, R. Dell'Acqua, G. Dell'Orto, L. Pirozzi, C. Canali, A practical utilization of the piezoresistive effect in thick film resistors: a low cost pressure sensor, Proc. 1980 Int. Symp. on Microelectronics ISHM-80, New York, 1980, 221-227
- /5/ S. Chitale, C. Huang, M. Stein, High gauge factor thick film resistors for strain gauges, Hybrid Circuits Technol., 6, (5), (1989)
- /6/ O. Abe, Y. Taketa, A new thick film strain sensor, Proc. 1988 Int. Symp. on Microelectronics ISHM-88, Seattle, 1988, 217-221
- /7/ M. Prudenziati, B. Morten, F. Cilloni, G. Ruffi, Very high strain sensitivity in thick film resistors; real and false gauge factors, Sensors and Actuators, 19, (1989), 401-414
- /8/ A. G. Bishay, D. A. Abdelhady, A. M. Darwish, Applicability of discontinuous palladium films as strain gauges, J. Mater. Sci.: Materials in Electronics, 3, (3), (1992), 195-199
- /9/ M. M. Nayak, S. Srinivasulu, K. Rajanna, S. Mohan, A. E. Muthunayagam, Electrical and strain-sensitive behaviour of sputtered gold films, J. Mater. Sci. Lett., 12, (2), (1993), 119-121
- /10/ M. Prudenziati, B. Morten, Thick film sensors: an overview, Sensors and Actuators, 10, (1-2), (1986), 65-82
- /11/ R. Dell'Acqua, Non-conventional applications of thick-film technology, Hybrid Circuits, (12), (1987), 11-20
- /12/ F. Muller, M. Wolf, Dependence of the sheet resistivity and current noise behaviour of the grain size and volume fraction of conducting material in thick-film resistors experiments, Active and Passive Elec. Comp., 13, (1), (1988), 1-6
- /13/ A. Le Corre, N. Nicoloso, J. Maier, J. C. Niepce, M. Maglione, Resistor inks: comprehension and modeling of the conduction mechanism in RuO₂/glass composites, Proc. 3 rd Int. Conf. Electroceramics, Vol. II, Maubege, 1992, D4.1-3
- /14/ M. Hrovat, D. Belavič, J. Holc, S. Šoba, An evaluation of some commercial thick film resistor materials for strain gauges, J. Mater. Sci. Lett., 13, (1994), 992-995
- /15/ Prospekt firme Electro Science Labs., High gauge factor resistor, D-3414-A/B, 9008 A
- /16/ B. Rzas, J. Potencki, Thick film resistors on dielectrics as temperature detectors, Active and Passive Elec. Comp., 12, (2), (1986), 135-147
- /17/ M. Hrovat, D. Belavič, "Thick film multilayer circuits with "buried" resistors - resistors under multilayer dielectric", Proc. ISHM-Europe Conf., Bournemouth, 1987, 305-312
- /18/ P. O. Callaghan, A. T. Walker, K. W. Hang, V. P. Siuta, J. J. Osborne, J. Smith, K. Hayakawa, A. Buckthorpe, New resistor systems for hybrid circuits and resistor components, Microelectronics Int., (37), (1995), 14-17
- /19/ J. E. Bauerle, Study of solid electrolyte polarization by a complex admittance method, J. Phys. Chem. Solids, 30, (1969), 2657-2670

dr. Marko Hrovat, dipl. ing.,
dr. Goran Dražič, dipl. ing.,
dr. Janez Holc, dipl. ing.
Institut "Jožef Stefan", Jamova 39,
61111 Ljubljana, Slovenija
tel. +386 61 1773 900
fax: +386 61 1261 029

Darko Belavič, dipl. ing.,
Stojan Šoba, dipl. ing.,
HIPOT Hybrid, d.o.o., Trubarjeva 7,
68310 Šentjernej, Slovenija
tel. +386 68 42 020
fax: +386 68 42 370

Prispelo (Arrived): 2.6.1995

Sprejeto (Accepted): 11.7.1995