

DEBELOPLASTNA TEHNOLOGIJA ZA SENZORSKE APLIKACIJE

¹Darko Belavič, ²Marko Hrovat, ¹Marko Pavlin, ¹Marina Santo Zarnik

¹HIPOT-RR, d.o.o., Šentjernej, Slovenija
²Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija

Ključne besede: debeloplastna tehnologija, senzor, senzor sile, senzor tlaka

Izveček: Kljub pospešenem razvoju mikrosistemske tehnike, ki je integracija številnih področij, kot so: senzorika, aktorika, mikroperiferika, mikromehanika, integrirana optika itd., so prevladujoče tehnologije za izdelavo senzorjev in pripadajoče elektronike še vedno monolitne polprevodniške tehnologije ter tankoplastna in debeloplastna tehnologija. Debeloplastna tehnologija lahko pri izdelavi senzorjev nastopa v dveh vlogah. Prva je izdelava debeloplastnega senzorskega elementa. Druga pa je integriranje senzorskega elementa, ki navadno ni debeloplasten, s kompenzacijskimi elementi in elektroniko za obdelavo električnega signala. V prispevku so prikazane predvsem nekatere aplikacije na področju senzorjev mehanskih veličin (senzori tlaka in sile), kjer je uporabljena debeloplastna tehnologija v eni ali obeh naštetih vlogah.

Thick-film Technology for Sensor Applications

Key words: thick-film technology, sensor, force sensor, pressure sensor

Abstract: The most important technologies for manufacturing sensors and transducers are semiconductor technology, thin- and thick-film technologies. Thick-film technology is used in two ways, to produce the sensor elements themselves and/or the electronic circuits for signal processing. In both cases are some common particular characteristics and ceramic interconnection technology is one of them. This paper is focused in mechanical sensors (pressure, load, force, etc) where the sensor elements are made with thick-film technology. The first application is thick-film load sensor for kitchen scale. The second application is thick-film sensing element for a low-cost force sensor designed for industrial applications. The third application is thick-film force sensor for belt dynamometer (toco sensor) for medical application in maternity hospital.

1 Uvod

Leta 1990 je bil svetovni trg senzorjev vreden približno 15 milijard EUR, njegova vrednost je narasla do leta 2000 na 30 milijard EUR ter bo leta 2010 predvidoma dosegla 51 milijard EUR z letno rastjo od 5 do 9 %. Pri tem je treba upoštevati, da bo verjetno količinska rast še večja, ker je indeks rasti cen negativen. Regionalno je bil leta 1990 največji trg senzorjev v Evropi (42%), sledila ji je NAFTA (North American free trade Association) s 34 % in Azija s 24 %. Deset let kasneje pa je NAFTA prehitela Evropo in je sedaj na prvem mestu. Glavna področja uporabe senzorjev so industrijski in procesni senzori, senzori v avtomobilih ter pri konstrukciji strojev in naprav. Največji indeksi rasti so napovedani za uporabo senzorjev v avtomobilih, na področju informatike in telekomunikacij ter za okolje. Senzori za okolje naj bi se povzpeli celo na tretje mesto po velikosti trga. Glede na tip senzorjev največji tržni delež pripada senzorjem tlaka, sledijo jim senzori pretoka, temperature itd.

Prevladujoče tehnologije za izdelavo senzorjev in/ali pripadajoče elektronike so še vedno monolitne polprevodniške tehnologije ter tankoplastna in debeloplastna tehnologija. Monolitne polprevodniške tehnologije imajo izrazito prednost pri miniaturizaciji, integraciji, velikoserijski proizvodnji in cenenosti. Debeloplastna tehnologija nastopa na področju senzorjev in pretvornikov v dveh vlogah. Prva je

električna in mehanska integracija senzorskega elementa (ki navadno ni debeloplasten), elektronike za pretvorbo signala in drugih elementov. Druga pa je izdelava samih senzorskih elementov, kot so: senzori temperature, mehanskih in kemičnih veličin, plinski senzori, biosenzori kakor tudi kombinacije le-teh.

V nadaljevanju bo prikazano nekaj rezultatov raziskovalnega dela in nekaj senzorjev mehanskih veličin (senzori tlaka in sile), kjer je uporabljena debeloplastna tehnologija v eni ali obeh naštetih vlogah.

2 Debeloplastni "strain gauge"

Senzor mehanskih deformacij ("strain gauge") je element, ki pretvarja deformacijo (razteg, skrčitev, upogib, ...) v električni signal in deluje po principu piezoupornostnega efekta električnih prevodnikov oz. uporov. Piezoupornost (Kelvin, 1857) je lastnost nekaterih materialov, da pri mehanski deformaciji spremenijo električno upornost. Občutljivost materiala za deformacijo pa je podana s faktorjem GF (1), ki je razmerje med spremembo upornosti (dR/R) in deformacijo (dL/L).

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad \text{in} \quad \epsilon = \Delta L/L \quad (1)$$

Debeloplastni upori so narejeni z metodo sitotiska, sušenja (150 °C) in žganja (850 °C) debeloplastnih materialov

na keramični (Al₂O₃) podlagi. Komercialno dostopni debeloplastni uporovni materiali (paste) imajo plastno upornost (R_{PL}) v dekadah od 1 do 10 MΩ. Pri konstantni debelini (t) pa je vrednost upornosti (R) odvisna še od dolžine (l) in širine (w) debeloplastnega upora. Relacije so prikazane v formulah (2):

$$R = \rho \frac{l}{tw} \quad R_{PL} = \frac{\rho}{t} \quad R = R_{PL} \frac{l}{w} \quad (2)$$

Piezoupornostni efekt, ki je sicer neželena lastnost pri navadni uporabi, izkazujejo tudi debeloplastni upori. Iz literature /1,2,3,4/ in naših prejšnjih raziskav /5,6,7,8,9,10,11/ izhaja, da je GF odvisen od mikrostrukture materiala, plastne upornosti in delno od geometrije debeloplastnega upora. Glede na orientacijo upora pa poznamo vzdolžni in prečni GF. Pri mehanski deformaciji se upornost debeloplastnega upora spremeni zaradi spremembe plastne upornosti in geometrije. Tako je GF sestavljen iz geometrijskega del (GF=2) in dela zaradi spremembe mikrostrukture materiala (3).

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + \left(\frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta w}{w} - \frac{\Delta t}{t} \right) \quad (3)$$

Za uporabo senzorskega elementa so poleg GF pomembne še nekatere druge lastnosti, kot so: temperaturni koeficient upornosti (TKR), temperaturni koeficient GF (TKGF), tokovni šum in dolgoročna stabilnost. Tako je v tabeli 1 prikazana primerjava različnih tehnologij za izdelavo elementov za senzorje mehanskih deformacij.

Tabela 1: Primerjava tehnologij za izdelavo elementov za senzorje mehanskih deformacij

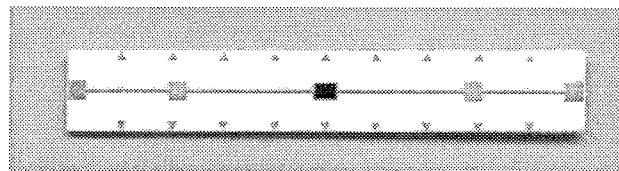
Tehnologija	Metaloplastna	Debeloplastna	Polprevodniška
GF	2	od 2 do 20	50
TKR (10 ⁻⁶ /K)	10	50 (100)	1500
TKGF (10 ⁻⁶ /K)	100	300	2000
Dolgoročna stabilnost	Odlična	Zelo dobra	Dobra
Cena	Visoka	Nizka	Nizka*

* Proizvodnja velikega obsega

3 Eksperimentalno delo

Za študij smo izbrali devetnajst debeloplastnih uporovnih materialov različnih proizvajalcev oz. serij (označeni s črkami A, B, ...) in z različnimi plastnimi upornostmi (označeni s številkami 1, 2, ...). Nekateri materiali, označeni z zvezdico (*), so bili namenjeni za tisk na dielektrično podlago.

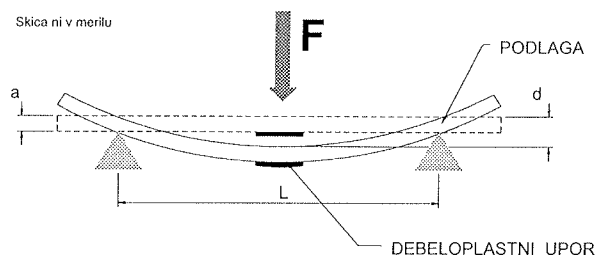
Debeloplastne upore smo tiskali in žgali (850 °C) na keramični podlagi dimenzij 50,8 × 8,0 × 0,64 mm. Dimenzije štirih vzdolžno orientiranih uporov so bile 1×1, 1,6×1,6, 5×1 in 4×4 mm. En upor velikosti 1,6×1,6 mm pa je orientiran tudi prečno. Preskusni debeloplastni upori so bili postavljeni v sredino substrata in so bili s prevodnimi linijami povezani s kontaktnimi blazinicami na robu (slika 1).



Slika 1: Preskusni vzorec za meritev piezoupornostnih lastnosti debeloplastnih uporov

Merjenje piezoupornostnih lastnosti debeloplastnih uporov smo izvedli na način, ki je shematično prikazan na sliki 2. Keramični most smo na sredini upogibali do določenih upogibkov (d) in hkrati merili upornosti. Iz upogibkov smo izračunali deformacijo oz. raztezek debeloplastnega upora (4). Iz tega in spremembe upornosti smo izračunali GF. Rezultati so prikazani v tabeli 2.

$$\varepsilon = \Delta l / l = \frac{6 d a}{L^2} \left(1 - \frac{l}{2 L} \right) \quad (4)$$



Slika 2: Princip merjenja piezoupornostnih lastnosti debeloplastnih uporov

Poleg občutljivosti je za uporabo teh senzorskih elementov pomembno razmerje signal/šum. Zato smo pri istih preskusnih vzorcih merili tudi tokovni šum. Meritev šuma je bila izvedena po metodi Quan-Tech. Rezultati so podani v μV/V za šum in v dB za indeks šuma.

4 Rezultati in diskusija

Nekateri izmerjeni parametri (plastna upornost, vzdolžni in prečni GF ter indeks šuma) preučevanih uporovnih materialov za upore dimenzij 1,6×1,6 mm so prikazani v tabeli 2. Rezultati kažejo, da so GF večji za višje plastne upornosti. Ravno tako je šum večji pri uporih z višjo upornostjo. Vzdolžni GF so 2- do 4-krat večji od prečnih GF. Zato je potrebna optimalna izbira med dovolj veliko občutljivostjo na eni strani in še dopustnim nivojem tokovnega šuma na

drugi. Pri nekaterih aplikacijah pa je pomembna tudi ohmska upornost in temperaturna odvisnost elementa.

Tabela 2: *Plastna upornost, GF in indeks šuma debeloplastnih uporov, izdelanih z različnimi debeloplastnimi uporovnimi materiali*

Oznaka	R _{PL} (W)	Vzdolžni GF	Prečni GF	Indeks šuma (dB)
A3	1k	10,2	7,8	-20,9
A4	10k	12,4	10,6	-12,4
A5	100k	14,3	12,9	-1,8
A6	1M	16,3	15,9	>30,0
B3	1k	2,6	2,0	-12,8
B4	10k	3,9	3,4	-5,2
C3	1k	7,5	5,6	-24,5
C4	10k	11,7	9,2	-16,4
C5	100k	13,1	10,6	-5,3
C6	1M	14,7	13,3	5,0
D4	10k	18,0	14,2	-7,2
E4	10k	20,1	12,9	2,0
F3*	1k	4,5	3,5	-18,6
F4*	10k	11,4	9,0	-15,4
F5*	100k	13,7	12,6	-2,5
F6*	1M	14,9	13,5	9,1
G3*	1k	3,8	2,9	-21,4
G4*	10k	10,0	8,0	-16,6
G5*	100k	13,5	12,1	-3,9

5 Aplikacije

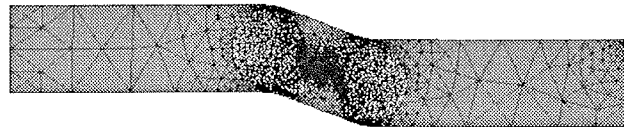
Debeloplastni element za senzorje mehanskih deformacij je bil prvič uporabljen že v začetku sedemdesetih let. Najpogosteje se ga uporablja pri senzorjih tlaka in sile. Lahko pa tudi za senzorje pospeškov, vibracij itd. Uporaben je predvsem za aplikacije v zahtevnejših razmerah v okolici. Ravno tako pa je konkurenčen pri maloserijskih naročilih in pri posebnih zahtevah naročnika.

Družba HIPOT-HYB se je že večkrat srečala s tržno zahtevo po debeloplastnih senzorjih sile. Tako je bilo po naročilu razvitih nekaj cenovno konkurenčnih senzorjev sile /12,13,14,15/, ki bodo kratko predstavljeni v nadaljevanju. Vsi omenjeni senzorji uporabljajo debeloplastni senzorski element, izdelan na keramični podlagi s štirimi debeloplastnimi upori, vezanimi v Wheatstonov mostič.

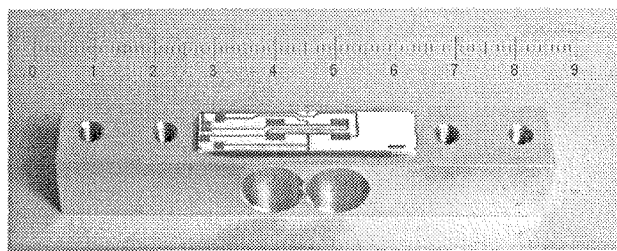
Pri konstruiranju senzorskih elementov pa se s pridom uporablja tudi orodja za numerično modeliranje in računalniško simulacijo mehanskih in elektromehanskih lastnosti /16,17/. Primer simulacije kovinskega nosilca z dvojnimi upogibom je prikazan na sliki 3.

5.1 Senzor sile za kuhinjsko tehtnico

Debeloplastni senzorski element je prilepljen na kovinski nosilec z dvojnimi upogibom. Senzor je bil razvit za elektronsko tehtnico z merilnim območjem od 10 do 3000 g in s točnostjo $\pm 2\%$ polnega obsega. Senzor je prikazan na sliki 4.



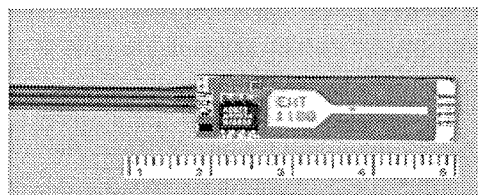
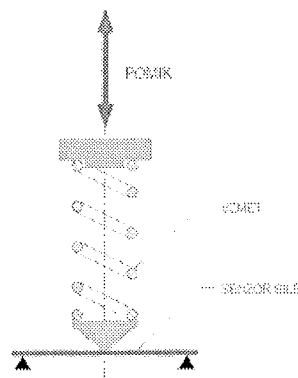
Slika 3: Računalniška simulacija kovinskega nosilca z dvojnimi upogibi za senzor sile pri kuhinjski tehtnici



Slika 4: Senzor sile za kuhinjsko tehtnico

5.2 Merilnik pomika

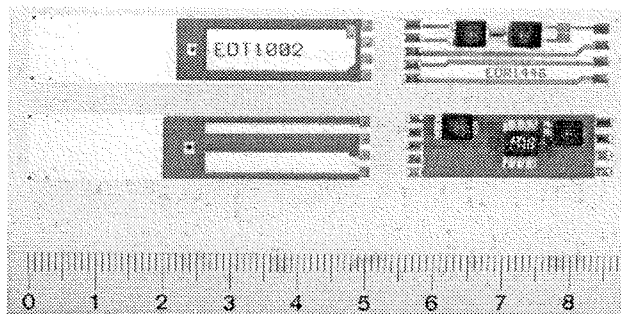
Merilnik pomika ima vgrajen senzor sile za območje do 30 N. Princip delovanja in sam izdelek sta prikazana na sliki 5.



Slika 5: Princip delovanja merilnika pomika (zgoraj) in debeloplasten senzor sile (spodaj)

5.3 Senzor porodnih krčev

Senzor porodnih krčev ima debeloplastni senzorski element, ki je vpet v plastično ohišje in meri sunke porodnih krčev do sile 1,2 N. Prikazan je na sliki 6.



Slika 6: Senzor sile za merjenje sunkov

6 Sklep

Debeloplastna tehnologija je primerna za izdelavo senzorjev zaradi svoje robustnosti (uporaba pri zahtevnejših pogojih okolice), razvojne fleksibilnosti in cenenosti pri manjših serijah. Senzorski elementi se lahko izdelujejo ali z uporabo komercialnih debeloplastnih materialov ali posebej razvitih senzorskih materialov.

Raznovrstnost problematike na področju senzorjev in debeloplastne tehnologije (tudi hibridne tehnologije) pa zahteva interdisciplinarni značaj raziskovalno-razvojne dejavnosti. Pomembna področja so: sensorika, znanost o materialih, keramične tehnologije, različna področja iz fizike in kemije, elektronika, načrtovanje elektronskih vezij in znanja s področja zagotavljanja kvalitete in produktivnosti. Pri tem so potrebne različne kategorije raziskovalnega dela, in sicer od osnovnih raziskav preko aplikativnih do razvojnega in eksperimentalnega dela.

Zahvale

Zahvaljujemo se industrijskemu partnerju, družbi HIPOT-HYB, d.o.o., Šentjerneji, ki je dovolila objavo prispevka.

Zahvaljujemo se Ministrstvu za šolstvo, znanost in šport Republike Slovenije za sofinanciranje aplikativnega raziskovalnega projekta L2-3130 z naslovom Debeloplastna tehnologija za senzorske aplikacije.

Avtorji prispevka se zahvaljujemo tudi vsem drugim sodelavcem pri različnih raziskovalnih in razvojnih projektih, ki so bili osnova za nekatere rezultate, navedene v prispevku.

7 Literatura

- /1/ B. Puers, W. Sansen, S. Paszczyński, K. U. Leuven, "Miniature highly sensitive pressure - force sensor using hybrid technology", Proc. 6th European Microelectronics Conference, Bournemouth, Anglija, 3.-5.6.1987, 416-420
- /2/ S. Chitale, C. Huang, M. Stein, "High gauge factor thick film resistors for strain gauges", Hybrid Circuits Technol., 6(1989)5
- /3/ C. Song, D. V. Kerns, Jr., J. L. Davidson, W. Kang, S. Kerns, "Evaluation and design optimization of piezoresistive gauge factor of thick film resistors", IEEE Proc. SoutheastCon 91 Conf., Williamsburg, 2(1991), 1106-1109

- /4/ N. M. White, J. D. Turner, "Thick film sensors: past, present and future", Measurements. Sci. Technol., 8(1997)1, 1-20
- /5/ M. Hrovat, D. Belavič, S. Šoba, A. Markošek, "Thick-film resistor materials for strain gauges", Proc. 20th Int. Conf. on Microelectronics / 28th Symp. on Devices and Materials MIEL-SD 92, Portorož, 1992, 343-348
- /6/ M. Hrovat, G. Dražič, J. Holc, D. Belavič, "Microstructural investigation of thick-film resistors for strain sensor applications by TEM", Proc. 22nd Int. Conf. Microelectronics MIEL-94 / 30th Symp. on Devices and Materials SD-94, Terme Zreče-Rogla, 1994, 207-212
- /7/ M. Hrovat, D. Belavič, J. Holc, S. Soba, "An evaluation of some commercial thick film resistors for strain gauges", J. Mater. Sci. Lett., 13(1994), 992-995
- /8/ M. Hrovat, G. Dražič, J. Holc, D. Belavič, "Correlation between microstructure and gauge factors of thick film resistors", J. Mater. Sci. Lett., 14(1995)15, 1048-1051.
- /9/ M. Hrovat, D. Belavič, G. Dražič, J. Holc, S. Soba, "Preiskave debeloplastnih uporov z visokimi faktorji gauge", Informacije MIDEM, 25(1995)2, 108-114
- /10/ M. Hrovat, D. Belavič, M. Jerlah, "Investigation of Some Thick-film Resistor Series for Strain Gauges", Proc. 23rd Int. Spring Seminar on Electronics Technology ISSE 2000, Balatonfüred, 2000, 406-410
- /11/ M. Hrovat, Z. Samardžija, J. Holc, D. Belavič, "Microstructural, XRD and electrical characterisation of some thick film resistors", J. Mater. Sci.; Materials in Electronics, 11(2000)3, 199-208
- /12/ D. Belavič, S. Šoba, M. Hodnik, M. Pavlin, S. Gramc, M. Hrovat, "Low cost force sensor for an electronic scale", Informacije MIDEM, 27(1997)3, 172-176
- /13/ D. Belavič, S. Šoba, M. Pavlin, S. Gramc, M. Hrovat, "Electronic scale with thick-film resistors strain gauge", Proc. 21st Conference of ISHM Poland, Poljska, Ustron, 5. - 8.10.1997, 9-14
- /14/ S. Soba, D. Belavič, M. Pavlin, "Thick-film load sensors array". Proc. 23rd IMAPS Poland'99, Poljska Koszalin Kołobrzeg, 2. - 23.9.1999, 303-308
- /15/ D. Belavič, M. Hrovat, M. Pavlin, S. Gramc, "Low-cost thick-film strain-gauge applications". Proc. 13th European Microelectronics and Packaging Conference, Strasbourg, Francija, 30.5. - 1.6.2001, 103-108
- /16/ D. Belavič, K. P. Friedel, M. Santo Zarnik, M. Hrovat, "A "design and simulate" approach to improving the characteristics of ceramic pressure sensors". Proc. 37th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials and the Workshop on Optoelectronic Devices and Applications, Bohinj, Slovenija, 10. - 12.10.2001, 267-272
- /17/ D. Belavič, K. P. Friedel, A. Wymysłowski, M. Santo Zarnik, "Virtual prototyping of the ceramic pressure sensor". Proceedings of the 3rd International Conference on Benefiting from Thermal and Mechanical Simulation in (Micro)-Electronics, ESIME 2002, Pariz, Francija, 15. - 17.4.2002, 38-44

Darko Belavič, univ. dipl. inž. el.
HIPOT-RR, d.o.o.
c/o Institut "Jožef Stefan"
Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

Tel.: +386 1 4773 479, Faks: +386 1 4263 126
E-pošta: darko.Belavič@ijs.si

Prispelo (Arrived): 06.06.2002 Sprejeto (Accepted): 25.03.2003