

# Prototip intruzivnog debeloslojnog senzora za detekciju prisustva vozila

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović

Odeljenje za tehnologije  
Institut IRITEL a.d. Beograd  
Beograd, Republika Srbija  
[inam@iritel.com](mailto:inam@iritel.com); [zdravkos@iritel.com](mailto:zdravkos@iritel.com)

**Sažetak**—Inteligentni transportni sistemi su postali sastavni deo savremenog života u urbanim sredinama. Osnovni zadatak inteligentnih transportnih sistema je poboljšanje efikasnosti transporta integracijom vozača, vozila, službi koje upravljaju saobraćajem i putne infrastrukture sa pridruženim sensorima i signalizacijom. Senzori za primene u regulaciji saobraćajnih tokova su brojni i veoma raznoliki u pogledu tehnologija kojima su realizovani. U ovom radu je prikazana realizacija i evaluacija prototipa intruzivnog senzora za detekciju prisustva vozila koji se bazira na tehnologiji debelog filma. Evaluacija je uključila merenja promene otpornosti senzora pod opterećenjem, određivanje faktora naprezanja i ispitivanje njegove termičke stabilnosti.

*Ključne riječi – detekcija prisustva vozila; intruzivni senzor; debeloslojna tehnologija; faktor naprezanja; termička stabilnost.*

## I. UVOD

U protekloj deceniji inteligentni transportni sistemi su postali sastavni deo savremenog života u urbanim sredinama. Njihov razvoj je doneo novi izazov – prikupljanje informacija iz transportne mreže u realnom vremenu. U cilju optimizacije transportnih tokova, upravljanja raskrscima i parkiranjem u upotrebi je veliki broj senzora koji se postavljaju na ili ugrađuju u kolovoz, instaliraju iznad ili pored puta [1].

Neintruzivni senzori koji ne narušavaju integritet kolovoza su radari, infracrveni, ultrazvučni i akustični senzori, video kamere itd. Na njihove performanse utiču vremenski uslovi, a i vozači često uspore vožnju kada ih primete.

Intruzivni senzori su piezoelektrični i magnetni, pneumatske cevi i induktivne petlje. Iako njihova instalacija zahteva više novčanih sredstava i utrošenog vremena, oni su tačni i pouzdani, a njihove performanse ne zavise od vremenskih uslova [1].

Uočljivo je da se svi navedeni tipovi senzora realizuju tehnologijama koje su dugo u upotrebi i čija je sposobnost detekcije vozila dobro poznata.

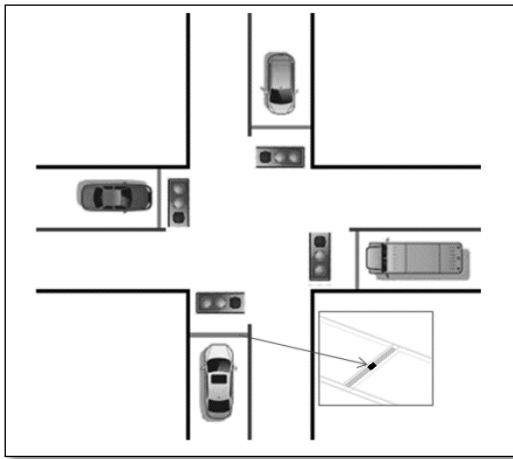
U ovom radu je predstavljen prototip intruzivnog senzora za detekciju vozila primenom još jedne odavno prisutne tehnologije. U pitanju je tehnologija debelog filma.

## II. INTRUZIVNI DEBELOSLOJNI SENZOR ZA DETEKCIJU PRISUSTVA VOZILA

Kada se prvi put pojavila, debeloslojna tehnologija je bila vrlo brzo prihvaćena zato što je bila u mogućnosti da pouzdano integriše različite elektronske elemente na zajedničkoj podlozi, najčešće alumina keramici (96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ili nerđajućem čeliku. Tokom godina primene su se menjale, pa su se pojavili keramički mikro-elektro-mehanički sistemi, gredice, mikrofluidni kanali. Sve veće interesovanje koje pobuđuje upravljanje saobraćajnim tokovima u gradovima, a naročito upravljanje svetlosnom signalizacijom na raskrscima i upravljanje parkingom, dovelo je do nove potencijalne primene debeloslojne tehnologije – do razvoja prototopa senzora za detekciju prisustva vozila.

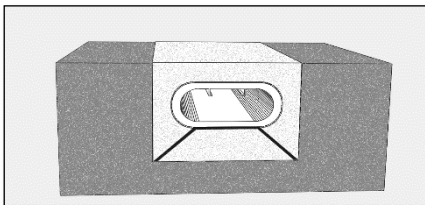
Trenutno se za upravljanje saobraćajnim tokovima najviše koriste induktivne petlje i video kamere. Video kamere su finansijski isplativo rešenje za praćenje stanja u saobraćaju koje ne zahteva veliko održavanje, ali su za njihov pouzdan rad neophodni dobri vremenski uslovi i adekvatno osvetljenje. Induktivne petlje su intruzivne. Njihovo postavljanje iziskuje nešto više materijalnih sredstava ali za uzvrat daju dobre rezultate u praćenju stanja saobraćajnih tokova [2]. Ipak, njihove performanse u velikoj meri zavise od kvaliteta površine kolovoza. Debeloslojna tehnologija ima potencijal da prevaziđe neke od ovih nedostataka.

Debeloslojni senzori mogu biti jedno od adekvatnih rešenja za detekciju vozila u gradskim saobraćajnim tokovima (Slika 1). Njihov zadatak je prikupljanje informacija prilikom prelaska vozila preko senzora. Pod opterećenjem se generiše analogni signal koji je proporcionalan primenjenom pritisku. Prikupljeni podaci se mogu iskoristiti za određivanje broja vozila prisutnih na raskrscima u cilju upravljanja svetlosnom signalizacijom u realnom vremenu ukoliko se radi o vozilima u pokretu ili za određivanje zauzetosti parking mesta u parking zonama urbanih sredina ukoliko se radi o vozilima u stanju mirovanja. Za razliku od induktivnih senzora, debeloslojni senzori nude mogućnost klasifikacije vozila na osnovu njihove težine. Takođe, za razliku od kamere, njihove performanse ne zavise od vremenskih uslova i osvetljenja. Debeloslojni senzori za detekciju prisustva vozila su intruzivni. Postavljaju se u šipku koja se ugrađuje u kolovoz i zaptiva epoksidnim, poliuretanskim ili akrilnim materijalom (Slika 2).



Slika 1. Detekcija prisustva vozila na raskrsnici pomoću debeloslojnih senzora ugrađenih u kolovoz

Debeloslojni senzori za ovu primenu se mogu razlikovati po sastavu otpornog materijala, geometriji, slojnoj otpornosti, podlozi na kojoj se vrši sitoštampa i uslovima procesiranja tokom realizacije. Glavni gradivni činioци debelog filma su izolaciona i provodna faza, a prisutne su i manje količine aditiva i dopanata kao što su stabilizatori, modifikatori *TCR* itd. Provodna faza je obično na bazi rutenata, dok se staklena faza bazira na olovo borosilikatnom staklu.

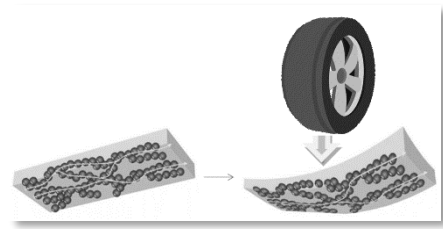


Slika 2. Šipka ugrađena u kolovoz sa slotom za instalaciju debeloslojnog senzora za detekciju prisustva vozila

Na osnovu determinističkog modela debeloslojnih otpornih struktura [3], u relaksiranom stanju debeli otporni film može biti aproksimiran kompleksnom provodnom mrežom koja se formira tokom procesa sinterovanja. Preraspodela provodnih čestica metal-oksida i neprovodnih čestica borosilikatnog stakla dovodi do generisanja aglomerata izolujućeg stakla, do uranjanja provodnih čestica u staklo i do stvaranja nizova provodnih čestica rutenata koje su u kontaktu i koje dominantno upravljaju procesom provođenja u debelom filmu.

Pod opterećenjem, kada vozilo pređe preko senzora, otporni film trpi reverzibilnu deformaciju koja se manifestuje promenom opornosti filma (Slika 3). Osetljivost na naprezanje prisutnih mehanizama provođenja (provođenja kroz kontakte susednih čestica metal-oksida i tunelovanja kroz staklene barijere) zavisi od čvrstine izolacione i provodne faze. Moduo elastičnosti borosilikatnog stakla, u zavisnosti od konstituenata, može dostići 80 GPa, dok moduo elastičnosti provodne faze ima znatno veće vrednosti. Primera radi, moduo elastičnosti rutenijum (IV) oksida iznosi 270 GPa [4]. Na osnovu toga možemo zaključiti da provođenje kroz provodne čestice koje su u direktnom kontaktu ima manju osetljivost na naprezanje nego

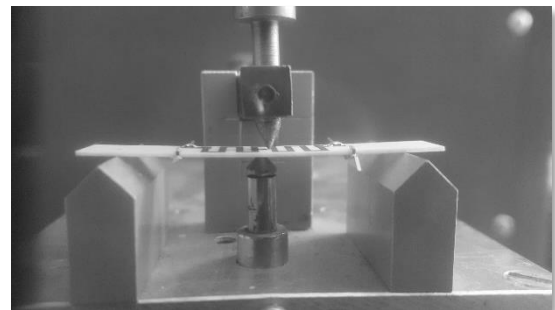
provođenje tunelovanjem. Odatle sledi da performansama senzora upravlja osetljivost procesa tunelovanja na primenjeno naprezanje.



Slika 3. Grafički prikaz debeloslojnog senzora za detekciju prisustva vozila u relaksiranom i napregnutom stanju (sfere – provodna faza, svetle linije – slučajno generisani provodni putevi)

### III. REALIZACIJA PROTOTIPA

Prototip intruzivnog senzora za detekciju vozila realizovan je tehnologijom debelog filma. Za njegovu realizaciju je upotrebljena debeloslojna otporna pasta na bazi  $\text{RuO}_2/\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$  slojne otpornosti  $10 \text{ k}\Omega/\square$  u kombinaciji sa debeloslojnom provodnom pastom na bazi Pd/Ag. Senzor je realizovan na alumina keramici (96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dimenzija  $8 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm} \times 0.635 \text{ mm}$  klasičnim postupcima debeloslojne sito-štampe. Suvi slojevi debljine  $25 \mu\text{m}$  su žareni u ciklusu od 30 min pri čemu je izloženost maksimalnoj temperaturi žarenja od  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  trajala 10 min.



Slika 4. Testiranje prototipa debeloslojnog senzora za detekciju prisustva vozila

U procesu realizacije senzora posebna pažnja je posvećena eliminaciji svih čestica organskih konstituenata zarobljenih u otpornom filmu tokom topljenja staklene faze pošto ove zarobljene čestice mogu dovesti do pojave balončića u istopljenom staklu i na taj način narušiti homogenost otpornog filma. Takođe, stabilisana maksimalna temperatura žarenja je eliminisala variranje maksimalne temperature i/ili vremena provedenog u zoni maksimalne temperature jer te varijacije mogu značajno uticati na formiranje strukture, a samim tim i na performanse senzora. Adekvatno trajanje faze očvršćavanja borosilikatnog stakla je eliminisalo stres u debelom otpornom filmu iako stres prouzrokovan brzim očvršćavanjem stakla može delimično biti eliminisan tokom faza nivelisanja i relaksacije.

Otpornost debeloslojnog senzora je merena instrumentom HP34401A. Simulacija naprezanja je izvedena pomoću uređaja

realizovanog specijalno za ova merenja koji je omogućavao izvijanje podloge do 300  $\mu\text{m}$  što je maksimalna vrednost koju alumina keramička podloga može da istrpi a da ne dođe do fatalnog otkaza senzora (Slika 4). Otporni film je bio centralno pozicioniran na podlozi koja je bila fiksirana na oba kraja čime je obezbeđeno maksimalno izvijanje.

Faktor napreznja  $GF$  kao mera osetljivosti na napreznje se definiše kao [5]:

$$GF = \frac{\Delta R/L}{R\Delta l} = \frac{\Delta R L^2}{6R\Delta t^2} \quad (1)$$

gde je  $\Delta R/R$  relativna promena otpornosti usled napreznja senzora.  $\Delta l/l$  označava relativnu promenu dužine filma usled izvijanja podloge  $d$ . Debljina podloge je označena sa  $t$ , dok je  $L$  dužina podloge između fiksiranih krajeva.

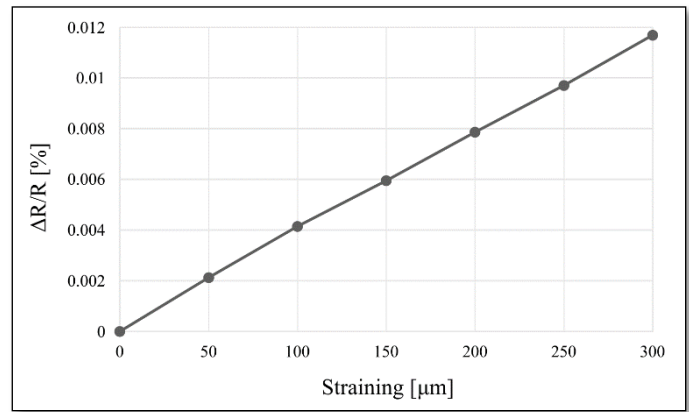
Svi materijali osetljivi na napreznje i parametri procesiranja su pažljivo evaluirani i izabrani da bi se ostvarile optimalne performanse senzora. Faktor napreznja senzora je osetljiv na izbor provodne faze, maksimalnu temperature žarenja i vreme provedeno na maksimalnoj temperaturi žarenja. Interfejs provodnog i otpornog filma takođe može uticati na osetljivost na napreznje usled efekta dopiranja.

Treba napomenuti da faktori napreznja manji od 2.5 potiču od promene geometrije otpornog filma napregnutog senzora [5]. Pošto senzor za detekciju prisustva vozila ima faktor napreznja veći od 2.5, izvijanje utiče na tunelovanje kroz staklene barijere ili, preciznije, menja širinu potencijalnih barijera u slučajnoj otpornoj mreži formiranoj u procesu žarenja.

Kada vozilo pređe preko senzora ugrađenog u kolovoz, geometrija otpornog filma se reverzibilno menja kao i njegova mikrostruktura. Debeli otporni film slojne otpornosti 10  $\text{k}\Omega/\square$ , koji je izabran za realizaciju prototipa senzora zbog svog specifičnog odnosa provodne i staklene faze, ispoljio je reverzibilnu promenu opornosti prilikom napreznja prikazanu na slici 5. Izvijanje od 300  $\mu\text{m}$  je dovelo do relativne promene otpornosti od približno 0.012 %. Faktor napreznja senzora je bio  $\sim 16$ .

Da bi ilustrovali proces koji stoji iza promene otpornosti tokom rada senzora, izračunata je relativna promena širina barijera pomoću parametara iz [6] u odnosu na relativnu promenu dužine senzora izloženih napreznju. Dobijeni rezultati su pokazali da elongacija filma indukovana napreznjem od 300  $\mu\text{m}$  dovodi do relativnog porasta širine potencijalne barijere od približno  $6 \times 10^{-4}$ .

Što se tiče temperaturske stabilnosti, senzori su bili izloženi radnim temperaturama iz opsega od 20  $^{\circ}\text{C}$  do 100  $^{\circ}\text{C}$ . Rezultati prikazani na slici 6 pokazuju da povišena radna temperatura ne utiče na performanse senzora. Temperaturska zavisnost otpornosti zavisi od vrste izolacione faze i aditiva koji se koriste u procesu realizacije senzora. Povišene radne temperature ne mogu uticati na performanse senzora zato što do omekšavanja borosilikatnog stakla ne mogu dovesti temperature niže od 500  $^{\circ}\text{C}$ . Treba naglasiti da temperature kolovoza u suvim i toplim oblastima ne prelaze 70  $^{\circ}\text{C}$  [7].



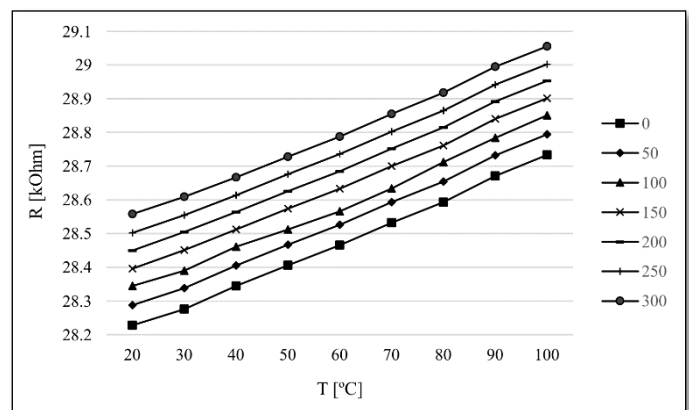
Slika 5. Relativna promena otpornosti vs. izvijanje senzora za detekciju prisustva vozila

Da bi dodatno ispitali da li se otpornost senzora menja sa promenom temperature, temperaturski koeficijent otpornosti je izračunat korišćenjem sledećeg izraza:

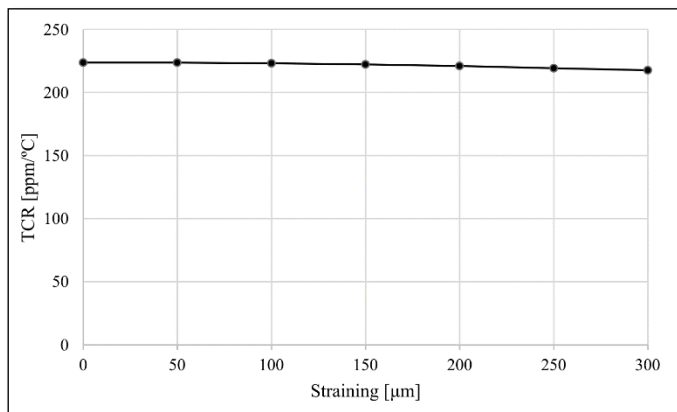
$$TCR = \frac{R(T_2) - R(T_1)}{R(T_1) \times (T_2 - T_1)} \times 10^6 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}, \quad (2)$$

gde  $R(T_i)$  predstavlja otpornost senzora izloženog specifičnoj temperaturi  $T_i$ .

Vrednosti  $TCR$  za napregnuti senzor su prikazane na slici 7 za temperature od 20  $^{\circ}\text{C}$  i 100  $^{\circ}\text{C}$ . Može se videti da  $TCR$  ne zavisi od primenjenog opterećenja i da su vrednosti  $TCR$ -a debeloslojnog senzora za detekciju vozila bliske konstantnim.



Slika 6. Promena otpornosti vs. temperatura na kojoj se nalazi senzor za detekciju prisustva vozila koji je izložen napreznju iz opsega 0  $\mu\text{m}$  - 300  $\mu\text{m}$



Slika 7. TCR vs. naprezanje debeloslojnog senzora za detekciju vozila za temperature od 20 °C i 100 °C

#### IV. ZAKLJUČAK

Inteligentni transportni sistemi su postali sastavni deo naših života. U velikim urbanim područjima upravljanje saobraćajem je od vitalnog značaja za funkcionisanje kako svakodnevnog života tako i privrede. Za prikupljanje podataka o saobraćaju u realnom vremenu koristi se veliki broj senzorskih naprava koje su realizovane različitim tehnologijama koje su u širokoj upotrebi.

Debeloslojni senzor za detekciju prisustva vozila se bazira na još jednoj tehnologiji koja je dobro poznata – na tehnologiji debelog filma. Ovaj intruzivni senzor zasnovan na RuO<sub>2</sub>/Bi<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> debelom otpornom filmu koji je sitoštampom nanet na 96% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> keramičku podlogu, ima za zadatak da detektuje prisustvo vozila u saobraćaju tj. može biti upotrebljen za određivanje broja vozila prisutnih na raskrsnicama u cilju upravljanja svetlosnom signalizacijom u realnom vremenu ukoliko se radi o vozilima u pokretu ili za određivanje zauzetosti parking mesta u parking zonama urbanih sredina ukoliko se radi o vozilima u stanju mirovanja.

U napregnutom stanju, kada vozilo pređe preko senzora, otporni film trpi reverzibilnu deformaciju koja se registruje kao promena otpornosti. Generiše se analogni signal proporcionalan pritisku koji vozilo izvrši na senzor. Faktor naprezanja senzora je ~16. On je određen promenom geometrije otpornog filma usled istezanja, ali u mnogo većoj meri na njega utiče promena uslova tunelskog provođenja usled naprezanja tj. dolazi do promene širina staklenih barijera u slučajnoj otpornoj mreži koja gradi debeli otporni film. Senzor je termički stabilan iako temperatura kolovoza za vreme toplih letnjih dana može da bude viša od 60 °C. Pored toga, TCR ne zavisi od primenjenog opterećenja.

Dalja istraživanja vezana za usavršavanje ovog prototipa će uključiti testiranje in situ, eksperimente vezane za primenu različitih fleksibilnih podloga koje su kompatibilne sa tehnologijom debelog filma i transfer sa žičnog na bežično povezivanje senzora sa pratećim uređajima za prikupljane podataka.

#### LITERATURA

- [1] J. Guerrero-Ibáñez, S. Zeadally, J. Contreras-Castillo, "Sensor Technologies for Intelligent Transportation Systems", *Sensors (Basel)*, 18(4), p. 1212, 2018, doi:10.3390/s18041212A
- [2] J.J.Lamas-Seco, P.M. Castro, A. Dapena, F.J.Vazquez-Araujo, "Multi-loop inductive sensor model for vehicle traffic applications", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 263, pp. 580-592, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.06.020>
- [3] M.M. Jevtić, I. Stanimirović, Z. Stanimirović, "Evaluation of thick-film structural parameters based on noise index measurements", *Microelectron. Reliab.*, 41, pp. 59-66, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(00\)00207-9](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(00)00207-9)
- [4] C. Grimaldi, P. Ryser, S. Strassler, "Gauge factor enhancement driven by heterogeneity in thick-film resistors", *Journal of Applied Physics*, 90, p. 322, 2001, <https://doi.org/10.1063/1.1376672>
- [5] M. Hrovat, D. Belavič, Z. Samardžija, "Characterisation of thick film resistor series for strain sensors", *J. Europ. Cer. Soc.*, 21, pp. 2001-2004, 2001, DOI: 10.1016/S0955-2219(01)00160-1
- [6] I. Stanimirović, Z. Stanimirović, "Influence of HVP trimming on primary parameters of thick resistive films", *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 28, pp. 8002-8010, 2017, <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6504-7>
- [7] N. Solatifar, M. Abbasghorbani, A. Kavussi, H. Sivilevičius, "Prediction of depth temperature of asphalt layers in hot climate areas", *Journal of Civil Engineering and Management*, 24, pp. 516-525, 2018, 10.3846/jcem.2018.6162.

#### ABSTRACT

Intelligent transportation systems are an integral part of our everyday lives in urban areas. The main goal of these systems is improvement of transport efficiency through integration of drivers, vehicles, traffic management services and road infrastructure along with traffic sensors and signalization. A wide variety of traffic sensors based on various well-known and widely implemented technologies are currently being in use. In this paper realization and evaluation of a prototype of a new intrusive thick-film sensor for vehicle detection is being presented. Evaluation included measurements of the resistance change under applied load, determination of the gage factor and investigations of sensor thermal stability.

#### PROTOTYPE OF THE INTRUSIVE THICK-FILM SENSOR FOR VEHICLE DETECTION

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović