

## **Мерна метода:**

Метода за одређивање карактеристика сензора истезања реализованог у инкџет технологији

**Руководилац пројекта:** проф. др Љиљана Живанов

**Одговорно лице:** Чедо Жлебич

**Аутори:** Чедо Жлебич, Никола Иванишевић, Нелу Блаж, Љиљана Живанов, Мирјана Дамњановић  
Факултет техничких наука (ФТН), Нови Сад  
Александар Менићанин  
Институт за мултидисциплинарна истраживања (ИМСИ), Београд

**Развијено:** у оквиру пројекта технолошког развоја ТР-32016

**Година:** новембар 2013.

**Примена:** новембар 2013.

## **Кратак опис**

Приказана мерна метода представља поступак одређивања карактеристика сензора истезања израђених штампањем наночестичног мастила са 20 % тежинских делова сребра пиезо инкџет штампачем на полиимидној пластичној фолији. Како би се одредио фактор осетљивости сензора, мерено је истезање челичне конзоле која је једним крајем укљештена, док је на слободном крају деловано силом која је истезала конзолу као и сензор који је постављен, са горње стране конзоле. Да би се одредило истезање, неопходна су прецизна мерења малих промена отпорности сензора, па је сходно томе сензор повезан на Keithley 2410 SourceMeter, који омогућава високу прецизност мерења и ниски шум. Поред поступка мерења, описан је и поступак анализе мерених резултата и дате су потребне математичке зависности.

### **Техничке карактеристике:**

Мерни систем обухвата уређај за мерење отпорности Keithley 2410 SourceMeter, челичну конзолу која је учвршћена на држачу, мерне сензоре и дигитално помично кљунасто мерило Kern IP54 помоћу којег је мерен угиб конзоле на слободном крају.

### **Техничке могућности:**

Приказаном мерном методом могуће је одређивање карактеристика сензора истезања израђених у инкџет технологији, штампаних у различитим димензијама и облицима, са различитим проводним мастилима, истезањем различитих врста материјала, са различитим механичким својствима, деловањем статичким, дуготрајним или краткотрајним силама.

### **Реализатори:**

ФТН, Нови Сад, Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд;

### **Корисници:**

Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд; Факултет техничких наука, Нови Сад, ИРИТЕЛ А.Д., Београд.

### **Подтип решења:**

M85 - Нова мерна метода.

## **Увод**

Предности сензора прављених у инкџет штампаној технологији на полиимидној фолији су ниска цена, мала дебљина и тежина, флексибилност, транспарентност, растегљивост, итд. Поред тога, флексибилна електронска кола омогућавају интегрисање различитих компоненти на различите компатибилне полимерне подлоге које се могу истезати више пута без оштећења у зависности

од примене. Увођењем нових технолошких поступака и флексибилности коју нуди штампана електроника, долази до њене примене у различитим областима као што су телекомуникације, аутомобилска индустрија, медицина, потрошачка и војна електроника, енергетика, здравство, логистика, итд.

Отпорнички сензори имају најчешћу примену од свих сензора. Њихова производња је јефтина и релативно лако се повезују у кола за обраду сигнала. Отпорнички елементи могу бити осетљиви на промену температуре, истезања (на притисак или савијање), светлост и друге физичке величине. Коришћењем ових основних елемената, могу се мерити многе сложене физичке појаве; као што су протоци течности или масе (мерењем промене температуре на два калибрисана отпорничка елемента у две тачке) или тачка росе. Отпорнички сензорски елементи могу имати отпорност у опсегу од 100  $\Omega$  до неколико k $\Omega$ , у зависности од пројектованог сензора и физичких параметара околине у којој сензор треба да врши мерења.

Да би се побољшала тачност мерења, треба водити рачуна о два фактора. Први је резолуција (амплитуда побудног напона мора бити довољна да минимална промена отпорности превазилази ниво шума), а други је напонски ниво (пошто је сензор истезања отпорничког типа, треба водити рачуна о негативном ефекту на резултате мерења услед самозагревања које настаје приликом протицања струје кроз сензор).

Мерење промене отпорности сензора услед истезања увелико зависе од мерне опреме и мерне технике којом се врши мерење. Одговарајући избор мерне методе значајно утиче на тачност мерења. У циљу постизања веће тачности мерних резултата, као мерни инструмент се користи дигитални мултиметар (*Keithley 2410 SourceMeter*).

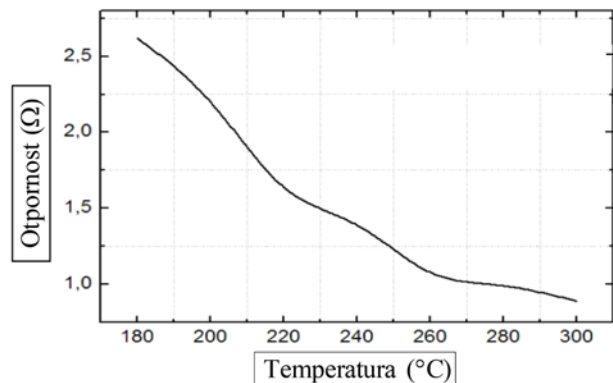
### Одређивање карактеристика сензора

#### Технолошки параметри сензора истезања

Предложена структура сензора истезања је штампана Dimatix DMP-3000 пиезо инкџет штампачем (произвођача Fujifilm). Наночестично мастило са 20% тежинских делова сребра је коришћено као проводни материјал које је штампано на полиимидну пластичну фолију дебљине 50  $\mu\text{m}$ . Фреквенција штампања је била подешена на 4 kHz, са напонам на млазницама од 22 V, и размаком између капљица 18  $\mu\text{m}$ . Дебљина штампаног слоја износила је око 800 nm. Након штампања, структура је печена у пећи на 200°C током 35 минута.



(а)



(б)

Слика 1. (а) Одштампане тест сребрне линије на полиимидној подлози. (б) Отпорност тест линија у функцији од температуре печења.

Да би се испитала промена отпорности проводних линија у функцији температуре печења, одштампане су тест линије на полиимидној подлози дебљине 125  $\mu\text{m}$ , релативне пермитивности  $\epsilon_r = 3.2$ , као што је приказано на слици 1. Линије су ширине  $w = 1 \text{ mm}$ , дужине  $l = 20 \text{ mm}$  и дебљине  $t = 0.5 \mu\text{m}$ . Као што се види на слици 1(б), ако је температура печења већа, отпорност сребрног слоја ће бити мања. Зато је неопходно изабрати оптималну температуру и време печења, како би сензор имао што боље особине (флексибилност и способност истезања), које су неопходне за бољи рад сензора.

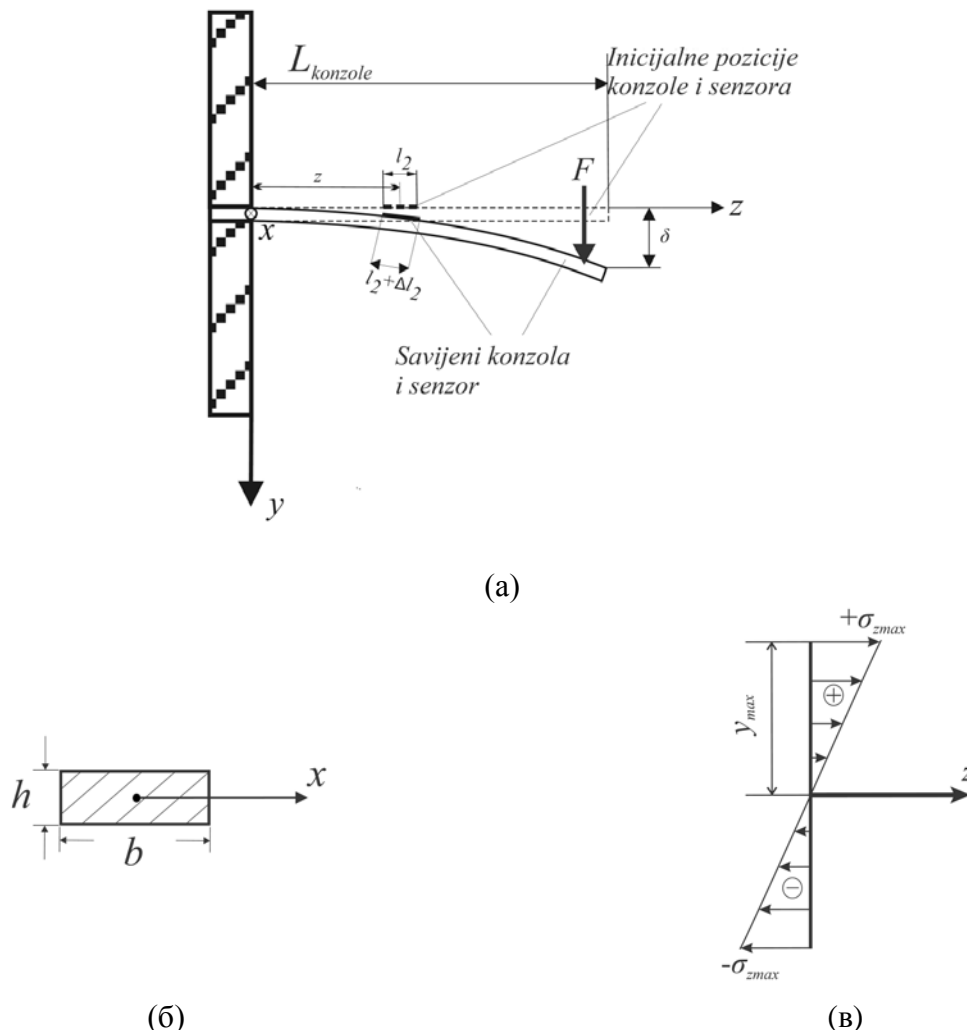
### Прорачун истезања

Истежање је промена димензија тела на које делује одређена сила. Када је сензор истезања залепљен на узорак (конзолу) који се истеже, истеже се и сам сензор и долази до промене отпорности сензора. Веза између релативне промене отпорности ( $\Delta R/R$ ) и количине истезања сензора ( $\epsilon$ ) изражава се преко фактора осетљивости (*gauge factor, GF*), као:

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

Истежање ( $\epsilon = \Delta L/L$ ) је бездимензионална величина и најчешће се изражава у микроистезањима ( $1 \mu\epsilon = 10^{-6} \text{ m/m}$ ).

Мерна поставка за одређивање карактеристика сензора приказана је на слици 2.



Слика 2. Мерна поставка са сензором истезања (а) поставка мерења, (б) попречни пресек конзоле ( $b=30.2 \text{ mm}$ ,  $h=3.03 \text{ mm}$ ) и (в) распоред нормалног напона конзоле.

У одсуству деловања силе, конзола дужине  $L_{konzole}$  и активна дужина сензора, односно дужина осетљива на истезање,  $l_2$ , су у иницијалној позицији. Пошто се делује силом на слободан крај конзоле, долази до њеног истезања, као и до истезања активне дужине сензора  $l_2$  на  $l_2 + \Delta l_2$ . Да би се одредио максимални угиб на крају челичне конзоле  $\delta$  коју она може да истрпи а да притом не дође до њене трајне деформације (прелазак из еластичног у пластично стање), узет је угљенични челик ознаке  $\check{c}$ . 0361, за који се прво рачуна сила као:

$$F = \frac{\sigma_t \cdot \omega_x}{l_f} = \frac{\sigma_t \cdot \frac{b \cdot h^2}{6}}{l_f} = \frac{\sigma_t \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot l_f}, \quad (2)$$

где је  $\sigma_t$  максимални напон на граници течења (за коришћени челик износи  $240 \text{ N/mm}^2$ ),  $\omega_x$  отпорни момент пресека за правоугаоник (слика 2(б)),  $b$  и  $h$  су ширина и дебљина конзоле, респективно, а  $l_f$  представља дужину између места укљештења и тачке где сила делује на конзолу.

Када је сила одређена, максимални угиб  $\delta_{max}$  се рачуна као

$$\delta_{max} = \frac{F \cdot l_f^3}{3 \cdot E \cdot I}, \quad (3)$$

где  $E$  представља Јангов модул еластичности (за коришћени челик износи  $210 \text{ kN/mm}^2$ ),  $l_f$  означава удаљеност од тачке укљештења конзоле до тачке деловања силе, и

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4)$$

представља момент инерције пресека. За ову поставку мерења, максимални угиб износи  $\delta_{max} = 10.05 \text{ mm}$ .

Момент савијања  $M_f(z)$  зависи од локације  $z$  где делује сила на конзолу. Овде  $z$  представља локацију на конзоли где се налази сензор, тј. средина активне дужине сензора. Максимални момент савијања конзоле се добија на месту укљештења конзоле и дефинише се као

$$M_{f \max}(z=0) = F \cdot L_{konzole}, \quad (5)$$

док се момент савијања на месту сензора одређује као

$$M_f(z) = F \cdot (L_{konzole} - z). \quad (6)$$

Истежање конзоле је дефинисано као

$$\varepsilon_{z \max} = \frac{1}{E} \cdot \sigma_{z \max} = \frac{M_f(z)}{E \cdot I_x} \cdot y_{\max}, \quad (7)$$

где  $y_{\max} = h/2$  представља ординату најудаљенијег влакна (слика 2(в)). Код равног напрезања, нормални напон је једнак нули, па је средња равна неутрална површ.

Микроистезања дуж  $z$  осе рачунају као

$$\varepsilon_z(z) = \frac{6 \cdot (L_{konzole} - z) \cdot \delta \cdot h}{4 \cdot L_{konzole}^3}, \quad (8)$$

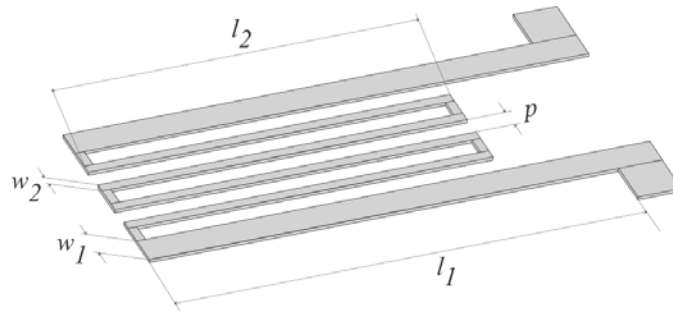
па се за сваки милиметар угиба  $\delta$ , може израчунати истезање конзоле и измерити промена отпорности сензора.

## Геометријски параметри сензора и мерна поставка

Геометријска структура сензора истезања, са означеним геометријским параметрима, приказана је на слици 3 (а). Дужина мерног дела сензора, као што је већ напоменуто, је означена са  $l_2$ . Два крајња сегмента сензора (дужине  $l_1$  и ширине  $w_1$ ) су шири од активних сегмената, као и стопаца за лемљење. Због релативно велике површине, они су неосетљиви на истезање, јер имају малу електричну отпорност. Активни сегменти су ширине  $w_2$ , док је размак између суседних сегмената  $p$ . Остали геометријски параметри сензора су представљени у табели 1.

Табела 1. Геометријски параметри сензора истезања.

Сензор 1	Сензор 2	Сензор 3
$w_1=500 \mu\text{m}$	$w_1=500 \mu\text{m}$	$w_1=500 \mu\text{m}$
$l_1=10000 \mu\text{m}$	$l_1=14500 \mu\text{m}$	$l_1=29500 \mu\text{m}$
$w_2=200 \mu\text{m}$	$w_2=200 \mu\text{m}$	$w_2=300 \mu\text{m}$
$l_2=8000 \mu\text{m}$	$l_2=11000 \mu\text{m}$	$l_2=22000 \mu\text{m}$
$p=300 \mu\text{m}$	$p=400 \mu\text{m}$	$p=300 \mu\text{m}$
$N=4$	$N=4$	$N=8$
Димензије сензора		
11.5mm×5.2mm	16.0mm×8.0mm	31.0mm×9.0mm



(а)



(б)



(в)

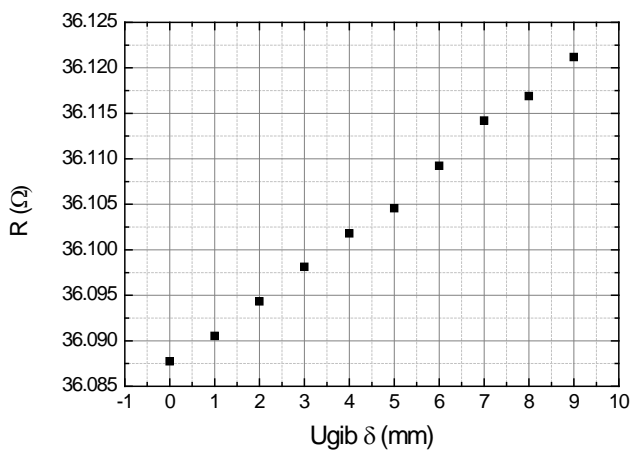
Слика 3. (а) Геометријска структура сензора истезања са означеним геометријским параметрима, (б) Мерни систем: Keithley 2410, дигитално помично кљунасто мерило и сензор, (в) Три сензора типа меандар, залепљени на конзоли.

На слици 3 (а) је приказан мерни систем за мерење истезања. Састоји се од уређаја за мерење отпорности *Keithley 2410*, сензора и помичног кљунастог мерила, којим се мери угиб конзоле на слободном крају. На слици 3 (б) су приказана три сензора, типа меандар, одштампана на флексибилном супстрату. Сензори су за конзолу залепљени двокомпонентним епокси везивом, док је сребрна паста коришћена за лемну везу између контаката сензора и жица којима се сензори повезују са *Keithley 2410*.

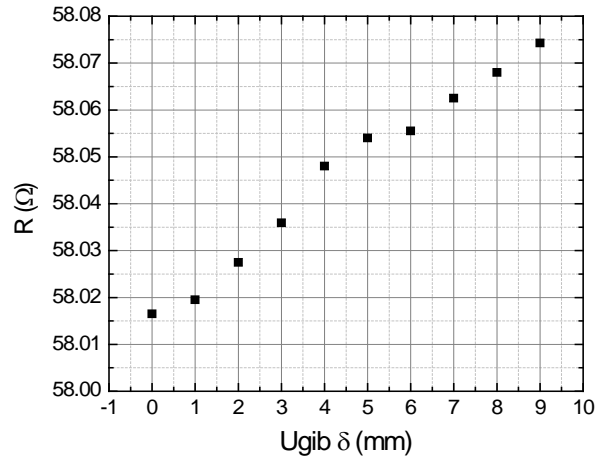
Да би резултати мерења били што тачнији, кроз сензор су пуштане мале струје, до 1 mA, како не би долазили до самозагревања сензора, чиме би била нарушена тачност добијених резултата.

### Резултати мерења

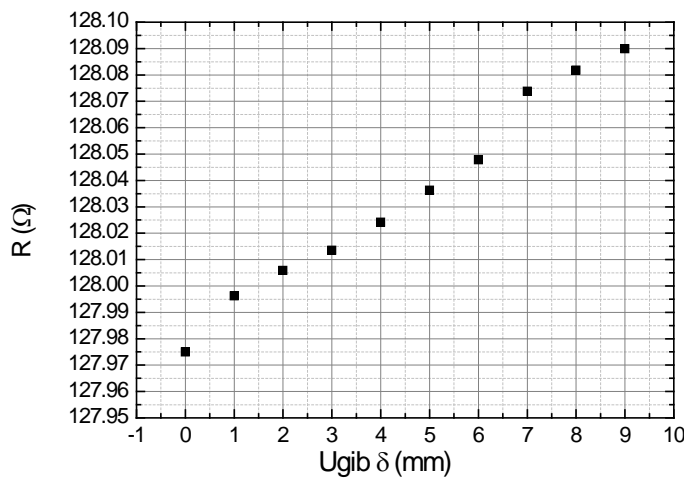
Измерене промене отпорности под дејством силе на слободном крају конзоле, приказане су на слици 4. У табели 2 су приказане мерене вредности отпорности без истезања (када је  $\delta = 0$  mm) и при скоро максималном истезању услед угиба (за  $\delta = 9$  mm), као и просечне вредности фактора осетљивости сензора *GF*.



(а)



(б)



(в)

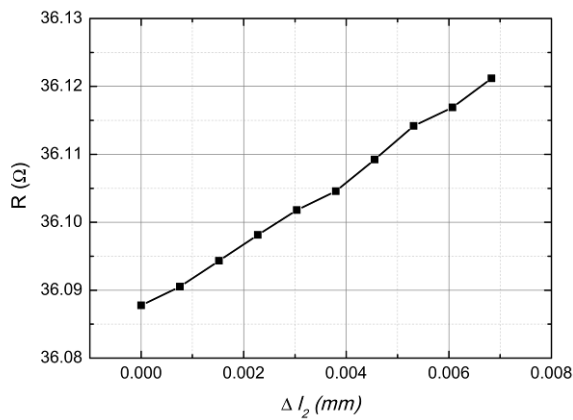
Слика 4. Отпорности сензора за различите угибе (за  $\delta = 0 \div 9$  mm), (а) сензора 1, (б) сензора 2, и (в) сензора 3.

Табела 2. Измерене отпорности сензора и просечне вредности фактора осетљивости.

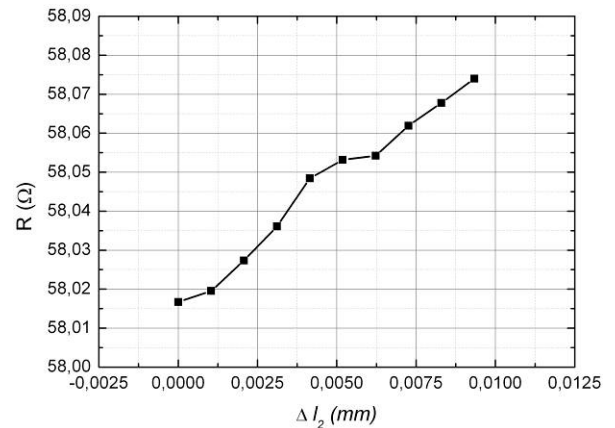
Сензор 1	Сензор 2	Сензор 3
<b>Иницијална отпорност (за <math>\delta=0</math> mm)</b>		
$R=36.09 \Omega$	$R=58.01 \Omega$	$R=127.97 \Omega$
<b>Отпорност за <math>\delta=9</math> mm</b>		
$R=36.12 \Omega$	$R=58.07 \Omega$	$R=128.09 \Omega$
<b>Фактор осетљивости</b>		
$GF=1.098$	$GF=1.203$	$GF=1.115$

Мерене вредности фактора осетљивости су у опсегу од 1.089 са Сензор 1 до 1.203 за Сензор 2, и представљају типичне вредности за овај сензор.

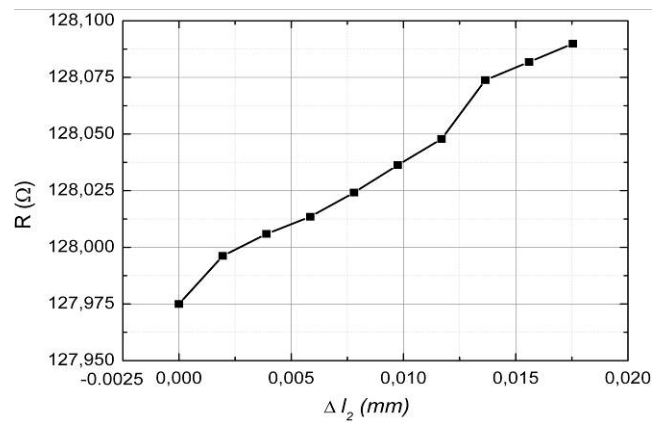
Да би се јасније карактерисао сензор, на слици 5 је приказана зависност промене отпорности сензора у односу на релативно истезање активне дужине сензора,  $l_2$ .



(a)



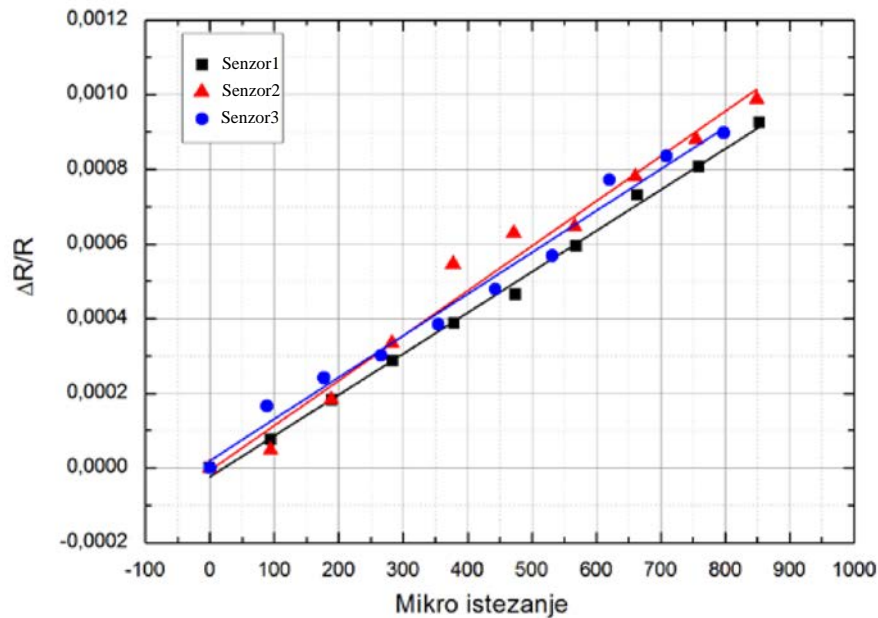
(б)



(в)

Слика 5. Промена отпорности сензора у зависности од релативног истезања активне дужине сензора, (а) сензора 1, (б) сензора 2, и (в) сензора 3.

На слици 6 је приказано поређење карактерисаних сензора истезања, тј. зависност промене релативне отпорности у односу на микроистезање сензора.



Слика 6. Промена релативне отпорности у односу на микроистезање Сензора 1, 2 и 3.

## Образложење

У овом техничком решењу је приказан начин за одређивање карактеристика сензора истезања који су реализовани у инкјет технологији. Овом методом је могуће одредити карактеристике сензора истезања који су штампани на различитим подлогама са различитим дебљинама и мастилима. Такође, могуће је окарактерисати сензоре различитих димензија који су штампани у једном или више слојева, без додатних измена у принципу и поставци мерног система.

Приказаном методом су одређене карактеристике сензора који је израђен штампањем наночестичног мастила са 20 % тежинских делова сребра на полиимидној пластичној фолији дебљине 50  $\mu\text{m}$ . Како би се одредио фактор осетљивости сензора, сами сензори су лепљени на горњу страну челичне конзоле која је једним крајем укљештена, док је на другом крају деловано силом која је истезала конзолу као и сензор.

Да би се одредило истезање, неопходна су прецизна мерења малих промена отпорности сензора, која се јављају услед деформација његове активне дужине. Због тога, промена отпорности је мерена дигиталним мултиметром *Keithley 2410*, који омогућава високу поновљивост мерења и ниски шум, за сваки милиметар угиба конзоле на слободном крају који је мерен дигиталним помичним кљунастим мерилом *Kern IP54*.

Мерење промене отпорности сензора услед истезања увелико зависе од мерне опреме и мерне технике којом се врши мерење. Одговарајући избор мерне методе значајно утиче на тачност мерења. Измерене вредности фактора осетљивости су у опсегу од 1.089 до 1.203, и показано је да је остварено добро слагање резултата са фактором осетљивости од 1.22 који су остварени са сензорима реализованим у технологији ротационог nanoшења (spin coating technology) (J. Rausch, L. Salun, S. Griesheimer, M. Ibis, R. Werthschützky, "Printed resistive strain sensors for monitoring of light-weight structures", SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive



Evaluation and Health Monitoring, pp. 79820H-79820H, Inter.Society for Optics and Photonics, 2011.). Поред поступка мерења, описан је и поступак анализе мерених резултата и дате потребне математичке зависности.

*Мерна метода за одређивање карактеристика сензора истезања реализованог у инџет технологији развијена је на Факултету техничких наука у Новом Саду и Институту за мултидисциплинарна истраживања у Београду, у оквиру текућег пројекта бр. ТР-32016 код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.*

*Штампано –2013.*