

Prototip:**Senzor istezanja realizovan u inkdžet tehnologiji na fleksibilnom supstratu**

Rukovodilac projekta: prof. dr Ljiljana Živanov

Odgovorno lice: Nikola Ivanišević

Autori: Nikola Ivanišević, Čedo Žlebič, Nelu Blaž, Ljiljana Živanov, Mirjana Damnjanović – Fakultet tehničkih nauka (FTN), Novi Sad;
Aleksandar Menićanin – Institut za multidisciplinarna istraživanja (IMSI), Beograd

Razvijeno: u okviru projekta tehnološkog razvoja TR-32016

Godina: 2013.

Primena: novembar 2013.

Kratak opis

Opisana je detaljna realizacija senzora istezanja korišćenjem štampe za deponovanje funkcionalnih materijala. Ova tehnologija eliminiše potrebu za maskama i hemijskim nagrizanjem jer se materijal nanosi isključivo tamo gde je predviđen, tzv. kap-na-zahtev (drop-on-demand) tehnika. Ovim se smanjuje potrošnja materijala i zagađivanje životne sredine, a razvojem novih funkcionalnih mastila proširuje se mogućnost primena i proizvoda.

Prototip je izrađen sa 20 % srebrnim nanočestičnim mastilom od proizvođača Sankemikal (Suncemical) i štampano štampećem oznake DMP3000 proizvedenog od strane kompanije Fudžifilm Dimatiks (Fujifilm Dimatix). Mastilo se nanosi na fleksibilnu podlogu, napravljenu od polimida, debljine 50,8 μm koji se i koristi kod komercijalnih senzora.

Tehnološki postupci izrade su opšte opisani sa konkretnim primerima parametara koji su korišćeni u izradi, s toga ovo tehničko rešenje nije ograničeno samo na primenu na senzorima istezanja već se može koristiti kao uputstvo za primenu ili poboljšanje inkdžet tehnologija u drugim institucijama.

Primenom navedenih tehnoloških postupaka uspešno su napravljeni prototipovi senzora istezanja sa električnom otpornošću od 145 Ω , 54 Ω i 45 Ω za jedan, dva i tri sloja respektivno, sa relativno malim međusobnim odstupanjima u pojedinačnim serijama.

Tehničke karakteristike:

Projektovanje i izrada senzora istezanja u serijama, napravljenog od srebrnih nanočestica na fleksibilnoj polimidnoj podlozi korišćenjem inkdžet tehnologije.

Tehničke mogućnosti:

Opisano tehničko rešenje omogućava kvalitetnu izradu ponovljivih planiranih struktura u inkdžet tehnologiji u višeslojnoj štampi pri relativno jeftinim troškovima izrade sa konkretnim primerom na senzoru istezanja.

Realizatori:

Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Institut za multidisciplinarna istraživanja, Beograd

Korisnici:

Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Podtip rešenja:

M85 Prototip

Uvod

Tehnologija štampanja, pozajmljena iz grafičke i novinske industrije, može se u principu prilagoditi za masovnu proizvodnju štampane elektronike. Inkdžet tehnologija se smatra digitalnom štampom zbog tzv. Kap-na-zahtev (drop-on-demand) tehnike. U poslednjih par godina dosta je

napora uloženo u pretvaranje ove tehnologije u svestrani alat za razne industrijske procese kao što su: proizvodnja solarnih ćelija, mobilnih telefona, RFID-a, WLAN antena, pametnih tkanina i odeli, organskih displeja i osvetljenja, baterija i senzora. Glavne prednosti ove tehnologije su beskontaktno i aditivno deponovanje malih količina materijala bez primene maski. Svestranost ove tehnologije je upravo omogućena depozicijom različitih funkcionalnih materijala u vidu rastvora kao što su provodnici, poluprovodnici i dielektrici. Najčešće se koristi u kombinaciji sa fleksibilnim supstratima kao što su plastika i papir što otvara novu lepezu aplikacija. Očekuje se da će globalno tržište štampane elektronike dostići 24-25 milijardi dolara do 2015. godine. Postupak štampe podrazumeva izbacivanje fiksne količine mastila iz mlaznice (reda nekoliko pikolitara) usled njene nagle promene zapremine nastale kontrakcijom piezoelektričnog materijala. Upravo najkritičniji korak u ovoj tehnologiji su fizičke karakteristike mastila kao što su viskoznost i površinski napon koje trebaju biti prilagođene tehničkim specifikacijama štampača, a potom i podešavanja upravljačkih signala za optimalno ispaljivanje i formiranje kapljica. Kako kapljica izlazi iz mlaznice sva energija prelazi u viskozni tok, površinsku energiju kapljice i kinetičku energiju. Viskoznost treba da je dovoljno mala da dozvoli mlaznici da se napuni pre sledećeg ispaljivanja i dovoljno velika da ne dolazi do raspadanja kapljice. Površinski napon treba da je dovoljno velik da ne dozvoli nenamerno curenje tečnosti iz mlaznica, a opet dovoljno mali da ne prekida viskozni tok kapljice.

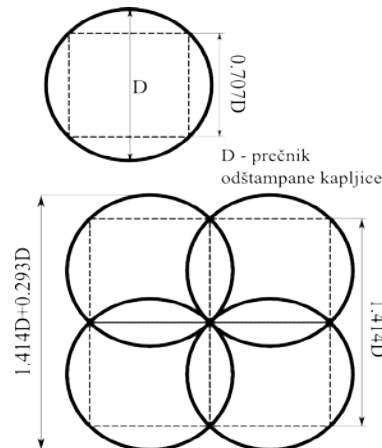
Senzori se često koriste u primenama koje zahtevaju nisku cenu i jednokratnu upotrebu, kao što su npr. senzori istezanja, odlično se poklapaju sa mogućnostima inkdžet tehnologije. Najčešće su u pitanju otpornički senzori koji su osteljivi na promenu fizičke veličine koja se detektuje. Jednokratnost senzora se može ogledati u smislu da otpornički materijal hemijski izreaguje sa nekom supstancom kao što je slučaj npr. kod senzora toksičnih gasova ili u slučaju da senzor jednom kada se montira ne može se odvojiti bez njegovog uništavanja kao što je slučaj kod senzora istezanja. Mala debljina, mala težina, velika površina, fleksibilnost, transparentnost i rastegljivost su neke od osobina koje predstavljaju senzore pravljene u inkdžet štampanoj tehnologiji na plastičnim folijama – podlogama.

Projektovanje i izrada senzora istezanja u inkdžet tehnologiji

Otpornost senzora istezanja koja se najčešće sreće u industriji je 120 Ω i 350 Ω . Shodno tome, lejaut je napravljen po uzoru na postojeće komercijalne senzore sa ciljanom otpornosti od 120 Ω . Prototip je napravljen od 20% srebrnog nanočestičnog mastila proizvedenog od strane kompanije Sankemikal (Sunchemical). U tehničkim specifikacijama proizvođača je navedeno da je specifična otpornost mastila u opsegu od 5-30 $\mu\Omega\text{cm}$. Prilikom projektovanja lejauta korisnije je podatak o slojnoj otpornosti koja u proseku iznosi 0.25 Ω što odgovara sloju debljine 700 nm za štampu rezolucije 1016 dpi (skraćeno od kapljice-po-inču).

Prilikom izrade lejauta neophodno je podesiti minimalne podeoke u koordinatnom sistemu softvera za crtanje. Oni bi trebalo da odgovaraju rezoluciji slike koja će se koristiti za štampu, odnosno veličini piksela (osnovna gradivna jedinica 2D slike). U suprotnom moglo bi doći do gubitka kvaliteta štampe usled odsecanja ili zaokruživanja dimenzija. Rezolucija od 1016 dpi, kojoj odgovara veličini piksela od 25 μm , se pokazala kao optimalna vrednost jer ne dovodi do preteranog razlivanja ili nagomilavanja mastila. U generalnom slučaju veličina piksela se određuje štampanjem usamljenih kapljica na supstratu i merenjem njihovog prečnika (D). Za polaznu veličinu se može uzeti 0,707D koja odgovara stranici kvadrata upisanog u krug prečnika D (slika 1). Često se preporučuje da veličina piksela odgovara polovini prečnika kapljice, ali u eksperimentima se pokazalo da često dovodi do razlivanja mastila. U zavisnosti od specifikacije mastila i njegove interakcije sa podlogom dolazi do neznatnog odstupanja od ovog pravila, ali i dalje predstavlja validnu polaznu iteraciju. Dimenzije krajnje odštampane linije bi nakon štampe trebalo da budu šire od projektovanih, a time razmak između njih uži. Koliko zavisi od rezolucije i prečnika kao što se

može videti na slici 1. Drugo razmatranje koje treba usvojiti prilikom projektovanja jeste da razmak između štampanih linija bude veći od debljine podloge kako bi prenos istezanja bio optimalan. Takođe, širina segmenata koji spajaju duge osetljive segmente se projektuju da budu nekoliko puta širi (u ovom slučaju pet) od njih kako bi uticaj puzanja (efekat histerezisa) bio manji. Podlogu je napravljena od polimidnog filma debljine 50,8 μm , koji se koristi i kod komercijalnih senzora. Za minimalne širine metalnih linija usvojeno je 200 μm , dok je za razmak usvojeno 250 μm koji se može postići sa velikim stepenom uspešnosti.

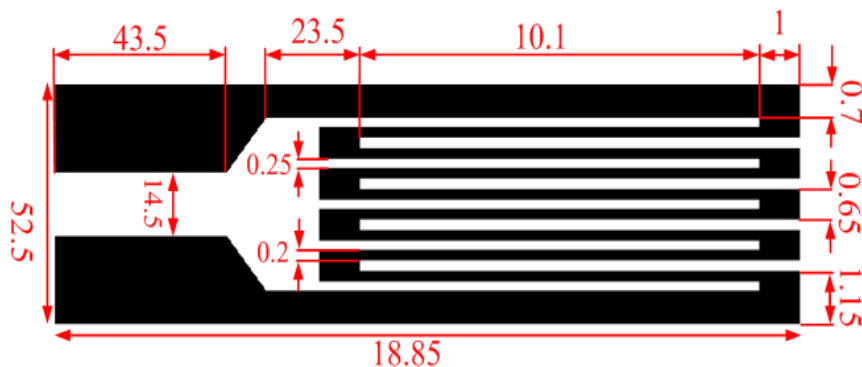


Slika 1. Postupak određivanja polazne veličine piksela.

Uz pomoć prethodno navedenih tehnoloških parametara moguće je proceniti otpornost senzora prikazanog na slici 2 (zanemarivanjem kontakata) kao:

$$R_{\text{senzora}} \approx 0.25\Omega \cdot \left[8 \cdot \left(\frac{10.1\text{mm}}{0.2\text{mm}} \right) + 7 \cdot (0.55) \cdot \left(\frac{0.65\text{mm}}{1\text{mm}} \right) + 2 \cdot (0.55) \cdot \left(\frac{1.15\text{mm}}{1\text{mm}} \right) + 2 \cdot \left(\frac{33.6\text{mm}}{0.7\text{mm}} \right) \right]$$

$$R_{\text{senzora}} \approx 126 \Omega$$



Slika 2. Predloženi ležaut senzora sa dimenzijama izraženim u milimetrima.

Postupak izrade senzora istezanja

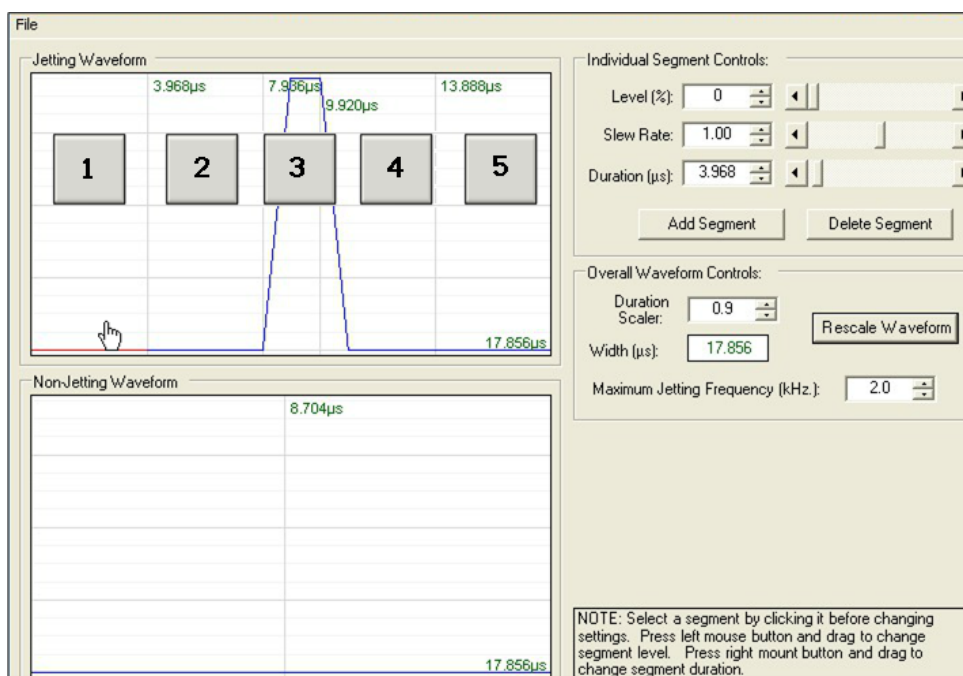
Podloga je sačinjena od hidrofobnog materijala što je veoma važan podatak kada je mastilo na bazi vode. Tada je neophodno izvršiti tretiranje površine podloge sa O_3 plazmom i UV zracima radi poboljšanja njihove interakcije. U ovom slučaju mastilo je rastvoreno u etanolu i etil-glikolu koji odlično kvase polimidnu podlogu. Pre štampe potrebno je očistiti površinu podloge od prašine i otisaka sa visko procentnim alkoholom (95% etanol) uz pomoć mekane krpe kako ne bi došlo do oštećenja folije (npr. grebanja).

Nacrtni ležaj se snima kao slika bitmap ekstenzije i učitava u softver za upravljanje DMP3000 inkdžet štampačom, nakon čega je potrebno podesiti sledeće tehnološke parametre:

- debljinu podloge
- startnu poziciju štampe
- intenzitet negativnog pritiska na rezervoar mlaznice
- signal za upravljanje mlaznicama
- visinu mlaznice u odnosu na podlogu
- izbor mlaznica za štampu

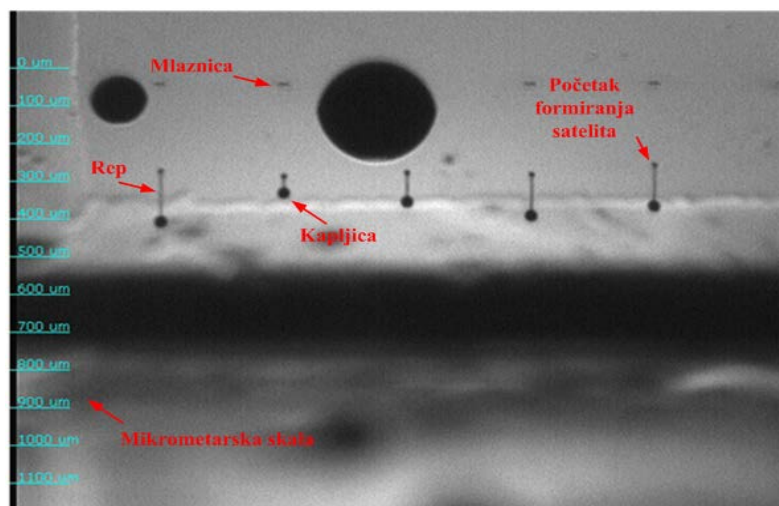
Ketridž se sastoji od dva dela: rezervoara i glave za štampanje. U rezervoar se špricom unosi preporučениh 1,5 ml mastila nakon čega se montira glava za štampanje. Moguće je podesiti negativan pritisak koji se primenjuje nad rezervoar kako bi se sprečilo nenamerno curenje mastila kroz mlaznice u odsustvu impulsa za ispaljivanje.

Upravljački signal je najvažniji korak u izradi jer od njega zavisi vreme, uspešnost i ponovljivost štampe. On se sastoji od pet segmenta (slika 3) koji upravljaju piezoelektričnim materijalom. Segmenti se mogu zamisliti kao različiti položaji piezoelektročnog materijala koji stiše mlaznicu i na taj način ispaljuje njen sadržaj. Odstustvo amplitude predstavlja nenapregnutu mlaznicu. Podešavanje se započinje formiranjem usamljenog impulsa maksimalne amplitude podeljenog u pet delova jednakih trajanja, gde pri tom impuls zauzima treći deo. Početnu vrednost amplitude upravljačkog napona treba podesiti na vrednost pri kojem se kapljice uspešno ispaljuju bez preteranog curenja, obično oko 25 V, dok je slurejt oko 1 V/ μ s.



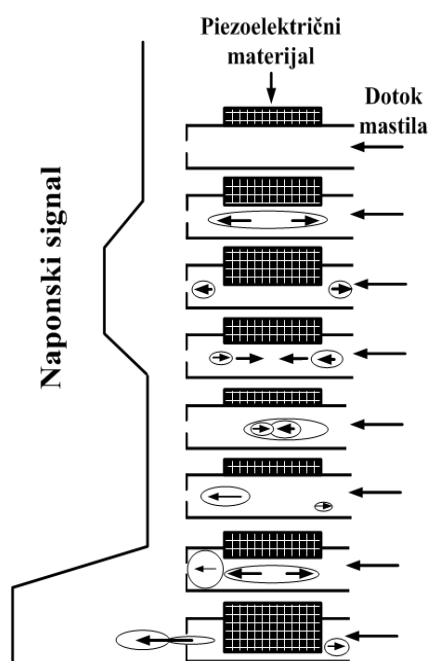
Slika 3. Početni oblik kontrolnog naponskog signala.

Potom se modifikuje trajanje impulsa dok se ne postigne maksimalna brzina kapljice. U prozoru za posmatranje trajektorije kapljica se nalazi mikrometerska skala (slika 4) pomoću koje se procenjuje brzina kapljice očitavanjem pređenog puta za fiksno vreme od trenutka ispaljivanja. Pri ovoj fazi je bitno postići što veću brzinu bez obzira na oblik kapi. Veći intenzitet brzine omogućava bolju pouzdanost ispaljivanja i preciznost položaja odštampane kapljice. Preporučena vrednost je između 6 i 10 m/s.



Slika 4. Prikaz kapljica nakon izlaska iz mlaznica posle 100 μ s.

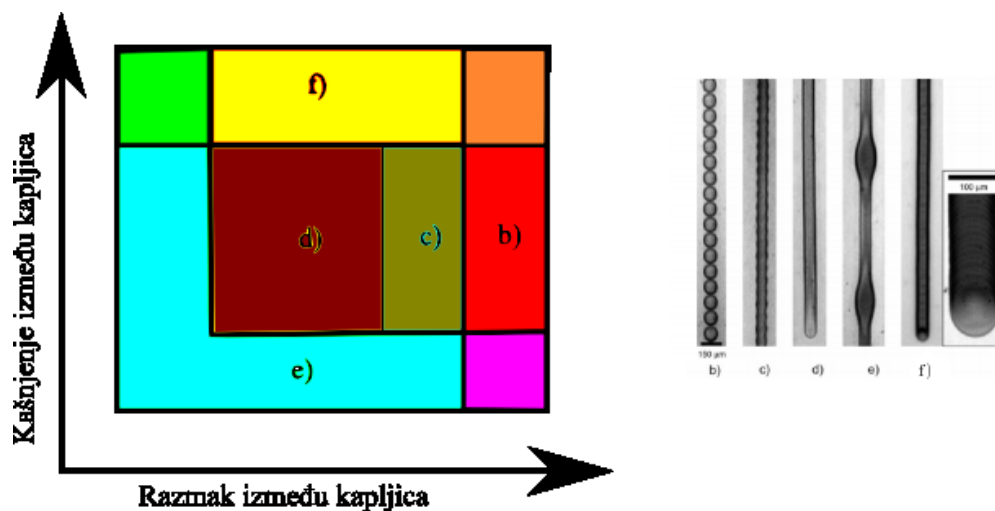
Kada je utvrđeno optimalno trajanje impulsa u preostala četiri segmenta se upisuje isto. Tipično vreme je oko 3 μ s. U sledećoj fazi se variraju nivoi preostala četiri segmenta, počev od poslednjeg, radi poboljšanja oblika. Blagim povećanjem amplitude petog dela dolazi do usporavanja kapljice, što kao posledicu ima elemnisanje repova i tzv. “satelita”. Poslednje predstavlja nepoželjne fragmente zaostalog raspadnutog repa, nastale usled velike kinetičke i površinske energije. Ukoliko kapljica odstupa od loptastog oblika nivo bi trebalo za početak podesiti na minimalni korak od 13% (od maksimalne amplitude), jer konačan nivo će zavisti od ostalih segmenata. Ako bilo kada dođe do zapušnja potrebno je pokrenuti ciklus čišćenja, koji se zasnivaju na produvavanju mlaznica većim količinama mastilau roku od par sekundi. Zatim je potrebno modifikovati nivo prvog segmenta koji najviše utiče na brzinu. Njegova uloga je da u kombinaciji sa drugim i trećim segmentom uspostavi akustični talas u mlaznici na sredini pritiskajuće prese tako da se pri aktivaciji trećeg segmenta istisne tečnost kao što je ilustrovano na slici 5. Na ovaj način se uspešno i pouzdano vrši ispaljivanje jer se ne dozvoljava da se tečnost u mlaznici ustali.



Slika 5. Formiranje akustičnih talasa u mlaznici prilikom ispaljivanja.

Intenzitet prvog segmenta ne bi trebalo da pređe 53% kako ne bi došlo do duplog ispaljivanja tečnosti. Da bi se očuvala forma, izbeglo rasprskavanje i održala brzina, potrebno je prvi i poslednji segment postepeno u kombinaciji povećavati. Kada je optimum pronađen modifikuje se četvrti segment koji nema značajni efekat na performanse pa se s toga izjednačava se nivom petog signala. Konačni cilj je da se dobije što jednostavniji oblik kontrolnog signala. Sa tom namerom dalje se ispituje da li se može susednim segmentima (najčešće prvom, petom i četvrtom) izjednačiti nivoi bez značajne degradacije performansi. Ako se pokaže da za neke parove to važi, proverava se da li se ponašanje kapljice promenilo ukoliko se jedan ukloni. Uprošćavanjem naponskog signala smanjujemo broj potrebnih harmonika za njegovo formiranje, a time i disipaciju energije, preslušavanje između susednih mlaznica i kompleksnost upravljačke elektronike kada bi se tehnologija prenosila na industrijski pogon. Poslednje se izvršava skaliranje kontrolnog impulsa u malim koracima i opet prati brzina i oblik kapljice. Ceo signal se množi npr. sa faktorom 0,9, što predstavlja skraćivanje njegovog ukupnog trajanja i doprinosa svakog segmenta, odnosno sa 1,1 ukoliko se bolji odziv dobija njegovim produžavanjem. Množenje se vrši u finim koracima, kako ne bi došlo do naglih promena koje bi poremetile rad mlaznica. Nakon skaliranja se utvrđuje maksimalna frekvencija rada i podešavanja se snimaju. Jednom podešeni signal se može višekratno koristiti sa velikim uspehom, ako se uslovi štampe održavaju konstantim, koristi isti kertridž, a mastilo u rezervoaru čuva od starenja.

Pošto je postignut stabilan rad mlaznica dalje se proverava uniformnost odštampane linije širine pojedinačne kapljice i dužine oko 16 mm. Problem koji se tada javljaju su islutrovanosti na slici 6, a rešavaju se modifikovanjem vremena i/ili razmaka između susednih kapljica kao i temperature podloge. Razmak između kapljica je najlakše podesiti, pri tome treba biti pažljiv da se napravi nova slika lejauta sa odgovarajućom rezolucijom kako ne bi došlo do skupljanja ili ekspanovanja strukture. Kontrola kašnjenja između kapljica je komplikovanija i podešava se visinom kertridža od podloge i frekvencijom štampe. Smanjivanjem visine skraćuje se put zbog čega kapljica ranije stupa u kontakt sa podlogom i ima više vremena da rastvor ispari. Povećanjem temperature podloge se može pospešiti proces isparavanja, ali treba biti pažljiv sa vrednostima jer ujedno dolazi do zagrevanja i kertridža tokom štampe. Parametri mastila kao što su viskoznost, površinski napon i gustina zavise od temperature i to generalno opadaju sa njenim povećanjem pa s toga treba izbegavati podešavanje temperature ukoliko to nije nužno. Pri nižim frekvencijama se produžava vreme između ispaljivanja kapi, dok je na višim obrnuto. Idealan oblik linije je prikazan na slici d). Za izradu predloženog senzora visina je bila podešena na 0.5 mm, frekvencija na 2 kHz, a temperatura podloge na 28° C (nezagrevana).



a)

Slika 6. Posledice različitih odnosa parametara na kvaliteta štampe,

Senzori istezanja se najčešće stavljaju u puni Vitstonov most radi efikasnijeg očitavanja promene napona usled promene otpornosti. U ovom kolu je potrebno koristiti senzore sa identičnim otpornostima. Ređanjem struktura jednu ispod druge sa malim odstojanjem (3 mm) moguće je dobiti seriju senzora sa vrlo malom tolerancijom (do 2%) ukoliko se pažljivo završi postupak sinterovanja. Motori koji upravljaju kertridžom štampaju od vrha-ka-dna (u 2D prostoru) i nakon završetka kolone kertridž se pomera gore udesno na vrh sledeće (analogno mašini za kucanje). Opisanim pozicioniranjem struktura motor u jednom prolazu štampa identično iste segmente na svim sensorima. Vreme štampe se neznatno povećava sa brojem linija po jednoj koloni zbog velike brzine motora, dok suprotno važi kada motor mora da menja kolone.

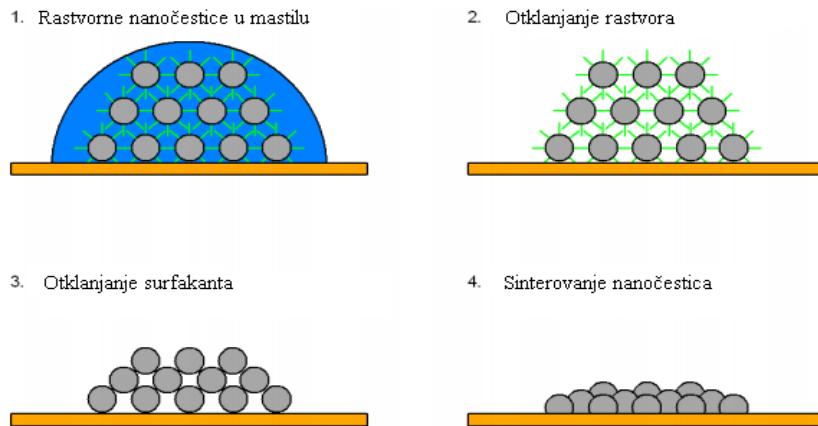
Postupak dobijanja višeslojne štampe

Višeslojna štampa je moguća ukoliko se dozvoli dovoljno vremena prethodnom sloju da se osuši pre nanošenja novog. Prosečno vreme sušenja je oko 30 minuta na 60° C. Fleksibilni supstrat mora tokom čitavog postupka biti fiksiran, tj. vakuumska pumpa mora biti uvek uključena kako ne bi došlo do smicanja između slojeva. Za svaki sledeći nivo potrebno je povećavati vreme sušenja za 15 minuta, Vizuelni indikator, koji daje do znanja da je prošlo dovoljno vremena, predstavlja metalni sjaj koji se javlja po ivicama struktura. Pre nastavka štampe mora se proveriti da li je ista mlaznica i dalje funkcionalna i stabilna jer je duga pauza napravljena. Ako operater nije u mogućnosti da osposobi mlaznicu pod istim rednim brojem, mora izabrati drugu i izvršiti kalibraciju ofseta koordinatnog početka. Taj korak je neophodan jer su susedne mlaznice udaljene 254 µm i ako bi bila preskočena novi sloj bi bio znatno smaknut. Kalibracija se izvršava u softveru u prozoru za rad sa kamerom. Pomeranjem koordinatnog početka u koracima (zapisati novu poziciju) odabira se novo mesto za štampu i pokreće se funkcija ofset-kapljice (drop-offset). Na novom mestu će automatski biti odštampana linija 16 mm dužine i jednog piksela širine, a ispod nje usamljena kapljica. Selektovanjem centra kapljice softver automatski proračunava kako da pozicionira kertridž da uvek štampa od koordinatnog početka, dok je pre toga štampao sa nekim ofsetom. Dobijeni oblik linije i kapljice na dnu je dobar indikator da li mlaznica ispravno radi. Nakon završetka kalibracije koordinatni početak se podešava na gornji levi kraj prethodne štampe. Ako je lejaut takav da u tom kraju nije ništa predviđeno za štampu u lejautu se moraju doctati pozicioni markeri minimalnih dimenzija. Opisan postupak je korišćen za izradu dvoslojnih i troslojni senzora radi ispitivanja mogućih poboljšanja.

Proces sinterovanja

Kada je postupak štampe završen i ispravnost strukture proverena pod mikroskopom (intgrisanim u štampaču) temperatura podloge se povećava na 60° C stepeni. Povišena temperatura ubrzava proces isparavanja rastvarača, etanola u slučaju korišćenog srebrnog mastila, i time se struktura zgrušava. Preostaje etil-glikol, koji daje mastilu veliku viskoznost čija je temperatura ključanja na višim temperaturama (zavisi od procenta rastvora, u ovom slučaju preko 120° C). Nakon 30 minuta sušenja na ivicama linija počinje da se uspostavlja metalni sjaj i tada je bezbedno premestiti strukture u peć. Uzorci se stavljaju u nezagrejanu peć kako bi se izbegao termički šok i naglo ključanje mastila. Temperatura se podešava na 240° C i strukture se sinteruju 45 minuta (slika 7). Tokom prvih pet minuta temperatura peći dostigne 307° C, tokom koje ispari preostali alkohol i etil-glikol (1. korak), nakon čega se polako hladi i smanjuje na podešenu vrednost u roku od 10 minuta gde se razgrađuje preostali surfakant. Surfakant predstavlja hemijsko jedinjenje koje sprečava česticama u rastvoru da se sjedine i anglomerišu. Nakon toga se temperatura održava preostalih 30 minuta kako bi se nanočestice istopile i sjedinile. Radi veće ponovljivosti uzorci treba da se postave na sredinu peći jer je uočena velika razlika u temperaturi duž njene grejne komore. Uzorci koji su postavljeni najdublje su pokazivali veću specifičnu otpornost od onih koji su se

nalazili najbliže vratima peći. Takođe, trebalo bi da su što kompaktnije raspoređeni da ne zauzimaju veliku površinu zbog spomenutog temperaturnog gradijenta.



Slika 7. Postupak sinterovanja ilustrovan u koracima,

Rezultat primenjenog postupka izrade

Primenom navedenih tehnoloških postupaka napravljeni su senzori istezanja sa električnom otpornošću od 144 Ω , 54 Ω i 45 Ω za jedan, dva i tri sloja respektivno. Na slici 8 je prikazan konačan izgled senzora pod mikroskopom gde je obradom slike utvrđena dimenzija linija, dok je na slici 9 prikazana ostvarena rezolucija struktura sa većim mikroskopskim uvećanjem. Dobijene dimenzije su u proseku do 10% manje od projektovanih. Postavljanjem senzora u preferiranom pravcu pomeranja motora i pažljivom primenom postupka sinterovanja može se dobiti serija sa vrlo malim odstupanjem otpornosti između uzoraka, reda samo par oma.



Slika 8. Ostvarene dimenzije odštampalog i sinterovanog senzora,



Slika 9. Ostvarene dimenzije odštampanih i sinterovanih linija sa većom magnifikacijom.

Mogućnosti predstavljenog tehničkog rešenja

U ovom tehničkom rešenju je prikazan nova način realizacije senzora istezanja. Novina se ogleda u koršćenju inkdžet tehnologije i mastila na bazi srebrnih nanočestica na fleksibilnoj polimidnoj foliji. Objasnjen je postupak projektovanja i razmatranja koja treba uzeti u obzir prilikom izrade lejauta. Potom su date smernice kako treba podesiti naponske signale koje upravljaju mlaznicama i kako koji segment impulsa utiče na formiranje kapljica. Njihovom primenom se može dobiti optimalan i pojednostavljen oblik upravljačkog signala koji bi se mogao relativno lako primeni u industrijskom pogonu za masovnu proizvodnju.

Postavljenjem uzoraka blizu i u pravcu preferiranog pravca motora koji upravlja mlaznicama može se dobiti serija senzora sa malim međusobnim varijacijama. Pored lejaut tehnike data je i tehnika za postizanje višeslojne štampe i testirana je za dobijanje dva i tri sloja. Takođe, pojašnjen je i postupak sinterovanja i skrenuta je pažnja na važnost ovog koraka kada je u pitanju ponovljivost senzora.

Dobijeni uzorci su verifikovani pod mikroskopom i izmerene su dimenzije sinterovanih struktura. Ostvarene strukture su u proseku dimenziono razlikuju do 10% od projektovanih, dok su izmerene električne otpornosti senzora od 144 Ω , 54 Ω i 45 Ω za jedan, dva i tri sloja respektivno. Glavna mogućnost ovog tehničkog rešenja je optimizacija postupa izrade struktura u inkdžet tehnologiji štampanja što je uspešno demonstrirano realizovanim sensorima istezanja. Daljim razvojem nanotehnologija, a time i novih materijala odnosno mastila, stvaraće se novo tržište na koje bi se primenom inkdžet tehnologije mogli plasirati relativno jeftini senzori i druge komponente sa konkurentnim performansama zahvaljući novim karakteristikama materijalima.

Novi senzori istezanja na bazi srebrnih nanočestica na polimidnoj foliji su razvijeni na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu i Institutu za mulidisciplinarna istraživanja u Beogradu, u okviru tekućeg tehnološkog projekta br. TR-32016 kod Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Štampano –2013.