

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Žiga Hussu

Kapljično tiskanje transparentnih oksidov

Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija

Ljubljana, 2017

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Žiga Hussu

Kapljično tiskanje transparentnih oksidov

Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija

Mentor: prof. dr. Marko Topič

Ljubljana, 2017

IZJAVA

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom prof. dr. Marka Topiča.

Ljubljana, september 2017

Žiga Hussu

Zahvala

Za vso strokovno pomoč, prilagajanje in potrpežljivost pri pisanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju, prof. dr. Marku Topiču in Aleksandru Matavžu za usmerjanje med raziskovalnim delom diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi dr. Andreju Čampi za pomoč na področju raziskovanja optičnih lastnosti in Milanu Kovačiču za vsestransko pomoč pri delu v laboratoriju.

Prav tako se zahvaljujem mami, ki mi je z nesebično podporo omogočila študij in Gali za spodbudo in motivacijo.

Vsebina

1. Uvod	1
2. Pregled tehnologij tiskane elektronike	3
2.1 Kapljično tiskanje.....	3
2.2 Sitotisk	7
2.3 Rotacijski globoki tisk (gravura)	8
3. Kapljični tiskalnik Fuji Dimatix DMP-2800	11
3.1 Opis sestavnih delov in zagon	11
3.1.1 Postopek zagona	11
3.1.2 Postopek tiskanja	13
4. Izdelava in karakterizacija plasti transparentnega oksida.....	15
4.1 Priprava substrata na tiskanje	15
4.2 Opis izdelave	16
4.3 Optične lastnosti	19
4.3.1 Prepustnost svetlobe	20
4.3.2 Odbojnost svetlobe	24
5. Zaključek.....	29
5.1 Izboljšanje tiska	29
6. Reference	33

Kazalo slik

- Slika 1.1: Poenostavljen postopek izdelave tiskanega vezja[1]
- Slika 2.1: Princip delovanja CIJ tiskalnika [2]
- Slika 2.2: Primer kapljičnega tiska na neravni površini [3]
- Slika 2.3: Primer tiskanja z binarnim in s »sivim« področjem [4]
- Slika 2.4: Termalni DOD (levo) in piezoelektrični DOD (desno) [5]
- Slika 2.5: Primer treh različnih šablon za nastanek enega vezja [8].
- Slika 2.6: Princip delovanja rotacijskega tiskanja (rotogravura) [11]
- Slika 3.1: Slika Fujifilm Dimatix DMP-2800 Series tiskalnika [13]
- Slika 3.2: Tiskalna glava s kartušo [15]
- Slika 3.3: Slika šob zajeta s kamero za opazovanje kapljic
- Slika 3.4: Iztisk kapljice iz šobe in kako se tvori
- Slika 4.1: Shematski pregled poteka izdelave
- Slika 4.2: Površine tiskov in substratov zajetih z pozicijsko kamero
- Slika 4.3: Površina deset plastnega tiska
- Slika 4.4: Spektrofotometer Perkin Elmer Lambda 950) levo in notranjost merilne sfere in senzor svetlobe (desno)
- Slika 4.5: Skica postopka meritve skupne prepustnosti tiska
- Slika 4.6: Rezultati meritve skupne prepustnosti
- Slika 4.7: Skica postopka meritve difuzne prepustnosti vzorca
- Slika 4.8: Rezultati meritve difuznih prepustnosti
- Slika 4.9: Primerjava faktorjev razpršitve prepustnosti med izdelanimi vzorci
- Slika 4.10: Skica postopka meritve skupne odbojnosti vzorca
- Slika 4.11: Rezultati meritev skupne odbojnosti
- Slika 4.12: Skica postopka meritve difuzne odbojnosti vzorca
- Slika 4.13: Rezultati meritev difuzne odbojnosti
- Slika 4.14: Primerjava faktorjev razpršitve odbojnosti med izdelanimi vzorci
- Slika 4.15: Izgled vzorca med sušenjem

Slika 4.16: Razpoke na tisku, ki se je sušil pri sobni temperaturi

Seznam uporabljenih kratic in simbolov

OLED – Organic light emitting diode / Organska svetleča dioda

PCB – Printed circuit board / tiskano vezje

CIJ – Continuous Inkjet / kontinuirano kapljično tisanje

DOD – Drop on Demand / kapljica po naročilu

UV – Ultraviolet / Ultra vijolična

dpi – Drops per inch / število kapljic na inč

IZO – Indium-zinc oxide / indij cinkov oksid

Tdif – Diffused Transmission / difuzna prepustnost

Ttot – Total transmission / celotna prepustnost

Rdif – Diffused Reflection / difuzna odbojnost

Rtot – Total reflection / celotna odbojnost

Ht – Haze in transmission / difuzni delež v smeri prepuščanja

Hr – Haze in reflection / difuzni delež v smeri odboja

Povzetek

V osnovi je bilo za diplomsko delo mišljeno tiskanje OLED (organic light-emitting diode) s Fujifilmovim Dimatix DMP-2800 Series tiskalnikom, kar se je izkazalo za prekompleksno, zato je bila ideja poenostavljena na tiskanje le ene od plasti, ki sestavlja diodo z prevodnim transparentnim IZO (indij-cinkov oksid) in da določim njene optične in električne lastnosti.

V začetnem delu naloge so opisani različni tiskalniki in postopki tiskanja, ki imajo sposobnost nanosa funkcionalnih plasti, kar je potrebno pri tiskani elektroniki.

V raziskovalnem delu naloge pa so opisane priprave na tiskanje, uporaba Dimatix – DMP-2800 Series tiskalnika, tiskanja, sušenja in pečenja IZO črnila, ter opis optičnih meritev narejenih z Spektrofotometer Lambda 950 za celoten spekter vidne svetlobe in meritve, ki so grafično prikazane.

Ključne besede: Dimatix-DMP-2800 Series, IZO, Spektrofotometer Lambda 950, tiskana elektronika, slojno tiskanje, prevodno črnilo, transparentno črnilo.

Abstract

The primary idea for my thesis was the printing of OLEDs (organic light-emitting diodes) using Fujifilm Dimatix-DMP-2800 printer. The process would be too complex and was simplified to print the base layer of an OLED with a conductive transparent IZO (indium-zinc oxide) ink and to measure its optical and electrical characteristics.

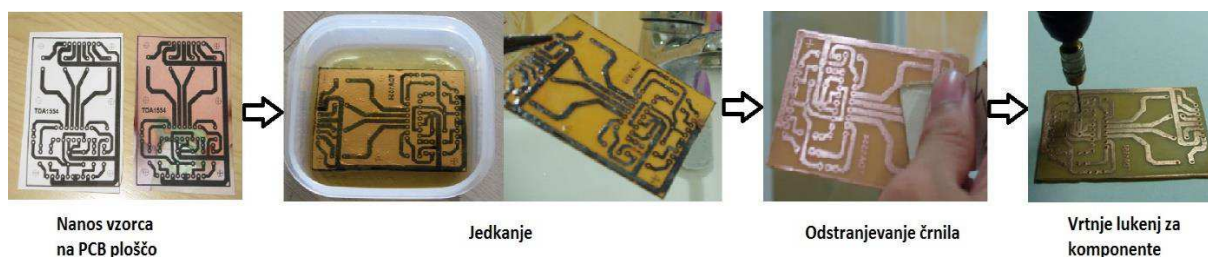
In the first part of the thesis I compare the different types of printers that have the ability to print functional layers, which serve as the basis for printed electronics.

The experimental part of the thesis consists of a description of the preparations needed before printing, the usage of the Dimatix-DMP-2800 Series printer, the printing procedure, how to dry and bake IZO ink, and the description of the process of measuring optical characteristics with the Lambda 950 spectrophotometer for the entire visible light spectrum, followed by graphically presented results.

Keywords: Dimatix-DMP-2800 Series, IZO, Spectrophotometer Lambda 950, printed electronics, layer printing, conductive ink, transparent ink.

1. Uvod

Idejo za diplomsko nalogo sem dobil pri predmetu Načrtovanje digitalnih vezij, kjer smo omenili, da je potreben več milijonski vložek za načrtovanje vezja in njegovo izdelavo, hkrati pa je postopek okolju in človeku zaradi strupenih snovi, ki so v uporabi, škodljiv in nevaren.



Slika 1.1: Poenostavljen postopek izdelave tiskanega vezja [1]

Tiskana vezja za podlago uporabljajo PCB ploščo, ki je sestavljena iz dielektrika, ki je na obeh straneh prevlečen z bakrom. Za izdelavo takega vezja moramo na obe strani plošče, na baker natisniti vzorec vezja z zaščitnim lakom, ker v naslednjem koraku ploščo jedkamo, kar odstrani bakreni premaz, kjer ga lak ne ščiti in je najbolj nevaren korak človeku in okolju. Zaščitni lak naknadno odstranimo in tako nam ostanejo na PCB plošči le povezave med komponentami, ki jih je potrebno ročno prilotati.

Zanimalo me je, ali bi bilo možno zamenjati klasičen postopek izdelave vezja in ga natisniti s tiskalnikom, ki ima možnost tiskanja s prevodnim črnilom, in ali bi s tem prihranili na času ali pa strošku izdelave. Ko sem idejo predstavil mentorju prof. dr. Marko Topiču, je predlagal, da bi poskusil natisniti OLED celico z Fujifilmovim Dimatix kapljičnim tiskalnikom DMP-2800, ki je v Laboratoriju za fotovoltaike in optoelektroniko. Izkazalo se je, da je zaradi postopka tiskanja in dobavljalnosti potrebnih črnih glede na časovno omejitev naloga prekompleksna. Zato sva jo kasneje poenostavila na kapljično tiskanje transparentnih oksidov.

Moja naloga je bila sestavljena iz več segmentov. Prvič, seznaniti se s tehnikami kapljičnega tiskanja in se naučiti uporabljati kapljični tiskalnik DMP-2800 in nato natisniti več

transparentnih kvadratnih vzorcev na steklen substrat, ki so se med seboj razlikovali po številu nanosov ter nekatere od njih zapeči in nato okarakterizirati in narediti primerjavo optične prosojnosti in električne upornosti med njimi.

2. Pregled tehnologij tiskane elektronike

2.1 Kapljično tiskanje

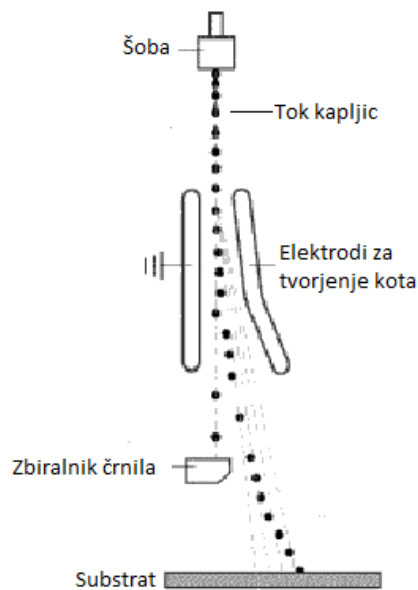
Inkjet tiskanje ali v slovenskem prevodu kapljično tiskanje deluje po principu brizganja kapljic tekoče snovi, ki mu rečemo črnilo, na poljuben substrat, da dobimo določeno sliko. Tiskalnik ni nikoli neposredno v stiku s substratom, zato lahko tiska na zelo različne površine, najpogosteje na papir, plastiko ali steklo, lahko pa ga uporabljamo tudi za tiskanje na mehke substrate, kot so tkanine ali živila, česar drugi tiskalniki ne zmorejo.

Kapljične tiskalnice delimo v dve skupini:

- CIJ (Continuous Inkjet) in
- DOD (Drop on Demand).

Pri CIJ tiskanju s pritiskom potiskamo tekočino iz rezervoarja v šobo in tako tvorimo neprekinjen tok kapljic. Šoba je izpostavljena vibracijam in tako se iz neprekinjenega curka ustvarja curek enakomernih drobnih kapljic. S takšnim postopkom lahko nastane tudi do 165 tisoč kapljic na sekundo in to s premerom do 84 mikrometrov [2].

Kapljice padajo skozi elektrostatično polje, ki ga tvorita elektrodi pod visoko napetostjo. Tako formiramo kot, ki na začetku samo loči kapljice, ki bodo uporabljene za tiskanje, od tistih, ki padejo v zbiralnik in jih nato vrnemo v rezervoar. Kapljice, ki so bile izpostavljene električnemu polju (ob priključenosti na katodi), padejo mimo drugega para elektrod, ki jih točno usmeri vzdolž določene osi, da dobimo potrebni kot.



Slika 2.1: Princip delovanja CIJ tiskalnika [3]

CIJ tiskalnike najpogosteje uporabljamo v proizvodnji, ker so izjemno hitri in lahko tiskajo na površine izdelkov na tekočem traku, ne da bi ga morali ustavljati. Primerni so tudi za živilsko industrijo, kjer je pogosto potrebno tiskanje na neravne površine s črnilom, ki živilom ni škodljivo.



Slika 2.2: Primer kapljičnega tiska na neravni površini [4]

DOD kapljični tiskalniki so v širši uporabi kot CIJ tiskalniki, ker tvorijo kapljico le, ko bo ta uporabljena, in ne potrebujejo zbiralnika za lovljenje odvečnega črnila.

Slabost DOD tiskalnikov je sušenje črnila v mirujočih šobah. Tako moramo pri DOD tiskanju redno čistiti šobe, da preprečimo sušenje.

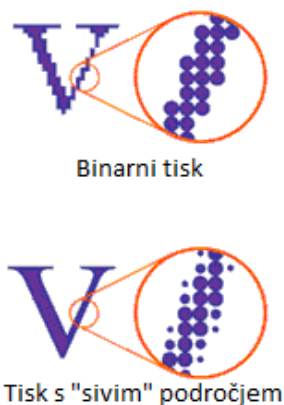
Glede na to, kako se v šobah tvorijo kapljice, se DOD tiskalniki delijo na

- termične in
- piezoelektrične.

Termični DOD tiskalnik ima pred vsako šobo grelec, ki zelo hitro segreje kapljevino do točke izhlapevanja, da nastane mehurček, ki v šobi dvigne pritisk in tako iztisne kapljico iz nje. Pri termičnem DOD tiskanju smo omejeni na določena črnila, ki reagirajo na temperaturo, medtem ko pri piezoelektričnem to ni potrebno in je izbira črnil zato širša.

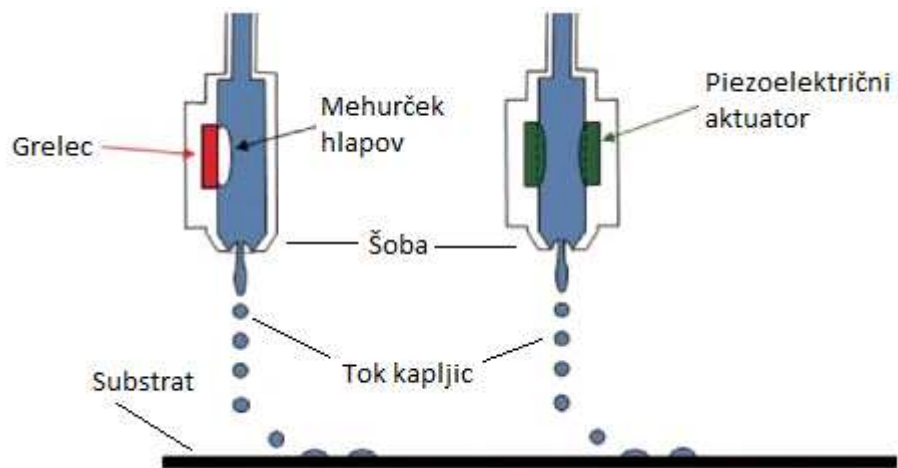
Piezoelektrični DOD tiskalnik uporablja piezoelektrično membrano v šobi, ki pod napetostjo spreminja obliko in s tem ustvarja pritisk, ki izrine kapljico iz šobe.

Prednost piezoelektričnih DOD tiskalnikov je, da so edini, ki lahko z membrano tvorijo kapljice različnih velikosti in ustvarjajo sliko s »sivim«
področjem, ne le črno-belo (binarno). S tem – zlasti pri pisavi – omogočajo lepše poševne robove.



Slika 2.3: Primer tiskanja z binarnim in s »sivim«
področjem [5]

Termični DOD tiskalniki so najcenejši med kapljičnimi tiskalniki, piezoelektrični pa imajo kompleksnejšo sestavo in so zato dražji.



Slika 2.4: Termični DOD (levo) in piezoelektrični DOD (desno) [6]

2.2 Sitotisk

Sitotisk je v široki uporabi pri tiskani elektroniki zaradi možnosti izdelave od zelo ozkih do zelo širokih elementov, spojev in vodil. Omejeni smo na približno od 75 do 100 mikrometrov.

Pri sitotisku potrebujemo napeto fino pleteno mrežo, običajno iz najlona ali še bolj finih sintetičnih materialov (odvisno od zahtevane natančnosti izdelka), vpeto v okvir, ki jo premažemo z emulzijo (s snovjo, občutljivo na svetlobo), primerno našem namenu. Dele mreže, na katerih želimo prepustnost črnila, selektivno zaščitimo s folijo v obliki šablone in nato premazano mrežo obsevamo z UV svetlobo.

Emulzijo, ki je bila izpostavljena svetlobi, zapečemo na mrežo, na zaščitenem delu pa je še vedno mehka in jo lahko speremo z vodo. S tem postopkom dobimo šablono, ki jo položimo na substrat ter jo premažemo s črnilom in ga nato z obsevanjem posušimo. Šablone so za večkratno uporabo in zato je sitotisk primeren za manjšo proizvodnjo.

Za eno vezje lahko potrebujemo več šablon z različnimi vzorci, če ima ta sloje, ki si niso enaki po obliki.



Slika 2.5: Primer treh različnih šablon za nastanek enega vezja [7]

Nanos plasti je večinoma ročen, zato je izbor črnil zelo velik. S sitotiskom lahko na različnih substratih večplastno izdelujemo elektroniko za različne namene, kot so kondenzatorji, navitja, antene, diode, tranzistorji, naprave z elektroluminiscenco in bio senzorji.

Če imamo na voljo nekaj osnovnih podatkov o mreži, ki jo uporabljamo, in o izbranem črnilu, lahko izračunamo teoretično debelino tiska.

2.3 Rotacijski globoki tisk (gravura)

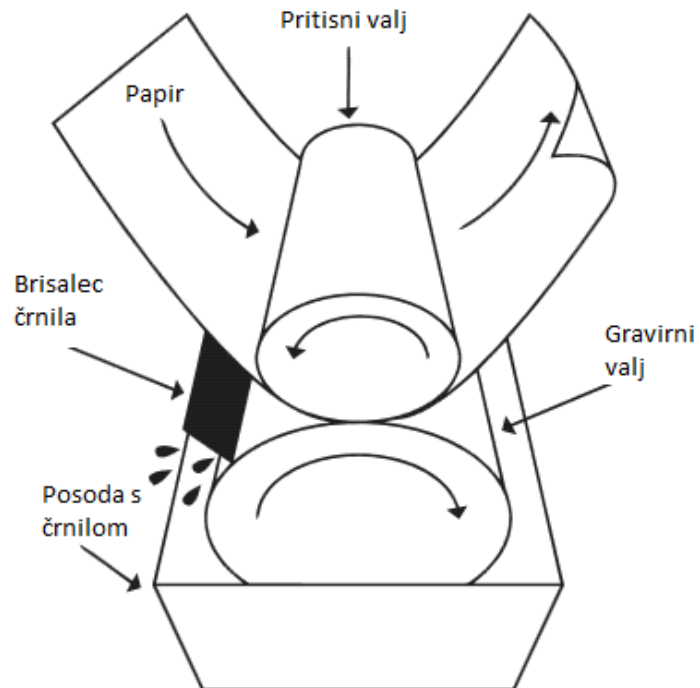
Rotacijski globoki tisk je zaradi zelo hitre izdelave (več metrov v sekundi) in relativno velike natančnosti (do 20 mikrometrov) v teoriji idealna metoda za komercialno izdelavo tiskane elektronike, vendar pa smo pri izbiri substrata omejeni večinoma na mehke in pregibne materiale (papir, plastična folija, tkanina).

Največja pomanjkljivost rotacijskega globokega tiska je, da v tiskani elektroniki za pravilno delovanje pogosto potrebujemo ravne in ozke (tudi do 20 mikronov) vodnike. Če v gravirani valj po celotnem obsegu zarezemo kanal, bo črnilo, preden ga odtisnemo, formiralo kapljice znotraj kanala, kar se bo na substratu poznalo kot nazobčana črta ali pa kot nestikajoče se kapljice, ki posledično ne prevajajo električnega toka. Če v valj zarezemo tanek kanal po širini, pa pride do razmaza črte na substratu.

Najboljše rezultate dosežemo s črnili z visoko gostoto, velikim pritiskom valja na substrat in nizko hitrostjo tiskanja.

Naprava za rotacijski globoki tisk je sestavljena iz valja – navadno iz jekla, prevlečenega z bakrom –, ki ima na površju z laserjem vrezano ali z jedkanjem vgravirano podobo, ki jo želimo natisniti. Globina vrezanih celic vpliva na količino črnila, ki ga bomo nanesli na substrat. Gravirani valj je deloma potopljen v posodo s črnilom, ki se med rotacijo usede v vrezane celice. V naslednjem koraku valj po površini obrišemo, da črnilo ostane samo v reliefu. Substrat, na katerega selektivno nanašamo črnilo, je stisnjen med gravirani in pritisni valj in tako nanj odtisnemo želeno podobo.

Pri večplastni tiskani elektroniki, ki ima plasti iz različnih snovi, potrebujemo za vsako njeno plast oziroma nadaljnji nanos nov gravirani valj in črnilo.



Slika 2.6: Princip delovanja rotacijskega tiskanja (rotogravura) [8]

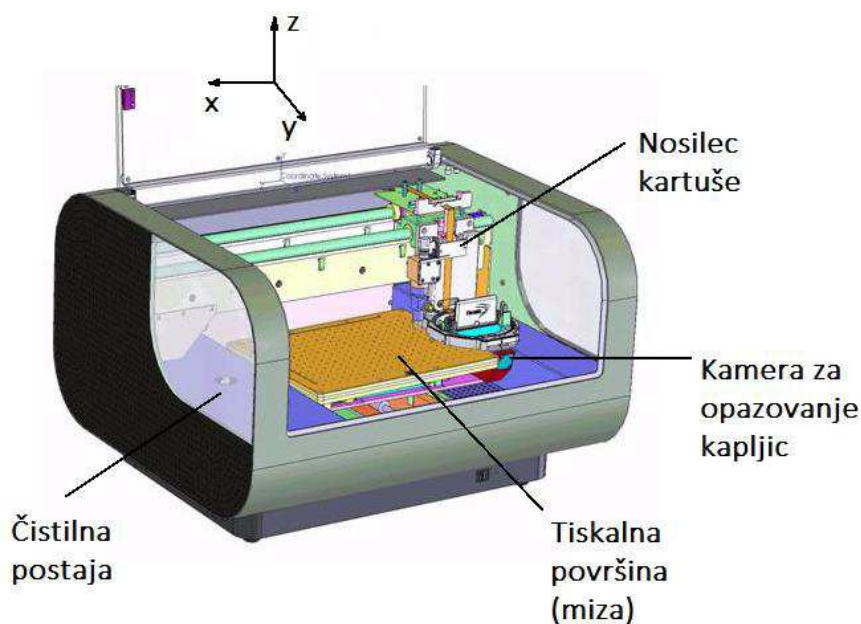
3. Kapljični tiskalnik Fuji Dimatix DMP-2800

3.1 Opis sestavnih delov in zagon

Fujifilm Dimatix DMP-2800 je namizni industrijski kapljični tiskalnik visoke resolucije, ki ga odlikuje piezoelektrična DoD tiskalna glava z možnostjo tiskanja na poljuben substrat velikosti 20 x 30 cm do debeline 2,5 cm.

3.1.1 Postopek zagona

Dimatix DMP-2800 kapljični tiskalnik vklopimo s stikalom na sprednji strani, upravljamo pa ga s programom Dimatix Drop Manager na osebnem računalniku. Ob vklopu najprej dobimo poziv, da preverimo, ali je površina tiskalne mize prazna, da se lahko glava tiskalnika prosto premika nad njeno površino med kalibracijo, ki sledi vklopu tiskalnika in traja nekaj minut.

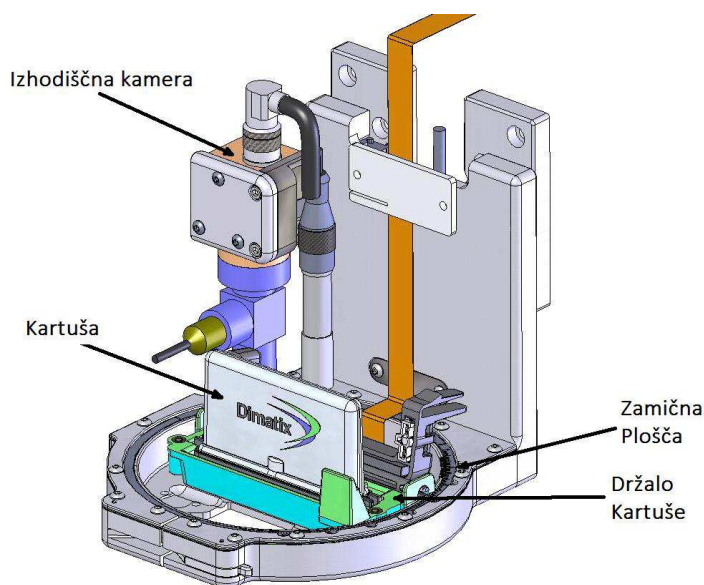


Slika 3.1: Slika tiskalnika Fujifilm Dimatix DMP-2800 Series [9]

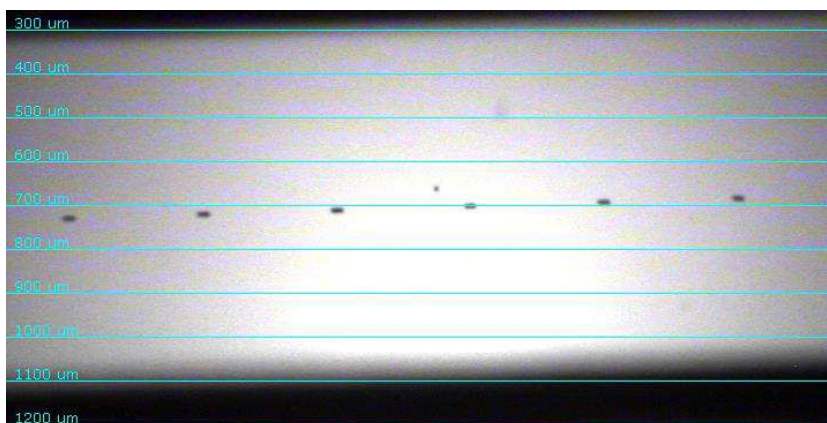
Po kalibraciji na levi strani tiskalnika vstavimo kartušo in čistilno glavo, na kateri se šobe kartuše periodično čistijo, kot predhodno določimo. Kartuša, ki jo moramo napolniti pred vstavitvijo, ima 16 šob premera 21,5 mikronov in kapaciteto 1,5 mililitra. Napolnimo jo s

poljubno tekočino – črnilom, ki mora biti dovolj tekoče (med 2 in 30 cp [10]) in ne sme biti korozivno, da ne bi reagiralo z ohišjem kartuše iz epoksija ali s silicijevimi piezo šobami.

Črnilo vedno zajemamo z injekcijo, na katero pred iztiskom nastavimo filter z 20 mikroni prepustnosti, in črnilo prefiltriramo v čisto posodo. Iz nje ga ponovno zajemamo z novo injekcijo z iglo, s katero napolnimo rezervoar kartuše in ga nato sestavimo z glavo, na kateri so šobe.



Slika 3.2: Tiskalna glava in kartuša [11]

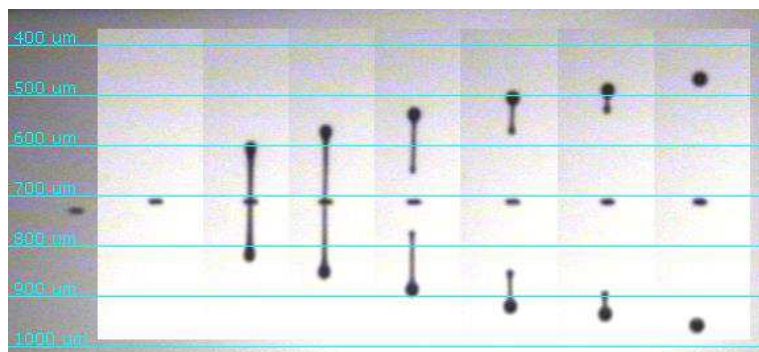


Slika 3.3: Slika šob na kartuši zajeta s kamero za opazovanje kapljic

3.1.2 Postopek tiskanja

Na tiskalno mizo položimo substrat (maksimalne debeline 25 mm) in na njem prek pozicijske kamere z opcijo "set print origin" nastavimo zgornjo levo točko izbranega vzorca. Z opcijo "print pattern" definiramo preproste vzorce, ki jih je mogoče opisati s točkami v dvodimenzionalnem koordinatnem sistemu tako, da določimo začetno točko vzorca z zamikom, če želimo, ter njegovo širino in višino. Omejeni smo na pravokotna telesa, črte in točke (posamezne kapljice). Za večje ali bolj zapletene vzorce je mogoč tudi uvoz slike v binarnem (črno-belem) bitmap formatu. Pri koraku izbiranja vzorca določimo tudi razmak med kapljicami oziroma gostoto tiska, kar vpliva na debelino nanosa, ki pa je odvisna tudi od lastnosti črnila. Tiskamo lahko z več zaporednimi šobami hkrati, pri čemer je pomemben kot kartuše glede na x os, po kateri potuje glava kartuše, s katerim vplivamo na razmak kapljic na y osi. Kot kartuše nam program avtomatično izračuna glede na izbrani razmak med kapljicami, na tiskalni glavi pa ga moramo spremeniti mehansko.

Z opcijo "drop watcher", ki aktivira kamero za opazovanje kapljic, podrobno vidimo, kako delujejo šobe; ali so zamašene, kako se formirajo kapljice in ali jih šobe brizgajo naravnost navzdol. S to opcijo si pomagamo pri nastavitvi krmilne napetosti na šobah, da črnilo lepo iztisnejo v eno samo kapljico brez »satelitov« in hkrati vizualno določimo, na kakšni razdalji se kapljica pravilno oblikuje. Če je napetost na šobah premajhna, kapljico slabo iztisnejo in del nje ostane v odprtini šobe. Pri preveliki napetosti se lahko primarna kapljica odtrga od repa (ga ne potegne za seboj) in tako na substrat padeta glavna kaplja in njen manjši del – satelit. Višina, na kateri se kapljica lepo oblikuje, je idealna razdalja med šobo in substratom. Če je višina prevelika, se začne kapljica ustavljati zaradi zračnega upora in lahko malenkostno odjadra od ciljne točke na substratu; v tem primeru je tisk manj natančen. Če je razdalja premajhna, pa se kapljica razmaže. To se zgodi, če se kapljica pred stikom s substratom še ne poveže z repom.



Slika 3.4: Iztisk kapljice iz šobe po korakih in kako se tvori

4. Izdelava in karakterizacija plasti transparentnega oksida

Po uspešno opravljenem urjenju za upravljanje s tiskalnikom DMP-2800 sem se lotil postopka izdelave in karakterizacije tankih plasti transparentnega indij cink oksida (IZO) na steklu, katerega raztopino smo dobili z Odseka za elektronsko keramiko, IJS.

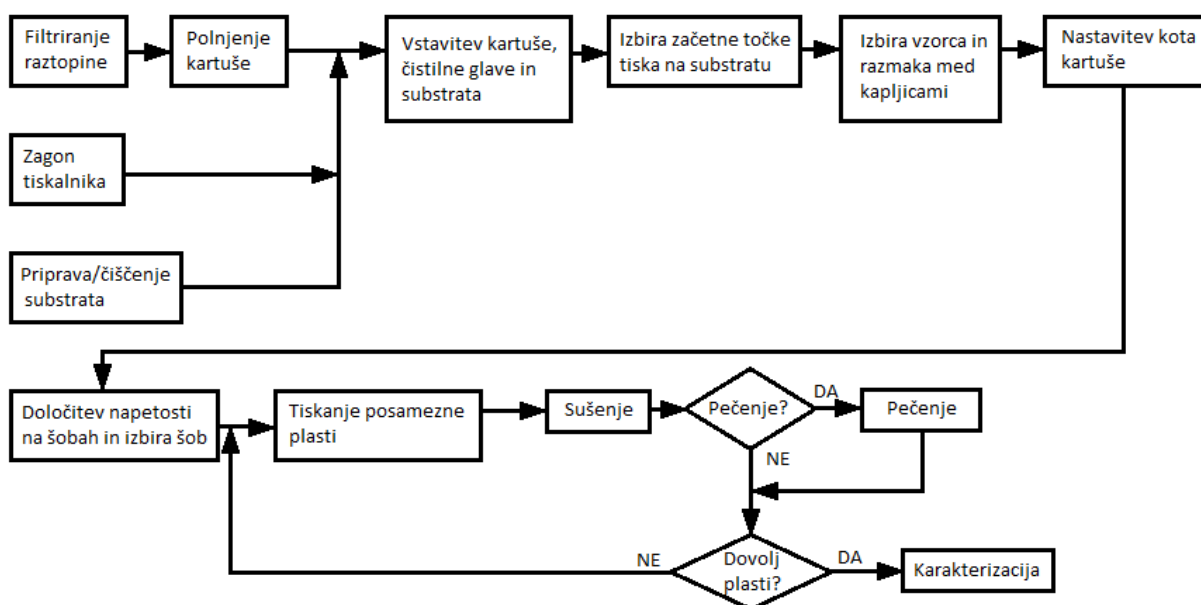
4.1 Priprava substrata na tiskanje

Največja težava pri tiskanju z Dimatix tiskalnikom in z dano IZO raztopino je čistoča stekla in njegovo omakanje. Laboratorijsko steklo, namenjeno tiskanju, je predhodno potrebno očistiti z brezvlakensko krpo in alkoholom (99,9-odstotnim isopropanolom). Nato ga namočimo v čašo z enakim alkoholom ter jo za 5 minut položimo v sonično kopel in steklo splaknemo z alkoholom. Po enakem postopku steklo očistimo še enkrat, vendar tokrat namesto alkohola uporabimo destilirano vodo, ki ji dodamo od 5 do 10 odstotkov alkalnega čistila za laboratorijsko steklo in pribor. V zadnjem koraku čiščenja steklo splaknemo z destilirano vodo in ga še zadnjič položimo v sonično kopel z destilirano vodo ter hitro osušimo s kompresiranim zrakom. Kljub temeljitosti in včasih tudi po ponovitvi postopka čiščenja, so pri omakanju stekla nastopile težave, kar je razvidno iz valovitosti robov natisnjenih struktur.

4.2 Opis izdelave

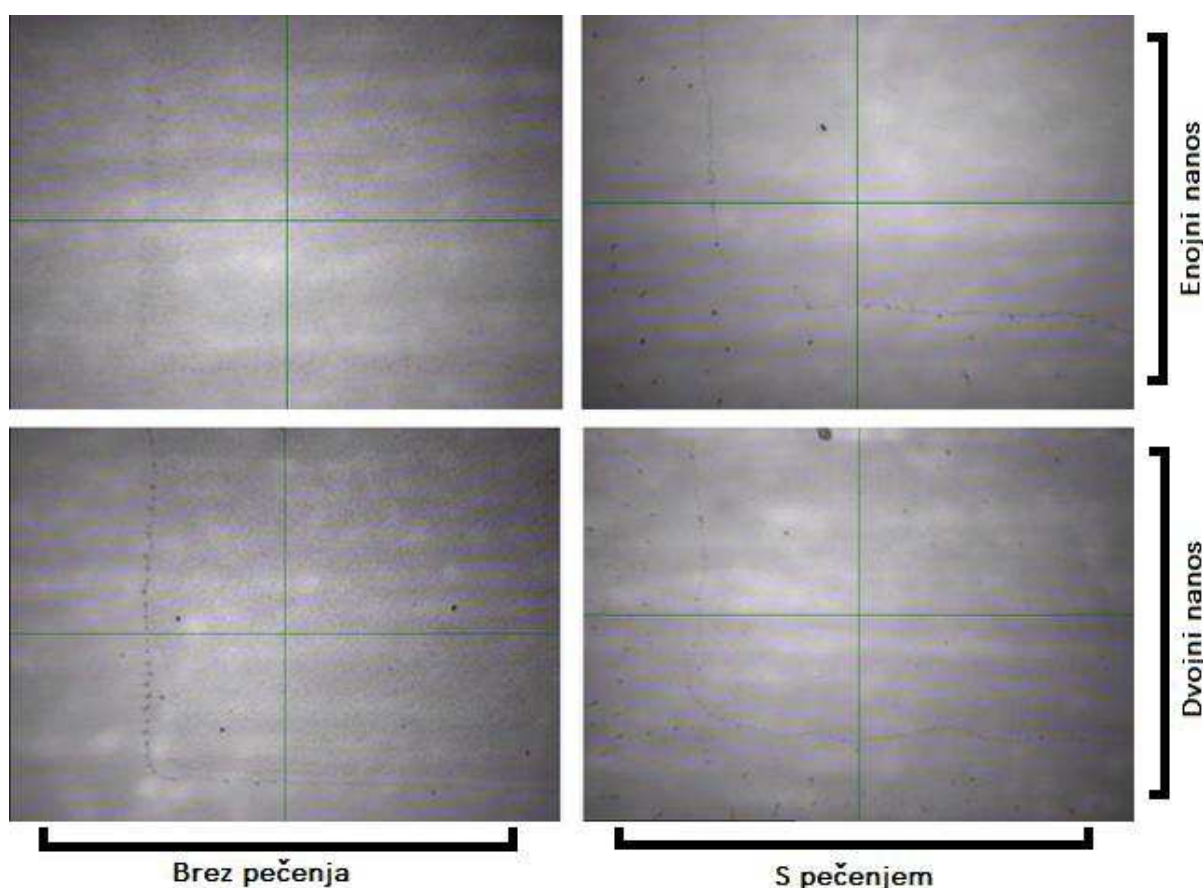
Za tiskanje sem uporabljal raztopino indij cinkovega oksida (IZO), in sicer v razmerju indij cink 4:1 v raztopini s koncentracijo 0,5 mol. Zaradi težav z mašenjem je bila za vse tiske naenkrat uporabljena samo ena šoba, kar je za eksperimentalno tiskanje nadvse primerno; tako pri slabem tisku omejimo iskanje napake le na eno šobo in nam ni treba preverjati vseh, da bi ugotovili, katera je med tiskom razvila napako. V proizvodnji pa bi bilo tiskanje z eno šobo seveda preveč zamudno. Za eno plast kvadrata s centimetersko stranico (1 cm x 1 cm) in z razdaljo med kapljicami 35 mikronov, mora kartuša 286-krat potovati čez substrat in nazaj, za kar potrebuje Dimatix tiskalnik nekaj več kot 7 minut. Ta čas bi bil 16-krat krajši, če bi tiskali z vsemi 16 šobami hkrati.

Najboljšo kvaliteto tiska sem dobil pri napetosti 22,5 volta na šobi. Napetost na šobi v največji meri vpliva na hitrost iztisnjene kapljice in posledično na višino, na kateri se ta lepo oblikuje – pri mojem poskusu je bila ta višina približno 250 mikronov. Natisnjene strukture je glede možnosti napak mogoče pregledati prek pozicijske kamere z ločljivostjo 2,54 mikrona.



Slika 4.1: Shematski pregled poteka izdelave

Natisnil sem pet kvadratnih vzorcev velikosti enega centimetra z različnim številom nanosov in nekatere od njih zapekel oz. temperaturno obdelal. Med posameznimi nanosi sem strukture 20 minut sušil pri 70°C. Strukture, ki so bile po končanem tiskanju zapečene, so bile 30 minut izpostavljene temperaturi 400°C. Spodnje slike so zajete z Dimatixovo pozicijsko kamero, ki nam omogoča podroben ogled substrata in tiska. Zajete slike s širino 1600 mikronov in višino 1200 mikronov prikazujejo le približno 9 odstotkov celotne strukture. Ker je črnilo prozorno, so strukture slabo vidne, zato za boljšo predstavbo navajam, da je na vseh slikah zajet spodnji levi kot vzorca, ki je v sredini spodnjega levega kvadranta.

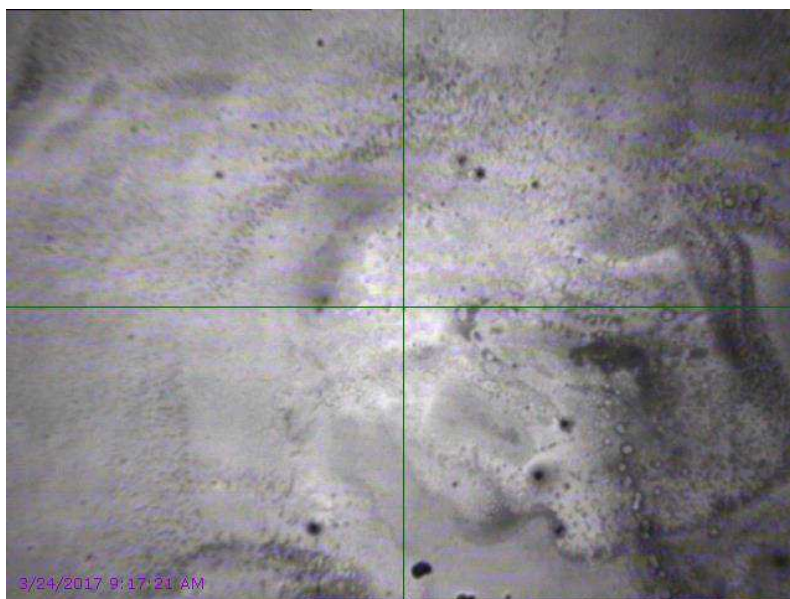


Slika 4.2: Površine tiskov in substratov zajetih z pozicijsko kamero

Na sliki 4.2 sta v zgornji vrstici strukturi z enojnim nanosom, v spodnji pa strukturi z dvojnimi nanosom. Strukturi na desni strani slike sta bili tudi zapečeni.

Če primerjamo levi in desni par slik, že s prostim očesom vidimo, da so zapečene strukture nekoliko bolj prosojne v primerjavi z nepečenim parom na levi, katerega površini sta videti nekoliko motno. S pečenjem se prosojnost izboljša, ker indij cinkov oksid pri temperaturah nad 400°C začne kristalizirati in veže nase kisik, kar vzorcu izboljša optične lastnosti.

Na sliki 12 (spodaj) je struktura z desetkratnim nanosom, ki je zaradi težav s tiskanjem in čistočo okolja po celotni površini lisasta, kar je vidno tudi s prostim očesom. Vsak sloj je bil pred naslednjim tiskom posušen pri 70°C in po desetem nanosu zapečen.



Slika 4.3: Površina deset plastnega tiska

4.3 Optične lastnosti

Optične lastnosti sem izmeril z spektrometrom Perkin Elmer Lambda 950, ki je prikazan na sliki 4.4, in za svetlobni vir uporablja volframovo žarnico. Opravi sem meritve prepustnosti (transmisije) in odbojnosti (refleksije) svetlobe posameznega vzorca na valovnih dolžinah svetlobe od 300 do 860 nanometrov s korakom 10 nanometrov, kar zajema nekaj več kot celoten spekter vidne svetlobe.

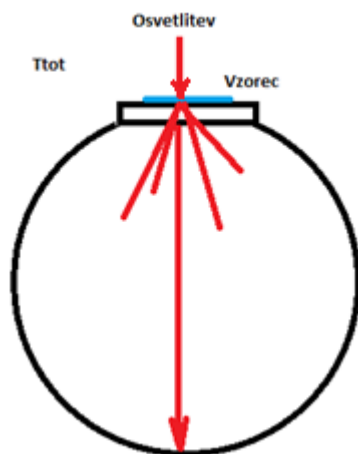


Slika 4.4 Spektrofotometer Perkin Elmer Lambda 950 (levo) in notranjost merilne sfere s senzorjem svetlobe (desno)

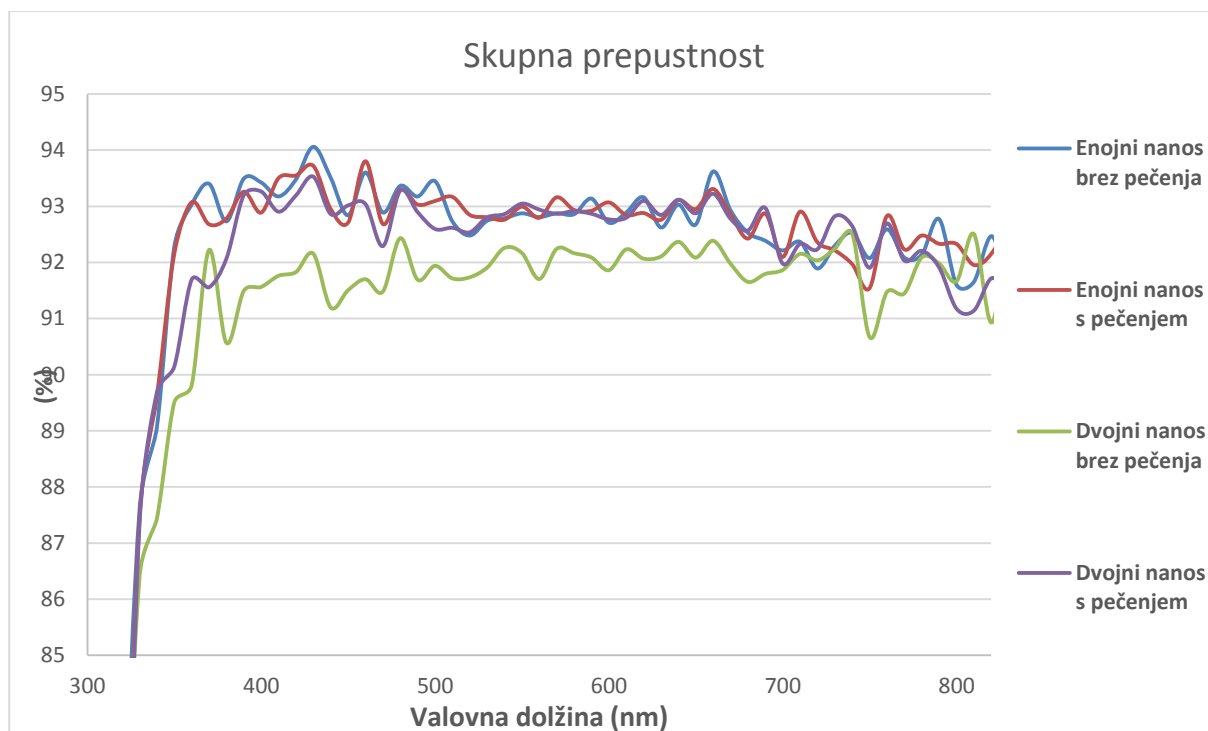
4.3.1 Prepustnost svetlobe

Prepustnost izmerimo tako, da vzorec obsvetimo z žarkom svetlobe in na drugi strani merimo svetlobo, ki jo preseva. Meritve prepustnosti izvedemo na dva načina.

Prvič merimo skupno prepustnost vzorca (slika 4.5), torej celotno svetlobo, ki jo vzorec prepusti v notranjost zaprte sfere, v kateri je fotodetektor.

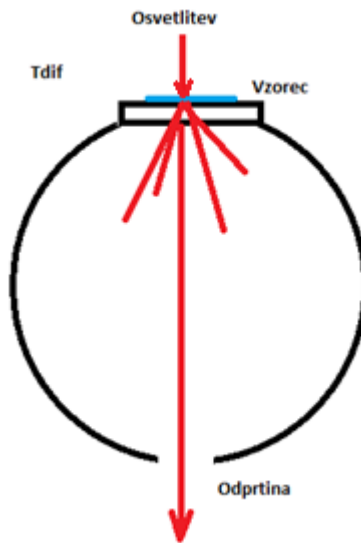


Slika 4.5: Skica postopka meritve skupne prepustnosti tiska

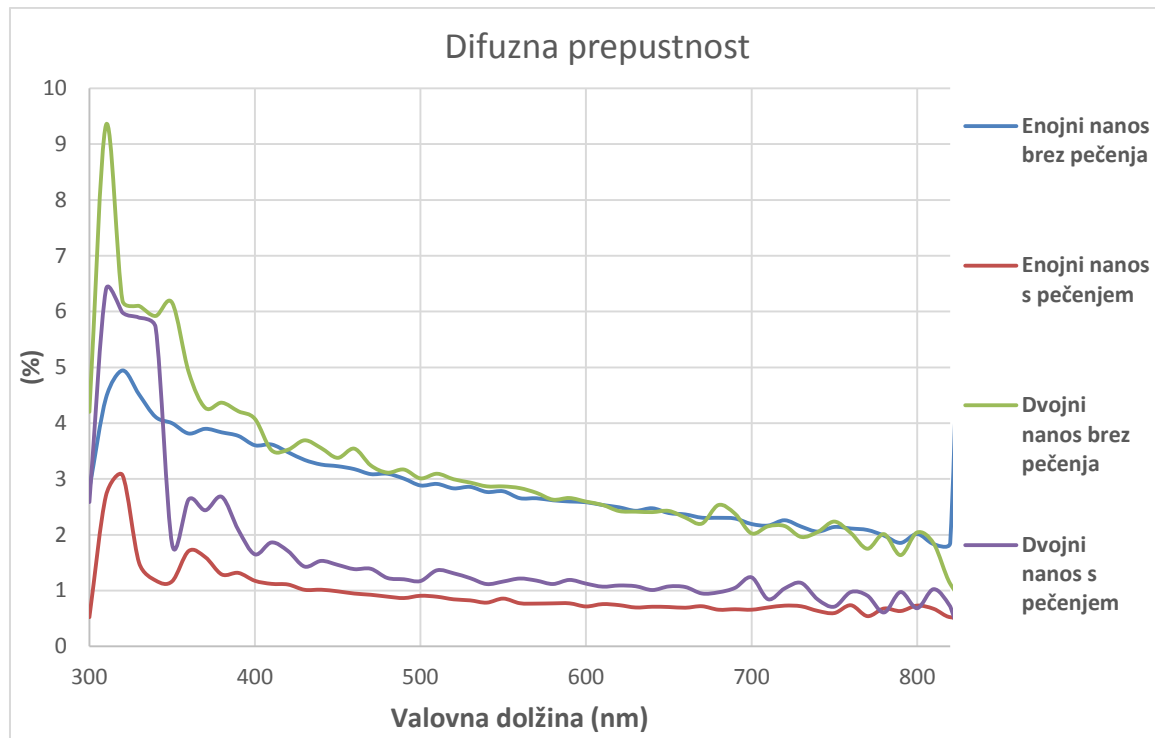


Slika 4.6: Rezultati meritve skupne prepustnosti

Drugič merimo difuzno prepustnost (slika 4.7). To je svetloba, ki jo vzorec prepusti v notranjost sfere z odprtino na nasprotni strani vstopa svetlobe in vzorca, tako da zaznavamo samo svetlobo, ki jo vzorec prepusti pod kotom, saj glavni žarek uide skozi odprtino v sferi in ne zadene svetlobnega zaznavala. Rezultate vrednotimo v odstotkih.



Slika 4.7: Skica postopka meritve difuzne prepustnosti vzorca

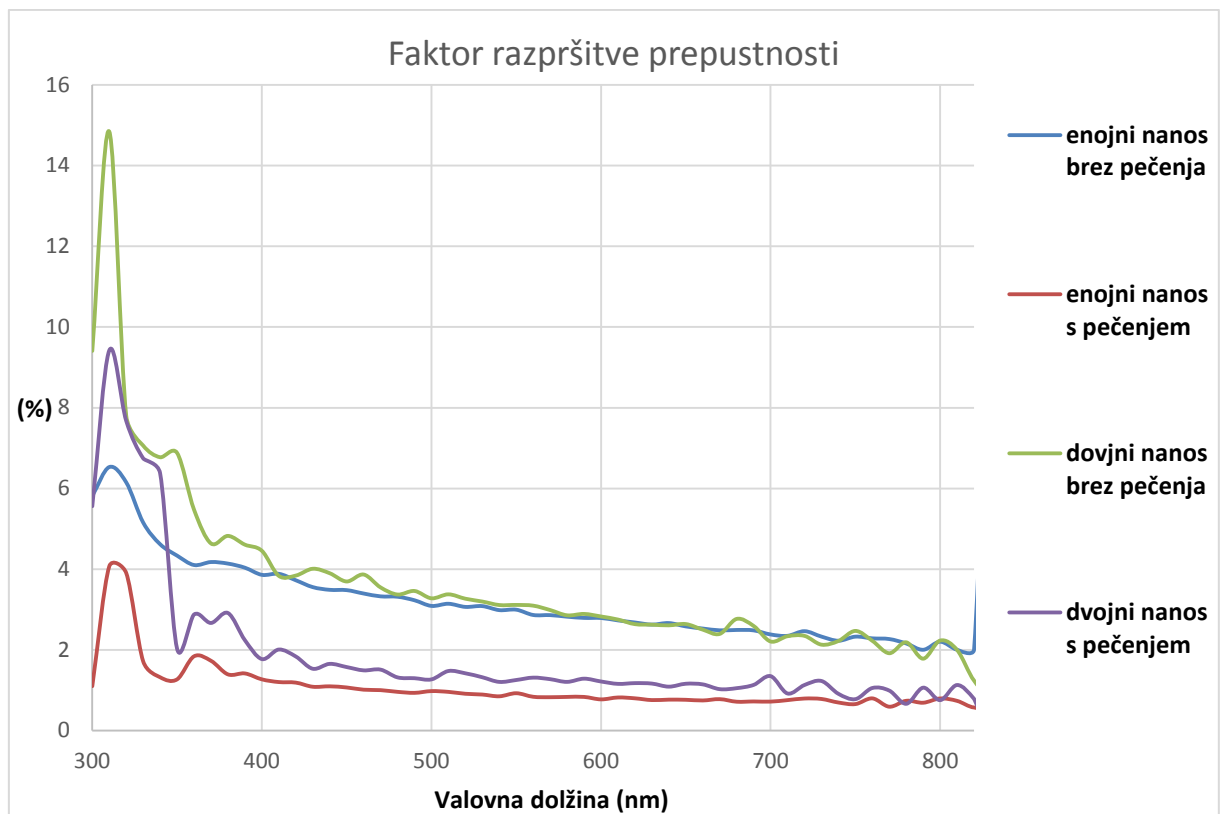


Slika 4.8: Rezultati meritve difuzne prepustnosti

Iz meritev nato izračunamo faktor razpršitve prepustnosti s formulo 4.1.

$$H_T(\lambda) = \frac{T_{dif}(\lambda)}{T_{tot}(\lambda)}$$

Formula 4.1: Faktor razpršitve prepustnosti [12]

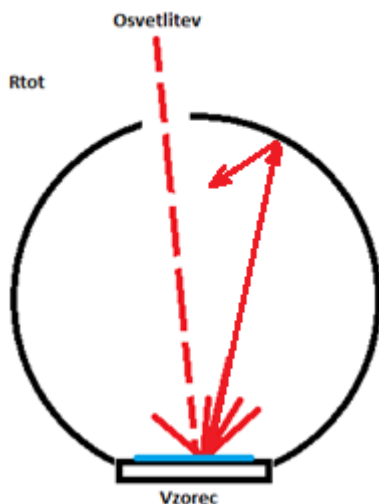


Slika 4.9: Primerjava faktorjev razpršitve prepustnosti med izdelanimi vzorci

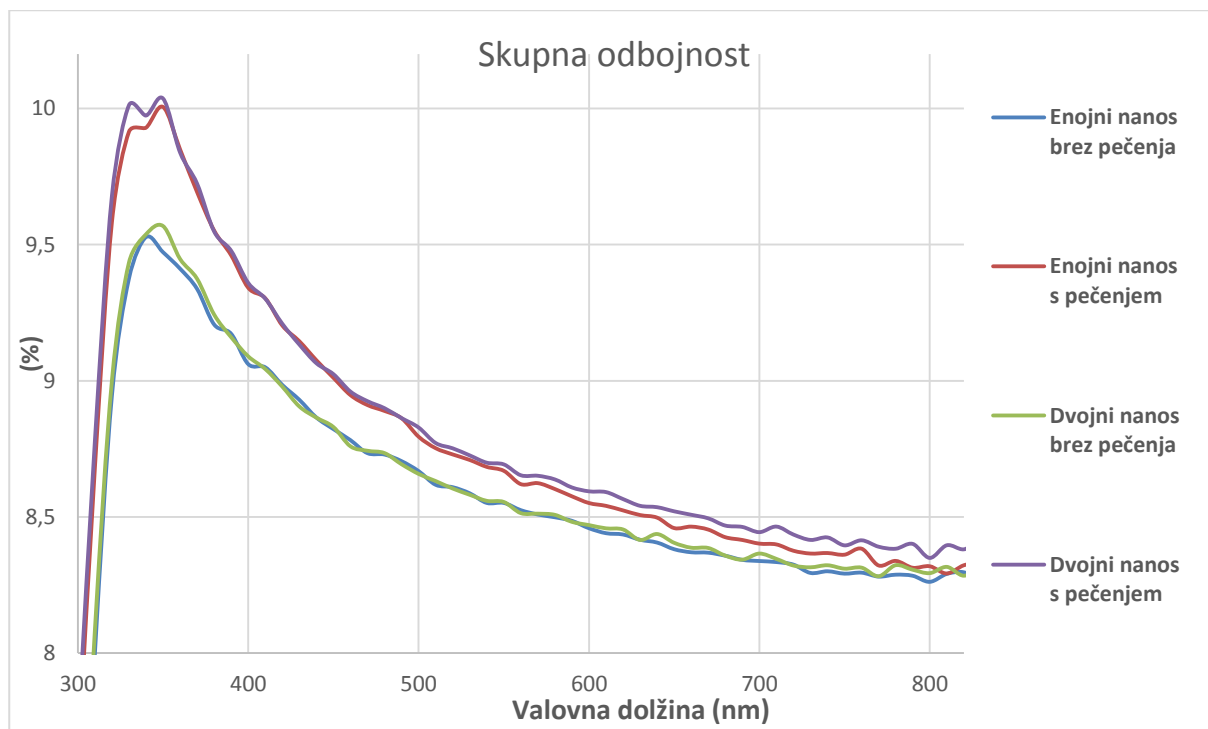
Na sliki 4.9 so prikazane izračunane vrednosti faktorja razpršitve prepustnosti. Ugotovimo, da pečenje IZO črnila skoraj razpolovi faktor razpršitve. Če primerjamo vzorce z različnim številom tiskov, pa opazimo, da ima dodaten sloj največji vpliv na faktor razpršitve pri nizkih valovnih dolžinah – v UV območju.

4.3.2 Odbojnost svetlobe

Tudi odbojnost vzorcev merimo v dveh podobnih korakih, vendar nas tokrat zanima svetloba, ki jo vzorec odbije. Vzorec je pri teh meritvah nastavljen na koncu merilne sfere z detektorjem, tako pri totalnem odboju (R_{tot}) zaznavamo svetlobo, ki jo odbije nazaj v sfero.

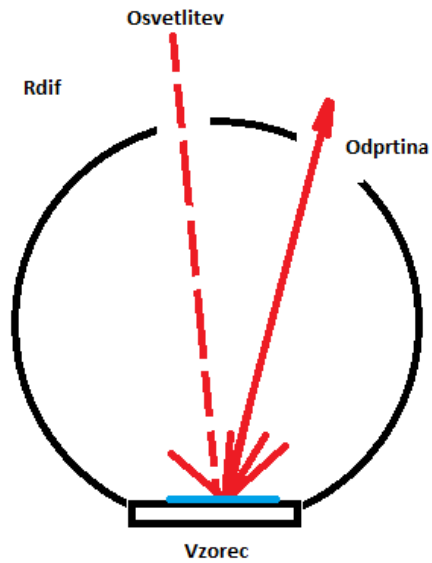


Slika 4.10: Skica postopka meritve skupne odbojnosti vzorca

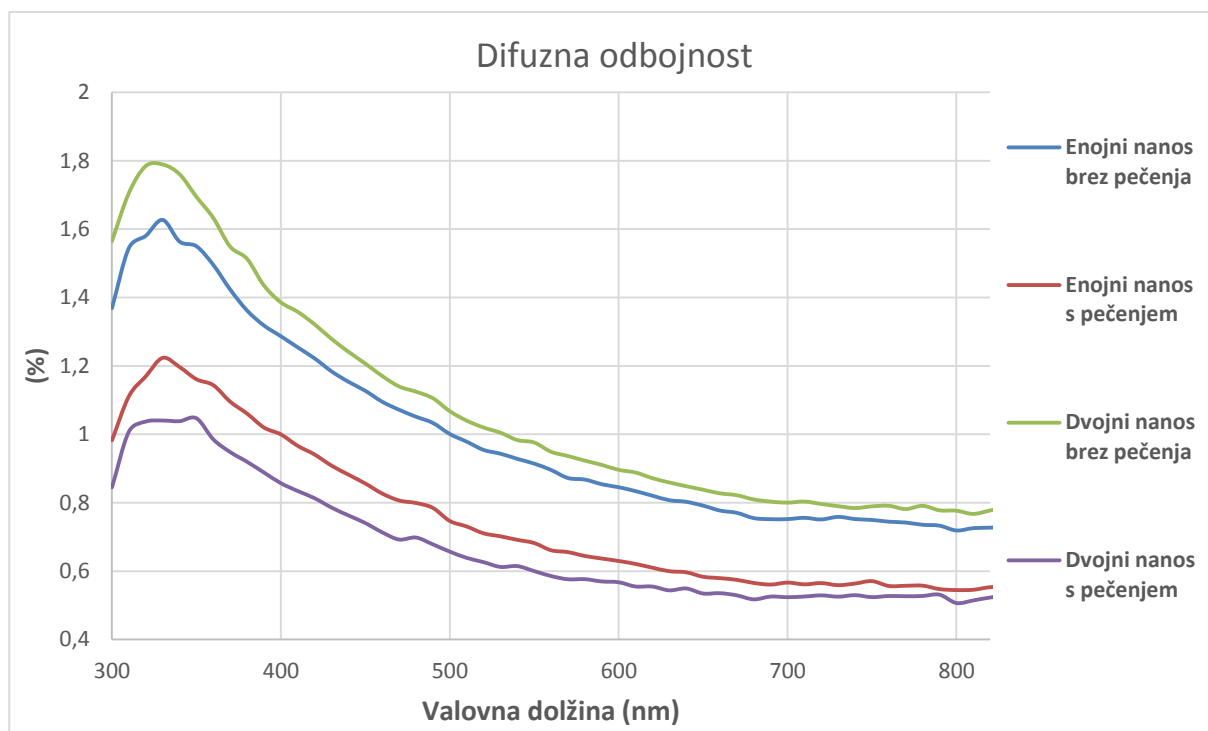


Slika 4.11: Rezultati meritev skupne odbojnosti

Pri difuzijski refleksiji (R_{dif}) glavni odboj spustimo iz sfere skozi odprtino in merimo svetlobo, ki se odbije pod ostalimi koti.



Slika 4.12: Skica postopka meritve difuzne odbojnosti vzorca

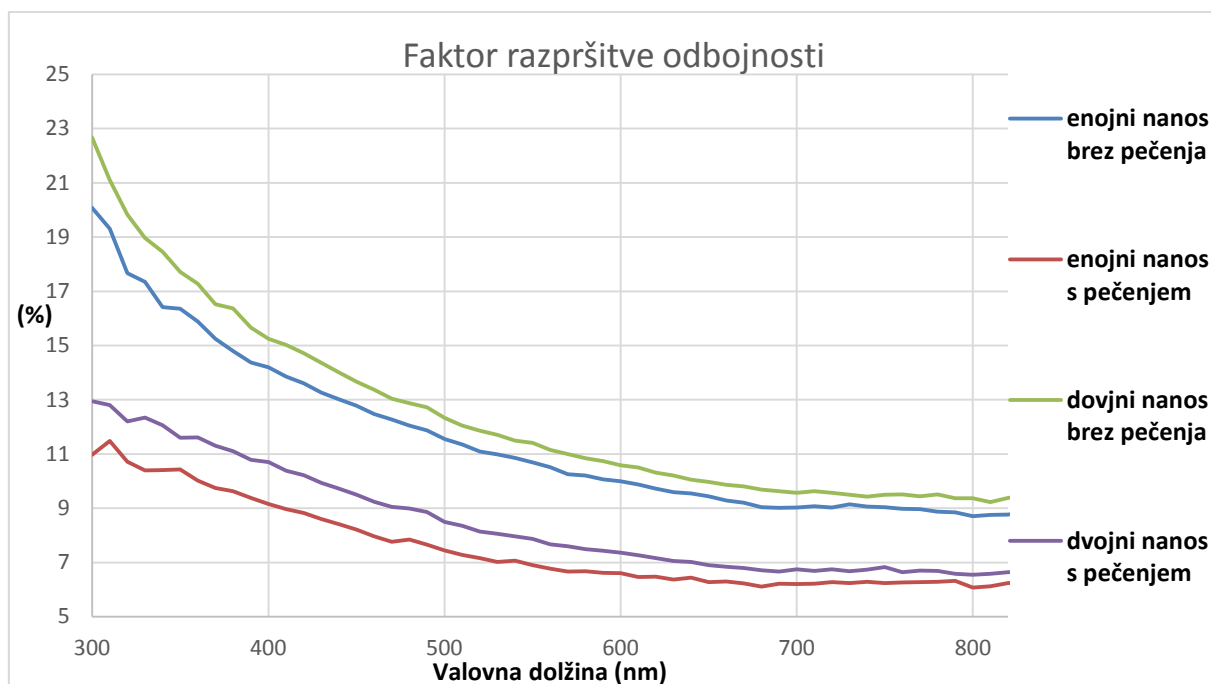


Slika 4.13: Rezultati meritev difuzne odbojnosti

Dobljene rezultate izračunamo s formulo za faktor razpršitve odbojnosti

$$H_R(\lambda) = \frac{R_{dif}(\lambda)}{R_{tot}(\lambda)}$$

Formula 4.2: Faktor razpršitve odbojnosti [13]



Slika 4.14: Primerjava faktorjev razpršitve odbojnosti med izdelanimi vzorci

Iz grafa zgoraj (Slika 4.14) vidimo, da se z dodatnimi nanosi faktor razpršitve odbojnosti povečuje in je najvišji pri nizkih valovnih dolžinah, s pečenjem pa se spet nekoliko zmanjša.

Določitev kompleksnega lomnega količnika iz izmerjenih tankih plasti IZO na steklenem substratu s programom NIKA [A. Čampa, doktorska disertacija] ni bila mogoča zaradi pretankih nanosov, ki imajo optične lastnosti preveč podobne steklu.

Prevodnost črnila sem probal izmeriti z ohm metrom na največjem merilnem območju, ki je 100 mega ohmov. Zaradi zelo tankega nanosa in majhne koncentracije natisnjena struktura ne prevaja oziroma ima tudi pri desetkratnem nanosu upornost večjo kot 100 mega ohmov tudi če sta sponki ohm metra le milimeter narazen.

5. Zaključek

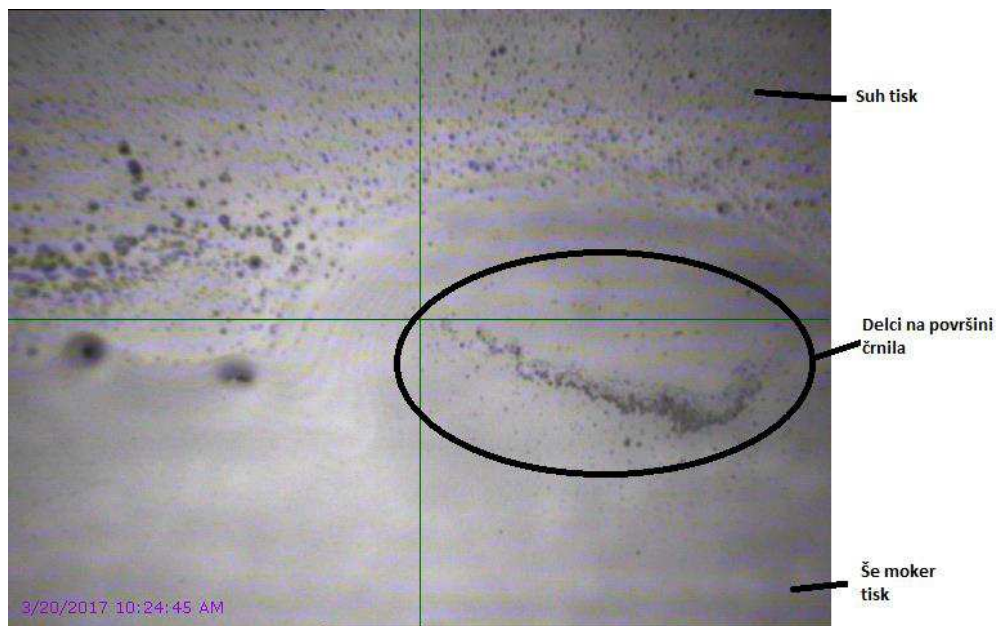
V diplomski nalogi sem podal pregled tehnologij tiskane elektronike. Preučil sem koncepte kapljičnih tiskalnikov in opisal lastnosti kapljičnega tiskalnika Fujifilm Dimatix DMP-2800 ter postopek tiskanja. Podrobno sem opisal postopek izdelave tankih plasti transparentnega indij cink oksida na steklu in se pri karakterizaciji osredotočil na optično prepustnost in odbojnost ter njuna faktorja razpršitve za vse izdelane vzorce.

5.1 Izboljšanje tiska

Največjo težavo pri tiskanju z Dimatix tiskalnikom predstavlja čistoča okolja. Tiskalnik skozi odprtino na sprednji strani sesa zrak iz okolja, kar povzroča tudi gibanje zraka znotraj zaprtega pokrova. Če primerjamo steklo, ki je bilo predhodno očiščeno, pred tiskom in po njem, opazimo očitno razliko v številu delcev na njegovi površini. Pri pečenju ali sušenju nekoliko umazanega stekla je razlika še bolj opazna.

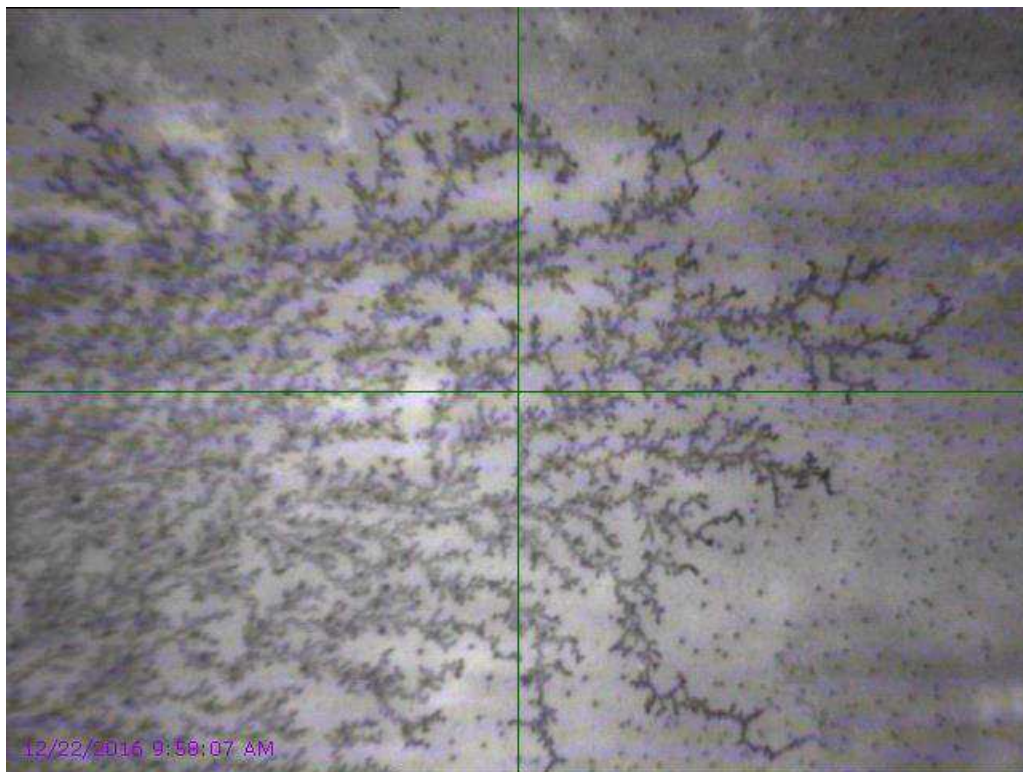
Prvi nanosi so po preizkušenem in preverjenem postopku imeli že zelo veliko uspešnost tiskanja; vzorci so bili videti homogeni in brez napak. Vsak naslednji nanos pa je imel vedno slabšo kvaliteto, razvil je napake in na vzorcu so nastajale lise.

Z Dimatixovo funkcijo ogrevanja tiskalne površine lahko opazujemo tvorjenje lis v dogajanju. Tiskalno mizo sem segrel na 60°C, kar je najvišja mogoča temperatura in podobna sušilni. Steklo, na katerega sem tiskal, je bilo namenoma površno očiščeno, da je pojav bolj opazen. Vzorec se suši že med tiskanjem, po končanem procesu tiskanja pa ga lahko opazujemo s pozicijsko kamero. Opazimo, da črnilo, ki se suši od zunanjih robov proti sredini, nosi s seboj vse nepravilnosti, ki so prišle v stik z njegovo še mokro površino (jih ne odlaga).



Slika 4.15: Izgled vzorca med sušenjem

Na zgornji sliki (slika 4.15) vidimo mejo med suhim in svežim tiskom. Z mokrim robom potujejo vsi delci, ki so na površini črnila, dokler se ne posuši v zadnji kaplji in za njo na tisku ostane lisa. Poleg slabše kvalitete tiska to povzroča tudi težave pri naslednjem nanosu. Poskusil sem bolj počasno sušenje ob pričakovanju, da bodo delci ostali razkropljeni po celotnem vzorcu, vendar se po enodnevnem sušenju razvijejo na površini razpoke, hkrati pa je večja tudi možnost usedanja dodatnega prahu na vzorec.



Slika 4.16: Razpoke na tisku, ki se je sušil pri sobni temperaturi

Če primerjamo končne rezultate hitrega in počasnega sušenja, ugotovimo, da je hitro sušenje v prednosti, za visoko kvaliteto tiska pa bi morali zagotoviti neoporečno čistočo tiskalnikovega okolja.

6. Reference

- [1] Slika sestavljena iz slik »FUKNZU3GS3BCJTX.MEDIUM.jpg (JPEG Image, 620 x 465)
FAL0Q0HGS4EIZ6V.MEDIUM.jpg (JPEG Image, 620 x 465)
FIDZ8BJGS3BD4K4.MEDIUM.jpg (JPEG Image, 620 x 465)
FU990P1GS4EIZWA.MEDIUM.jpg (JPEG Image, 620 x 465)
FWARGW4GS4EIZUN.MEDIUM.jpg (JPEG Image, 620 x 465).« [online] Available:
<http://www.instructables.com/id/Making-A-Customized-Circuit-Board-Made-Easy/>
[accessed: 17-jun-2017].
- [2] »Physics of an Ink-Jet Printer« [online] Available:
http://spiff.rit.edu/classes/phys213/lectures/inkjet/inkjet_long.html [accessed: 17-jun-2017].
- [3] Povzeta slika [online] Available: <https://dsi-printer.co.id/category/cij-products/> [accessed: 15-apr-2017].
- [4] »CIJ_Egg_300.jpg (JPEG Image, 191 x 150) [online] Available:
<http://www.labelingnews.com/2014/10/citronix-inkjet-coding-for-the-food-industry/>
[accessed: 17-jun-2017].
- [5] Povzeta slika [online] Available: <http://www.impika.com/index.php?id=lejetdencredod>
[accessed: 13-maj-2017].
- [6] Povzeta slika »r011-eng-15014-bd-fig3.jpg (JPEG Image, 220 x 128)« [online] Available:
<http://engineering.org.cn/EN/10.15302/J-ENG-2015014#FigureTableTab> [accessed: 17-jun-2017].
- [7] »pcb_serigrafia_09p.jpg (JPEG Image, 300 x 212)« [online] Available:
http://construyasuvideorockola.com/fabricacion_impresos_03.php [accessed: 17-jun-2017].
- [8] Povzeta slika »220px-Rotogravure_PrintUnit.svg.png (PNG Image, 220 x 254)« [online]
Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rotogravure> [accessed: 17-jun-2017].
- [9] Povzeta slika »Figure1 – 1 DMP DMP-2800, Dimatix Materials Printer, DMP-DMP-2800
Series User Manual« 4. November 2008, str. 3

- [10] Dovoljena viskoznost črnila »What fluid viscosity is jettable« [online] Available: https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/FAQs_DMP-DMP-2800_Series_Printer_DMC-11600+Series+Cartridge.pdf [accessed: 17-jun-2017].
- [11] Povzeta slika »Figure1 – 2 Print Carrige, Dimatix Materials Printer, DMP-DMP-2800 Series User Manual« 4. November 2008, str. 3
- [12] J. Krč, M. Topič, »Optical modeling and simulation of thin-film photovoltaic devices, 2.5 Description of light scattering at a Nano-textured Interface« p.50 equation 2.30
- [13] J. Krč, M. Topič, »Optical modeling and simulation of thin-film photovoltaic devices, 2.5 Description of light scattering at a Nano-textured Interface« p.50 equation 2.29