

Univerzita Pardubice
Fakulta Chemicko-technologická

Tlačené polom riadené tranzistory OFET

Filip Kiko

Bakalárska práca

2017

University of Pardubice
Faculty of Chemical Technology

Printed organic field-effect transistors OFET

Filip Kiko

Bachelor's thesis

2017

PREHLÁSENIE AUTORA

Prehlasujem, že som túto prácu vypracoval samostatne. Všetky literárne pramene a informácie, ktoré som v práci využil, sú uvedené v zozname použitej literatúry.

Bol sem oboznámený s tým, že sa na moju prácu vzťahujú práva a povinnosti vyplývajúce zo zákona č. 121/2000 Zb., autorský zákon, hlavne so skutočnosťou, že Univerzita Pardubice má právo na uzatvorenie licenčnej zmluvy o využívaní tejto práce ako školského diela podľa § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tým, že pokiaľ dôjde k použitiu tejto práce mnou alebo bude poskytnutá licencia o použití inému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávnená odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré na vytvorenie diela vynaložila, a to podľa okolností až do ich skutočnej výšky.

Beriem na vedomie, že v súlade s § 47b zákona č. 111/1998 Zb., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, a smernici Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práca zverejnená v Univerzitnej knižnici a prostredníctvom Digitálnej knižnice Univerzity Pardubice.

V Pardubiciach, dňa 6. 7. 2017

Filip Kiko

POĎAKOVÁNIE

Touto cestou chcem poďakovať vedúcemu bakalárskej práce Ing. Tomášovi Syrovému Ph.D. za pedagogickú a odbornú pomoc, cenné rady, ústretovosť, a trpezlivosť pri vypracovaní bakalárskej práce, tímu Dr. Jiřího Pfliegera CSc. z ÚMCH AV za pomoc pri charakterizácii vyhotovených vzoriek, mojej rodine a priateľom za podporu počas štúdia.

ANOTÁCIA

Bakalárska práca je zameraná na rešerš využitia tlačových techník pre prípravu organických polom riadených tranzistorov (OFET). V teoretickej časti je opísaný princíp funkcie OFET, ďalej tlačové techniky, ich výhody a nevýhody, formulácie a vlastnosti funkčných vrstiev pre prípravu OFET. V praktickej časti je pomocou poloautomatického sieťotlačového stroja pripravený a vyhodnotený tranzistor.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

tlačená elektronika, organické polom riadené tranzistory, OFET

TITLE

Printed organic field-effect transistors

ANNOTATION

This bachelor's thesis aim is to explore use of printing techniques in organic field-effect transistor (OFET) manufacturing. In the theoretical part, the principle of an OFET function, printing techniques, and formulations were described. In the practical part, an OFET transistor was printed using semi-automatic screen printing machine and characterized.

KEYWORDS

printed electronics, organic field-effect transistors, OFET

OBSAH

Prehlásenie autora.....	3
Obsah.....	6
Zoznam skratiek a značiek.....	8
Úvod.....	9
1 Tlačená elektronika.....	10
1.1 Vodiče, polovodiče a izolanty.....	10
1.1.1 Elektrická vodivosť.....	10
1.2 Pásový model elektrického vodiča.....	12
1.3 Vodivosť polymérov.....	13
1.3.1 Mobilita nosičov náboja.....	13
1.4 Depresia bodu topenia nanočastíc.....	14
2 Tranzistor.....	15
2.1 FET tranzistor.....	15
2.2 OFET tranzistor.....	16
2.3 Materiály.....	16
2.3.1 Substráty.....	16
2.3.2 Dielektrikum.....	17
2.3.3 Polovodičová vrstva.....	17
2.3.4 Elektródy.....	18
2.4 Konštrukcia.....	19
3 Tlačové techniky použité k tlači ofet.....	20
3.1 Ofset.....	20
3.2 Hĺbkotlač.....	20
3.3 Sieťotlač.....	21
3.4 Inkjet.....	21
3.4.1 Elektrohydrodynamická tlač.....	22
3.4.2 Laserové slinovanie inkjetom tlačených nanočastíc.....	22
4 Charakterizácia.....	24
5 Praktická časť.....	26

5.1 Pomôcky	26
5.1.1 Použité materiály.....	26
5.1.2 Použité zariadenia	26
5.1.3 Použitý softvér	26
5.2 Prevedenie praktickej časti.....	26
5.3 Príprava šablón	27
5.4 Tlač tranzistorov s Al elektródami.....	28
5.5 Tlač tranzistorov s Ag elektródami	28
5.6 Stanovenie hrúbky a drsnosti vybraných vrstiev.....	29
5.7 Optická analýza vzoriek	29
5.7.1 Gate elektródy.....	29
5.7.2 Dielektrické vrstvy	30
5.7.3 S/D elektródy	31
5.7.4 Polovodičové vrstvy.....	31
5.8 Elektrické vlastnosti.....	32
6 Záver	35
7 Použitá literatúra.....	36

ZOZNAM SKRATIEK A ZNAČIEK

FET – field-effect transistor / poľom riadený tranzistor

MOSFET – metal-oxide-semiconductor field-effect transistor / poľom riadený tranzistor s oxidom izolovaným hradlom

OFET – organic field-effect transistor / organický poľom riadený tranzistor

S/D elektródy – Source a Drain elektródy

ÚVOD

Tlačené polom riadené tranzistory (OFET) sa postupne dostávajú z prostredia výskumu do praktického použitia. Ich využitie spočíva v aplikáciách v ktorých sú klasické tranzistory nevhodné pre ich konštrukčné vlastnosti alebo nevýhodné. Pre ich rozšírenie je potrebné minimalizovať náklady a nájsť komerčné využitie. Jednou z ciest ako minimalizovať náklady je polygrafická výroba. Tlač tranzistorov veľkou rýchlosťou na veľké plochy substrátu.

OFET tranzistory sú vďaka technológii a materiálom použitým vo výrobe flexibilné. Komerčné využitie preto môžu nájsť napríklad v smart prvkoch oblečenia alebo obaloch. Ich výroba je jednoduchšia, produkuje menej odpadu a sú ekologickejšie.

1 TLAČENÁ ELEKTRONIKA

Tlačená elektronika (printed electronics) spája výrobu elektroniky s polygrafickými technológiami pre tlačenie textov a grafiky. Touto kombináciou vznikajú produkty ktoré sú tenké, flexibilné, nositeľné, ľahké, v rozličných veľkostiach, nákladovo efektívne a šetrné k životnému prostrediu [1].

Tlačenou elektronikou sa v súčasnosti vyrábajú membrány klávesníc, dotykové panely, RFID štítky, tranzistory, fotovoltaičné články, ohybné LCD, OLED, e-papier, pamäte, batérie a antény.

Nahradením fotolitografických procesov tlačovými technikami za použitia organických látok ako funkčných vrstiev sa výroba výrazne urýchľuje čím sa znižuje cena elektroniky. Formulácie pre výrobu OFET môžu byť nanášané na bázi roztokov pomocou tlačových techník.

Výhodou organických vrstiev v porovnaní s polykryštalickým kremíkom je ich schopnosť odolávať namáhaniu bez poškodenia. Takýto materiál si pri deformovaní zachováva svoje elektrické vlastnosti.

Polykryštalický kremík využívaný v elektronike je pevný materiál. Elektrické vlastnosti kremíkovej vrstvy záležia na veľkosti jeho častíc. So zmenšujúcou sa veľkosťou častíc sa zväčšuje množstvo bariér ktoré musia prekonať nosiče náboja pri prechode na rozhraní medzi časticami čo znižuje jeho výkonnostné parametre. Deformáciou materiálu pri ohybe sa ničí kremíková mriežka ešte viac čo má za následok nestabilné vlastnosti zariadenia využívajúceho takýto materiál [2].

1.1 Vodiče, polovodiče a izolanty

1.1.1 Elektrická vodivosť

Schopnosť materiálu viesť elektrický prúd nazývame elektrická vodivosť. Elektrická vodivosť je veličina definovaná prevrátenou hodnotou elektrického odporu. Elektrický odpor je definovaný Ohmovým zákonom.

$$U = R I$$

Rovnica 1: Ohmov zákon

Kde I je elektrický prúd ($I = [A]$ – Ampér) prechádzajúci rezistorom a U je pokles alebo rozdiel potenciálu ($U = [V]$ – Volt) po jeho dĺžke. R – odpor, je konštantou proporčnosti ($R = [\Omega]$ – Ohm). Odpor vodiča je meraný priložením známeho napätia k odporu a meraním prechádzajúceho prúdu alebo naopak, sledovaním úbytku potenciálu pri zmene známeho prúdu. Prevrátenou hodnotou elektrického odporu je elektrická vodivosť.

$$G = \frac{1}{R}$$

Rovnica 2: Elektrická vodivosť

Nie všetky materiály sa chovajú podľa Ohmového zákona. Plynové výbojky, elektrónky, polovodiče a takzvané jednorozmerné vodiče (vodivé lineárne polymérne reťazce) sa vo všeobecnosti odchyľujú od Ohmového zákona.

V Ohmickom materiáli je odpor proporčný k dĺžke l vodiča a inverzne proporčný k jeho prierezu A .

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

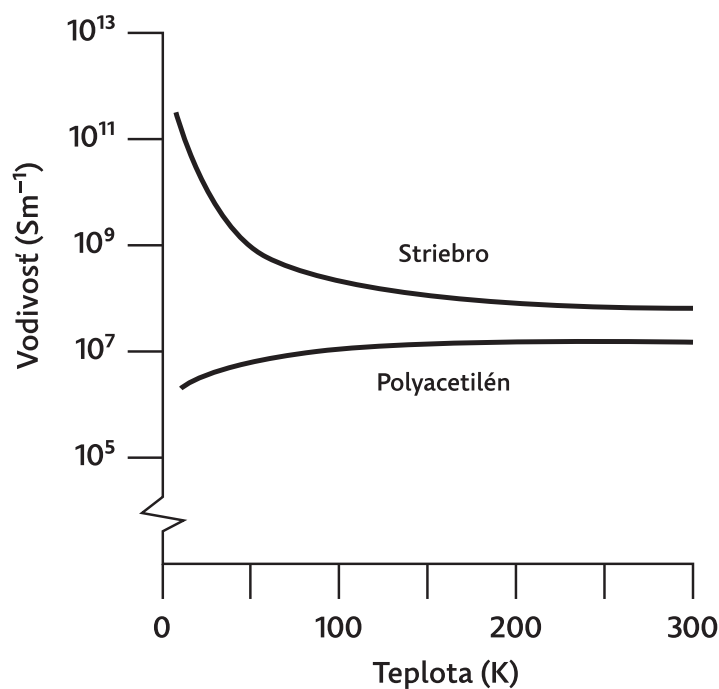
Rovnica 3: Merný elektrický odpor

Kde ($\rho = [\Omega\text{m}]$) je merný elektrický odpor. Jeho prevrátená hodnota je merná elektrická vodivosť ($\sigma = [\text{Sm}^{-1}]$ – Siemens) [3].

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Rovnica 4: Merná elektrická vodivosť

Vodivosť je veličina závislá na teplote. Vo všeobecnosti, so stúpajúcou teplotou klesá vodivosť „kovových“ vodičov a stúpa vodivosť polovodičov a izolantov. Merná vodivosť rastie s rastúcou vlhkosťou a výrazne závisí na teplote a intenzite elektrického poľa.



Obrázok 1: Závislosť vodivosti vodičov a polovodičov na teplote [4]

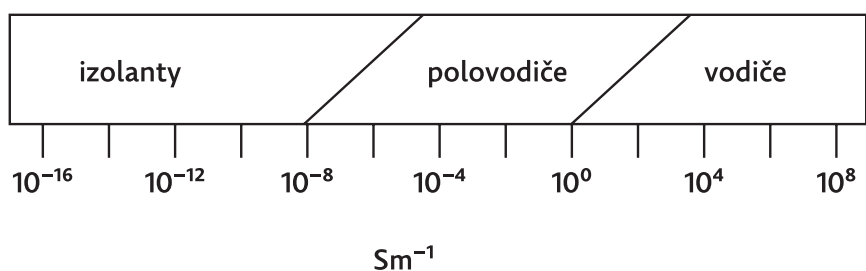
Polyméry vykazujú anizotropické vlastnosti. To znamená že ich optické a elektrické vlastnosti alebo pevnosť sú závislé od smeru usporiadania atómov a väzieb tvoriacich ich reťazce. Tri jednoduché uhlíkové zlúčeniny ako diamant, grafit alebo polyacetylén môžeme nazvať ako troj-, dvoj- a viacrozmerné formy uhlíkových materiálov. Zatiaľ čo diamant obsahujúci iba σ väzby je nevodič, jeho vysoká symetria mu dodáva izometrické vlastnosti. Grafit a acetylén oba obsahujú mobilné n elektróny, dopovaním sa menia na vysokoanizotropické metalické vodiče. Konduktivita je asi miliónkrát väčšia v rovine ako grafitových kruhov ako v kolmici k rovine. Nápodobne, konduktivita pozdĺž orientovaného polyacetylénu je 100krát väčšia pozdĺž roviny ako v kolmici k nej.

1.2 Pásový model elektrického vodiča

V kovoch sa na rozdiel od polymérov vyskytuje veľké množstvo energetických hladín v ktorých sa môžu elektróny nachádzať s pomerne nízkou väzobnou energiou. Takéto voľné elektróny sa môžu voľne pohybovať medzi atómami v elektrickom poli. Konduktivita materiálu môže byť zmeraná jednoduchými procedúrami. Konduktivita kovovej medi sa pohybuje okolo 10^8 Sm^{-1} .

Elektrické vlastnosti materiálu sú určované jeho elektrónovou štruktúrou. V kove sa elektrónové orbitály prekrývajú s ekvivalentnými orbitálmi susedných atómov vo všetkých smeroch, čím utvárajú molekulové orbitály podobné tým v izolovaných molekulách. Pri veľkom množstve molekulových orbitálov umiestnených pri sebe v danom rozpätí energií utvárajú spolu jedno široké spektrum energií. V atónoch kovov na rozdiel od atómov vzácnych plynov valenčné orbitály nie sú zaplnené.

Od určitej energetickej hladiny sa nachádzajú prázdne orbitály. Energetický rozstup medzi najvyššou obsadenou hladinou a najnižšou neobsadenou hladinou sa nazýva zakázané pásmo. Najnižší neobsadený pás sa nazýva vodivý pás a najvyšší obsadený sa nazýva valenčný pás. Vodivosť kovu je dôsledkom neúplne zaplneného valenčného alebo vodivého pásu, alebo takmer nulovej zakázanej hladiny, takže aj účinkom veľmi slabého elektrického poľa sa dokážu elektróny preusporiadať: elektróny s vyššou energiou na hladiny a diery s nižšou energiou. Táto situácia je ideálne pre rapídny prenos náboja.



Graf 1: Vodivosť izolantov, polovodičov a vodičov

1.3 Vodivosť polymérov

Polyméry sú prevažne materiály s veľmi nízkou elektrickou vodivosťou. Môžeme ich teda považovať vo väčšine prípadov za dielektriká, ktoré sa po vložení do elektrického poľa polarizujú. Pri vložení polyméru do vysokého elektrického napätia môže dôjsť k lavínovitej ionizácii, následkom ktorej začne polymérom prechádzať elektrický prúd. Tento jav nazývame prieraz dielektrika [5].

V roku 1974 bol trojicou Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid a Hideki Shirakawa pomocou dopovania polyacetylénu halogénovými výparmi pripravený vodivý polymér. Nejednalo sa o prvý prípad, ale historicky najvýznamnejší, pretože takto pripravená látka dosahovala vodivosti 10^5 Sm^{-1} . Pre porovnanie, teflon dosahuje vodivosť 10^{-23} Sm^{-1} a striebro alebo meď 10^7 Sm^{-1} . Za svoj objav obdržali vedci Nobelovu cenu za chémiu [4].

Vodivosť polymérov je umožnená existenciou konjugovaných dvojitych väzieb v hlavnom uhlíkovom reťazci polyméru. Konjugované väzby sú väzby pri ktorých sa strieda jednoduchá a dvojité väzby v uhlíkovom reťazci polyméru. Pomocou konjugácie väzby alternujú medzi jednoduchou a dvojitou väzbou. Každá väzba obsahuje lokalizované σ väzby formujúce silnú chemickú väzbu a π väzby ktoré sú slabšie. Konjugácia sama o sebe nestačí k vodivosti polymérneho materiálu. Dodatočne je potrebné dopovanie – nosiče náboja vo forme dier alebo elektrónov ktoré musia byť do materiálu dodané. Diera má pozitívny náboj a elektrón negatívny (diera nie je mikročastica ale absencia elektrónu). Postupným zaplňovaním dier elektrónmi vznikajú ďalšie diery a týmto spôsobom je umožnený prenos elektrónov.

1.3.1 Mobilita nosičov náboja

V polovodiči sa nachádzajú dva druhy nosičov náboja: negatívne nabité elektróny a kladne nabité diery. Rýchlosť pohybu nosiča elektrického náboja v polovodiči je spôsobená aplikovaním elektrického poľa. Ak je elektrické pole E aplikované jedným smerom, diery pôsobia silou rovnakým smerom a majú driftovú rýchlosť V_d

$$V_d = \mu_d E$$

Rovnica 5: Driftová rýchlosť dier

Kde μ_d je konštanta zvaná mobilita dier ktorej jednotka je $\text{cm}^2/(\text{Vs})$.

$$V_e = \mu_e E$$

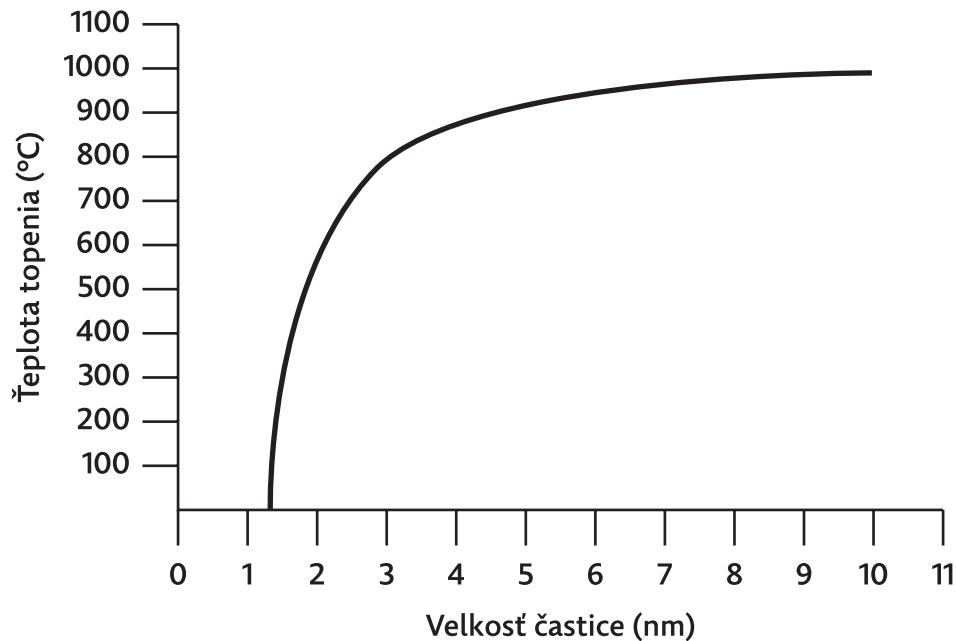
Rovnica 6: Driftová rýchlosť elektrónov

Kde μ_e je konštanta zvaná elektrónová mobilita ktorej jednotka je $\text{cm}^2/(\text{Vs})$.

Mobilita nosičov náboja je jeden zo základných parametrov ktorý určuje výkon a použitie OFET tranzistora.

1.4 Depresia bodu topenia nanočastíc

Mnohé fyzikálne vlastnosti materiálov ako bod varu, sa menia ak sa veľkosť materiálu blíži mikro- a nanoškále. Depresia bodu topenia je termín ktorý označuje fenomén poklesu teploty topenia materiálu spolu s veľkosťou jeho častíc. Tento jav sa predne vyskytuje v nanoskopických materiáloch ktoré sa topia pri teplotách o desiatky až stovky stupňov nižších ako objemné materiály.



Graf 2: Depresia bodu topenia nanočastíc zlata [6]

Priblížením veľkosti materiálu ku škále veľkosti atómov sa jeho teplota topenia začne meniť spolu s jeho veľkosťou. Zníženie teploty topenia je najbadateľnejšie pri nanovláknach, nanotrubicích a nanočasticích ktoré sa topia pri nižších teplotách ako ich objemné množstvá. Zmeny v bode topenia nastávajú pretože nanoskopické materiály majú omnoho väčší pomer povrchu k objemu než objemné materiály, čo drasticky upravuje ich termodynamické a tepelné vlastnosti [7].

2 TRANZISTOR

Tranzistor je elektronická polovodičová súčiastka slúžiaca ako spínač alebo zosilňovač elektrického signálu. V digitálnych obvodoch sú tranzistory využívané na spínacie účely. Z tranzistorov sa skladajú obvody ktoré vykonávajú logické funkcie. Kombináciou logických funkcií a hradieľ je možné zostaviť zložitejší integrovaný obvod pre vykonávanie funkcií ako pamäte, ščítače, LCD prvky a pod.

Polovodiče v tranzistoroch delíme na dva druhy:

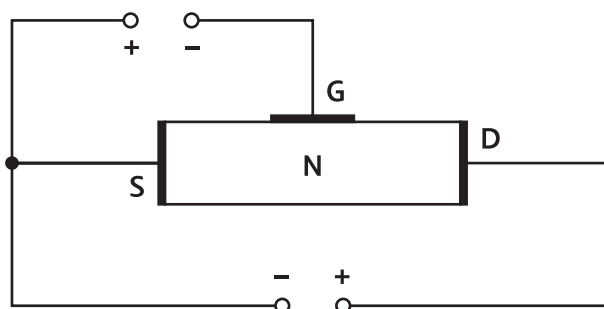
- polovodiče typu N – nosičmi náboja sú záporne nabité častice, teda elektróny.
- polovodiče typu P – nosičmi náboja sú kladne nabité častice, diery.

Na základe princípu činnosti môžeme tranzistory ďalej deliť na:

- bipolárne – obsahujú polovodiče typu p aj n – nosičom prúdu sú elektróny a diery. Tieto tranzistory sa skladajú z kombinácií polovodičov napríklad PN, PNP alebo NPN. Fungujú na rovnakom princípe, líšia sa len polaritou napájacieho napätia.
- unipolárne – obsahujú iba jeden typ polovodiča – N alebo P

2.1 FET tranzistor

FET je typ tranzistora ktorý funguje na princípe riadenia pohybu nosičov náboja elektrickým polom. Skladá sa z troch elektród. Elektróda ktorou nosiče prúdu z vonkajšieho zdroja vstupujú do polovodiča sa nazýva zdrojová elektróda S (source), zbernou elektródou D (drain) nosiče prúdu opúšťajú polovodič. Množstvo prúdu prechádzajúceho zo zdroja do zbernej elektródy je určené napätím privádzaným na riadiacu elektródu G (gate), tvoriacu oblasť s opačnou vodivosťou ako polovodič. Medzi gate elektródou a polovodičom sa nachádza vrstva dielektrika.



Graf 3: Unipolárny tranzistor [8]

Riadenie elektrickým polom je jav pri ktorom sa konduktivita polovodiča mení aplikovaním elektrického poľa kolmo k povrchu [9]. Elektrické pole je aplikované kovovou gate elektródou.

2.2 OFET tranzistor

Na rozdiel od klasického MOSFET tranzistora sa ako polovodičová vrstva nevyužíva SiO_2 ale organický polovodič a organické dielektrikum na polymérnom alebo sklenenom substráte. Veľké množstvo OFET sú tranzistory tvorené tenkým filmom (thin-film). Kvôli svojej lineárnej štruktúre mnohých organických polovodičov je veľmi tenká polovodičová vrstva braná ako dvojrozmerná.

OFET sú typicky zariadenia s polovodičom typu P skladajúce sa zo source a drain elektród (S/D) prepojených organickým polovodičom, a gate elektródou izolovanou od polovodiča vrstvou dielektrika. Aplikovaním negatívneho napätia sú diery injektované do najvyššieho obsadeného molekulárneho orbitálu (HOMO) [10] organického polovodiča. Diery migrujú do akumuláčnej vrstvy ktorá sa formuje na rozhraní polovodiča s dielektrikom a sú transportované medzi S/D elektródami aplikovaním elektrického poľa. Moduláciou napätia Gate elektródy sa tranzistor spína a vypína. Spínací prúd tranzistora s napätím sú veličinou udávajúcou elektrický výkon tranzistora. Výkon tranzistora je rovnako daný mobilitou nosičov náboja v polovodiči, ktorá by mala byť vysoká pre veľké spínacie rýchlosti [11].

2.3 Materiály

Materiály pre tlačenú elektroniku môžu byť rozdelené do troch základných skupín. Vodiče, polovodiče a dielektriká. Dôležité je ale brať do úvahy kombinácie týchto materiálov so zhodnými vlastnosťami. Optimálny tranzistor má vodivé elektródy a dielektrickú vrstvu s vlastnosťami ktoré sú podobné s vlastnostiam polovodiča, čo má dopad na ideálne správanie výsledného zariadenia a jeho celkové výsledne vlastnosti.

Materiály ktoré sa určito chovajú v laboratóriu, musia byť prispôbené aby sa chovali rovnako pri produkcií aj vo veľkom merítku. Materiály by mali vykazovať rovnaké vlastnosti aj pri bežných podmienkach. Zariadenia vyprodukované vo výrobe majú zriedka vlastnosti zariadení pripravených v menších mierkach a laboratórnych podmienkach.

2.3.1 Substráty

Všetky flexibilné organické substráty nie sú kompatibilné s konvenčnými fotorezistami, leptacími a vyvolacími roztokmi využívanými pri fotoliografickej výrobe integrovaných obvodov. Tieto technológie sú limitované množstvom krokov a podmienkami zahŕňajúc procesy pri vysokých teplotách, generujúc toxický odpad.

Využívané sú napríklad poly(ethylene teraphthalate) (PET) a poly(ethylene naphthalate) (PEN) [12].

2.3.2 Dielektrikum

V OFET je dielektrikum vrstvou na ktorú je nanášaný polovodič. Znamená to že dielektrikum do istej miery určuje vlastnosti polovodiča. Určuje molekulárny rásť a orientáciu molekúl vrstvy organického polovodiča čím vplýva na mobilitu nosičov náboja.

Príkladom dielektrika sú polyvinylphenol (PVP) [13], poly(methyl methakrylat) (PMMA) [14] a poly(vinyl alkohol) (PVA) [15]. PVP disponuje excelentnými filmotvornými vlastnosťami s hladkým povrchom. Nevýhodou je citlivá rozpustnosť na rozpúšťadlá používané v procese nánosu ďalších vrstiev [12].

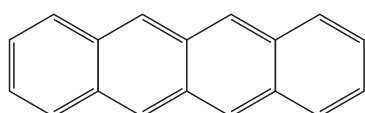
2.3.3 Polovodičová vrstva

Všetky organické polovodiče ktoré sú dnes používané obsahujú veľké množstvo aromatických kruhov pre elektrónovú delokalizáciu aromatických štruktúr. Aromatické kruhy obsahujú alternujúce jednoduché a dvojité väzby ktoré vedú k prekryvu p orbitálov formujúcich π väzby. Tieto väzby delokalizujú a zdieľajú elektróny medzi atómy reťazca umožňujú vodivosť.

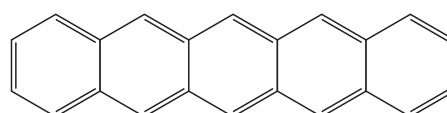
Molekuly používané v aktívnej polovodičovej vrstve OFET sú všeobecne lineárne alebo dvojrozmerné štruktúry kvôli planárnej konformácií aromatických kruhov.

Polovodiče typu P sú rozšírenejšie, kvôli vyššej mobilite dier ako nosičov náboja. Organické polovodiče sú používané v dvoch formách: konjugované polyméry a konjugované nízkomolekulárne látky. Jeden z rozdielov medzi nízkomolekulárnymi látkami a polymérmí je spôsob procesu ich nanášania. Nízkomolekulárne látky môžu byť nanášané pomocou roztokov alebo vákuovo naparované. Aromatické polymérne polovodiče musia byť doplnené o funkčné skupiny aby bolo možné ich používať vo forme roztokov.

Planárne molekuly sú lineárne pospájané benzénové jadrá, lineárne pospájané thiopheny a veľké množstvo látok zahŕňajúcich tieto štruktúry. Sú to jedny z najbežnejších materiálov používaných v OFET. Ich štruktúry sú jednoduché a ich výkon bol intenzívne skúmaný. Nanášaním tetracenu vákuovou sublimáciou boli dosiahnuté mobility dier do $0,15 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ [16] a $2,2 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ a pri vákuovom naparovaní pentacenu. Lepšia mobilita pentacenu bola zdôvodnená dĺžkou molekuly ktorá umožňuje viac miesta pre pohyb nosičov náboja [17].



Tetracene



Pentacene

Obrázok 2: Tetracene a Pentacene

Klasickým prototypom polymérneho polovodiča je polythiophen. Polythiophen je nerozpustný. Alkylovo substituované polythiopheny ako poly(3-hexylthiophene) (P3HT) sú rozpustné v organických rozpúšťadlách [18] a ich filmy môžu byť nanášané sieťotlačou, alebo inkjet-om.

Polythiopeny formujú amorfné filmy bez dlhého štruktúrného usporiadania, veľmi krátkymi konkurovanými n väzbami a slabými mobilitami pod $10^{-3} \text{ cm}^2/(\text{Vs})$. Pre zvýšenie mobility je nutné použitie derivátov s vysokou čistotou, syntetizovaných tak, aby sa dokázali molekuly samé usporiadať do konfigurácie za vzniku kryštalických lamiel ktoré zvyšuje prekryv orbitálov a mobilitu nosičov náboja [19]. Následok je nárast mobility na $0,05\text{--}0,1 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ v smere usporiadania molekúl. On/Off prúdový pomer pentacentu dosahuje 10^8 .

Lineárne oligoméry thiophenu a ich deriváty sú ďalšia populárna trieda materiálov používaných v OFET. Polovodiče typu P ako P3HT vykazujú mobility $0,01 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ a On/Off pomer $\sim 10^1/10^4$ vo vákuu.

Morfológia a molekulárne usporiadanie majú dopad na vlastnosti polovodičových vrstiev. Pre dosiahnutie ideálnych vlastností a efektívnejšieho prenosu náboja by sa mali polovodičové vrstvy usporadúvať pozdĺž smeru vodivej vrstvy.

2.3.4 Elektródy

Vodiče musia splňať veľa podmienok. Elektródy umiestnené na polovodiči v OFET tranzistore musia byť vhodné pre polovodič typu P alebo N. Rovnako dôležité pre injekciu nosičov náboja je rozhranie medzi vodičom a polovodičom. Vodič a polovodič by mal byť dostatočne vodivý a stabilný. Nemal by reagovať s okolitými látkami ani medzi sebou.

Kovy sú široko využívané v elektronických zariadeniach ako materiály pre elektródy pre svoju vysokú vodivosť. Kovy použiteľne k tlači sú striebro (Ag), meď (Cu), zlato (Au) a hliník (Al) s merným odporom 1,59; 1,72; 2,44 a 2,62 $\mu\Omega\text{cm}$.

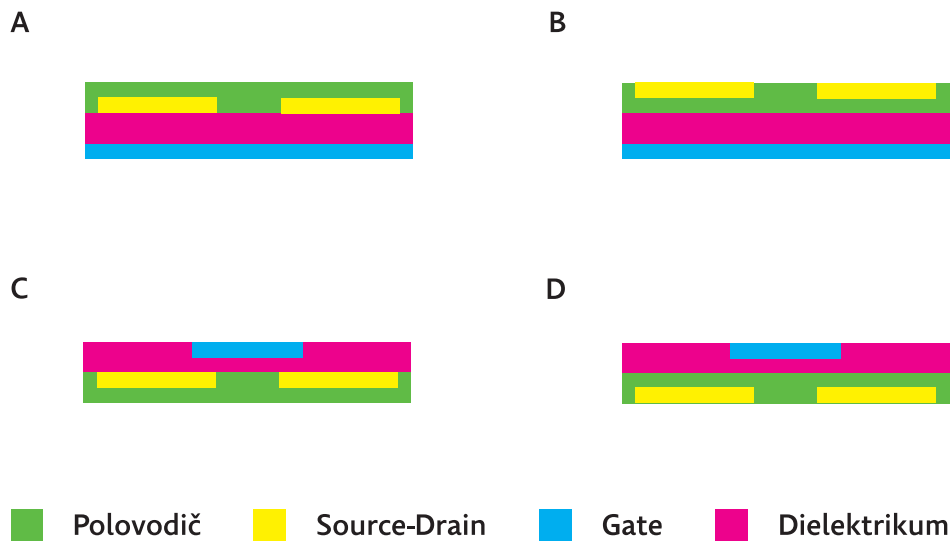
Zlato je ideálny vodič, stabilný voči prostrediu, nevýhodou je jeho vysoká cena. Najdôležitejší tlačený kov je striebro pre svoju relatívne nízku cenu v porovnaní so zlatom, vysokú vodivosť a chemickú inertnosť. Striebro môže byť slinované pri teplote nižšej ako $200 \text{ }^\circ\text{C}$ [20].

Kovy nie sú rozpustné v bežných vodných alebo organických rozpúšťadlách. Konvenčný spôsob prípravy tlačiteľných kovov je ich miešanie s vysokoviskóznymi polymérnymi pastami [21]. Rozpúšťadlo musí byť odparené zvýšenou teplotou, pretože prirodzeným odparením by medzi časticami ostal nevodivý film z rozpúšťadla ktorý by

zhoršoval vodivosť. Častice sú po nánose slinované zdrojom tepla. Sú využívané napríklad metalické nanočastice Au a Ag v rozmeroch 1–3 nm [15].

2.4 Konštrukcia

Konfigurácia OFET zariadení môže byť rozdelená do 4 druhov.



Obrázok 3: konštrukcie OFET tranzistorov [10]

- A. Bottom Gate/Bottom Contact
- B. Bottom Gate/Top Contact
- C. Top Gate/Top Contact
- D. Top Gate/Bottom Contact

Usporiadanie prvkov OFET má kľúčový dopad na jeho funkciu a výkon. Zariadenia typu B a D vykazujú lepšie výkony než zariadenia A a C. Táto skutočnosť je pripisovaná lepšiemu kontaktu medzi organickým polovodičom a elektródami [22]. Okrem konfigurácie majú na vlastnosti OFET dopad morfológické vlastnosti a molekulárne usporiadanie jednotlivých vrstiev.

3 TLAČOVÉ TECHNIKY POUŽITÉ K TLAČI OFET

Veľké množstvo tlačových techník bolo aplikovaných na konvenčnú výrobu elektroniky – sieťotlač, inkjet, hĺbkotlač a ofset.

Pre použitie tlačových techník na tlač OFET je nutné zvážiť správny výber atramentu a substrátu, zvážiť vhodnosť štruktúry pre danú tlačovú techniku, rýchlosť výroby, výťažok, kvalitu a cenu. Rovnako dôležitá je presnosť techniky a jej rozlíšenie, nárast naneseného bodu, sýtlač, zmáčanie povrchu, uniformitu nanášanej vrstvy, hranovú ostrosť, kompatibilitu nanášaných materiálov.

3.1 Ofset

Ofset je najrozšírenejšia komerčná tlačová technika. Je založený na vzájomnom odpudzovaní olejofilných a hydrofilných látok. Netlačiace prvky na formovom valci sú prekryté vlhčiacim roztokom ktorý odpudzuje tlačovú farbu. Tlačiace prvky odpudzujú vlhčiaci roztok a prijímajú farbu. Z tvrdej tlačovej formy sa dostáva farba na ofsetový valec s prijímovým gumeným povrchom z ktorého sa tlakom tlakového valca prenášajú na substrát. Pri tlači elektroniky sa používa ofset bez vlhčenia.

Ofset je vysokovýkonná tlačová technika čo z neho robí atraktívnu technológiu pre tlač OFET. Rýchlosť tlače dosahuje 200 000 m²/h [23].

Ofsetom sú tlačené S/D štruktúry pre top-gate OFET s použitím poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT). Potláčané sú PET substráty s hrúbkou 50 μm na role so šírkou 140 mm. Veľkosť týchto štruktúr dosahuje 20 μm, mobilitu nosičov náboja $3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ a On/Off pomer 10^3 Používaný je bezvodý ofset [24].

3.2 Hĺbkotlač

Tlačové prvky sa nachádzajú pod úrovňou netlačiacich a sú vyleptané do medeného, alebo vypálené laserom do zinkového povrchu. V závislosti na použitej technológii môžu mať variabilnú hĺbku alebo priemer.

Tvar a hĺbka buniek v hĺbkotlači zohráva kľúčovú úlohu v riadení kvality tlačených obrazcov. V hĺbkotlači závisí hrúbka a morfológia nanášanej farby od hĺbky a veľkosti tlačových buniek, takže môže byť veľmi presne riadené.

Výhody hĺbkotlače:

- Použitie nízkoviskózných tlačových farieb vo forme disperzií s vysokou čistotou bez aditív.
- Vysoký výkon pri rotačnej hĺbkotlači.
- Vyrytý povrch umožňuje presne stanovené objemy prenesenej farby.

- Dlhá životnosť tlačového valca ktorý je schopný vyprodukovať milióny výtlačkov bez poškodenia.

Nevýhody:

- Vysoká cena tlačového valca. Produkcia malého množstva výtlačkov je preto nevýhodná.
- Tvrdý formový valec je možné použiť len na flexibilné substráty.

Hĺbkotlačou môžu byť tlačené dielektrické vrstvy s hrúbkou 100 nm bottom-gate OFET pre tepelne naparovaný TIPS pentacen s priemernou mobilitou $0,6 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ [25].

3.3 Sieťotlač

Sieťotlač je pre svoju jednoduchosť široko využívaná pre tlač elektrický obvodov. Je to adekvátna tlačová technika pre jednoduché štruktúry s nízkym rozlíšením. Sieťotlač väčšinou využíva pastovité tlačové farby. Farby sú nanášané na substrát cez sito so šablónou pomocou stierky. Netlačiace prvky sú zakryté. Tlačová farba je najprv rozotretá a následne pretlačená cez tlačiace prvky sita na substrát.

Bežná hrúbka nánosu pri sieťotlači je v rozpätí desiatok mikrónov. Pri použití hrubého sita môže hrúbka presiahnuť 100 μm pri nánose jednej vrstvy. Takáto hrúbka nie je dosiahnuteľná inou tlačovou technikou. Pre inkjet a flexotlač dosahuje hrúbka nánosu menej ako 5 μm . Tlač jemných liniek dosahuje hodnoty po 10 μm v laboratórnom prostredí. Pre masovú produkciu dosahuje 50 μm [1].

Výhody sieťotlače:

- Možnosť tlačiť aj po zahnutých substrátoch.
- Možnosť dosiahnuť nános filmu hrúbky viac ako 10 μm jednoduchšie než ostatné tlačové techniky.
- Celková cena sieťotlače je menšia oproti ostatným tlačovým technikám.

Nevýhody:

- Pre zvýšenie viskozity farieb je nutné použiť aditíva ktoré znižujú ich čistotu a zhoršujú elektrické vlastnosti.
- Vysoká viskozita spôsobuje že povrch pripravený sieťotlačou nie je hladký.
- Nízke rozlíšenie pre tlač detailných štruktúr tlačenej elektroniky

3.4 Inkjet

Tlačová farba je vo forme kvapiek vystreľovaná tryskami riadenými počítačom na substrát. Parametre inkjetu ako objem, množstvo, rýchlosť a smer kvapiek ako aj

teplota substrátu môžu byť presne sledované a riadené. Pohyb kvapiek a ich interakcia so substrátom môže byť jednoducho pozorovaná. Rozmery substrátu môžu mať ľubovoľné veľkosti.

Inkjet dokáže tlačiť veľkým množstvom materiálov a nanášať vodivé, polovodivé aj dielektrické vrstvy. Kľúčové vlastnosti farieb pre inkjet sú nízka viskozita, jemné veľkosti častíc ak sa jedná o suspenziu a nízka výparnosť, kvôli upchávaniu trysiek.

Piezoelektrický DOD inkjet je používaný tlačeníu PEDOT/PSS vodivých polymérov pre S/D elektródy [26], kovové elektródy a prepojenia z nanočastíc. Šírka liniek je 20–200 μm kvapkami s objemom 1–30 pL [27].

Výhody inkjet:

- Technológia populárna pre laboratórne účely. Tlačová farba nanášaná priamo na substrát bez kontaktu s inými nástrojmi.
- Riadenie počítačom, bez fyzickej formy. Jednoduchá a rýchla úprava dát
- Tlač malého množstva vzorkov.
- Možnosť použiť atrament s nízkou viskozitou.
- Viacvrstvová tlač je veľmi presná, odpadá nutnosť pasovania sútláče.
- Možnosť tlačiť väčším množstvom atramentov súčasne.
- Minimalizácia makulatúry.

3.4.1 Elektrohydrodynamická tlač

Pri inkjet-e závisí rozlíšenie od veľkosti kvapiek, ktorá závisí od veľkosti trysky. Kvôli povrchovému napätiu a viskozite je náročné tlačiť ak je tryska veľmi malá. elektrohydrodynamická tlač predstavuje riešenie tohoto problému. Kvapky farby sú vystreľované z hlavy pomocou elektrického poľa. Medzi tryskou a podložkou substrátu je aplikované silné elektrické pole. Týmto spôsobom je formulovaná kvapka ktorá je menšia ako otvor trysky pokiaľ je elektrické pole silnejšie ako povrchové napätie kvapky. Trysky dosahujú rozmery 300 nm a boli dosiahnuté linky s hrúbkou 240 nm [28]. Technológia bola použitá pri tlači kontaktov pomocou atramentov na bázi kovov [29].

3.4.2 Laserové slinovanie inkjetom tlačených nanočastíc

Drop on demand inkjet technológia umožňujúca depozíciu kovov pri nízkej teplote ako aj utváranie obrazcov vo vysokom rozlíšení ktoré prekonáva limity súčasného inkjetu za použitia polythiopenu pri izbovej teplote a atmosférickom tlaku bez akýchkoľvek fotolitografických techník alebo využitia vákuovej depozičnej technológie. Je možné ju využiť pre tlač rozličných funkčných filmov ako napr. elektródy, dielektriká, kontakty, aktívne polovodičové vrstvy.

Rozlíšenie technológie je limitované v rozpätí 20–50 μm a použitý materiál je polovodič s odporom o niekoľko rádov vyšším ako kovové vodiče.

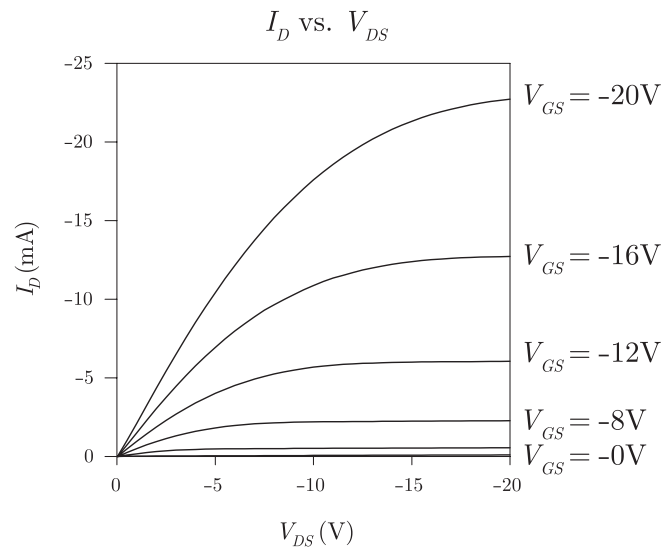
Zníženie teploty bolo dosiahnuté termodynamickou vlastnosťou veľkosti nanočastíc. Ak zmenšíme veľkosť častice zlata pod 2 nm, jeho teplota prechodu do kvapalného skupenstva klesne z 1063 °C na 150 °C [6]. Následne sú častice natavené zdrojom tepla – pomocou lasera alebo ohrevom v peci. Použitie lasera je výhodnejšie a efektívnejšie pre minimalizovanú plochu vystavenú ohrevu.

Proces založený na technológií inkjetu má výhodu vo veľkom množstve dostupných materiálov pre tlač. Generuje minimálne množstvo odpadu a proces je možné integrovať a riadiť pomocou CAD systému. Rozlíšenie konvenčnej inkjet technológie je obmedzené, v kombinácii s laserom je možné dosiahnuť rozlíšenie porovnateľné s konvenčným litografickým procesom. Inkjetom nanosené nanočastice sú usušené a slinované pomocou lasera s vlnovou dĺžkou 514,5 nm. Uvoľnené častice sú vymyté organickým rozpúšťadlom [30].

4 CHARAKTERIZÁCIA

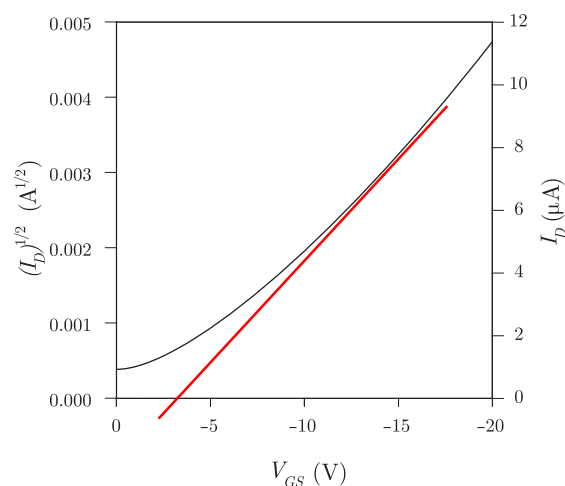
Pre možnosť porovnávania OFET pripravených rozličnými technikami je nutné používať objektívne charakteristiky ich vlastností.

OFET sú charakterizované polom riadenou mobilitou nosičov náboja (μ , driftová rýchlosť nosičov náboja na jednotku elektrického poľa), prúdovým On/Off pomerom (pomer maximálneho a minimálneho spínacieho prúdu) a hraničným napätím (minimálne napätie na gate elektróde potrebné pre zopnutie tranzistora). Mobilita nosičov náboja určuje rýchlosť spínania tranzistora a následné použitie.



Graf 4: Výstupná charakteristika OFET tranzistora.
Výstupná charakteristika je kvalitatívny dôkaz funkčnosti tranzistora [9].

V_{DS} = napätie medzi drain a source elektródami, V_{GS} = napätie medzi gate a source elektródami, I_D = prúd na drain elektróde



Graf 5: Transferová charakteristika OFET tranzistora [9].

Extrapolovaním lineárnej časti transferovej charakteristiky je možné zistiť hraničné napätie.

Ďalej je charakterizovaná uniformnosť, hladkosť a hrúbka jednotlivých vrstiev pomocou profilometra a mikroskopu.

5 PRAKTICKÁ ČASŤ

5.1 Pomôcky

5.1.1 Použité materiály

- pozitívne filmové predlohy vrstiev tranzistora
- sito s hustotou 165 l/cm, priemer vlákna 27 μm
- substráty Melinex ST504, hrúbka 175 μm
- vodiče v roztoku na bázi Ag nanočastíc
- polovodiče na bázi 5% roztoku TIPS Pentacen a toluénu
- dielektriká na bázi Poly(4-vinylphenol) (PVP), tlačová formulácia na bázi 3, 6, 9 hm. % polyméru

5.1.2 Použité zariadenia

- osvitová jednotka
- sušiacie zariadenie
- poloautomatický sieťotlačový stroj
- automatický aplikátor filmu TQC AB3120
- špirála 30 μm
- mikroskop Leica DM750 M
- elektromer Keithley 6517A a Keithley 2400 SourceMeter
- profilometer Klencor

5.1.3 Použitý softvér

- Leica application Suite

5.2 Prevedenie praktickej časti

V praktickej časti boli pripravené funkčné časti tranzistorov postupným nanášaním vrstiev sieťotlačou.

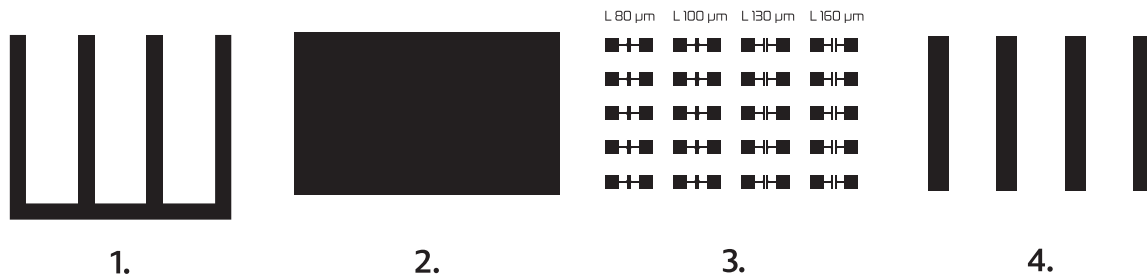
Boli použité dva druhy Gate elektród. Hliníkové elektródy vytvorené vákuovou depozíciou a strieborné elektródy, nanášané sieťotlačou. Dielektrikum z PVP (Poly(4-vinylphenol)) s tromi druhmi koncentrácie 3, 6 a 9 % a polovodič TIPS Pentacene rozpustený v toluéne.

Samotná tlač prebiehala v dvoch sériách. Na obe série boli použité tri rozličné koncentrácie dielektrickej vrstvy. Prvá séria neobsahovala polovodič. Druhá séria obsahovala polovodič ktorý bol nanášaný pomocou špirály. Funkčné časti

tranzistorov z prvej série boli zaslané do ÚMCH AV a charakterizované tímom Dr. Jiřího Pfliegera CSc. Druhá séria bola opticky skúmaná mikroskopom.

5.3 Príprava šablón

Na sita boli pripravené štyri šablóny. Každá šablóna predstavovala jednu funkčnú vrstvu OFET. Gate elektródy, dielektrikum, S/D elektródy a polovodič.



Obrázok 4: Jednotlivé vrstvy OFET v poradí ich nánosu na substrát

1. Gate elektróda
2. Dielektrikum
3. S/D elektródy s odstupňovaným rozstupom
4. Polovodič

Sita boli pred vytvorením šablóny umyté od nečistôt organickým rozpúšťadlom a odmastené. Na odmastený povrch sita bola rovnomerne nanosená svetlocitlivá emulzia v troch vrstvách nasledovne:

- 1 vrstva na stierkou stranu sita
- 2 vrstvy na tlačovú stranu sita

Po každom nánose bolo sito sušené kým emulzia nestratila svoju povrchovú lepivosť. Po dostatočnom usušení emulzie bol na sito exponovaný film.

Prvá expozícia s dĺžkou 60 sekúnd bola nedostatočná. Nedostatočná expozícia sa prejavovala odstraňovaním šablóny počas umývania. Expozícia bola navýšená na 140 sekúnd. Takto exponované sita vykazovali dostatočnú hranovú ostrosť a netlačiace prvky neboli vyplavované počas ich vymývania. Sita boli vymytí dodatočne exponované pre zlepšenie vlastností šablóny.

Pripravené sitá boli upevnené do poloautomatického sieťotlačového stroja. Časť šablóny ktorá nebola určená k tlači bola zamaskovaná páskou.

Substráty Melinex ST504 s veľkosťou 75 × 75 mm a hrúbkou 175 μm boli vákuovým stolčekom upevnené do štvorcového rámu pod šablónou.

Pred nanosením novej vrstvy bolo sito a stierka očistené aby nedošlo ku kontaminácií vzorku. Nepoužívaná časť šablóny bola zamaskovaná páskou.

5.4 Tlač tranzistorov s Al elektródami

Najprv bola tlačaná vrstva Gate, následne vrstva dielektrika. Na nej bolo pomocou techniky dip coating z 1% roztoku nanosený TIPS Pentacen, na ktorý boli následne vákuovým naparovaním nanosené S/D elektródy. Vzorky zo série boli vyhodnocované externe v ÚMCH AV tímom Dr. Jiřího Pfliegera CSc. Vyhodnocovanie vzoriek prebiehalo pri izbovej teplote.

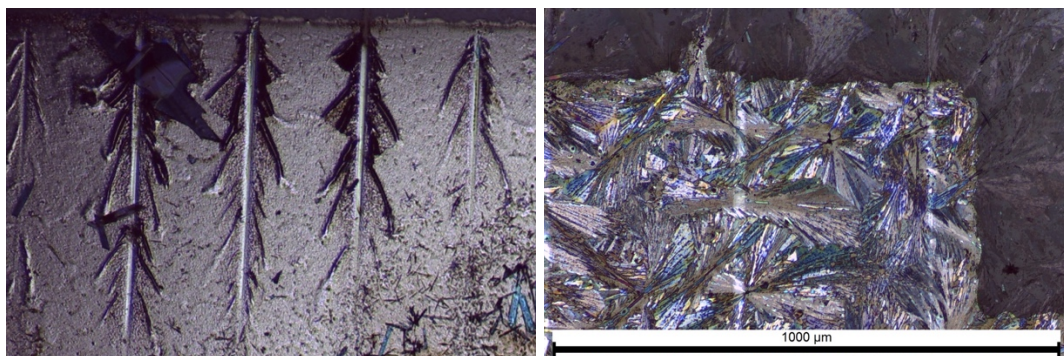
5.5 Tlač tranzistorov s Ag elektródami

Na očistenú šablónu bola nanosená sieťotlačová formulácia Ag nanočastíc striebra. Prvé výtlačky slúžili pre správne nastavenie odrthu, náklonu a tlaku stierky tlačového stroja. Po vytlačení boli substráty s elektródami uložené do sušičky vyhriatej na 140 °C. Zahriatie elektród na túto teplotu slúžilo k nataveniu a slinutiu nanočastíc striebra v nanášanom roztoku. Táto technika využíva jav depresie teploty topenia nanočastíc.

Pri nanášaní dielektrickej vrstvy bolo nutné dohliadnuť na kvalitnú súťlač. Boli vytlačené tri tlačové formulácie obsahujúce 3, 6, 9% PVP ako dielektrika. Substráty s dielektrickou vrstvou boli usušené sušičkou pri 130 °C po dobu 60 minút.

K tlači elektród bola použitá rovnaká formulácia Ag nanočastíc ako v prípade Gate elektród. S/D elektródy museli byť napasované presne. Ich umiestnenie má priamy dopad na funkciu tranzistora. Štruktúra S/D elektród bola podstatne jemnejšia ako štruktúra Gate elektród, musel byť preto zvýšený prítlak stierky. Rozpätia vzdialeností elektród boli 80, 100, 130 a 160 μm .

Na vrstvu S/D elektród bol vytlačený sieťotlačou alebo špirálou rozotrený 5% roztok TIPS pentacene v toluéne. Polovodič mal nehomogénnu kryštalickú štruktúru. Nanášanie roztoku na nezmáčavý povrch bolo problematické.



Obrázok 5: Patrné poškodenie vodiča a nerovnomerný nános polovodiča spôsobené špirálou.

5.6 Stanovenie hrúbky a drsnosti vybraných vrstiev

Jednotlivé vrstvy na vzorkách boli zmerané profilmetrom Klencor. Drsnosť povrchu PVP nad elektródami dosahovala 5 nm/ μm , priemerná drsnosť 82 Å a stredná kvadratická drsnosť 105 Å pre všetky typy dielektrických vrstiev. Hrúbky jednotlivých vrstiev dosahovali 450 nm pre formuláciu s 9 %, 190 nm pre 6 % a 140 nm pre 3 % dielektrika PVP. Veľká drsnosť povrchu robila meranie hrúbky problematické.

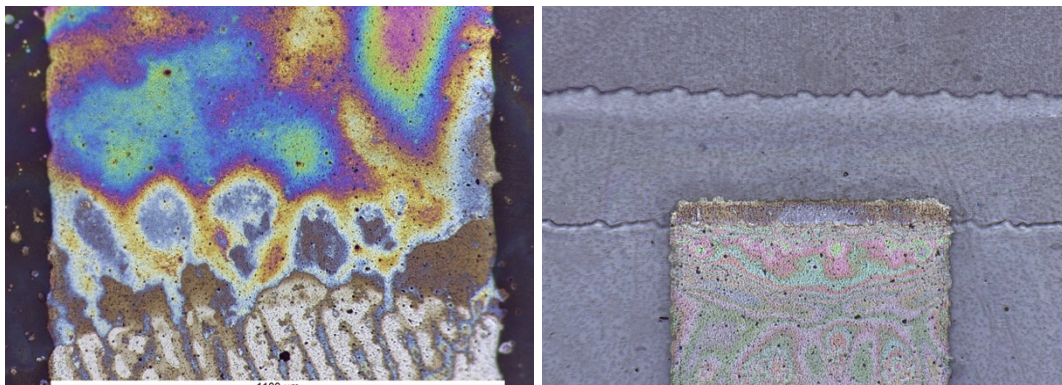
V prípade Al gate elektród bola drsnosť nad elektródami nižšia a dosahovala 3 nm/ μm . Podobne bol nižší aj priemer a kvadratický priemer. Dosahoval 15 Å a 20 Å. Pri 9 % PVP. Drsnosť rástla so zvyšujúcou sa koncentráciou vrstvy PVP. Pri 6% a 3% koncentrácií PVP dosahovala drsnosť 30 Å a 20 Å. Hrúbky jednotlivých vrstiev dosahovali 600 nm pre formuláciu s 9 %, 450 nm pre 6 % a 140 nm pre 3 % dielektrika PVP.

Zo všetkých vzoriek obstáli najlepšie substráty s Al Gate elektródami a 9% koncentráciou PVP v dielektrickej vrstve. Túto vlastnosť by sme mohli pripísať vyššej viskozite roztoku a väčšiemu nánosu, lepši filmotvornosti, vyplývajúceho z koncentrácie dielektrika, brániacej prenikaniu vzduchu a tvoreniu bubliniek.

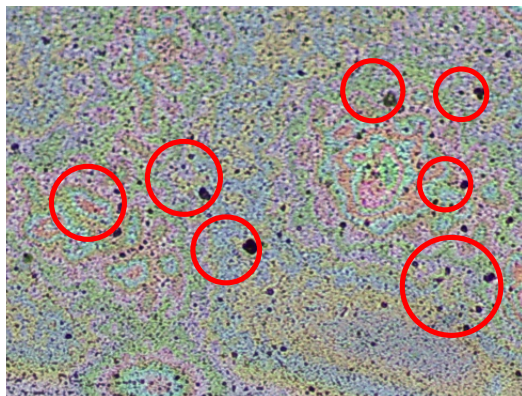
5.7 Optická analýza vzoriek

Vzorok boli nasnímané mikroskopom Leica DM750 M a spracované v Leica application Suite.

5.7.1 Gate elektródy



Obrázok 6: Detail vodiča Gate elektródy ktorý je postupne zanášajú rozhraním dielektrickej vrstvy a viacnásobným prekrytím.

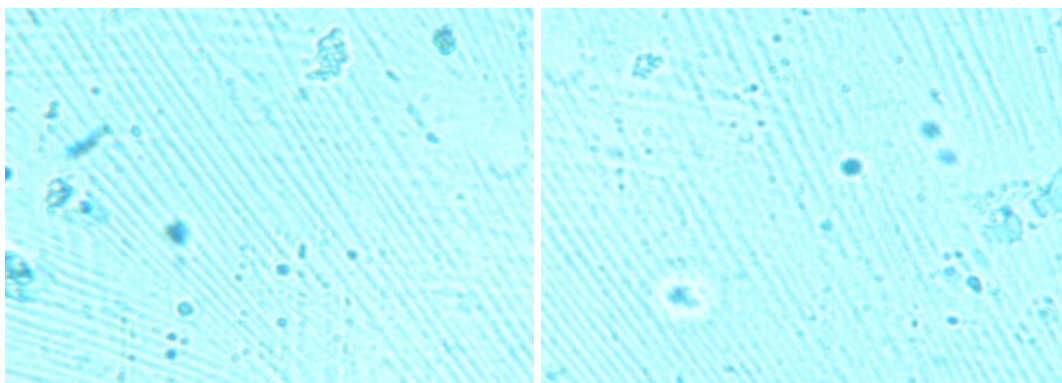


Obrázok 7: patrné veľké množstvo vzduchových bubliniek vo vodiči Gate elektródy

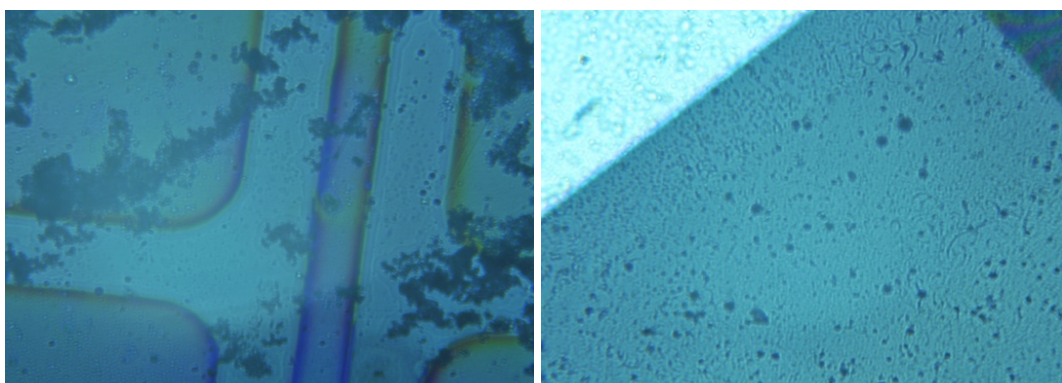
Vrstva Ag tvoriaca Gate elektródy obsahovala bublinky ktoré mali negatívny vplyv na jej homogenitu.

5.7.2 Dielektrické vrstvy

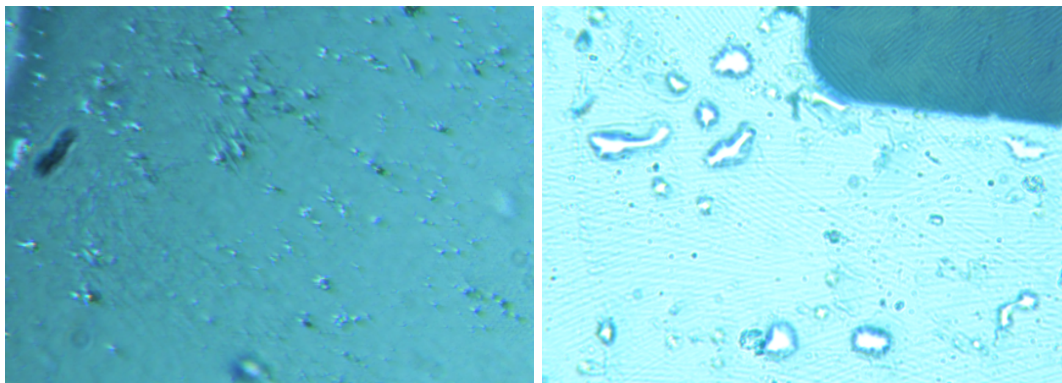
Na zväčšených záberoch je detailne vidieť povrchové vady funkčných vrstiev.



Obrázok 8: Gate elektródy na bázi Al, tlačené dielektrikum 9% PVP, nečistoty a vzduchové bublinky.

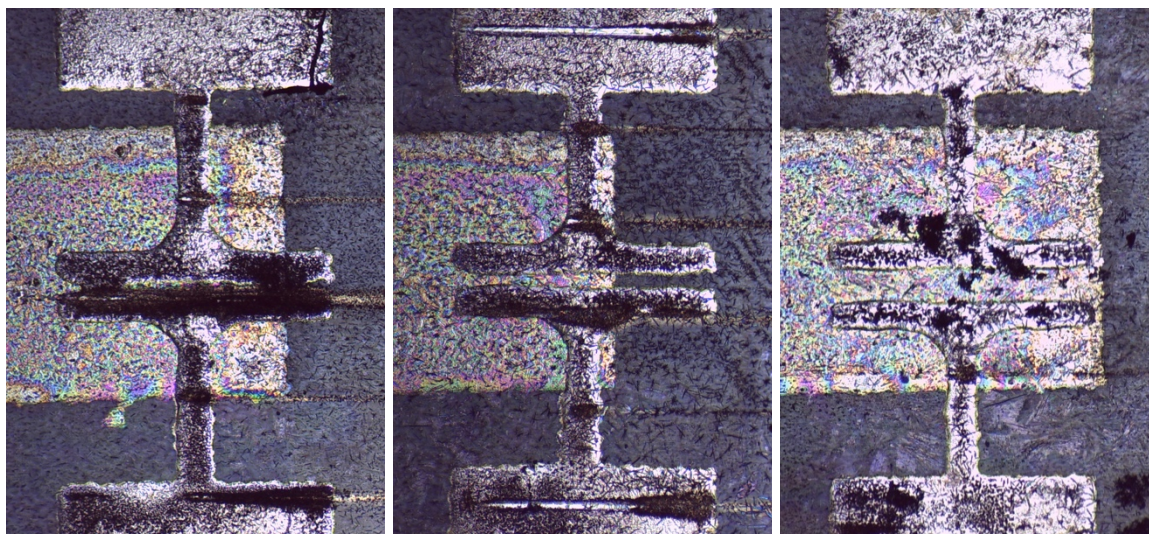


Obrázok 9: Vľavo Gate elektródy na bázi Al, tlačené PVP 6% dielektrikum s hrúbkou 450 nm, veľké škvrny na povrchu. Vpravo Gate elektródy na bázi Ag, 3% PVP dielektrikum s hrúbkou 140 nm, nehomogenita povrchu, nečistoty a vzduchové bublinky.



Obrázok 10: Vľavo Gate elektródy na bázi Ag, tlačené dielektrikum 9% PVP s hrúbkou 600 nm. Vpravo 6% PVP s hrúbkou 450 nm s väčšími vzduchovými bublinami.

5.7.3 S/D elektródy

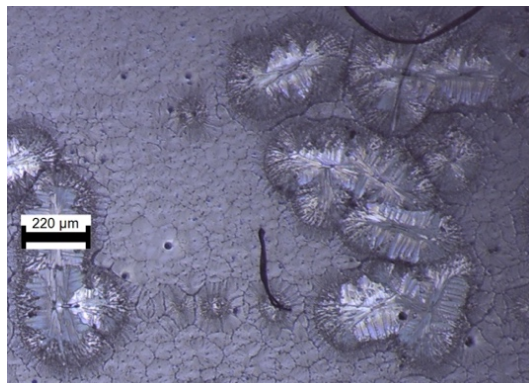


Obrázok 11: zľava, zliate elektródy s rozpätím 80 µm, elektródy s dostatočným rozpätím 100 µm ale nedokonalým prekryvom, elektródy s dostatočným rozpätím 160 µm a prekryvom gate elektródy.

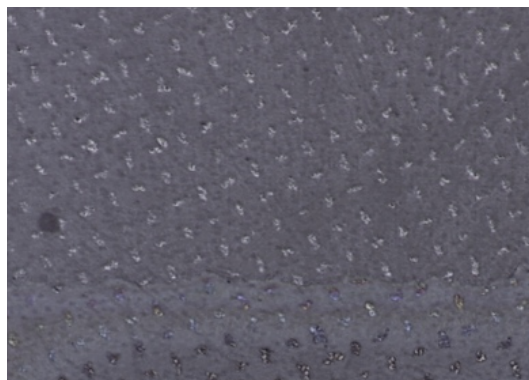
Pri elektródach bolo najpatrnejšie rozšírenie vzoru. Elektródy so vzdialenosťou pod 80 µm vykazovali čiastočné zlievanie plôch. Elektródy s rozpätím 100 µm na filme dosahovali reálne rozpätie 20 µm a tento jav už nevykazovali. Pri rozsietení väčšom ako 500 µm (polovica dĺžky elektródy) dochádzalo k nedokonalému prekryvu. Tento jav bol najpatrnejší na okrajových elektródach.

5.7.4 Polovodičové vrstvy

Pri nanášaní vrstvy špirálou dochádzalo k poškodeniu polovodičovej vrstvy a vodivej vrstvy S/D elektród. Na druhú stranu, formulácia s TIPS Pentacene neumožnila nanášať súvislé vrstvy pomocou techniky sieťotlače.



Obrázok 12: Nehomogenita štruktúry TIPS Pentacene a zachytené nečistoty.

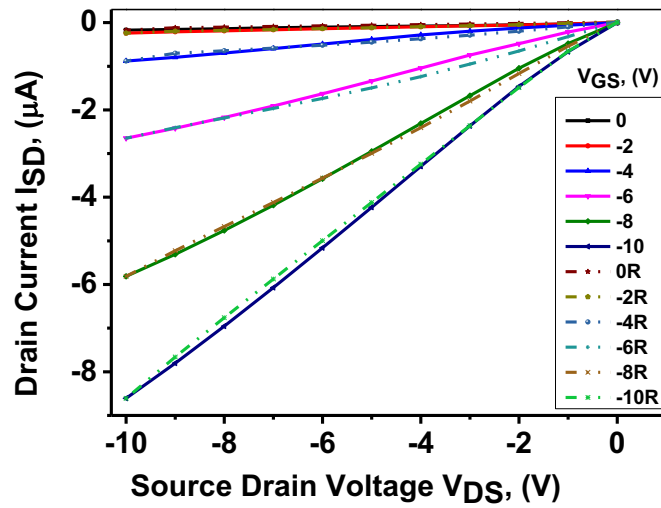


Obrázok 13: Štruktúra siete patrná v polovodičovej vrstve tlačenej sieťotlačou, s hustotou 165 l/cm, priemerom vlákna 27 μm, z 5% roztoku TIPS Pentacene v toluéne.

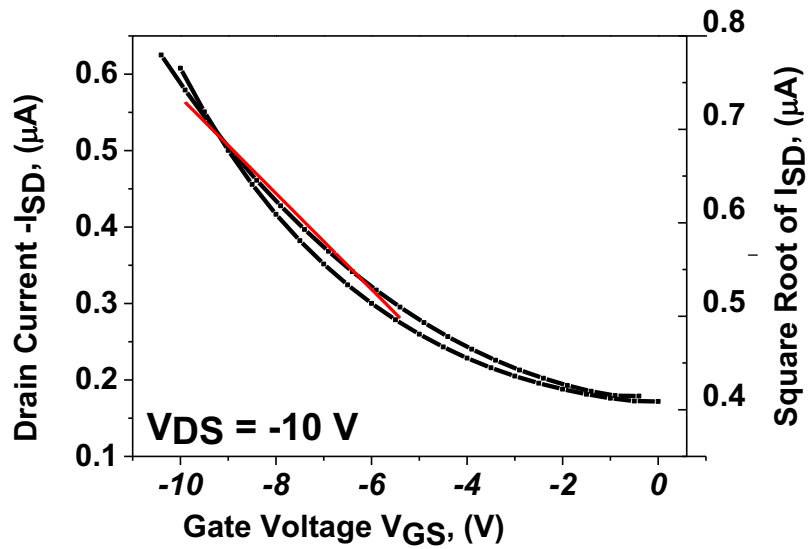
5.8 Elektrické vlastnosti

Väčšina meraných vzoriek tranzistorov bola skratovaná. Skrat bol spôsobený nehomogenitou dielektrickej vrstvy ktorá obsahovala diery a prachové nečistoty (Obrázok 11). Iba vybrané vzorky s hliníkovými Gate a striebornými S/D elektródami preukázali tranzistorové vlastnosti. Výstupná charakteristika obrázku č. 5 ukazuje lineárnu závislosť napätia a prúdu D/S elektród. Z grafu č. 6 je jasné že zmena prúdu na Gate elektróde ovplyvňuje množstvo prúdu prechádzajúce tranzistorom.

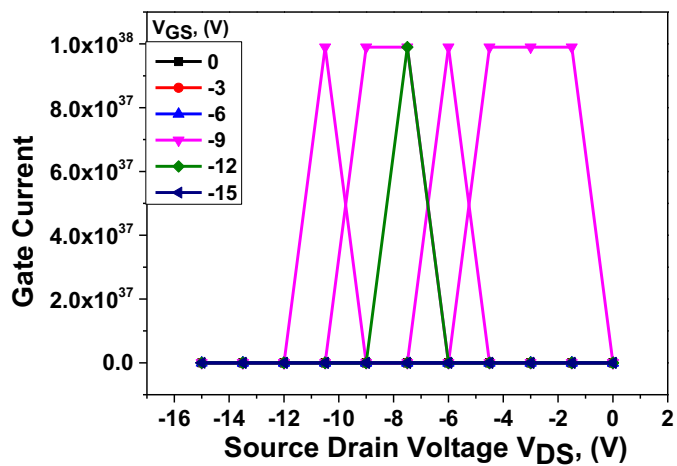
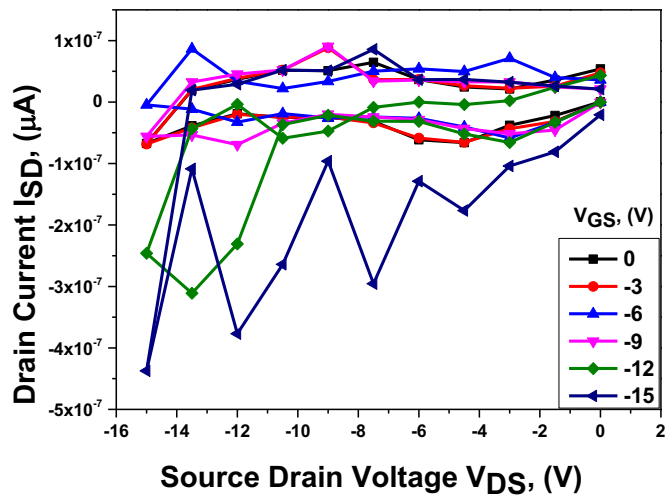
Tranzistor vykazoval mobilitu $0,002 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ a minimálne spínacie napätie 4,7 V.



Graf 6: Výstupná charakteristika tranzistora s Al elektródami. Bez saturácie.



Graf 7: Transferová charakteristika tranzistora s Al elektródami



Graf 8: Výstupná a transferová charakteristika skratovaného tranzistora s Ag elektródami

6 ZÁVER

Funkčné vrstvy OFET je možné pripraviť veľkým množstvom tlačových techník. Nie všetky techniky ale umožňujú vhodnú tlač danej vrstiev čiže kompletného tranzistora. Najjednoduchší spôsob prípravy OFET v laboratórnych podmienkach je inkjet a sieťotlač. Jej výhody sú v nízkej cene stroja, nevýhody sú relatívne nízke rozlíšenie, náchylnosť sítia k pretrhnutiu a zdĺhavá príprava formy. Pri inkjet-e táto nevýhoda odpadá, jeho cena je ale vyššia, pracuje pomalšie a nános farby je menší. Problematické môže byť zanášanie trysiek.

Tlačou boli pripravené tranzistory s Al a Ag elektródami. Hrúbky vrstiev dielektrika dosahovali 450 nm pre formuláciu s 9 %, 190 nm pre 6 % a 140 nm pre 3 % dielektrika PVP pre Ag elektródy.

V prípade Al gate elektród bola hrúbka jednotlivých vrstiev 600 nm pre formuláciu s 9 %, 450 nm pre 6 % a 140 nm pre 3 % dielektrika PVP.

Pri tlači SD štruktúry nastávalo rozšírenie tlače. Elektródy s hrúbkou 80 μm dosahovali reálnu hrúbku 120 μm . Elektródy so vzdialenosťou 80 μm sa preto zlievali. Reálne vzdialenosti elektród boli 45 μm pre 100 μm , 90 μm pre 130 μm a 130 μm pre 160 μm .

Najlepšie výsledky dosiahli OFET s Al elektródami. Takmer všetky substráty s Ag elektródami boli skratované čo mohlo byť zapríčinené vysokou drsnosťou povrchu, nečistotami zachytenými na dielektriku alebo väčšou mierou porúch v slabších vrstvách. Kvalita povrchu by mohla byť zlepšená zredukovaním množstva vzduchových bublín a prachových častíc. Vyššia koncentrácia dielektrika alebo pomalšie sušenie by bolo tiež prospešné.

Poškodeniu povrchu polovodiča a elektród pri roztieraní by sa dalo predísť nastavením väčšej vzdialenosti medzi špirálou a substrátom. V prípade sieťotlače by pravdepodobne bolo možné zlepšiť vlastnosti vrstvy polovodiča zvýšením jeho viskozity.

Presnejším uchytením sítia merným predĺžením Gate elektród by bolo možné zlepšiť pasovanie jednotlivých vrstiev pri tlači.

7 POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] SUGANUMA, Katsuaki. *Introduction to printed electronics* [online]. B.m.: Springer Science & Business Media, 2014. Dostupné z: <https://books.google.com/books?hl=sk&lr=&id=7HG8BAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=introduction+to+printed+electronics&ots=BFuDnNh8E5&sig=RcdMQ4zrA5FD3lqLutWq7hhcvbw>
- [2] LEENEN, Mark AM, Volker ARNING, Heiko THIEM, Jürgen STEIGER a Ralf ANSELMANN. Printable electronics: flexibility for the future. *physica status solidi (a)*. 2009, **206**(4), 588–597.
- [3] HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALKER. *Fyzika*. Brno: VUTIUM. 2000. 1198 s. B.m.: ISBN 80-214-1868-0. nedatováno.
- [4] *advanced-chemistryprize2000.pdf* [online]. [vid. 2017-06-28]. Dostupné z: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/advanced-chemistryprize2000.pdf
- [5] KAPLANOVÁ, Marie. *Moderní polygrafie*. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2010, 391 s. B.m.: ISBN 978-80-254-4230-2. 2010.
- [6] BUFFAT, Ph. a J-P. BOREL. Size effect on the melting temperature of gold particles. *Physical Review A* [online]. 1976, **13**(6), 2287–2298. Dostupné z: [doi:10.1103/PhysRevA.13.2287](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.13.2287)
- [7] BALAGURU, R. John Bosco a B. G. JEYAPRAKASH. *Melting points, mechanical properties of nanoparticles and Hall Petch relationship for nanostructured materials* [online]. B.m.: NP India, 2010. Dostupné z: http://eacharya.inflibnet.ac.in/data-server/eacharya-documents/55dabcc4e41301ad652caf1e_INFIEP_211/855/ET/211-855-ET-V1-S1__module_10.pdf
- [8] DRŽKOVÁ, Markéta. *Automatizace a řízení tisku*. B.m.: Univerzita Pardubice, 2012. ISBN 978-80-7395-446-8.
- [9] PIERRET, Robert F. *Semiconductor device fundamentals*. B.m.: Pearson Education India, 1996.
- [10] WANG, Chengliang, Huanli DONG, Wenping HU, Yunqi LIU a Daoben ZHU. Semiconducting π -conjugated systems in field-effect transistors: a material odyssey of organic electronics. *Chemical Reviews*. 2011, **112**(4), 2208–2267.
- [11] SIRRINGHAUS, Henning. 25th Anniversary Article: Organic field-effect transistors: the path beyond amorphous silicon. *Advanced materials*. 2014, **26**(9), 1319–1335.

- [12] KLAUK, Hagen. *Organic electronics: materials, manufacturing, and applications* [online]. B.m.: John Wiley & Sons, 2006. Dostupné z: https://books.google.com/books?hl=sk&lr=&id=Fr016RFJX2MC&oi=fnd&pg=PR5&dq=organic+electronics&ots=3JO06Vs4i5&sig=_4AIFKErkqnL5u6lj8Caohbjveo
- [13] DRURY, C. J., C. M. J. MUTSAERS, C. M. HART, M. MATTERS a D. M. DE LEEUW. Low-cost all-polymer integrated circuits. *Applied Physics Letters*. 1998, **73**(1), 108–110.
- [14] UKAH, N. B., J. GRANSTROM, R. R. SANGANNA GARI, G. M. KING a S. GUHA. Low-operating voltage and stable organic field-effect transistors with poly (methyl methacrylate) gate dielectric solution deposited from a high dipole moment solvent. *Applied Physics Letters*. 2011, **99**(24), 273.
- [15] GAMERITH, Stefan, Andreas KLUG, Horst SCHEIBER, Ullrich SCHERF, Erik MODEREGGER a Emil JW LIST. Direct Ink-Jet Printing of Ag–Cu Nanoparticle and Ag-Precursor Based Electrodes for OFET Applications. *Advanced Functional Materials*. 2007, **17**(16), 3111–3118.
- [16] CICOIRA, Fabio, Clara SANTATO, Franco DINELLI, Mauro MURGIA, Maria Antonietta LOI, Fabio BISCARINI, Roberto ZAMBONI, Paul HEREMANS a Michele MUCCINI. Morphology and Field-Effect-Transistor Mobility in Tetracene Thin Films. *Advanced functional materials*. 2005, **15**(3), 375–380.
- [17] KLAUK, Hagen a Thomas N. JACKSON. Pentacene organic thin-film transistors and ICs. *Solid State Technology*. 2000, **43**(3), 63–63.
- [18] ASSADI, A., C. SVENSSON, M. WILLANDER a O. INGANÄS. Field-effect mobility of poly(3-hexylthiophene). *Applied Physics Letters* [online]. 1988, **53**(3), 195–197. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.100171
- [19] MCCULLOUGH, Richard D., Renae D. LOWE, Manikandan JAYARAMAN, Paul C. EWBANK, Deborah L. ANDERSON a Stephanie TRISTRAM-NAGLE. Synthesis and physical properties of regiochemically well-defined, head-to-tail coupled poly (3-alkylthiophenes). *Synthetic metals*. 1993, **55**(2–3), 1198–1203.
- [20] PERELAER, Jolke, Patrick J. SMITH, Dario MAGER, Daniel SOLTMAN, Steven K. VOLKMAN, Vivek SUBRAMANIAN, Jan G. KORVINK a Ulrich S. SCHUBERT. Printed electronics: the challenges involved in printing devices, interconnects, and contacts based on inorganic materials. *Journal of Materials Chemistry*. 2010, **20**(39), 8446–8453.
- [21] YANG, Cheng, Ching Ping WONG a Matthew MF YUEN. Printed electrically conductive composites: conductive filler designs and surface engineering. *Journal of Materials Chemistry C*. 2013, **1**(26), 4052–4069.

- [22] DI, Chong-an, Yunqi LIU, Gui YU a Daoben ZHU. Interface engineering: an effective approach toward high-performance organic field-effect transistors. *Accounts of chemical research*. 2009, **42**(10), 1573–1583.
- [23] HUEBLER, Arved, Ulrich HAHN, Wolfgang BEIER, Nicole LASCH a Thomas FISCHER. High volume printing technologies for the production of polymer electronic structures. In: *Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics, 2002. POLYTRONIC 2002. 2nd International IEEE Conference on* [online]. B.m.: IEEE, 2002, s. 172–176. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1020204/>
- [24] ZIELKE, Dirk, Arved C. HÜBLER, Ulrich HAHN, Nicole BRANDT, Matthias BARTZSCH, Uta FÜGMANN, Thomas FISCHER, Janos VERES a Simon OGIER. Polymer-based organic field-effect transistor using offset printed source/drain structures. *Applied Physics Letters*. 2005, **87**(12), 123508.
- [25] VAKLEV, Nikolay L., Robert MÜLLER, Beinn V. O. MUIR, David T. JAMES, Roger PRETOT, Paul VAN DER SCHAAF, Jan GENOE, Ji-Seon KIM, Joachim H. G. STEINKE a Alasdair J. CAMPBELL. High-Performance Flexible Bottom-Gate Organic Field-Effect Transistors with Gravure Printed Thin Organic Dielectric. *Advanced Materials Interfaces* [online]. 2014, **1**(3), n/a-n/a. ISSN 2196-7350. Dostupné z: [doi:10.1002/admi.201300123](https://doi.org/10.1002/admi.201300123)
- [26] SIRRINGHAUS, H., T. KAWASE, R. H. FRIEND, T. SHIMODA, M. INBASEKARAN, W. WU a E. P. WOO. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits. *Science*. 2000, **290**(5499), 2123–2126.
- [27] HUANG, Daniel, Frank LIAO, Steven MOLESA, David REDINGER a Vivek SUBRAMANIAN. Plastic-compatible low resistance printable gold nanoparticle conductors for flexible electronics. *Journal of the electrochemical society*. 2003, **150**(7), G412–G417.
- [28] PARK, Jang-Ung, Matt HARDY, Seong Jun KANG, Kira BARTON, Kurt ADAIR, Deep KISHORE MUKHOPADHYAY, Chang Young LEE, Michael S. STRANO, Andrew G. ALLEYNE, John G. GEORGIADIS a OTHERS. High-resolution electrohydrodynamic jet printing. *Nature materials*. 2007, **6**(10), 782.
- [29] SEKITANI, Tsuyoshi, Yoshiaki NOGUCHI, Ute ZSCHIESCHANG, Hagen KLAUK a Takao SOMEYA. Organic transistors manufactured using inkjet technology with subfemtoliter accuracy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008, **105**(13), 4976–4980.
- [30] KO, Seung H., Heng PAN, Costas P. GRIGOROPOULOS, Christine K. LUSCOMBE, Jean MJ FRÉCHET a Dimos POULIKAKOS. All-inkjet-printed flexible electronics

fabrication on a polymer substrate by low-temperature high-resolution selective laser sintering of metal nanoparticles. *Nanotechnology*. 2007, **18**(34), 345202.