

Ing. Ján Uhrík

Autoreferát dizertačnej práce

**VÝVOJ TECHNOLOGIÍ PRE CMOS INTEGROVANÉ OBVODY
NA BÁZE ORGANICKÝCH POLOVODIČOV**

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe: elektronika a fotonika

v študijnom odbore

5.2.13 elektronika

Miesto a dátum:

Bratislava, jún 2018

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Ján Uhrík

Autoreferát dizertačnej práce

**VÝVOJ TECHNOLOGIÍ PRE CMOS INTEGROVANÉ OBVODY NA
BÁZE ORGANICKÝCH POLOVODIČOV**

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe: elektronika a fotonika

Miesto a dátum:

Bratislava, jún 2018

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia
na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Ján Uhrík**
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Ján Jakabovič, PhD.**
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **Ing. Jozef Osvald, DrSc**
Elektrotechnický ústav SAV, Oddelenie
mikroelektroniky a senzoriky
Dúbravská cesta 9, 842 39 Bratislava

prof. Ing. Dušan Pudiš, PhD.
Elektrotechnická fakulta, Katedra fyziky
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:o.....h.

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej
univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
Dekan FEI STU

Obsah

1	Úvod	4
2	Prehľad súčasného stavu	4
3	Ciele dizertačnej práce	6
4	Dosiahnuté výsledky	7
4.1	Nové polovodičové materiály a ich technológia prípravy potrebné pre vytvorenie IO na báze organických polovodičov.	7
4.2	Nové postupy technológie prípravy kontaktných vrstiev na báze kovov s nízkou výstupnou prácou	11
4.3	Nové postupy technológie prípravy dielektrických a pasivačných vrstiev pre integrované obvody	16
4.4	Návrh a realizácia prototypu integrovaného obvodu	18
5	Záver	23
	Použitá literatúra	26
	Zoznam publikácií	27
	Zoznam citácií	30

1 Úvod

Súčasný prudký rozvoj plovodičových technológií je poháňaný nikdy nekončiacimi požiadavkami na lepšiu účinnosť a väčšiu funkčnosť elektronických zariadení pri menších výrobných nákladoch [1]. V dôsledku týchto požiadaviek vzniká nová generácia tenko vrstvovej, flexibilnej elektroniky nazývaná organická elektronika. Organická elektronika je technologickou platformou založenou na organických vodivých, polovodivých a iných funkčných materiáloch, ktorá ponúka nízke výrobné náklady, jednoduchú výrobu a flexibilitu. Otvára nové možnosti pre nové produkty a ich aplikácie.

2 Prehľad súčasného stavu

V rámci organickej elektroniky sa v súčasnosti výskumné aktivity sústreďujú najmä na organické LED diódy (OLED - Organic Light Emitting Diode), organické tenko vrstevové tranzistory (OTFT - Organic Thin Film Transistors), solárne články a batérie. V dnešnej dobe popri OLED sa čoraz viac dostávajú do popredia OTFT kde je snaha využívať ich na riadenie elektroluminiscenčných diód v OLED displejoch. Technológia OTFT predstavuje alternatívu k tranzistorom na báze polykryštalického, alebo amorfného kremíka. OTFT sú perspektívne vďaka jednoduchému technologickému procesu, pretože je podstatne menej zložitý ako konvenčná technológia na báze kremíka, ktorá zahŕňa vysokoteplotný a vysoko vákuový výrobný proces. Nízkoteplotné metódy depozície organického polovodiča z roztoku môžu nahradiť o mnoho komplikovanejší proces konvenčnej kremíkovej technológie. Navyše vďaka mechanickej flexibilitě organických materiálov sú zlučiteľné s plastickými substrátmi pre ľahké a ohybné produkty. Od prvej zmienky o OTFT v roku 1986 nastal obrovský pokrok vo vlastnostiach materiálov a vývoji výrobných technológií. OTFT už boli predvedené v aplikáciách ako sú elektronický papier, senzory a pamäťové zariadenia vrátane RFID kariet. Hoci OTFT nie sú určené na úplné nahradenie anorganických tranzistorov, napriek ich nízkej spínacej rýchlosti, majú veľký potenciál pre širokú škálu aplikácií, špeciálne pre nové produkty, ktoré sú založené na ich jedinečných vlastnostiach. Ako elektronické noviny a veľké flexibilné displeje [2].

V posledných rokoch boli pre tenko vrstvomé tranzistory – TFT (Thin Film Transistor) vyvinuté nové tenkovrstvomé technológie založené na rôznych materiáloch. Materiály sa pohybujú od organických polovodičov, mikro-kryštalickeho kremíka, uhlíkových nanotrubiiek a grafénu. Všetky tieto materiály vykazujú ambipolárny prenos náboja. Preto niektorí autori navrhovali ambipolárne obvody ako alternatívu k technológiám CMOS. Realizácia ambipolárnych logických obvodov je jednoduchšia v porovnaní s výrobou logických obvodov v CMOS technológiách. Na realizáciu jednoduchých číslicových obvodov je potreba menej deponovaných vrstiev a menej tvarovacích krokov. Avšak vzhľadom k ambipolárnej povahe prenosu náboja tranzistory nemožno úplne vypnúť, a tým sa zvýši statický príkon a zníži sa šumový rozsah tranzistora [3].

V nedávnej minulosti boli vyvinuté na vzduchu stabilné organické polovodičové materiály pre n-kanálový a p-kanálový OTFT. Taktiež bol dosiahnutý pokrok vo vývoji čoraz zložitejších číslicových obvodov na báze organických polovodičov. Bolo navrhnutých množstvo riešení ako realizovať takýto obvod. Tieto môžu byť na báze p-kanálových poľom riadených tranzistorov, komplementárnych obvodov, alebo hybridných organicko-anorganických komplementárnych obvodov. Každý prístup má svoje výhody a nevýhody. Obvody vytvorené iba z p-kanálových OTFT potrebujú iba jeden funkčný materiál a nie je potrebné tvarovanie aktívnej vrstvy. Z tohto dôvodu sú najjednoduchšie na výrobu. Organické komplementárne obvody potrebujú dva funkčné materiály a z tohto dôvodu už je potrebné aj tvarovanie. Tieto obvody majú lepšiu šumovú odolnosť v porovnaní s p-kanálovými obvodmi, nižší stratový výkon, vyššiu rýchlosť a väčšiu stabilitu pri zmene materiálových parametrov, ako je úroveň dopácie a pohyblivosť [4].

Pri stanovení cieľov na vývoj technologických procesov pre vytvorenie prototypu CMOS integrovaného obvodu (IO) na báze organických polovodičov sme sa zamerali na tie procesy, ktoré sú potrebné pre vytvorenie komplementárneho invertora zhotoveného z dvoch rôznych polovodičov využívajúcich p- aj n-tyt OTFT. Z hľadiska výsledných parametrov IO ako bolo vyššie uvedené, sú tieto oveľa lepšie oproti iným zapojeniam, čo má zásadný význam pre nové perspektívne aplikácie, hoci technologická náročnosť takéhoto IO je vyššia.

3 Ciele dizertačnej práce

Organické tenko vrstvé tranzistory sa prakticky stávajú základnými funkčnými blokmi rozvíjajúcej sa organickej elektroniky. Preto ciele dizertačnej práce boli stanovené nasledovne:

1. Získať nové poznatky o vlastnostiach materiálových systémov potrebných pre vytvorenie integrovaných obvodov na báze organických polovodičov.
2. Na základe získaných poznatkov navrhnuť nové postupy a technológie prípravy organických polovodičových vrstiev vhodných pre integrované obvody. Materiálový systém by mal byť vhodný pre depozíciu z plynnej alebo kvapalnej fázy.
3. Preskúmať vlastnosti a navrhnuť nové postupy technológie prípravy dielektrických a pasivačných vrstiev pre integrované obvody, a nové postupy technológie prípravy kontaktných vrstiev na báze kovov s nízkou výstupnou prácou pre integrované obvody.
4. Nové poznatky a postupy využiť pri návrhu a realizácii prototypu invertujúceho zosilňovača s cieľom jeho použitia v integrovanom obvode.

4 Dosiahnuté výsledky

Ako bolo spomenuté v úvode pri vývoji technologických procesov pre vytvorenie prototypu CMOS IO na báze organických polovodičov sme sa zamerali na tie procesy, ktoré sú potrebné pre vytvorenie komplementárneho invertora zhotoveného z dvoch rôznych polovodičov využívajúcich p– aj n–typ OTFT. Z hľadiska výsledných parametrov IO, sú tieto oveľa lepšie oproti iným zapojeniam, čo má zásadný význam pre nové perspektívne aplikácie, hoci technologická náročnosť takéhoto IO je vyššia.

Pre úspešný návrh CMOS IO na báze organických polovodičov je potrebné vyriešiť niekoľko technologických problémov. Jedným zo zásadných problémov je vývoj a výber vhodných organických polovodičových materiálov (diery transportujúcich aj elektróny transportujúcich) pre CMOS IO, ďalším veľmi dôležitým problémom je vytvorenie technológie prípravy kvalitných ohmických kontaktov na oboch typoch organických polovodičových materiálov a taktiež vývoj technológie vhodného hradlového dielektrika. Pretože organické polovodičové materiály sú citlivé na vplyv okolitého prostredia ako je vzdušná vlhkosť a kyslík, nemenej závažným problémom je zabezpečiť kvalitnú pasiváciu vytvorených tranzistorových štruktúr. Vzhľadom na už existujúce technologické zázemie a vyvinuté technologické procesy prípravy organických elektronických prvkov na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU, rozhodli sme sa v práci zamerať na tieto technologické problematiky:

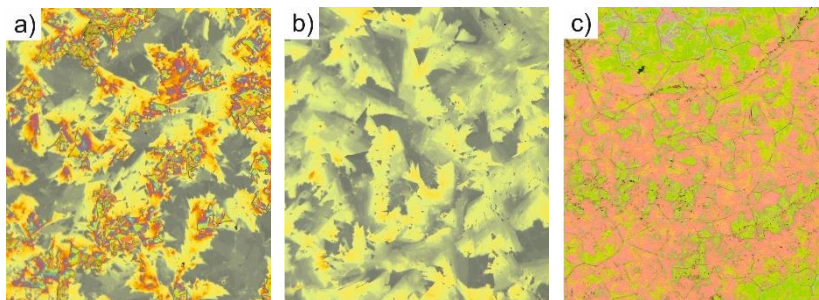
- Nové polovodičové materiály a ich technológia prípravy potrebné pre vytvorenie IO na báze organických polovodičov.
- Nové postupy technológie prípravy kontaktných vrstiev na báze kovov s nízkou výstupnou prácou.
- Nové postupy technológie prípravy dielektrických a pasivačných vrstiev pre IO.
- Návrh a realizácia prototypu IO.

4.1 Nové polovodičové materiály a ich technológia prípravy potrebné pre vytvorenie IO na báze organických polovodičov.

V rámci spolupráce s Prírodovedeckou fakultou Univerzity Komenského bolo vyvinutých niekoľko nových materiálov na báze naftalénových derivátov

s oligotiofénovými ramienkami ktoré sme testovali pre aplikáciu v OTFT. Najlepšie vlastnosti pre využitie v OTFT preukázali materiály zo série naftalénových derivátov s oligotiofénovými ramienkami, H2TxyN (xy = 14, 15 a 26). Najlepšie vlastnosti z nich vykazoval materiál H2T26N (2,6-bis(5'-hexyl-2,2'-bitiofén-5-yl)naftalén). V tejto časti práce sme sa preto zamerali na prípravu OTFT na báze tohto materiálu a jeho charakterizáciu. Organické polovodičové vrstvy na báze tohto materiálu sme pripravovali vákuovým naparovaním a aj technikou depozície z kvapalnej fázy, a to tilt-casting.

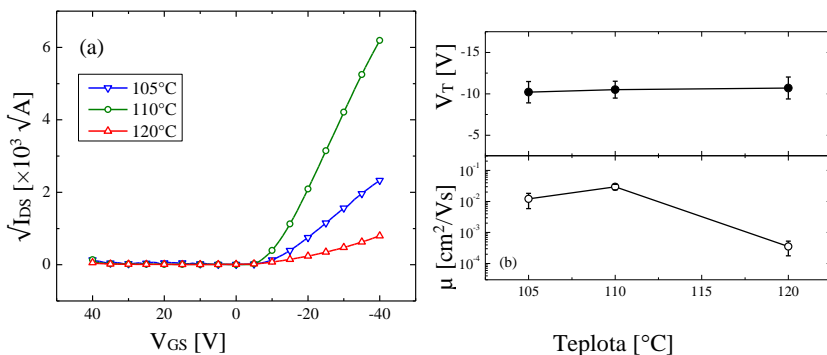
Organický polovodič H2T26N (C38H40S4) bol rozpustený v bezvodom toluéne (Sigma Aldrich) v koncentrácii 0,5mg/mL v dusíkovej atmosfére pri teplote 110°C, ktorá je tesne pod bodom varu rozpúšťadla (110,6°C). Ako substrát sme použili vysoko-dopovaný kremík na ktorom bola termickou oxidáciou vytvorená vrstva SiO₂ hrúbky 110 nm. Na jej povrchu bola vytvorená samousporiadaná monovrstva (SAM) HMDS. Organická vrstva bola nanosená naklonením, pričom substráty boli udržiavané na špecifickej teplote definovanej horúcou platňou na ktorej boli substráty umiestnené, 105, 110 a 120°C. Pri nižších teplotách ako 105°C bolo zistené, že materiál nie je dostatočne rozpustný. Roztok sa na substráty aplikoval cez PTFE membránový filter (veľkosť pórov <400 nm), aby sa predišlo ukladaniu nerozpustených častíc na substrát, následne sa prebytočný roztok odstránil naklonením substrátu o 90 stupňov pri udržiavanej konštantnej teplote substrátu. Po vysušení pri zvýšenej teplote (110 °C) bola dosiahnutá hrúbka vrstvy približne 100 nm. Morfológia povrchu bola pozorovaná optickou mikroskopiou (obr. 4.1a – c).



Obr. 4.1 Povrchová morfológia vrstvy organického polovodiča H2T26N pripraveného z roztoku pri teplote: (a) 105°C, (b) 110°C, (c) 120°C.

Zlaté elektródy pre vrchný kontakt OTFT boli následne naparené vo vákuu. Dĺžka/šírka kanála bola $16\mu\text{m} / 2\text{mm}$. Kryštalizácia začína už pri teplote 105°C , zatiaľ čo veľké kryštály sú pozorované iba pri teplote 110°C . Treba poznamenať, že kryštály s veľkosťou 200 až $300\mu\text{m}$ sú o tri rády väčšie ako zvyčajne pozorované zrná polymérov spracovateľných mokkými technológiami. Zvyšovanie teploty nad bod varu rozpúšťadla má za následok vznik trhlín. Elektrické vlastnosti pripravených tranzistorov, ktorých štruktúra je uvedená na obr. 4.3b, v rovnovážnom stave boli charakterizované pomocou analyzátora polovodičových súčiastok (Agilent 4155C Semiconductor Parameter Analyzer). Z nameraných charakteristík boli stanovené prahové napätia a pohyblivosti nosičov náboja. Prevodové charakteristiky OTFT s polovodičom H2T26N sú znázornené na obr. 4.2a pre napätie gate-source V_{GS} od 0 do -40 V. OTFT vykazuje bežné správanie [5]. Prahové napätie V_T a pohyblivosť μ boli zistené modelom postupnej aproximácie kanálov v oblasti saturácie. Pre tranzistory pripravené pri 110°C je odhadovaná pohyblivosť $3,6 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{Vs}$ a prahové napätie V_T bolo približne -10V . Pomer ON/OFF ($=I_{Ds}(V_{GS,max})/I_{Ds}(V_{GS,min})$) pre tieto OTFT je rádovo 10^6 .

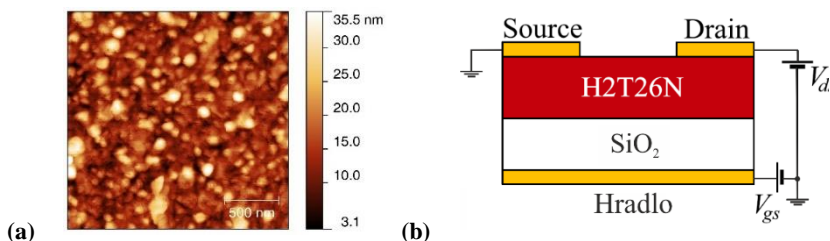
Teplotná závislosť prahového napätia V_T a efektívnej pohyblivosti μ_{eff} sú znázornené na obr. 4.2b. Pohyblivosť sa mierne zvyšuje so zlepšením kryštalinity a dosahuje maximum pri 110°C , po čom nasleduje výrazné zníženie o dva dva rády.



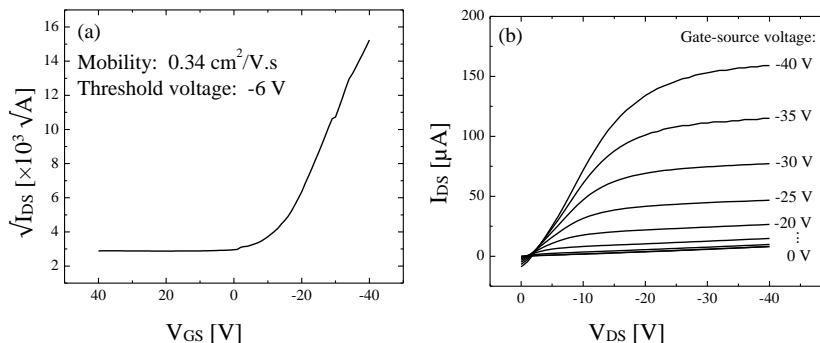
Obr. 4.2 (a) Prevodové charakteristiky H2T26N pre rôzne depozičné teploty, (b) závislosť prahového napätia a pohyblivosti OTFT od teploty.

Na druhej strane je prahové napätie je zachované v všetkých teplotách, dokonca aj keď sa výrazne mení kryštalinita. Predpoklad možného posunu prahového napätia ΔV_T v stave pascií, $\Delta V_T = Q_i/C_g$, s hustotou pascií Q_i . Konštantné prahové napätie zobrazuje zachovanie záchytenej hustoty náboja so zanedbateľným záchytným na hraniciach zrna. Podprahový posun opäť sleduje tendenciu efektívnej pohyblivosti z dôvodu rozptýleného náboja na hraniciach zrn.

Naparované vrstvy vykazujú podstatne menšiu veľkosť zrn (viď. obr. 4.3a) čomu odpovedá pohyblivosť $1,2 \times 10^{-1} \text{cm}^2/\text{Vs}$ a prahové napätie -15V . Aby sa zlepšila kryštalinita a aj elektrické vlastnosti vybrané prvky boli žihané vo vákuu lepšom ako $5 \times 10^{-6} \text{Pa}$ pri teplote 150°C . OTFT po vákuovom žihaní vykazovali pohyblivosť $3,4 \times 10^{-1} \text{cm}^2/\text{Vs}$ a prahové napätie bolo -6V , ako je znázornené na obr. 4.3.



Obr. 4.3 (a) Povrchová morfológia vrstvy organického polovodiča H2T26N pripraveného vákuovou depozíciou. (b) Schematický obrázok pripraveného OTFT na báze H2T26N.



Obr. 4.4 (a) Prevodové a (b) výstupné charakteristiky H2T26N OTFT pripraveného vákuovou depozíciou a následným žihaním.

Ukázalo sa, že tento materiál (H2T26N) sa dá použiť nielen na prípravu OTFT ale aj OLED.

4.2 Nové postupy technológie prípravy kontaktných vrstiev na báze kovov s nízkou výstupnou prácou

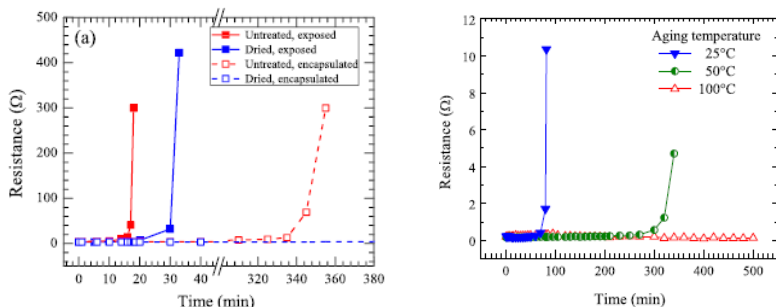
Ďalším veľmi dôležitým problémom je vytvorenie technológie prípravy kvalitných ohmických kontaktov na oboch typoch organických polovodičových materiálov. Pre vytvorenie kontaktu tranzistorov na báze p–typu materiálu, je potrebné použiť ako elektródu kov s vysokou výstupnou prácou ako je napríklad Au, Pt, Pd, Ni, Os, Ir, Cu. Štandardne sa používa Au a tento technologický proces je na pracovisku zvládnutý. Pre prípravu tranzistorov na báze n–typu materiálu, je potrebné použiť ako elektródu kov s nízkou výstupnou prácou ako je napríklad Ba, Ca, Sm, Eu. Kovy s nízkou výstupnou prácou sú v prevažnej väčšine veľmi reaktívne. Z toho dôvodu je potrebné odladiť technologický proces depozície týchto kovov a následne vyriešiť ich stabilitu pre zvýšenie životnosti. Takýto materiál je napríklad kalcium Ca, ktorého elektrický test sa používa ako štandardná metóda na odhad rýchlosti prenosu vodných pár cez pasivačné bariéry. Z tohto dôvodu sme sa preto v tejto časti práce zamerali na korózný proces tenkých Ca vrstiev, vytvorených pri rôznych podmienkach. Pri Ca teste sa na hodnotenie stupňa korózie Ca používa zmena odporu tenkých vrstiev Ca, pretože oxidové soli Ca majú veľmi nízku vodivosť. Za predpokladu homogénnej korózie tenkej vrstvy Ca z povrchu a postupnej zmeny vodivosti medzi korodovaným a čistým Ca je celkový odpor vrstvy R nepriamo úmerný hrúbke h zvyšného vodivého Ca

$$R = \frac{\rho l}{wh}, \quad (2.1)$$

kde ρ predstavuje merný odpor Ca, w a l sú teda šírka a dĺžka tenkej vrstvy. Avšak, odpor vrstvy $R_{\square} = \rho/h$ sa bežne používa na získanie nezávislej premennej v oblasti tenkých vrstiev s jednotkou Ω/\square , kde \square znamená "štvorec". Presne takáto jednotka (Ω/m^2) neexistuje, ale bežne sa používa, pretože sa dá priamo merať. To znamená, že odpor vrstvy je primárny výsledok, zatiaľ čo merný odpor je sekundárny výsledok, ktorý si vyžaduje stanovenie hrúbky vrstvy.

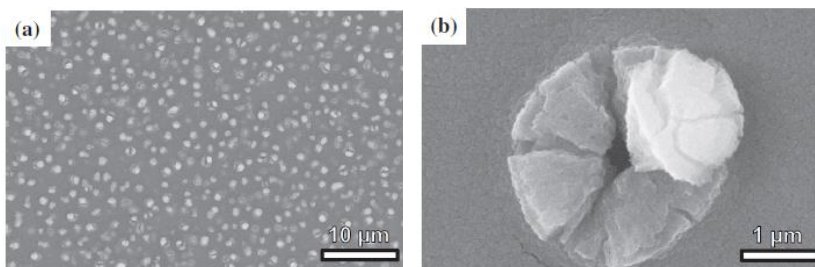
Reakcia s vodnou parou pri izbovej teplote je oveľa výraznejšia ako reakcia s kyslíkom [7,8,14]. Ako substrát boli použité sklenené alebo Si substráty. Substráty sa čistili ultrazvukom v izopropylalkohole a následne v deionizovanej vode po dobu 10 minút. Pred depozíciou kovu bola použitá kyslíková plazma na odstránenie zvyšných organických molekúl z povrchu substrátu.

Hliníkové elektródy (s hrúbkou 100nm) boli vytvorené cez tieniacu masku. Vákuové žihanie bolo robené v depozičnej komore v ktorej sa následne deponuje Ca pomocou výhrevného telesa, ktoré bolo v priamom kontakte so substrátom. Ca (99%, Sigma-Aldrich) bolo deponované cez tieniacu masku vo vákuu 8×10^{-6} Pa alebo lepšom. Na dosiahnutie vyššej presnosti merania boli rozmery tenkej vrstvy Ca navrhnuté tak, aby táto vrstva mala 10 štvorcov (t.j. $w = 1\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$). Hrúbka deponovanej vrstvy bola monitorovaná pomocou oscilácií meracieho kryštálu a rýchlosť odparovania Ca bola 8nm/s. Následne boli vrstvy Ca pasivované prekrytím vrstvou oxidu kremíka (SiO) hrúbky 40nm bez toho, aby došlo k prerušeniu vákuu, kvôli ich ochrane pred okolitým prostredím. V tejto práci pod okolitým prostredím rozumieme atmosféru s teplotou 25°C a relatívnou vlhkosťou (RH) 33%. Elektrické merania boli uskutočnené štvorbodovou metódou, avšak nebol zistený žiadny rozdiel v porovnaní s inými meracími technikami, pretože celkový zaznamenaný odpor nebol nikdy pod 10Ω. Morfológia Ca vrstiev bola pozorovaná elektrónovým mikroskopom LEO 1550 v móde sekundárnych elektrónov (SE) s využitím detektora v objektíve. Koncentračný profil testovaných vrstiev bol analyzovaný pomocou zariadenia pre hmotnostnú spektroskopiu založeného na dobe preletu sekundárnych iónov (TOF SIMS - time-of-flight secondary ion mass spectroscopy) s nízkou energiou 500eV. Cs⁺ primárny zdroj bol použitý na hĺbkový profil štruktúry a analýzu defektov súvisiacich s vodíkom a kyslíkom. Primárny zdroj O⁻ s rozmermi zväzku 80×80μm² a uholom dopadu 45° k povrchu vzorky, bol použitý na analýzu Ca iónov. Pripravené vzorky boli vystavené okolitej atmosfére počas 10 minút a potom pokryté vrstvou Au s hrúbkou 300nm, aby sa zachoval získaný stav. Pre demonštráciu citlivosti Ca na okolité prostredie sa na sklenený substrát neparilo 300nm Ca. Na porovnanie, ďalší substrát bol zapuzdrený vrstvou SiO. Obr. 4.5a znázorňuje časovú závislosť odporov po vystavení okolitému prostrediu. Dosiagnutá životnosť Ca vrstvy vystavenej okoliu bola 18 minút, len ako výsledok korózneho procesu. Na obr. 4.5b je znázornený časový vývoj merného odporu Ca vrstvy. Aj keď zvýšenie teploty urýchľuje chemickú reakciu pri korózii, zvýšená teplota podkladu potláča kondenzáciu vody. V dôsledku toho vysoká teplota substrátu chráni vrstvy Ca proti korózii. Napriek tomu, že referenčná vrstva bola chránená pred okolitou atmosférou, životnosť bola len asi 350 min. Tento výsledok poukazuje na korózný proces bez vystavenia Ca okolitému prostrediu a odhaľuje prítomnosť molekúl vody na povrchu SiO₂ pred depo-



Obr. 4.5 (a) Časová závislosť odporu nepasivovanej vrstvy Ca hrúbky 300nm deponovanej na nežihanom a vákuovo žihanom substráte SiO_2 . Pre porovnanie sú uvedené dáta pasivovaných Ca vrstiev na nežihanom a vákuovo žihanom substráte SiO_2 . (b) Časová závislosť odporu vrstvy Ca pre rôzne teploty stárnutia.

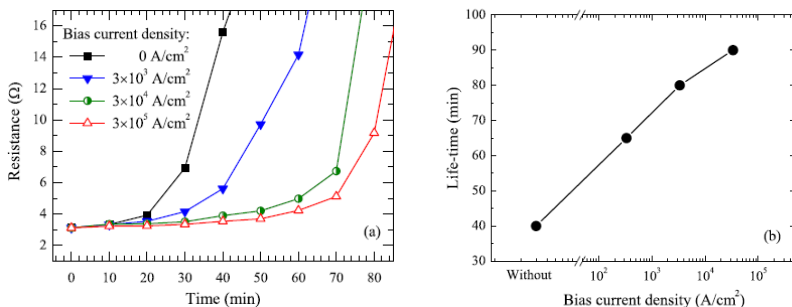
ziciou Ca [9]. Bolo publikované, že hrúbka adsorbovanej vody pri 60% relatívnej vlhkosti je asi 1,2 nm (~ 4 monovrstvy) [10,11]. Na preukázanie účinku adsorbovanej vody boli substráty pred depozíciou Ca žihané vo vákuu pri teplote 200°C počas 30 minút. Aby sme odparili vodu naviazanú na povrchu potrebujeme dosiahnuť teplotu minimálne 180°C [12]. Vrstva Ca vystavená okolitému prostrediu mala iba o niečo dlhšiu životnosť (asi 33 minút), zatiaľ čo zapúzdrená nevykazovala žiadne zvýšenie odporu počas dvoch týždňov pozorovania. Toto zistenie bolo potvrdené experimentmi SIMS, kde skúmané Ca vrstvy boli deponované na neupravených substrátoch a substrátoch žihaných vo vákuu.



Obr. 4.6 Morfológia Ca vrstiev zobrazená elektrónovým mikroskopom v móde sekundárnych elektrónov (SEM) (a) obrázok veľkej plochy (b) detail jedného defektu.

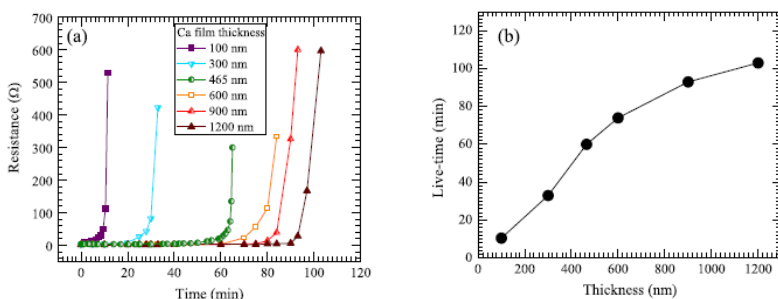
Avšak defekty súvisiace s vodou sú viditeľné vo veľkom množstve pri neupravenom substráte. Proces korózie začína na rozhraní Ca-SiO₂ a nepretržite difunduje do Ca vrstvy. Skorý stupeň korózneho procesu Ca vrstiev deponovaných na neošetrenom substráte bol vizualizovaný pomocou SEM, ako je znázornené na obr. 4.6a. Je zrejme, že proces korózie je nehomogénny a začína miestnymi defektami. Aj keď je proces nehomogénny v mikroskopickom meradle, oblasť skúmaná SIMS, je oveľa väčšia a produkty korózie sa spriemerujú v celej oblasti. Podrobný pohľad na defekt (obr. 4.6b) znázorňuje vplyv korózie na objem. Pretože molárne objemy Ca a Ca(OH)₂ sú 25,8 a 33,5 cm³/mol, objem korodovaného materiálu zvyšuje jeho objem o 30%. Korózia Ca pod vrstvou Ca vytvára trhliny a krátery, čo ďalej urýchľuje proces stárnutia. Na druhej strane, aj keď je substrát sušený vo vákuu, citlivosť na okolitú atmosféru zostáva nezmenená. Aby sa zabránilo procesu korózie Ca, musia byť tenké vrstvy spracované v atmosfére bez vlhkosti. Ako alternatíva k atmosfére bez kyslíka a bez vlhkosti, prezentujeme účinok zvýšenej teploty substrátu. Vytvorené Ca vrstvy s hrúbkou 600 nm sa udržiavali v okolitej atmosfére pri teplote 25, 50 a 100°C. Na obr. 4.6b je znázornený časový vývoj merného odporu Ca vrstvy. Aj keď zvýšenie teploty urýchľuje chemickú reakciu pri korózii, zvýšená teplota podkladu potláča kondenzáciu vody. V dôsledku toho vysoká teplota substrátu chráni vrstvy Ca proti korózii. Upozorňujeme, že zvolené teploty sú stále pod teplotou potrebnou pre oxidáciu [7]. Zmeny povrchovej morfológie sa skúmali na substrátoch stárnutých v okolitej atmosfére počas jednej hodiny. Je zaujímavé, že povrch substrátu stárnutý pri 25°C je úplne korodovaný, zatiaľ čo substrát udržiavaný na 100°C vykazuje len občasné poruchy. Vyhodnotená teplotná závislosť vplyvu oxidovanej oblasti, znázornená, potvrdzuje túto tendenciu. Pretože všetky substráty boli vákuovo sušené pred depozíciou Ca, proces korózie začína na rozhraní Ca-vzduch a pokračuje do vrstvy. Treba poznamenať, že aj keď vrstva Ca vykazuje ~ 50% oxidovanú povrchovú plochu, stále neexistuje žiadny významný vplyv na elektrické vlastnosti. Tieto výsledky poukazujú na dôležitosť teploty tenkých vrstiev Ca. Avšak môžu existovať rôzne príčiny zvýšenia teploty pri Ca teste. Zistili sme, že konštantné prúdové zaťaženie pri štvorbodovom meraní môže tiež zvyšovať teplotu. Pre skúmanie vplyvu priebežných meraní boli testované Ca vrstvy pre prúd 1, 10 a 100mA (viď. obr. 4.7a), ktoré zodpovedajú hustotám prúdu 3×10³, 3×10⁴ a 3×10⁵ A/cm². Očividne vyššie prúdové zaťaženie Ca vrstiev indukuje dlhšiu životnosť, tak ako je to uvedené na obr. 4.7b. Treba si uvedomiť, že vyššie uvedené prúdové

hustoty vytvárajú Joulovo teplo okolo 3, 30 a 300 mW/cm² a teda ohrev tenkej vrstvy Ca v dôsledku pretekajúceho prúdu výrazne potlačuje proces korózie, čo je opakom pôvodne očakávaného urýchlenia korózneho procesu v dôsledku zvýšenia teploty, tak ako to bolo publikované v [13,14]. Je nutné podotknúť, že vplyv potlačenia korózie Ca vyhrievaním vrstvy Ca je väčší ako vplyv pretekajúceho prúdu.



Obr. 4.7 (a) Časová závislosť odporu vrstvy Ca pre rôzne pretekajúce prúdy, (b) nameraná závislosť životnosti na pretekajúcom prúde.

Obr. 4.8a znázorňuje časovú závislosť odporu Ca vrstvy pre rôzne hrúbky. Životnosť sa samozrejme s hrúbkou vrstvy Ca zvyšuje, tak ako je to znázornené na obrázku 4.8b. Nelineárne správanie je pravdepodobne vyvolané povrchovou morfológiou hrubých vrstiev, ako aj krátermi, ktoré sú porovnateľné s hrúbkou vrstvy.



Obr. 4.8 (a) Časová závislosť odporu vrstvy Ca od rôznych hrúbok vrstvy, (b) Závislosť životnosti od hrúbky vrstvy.

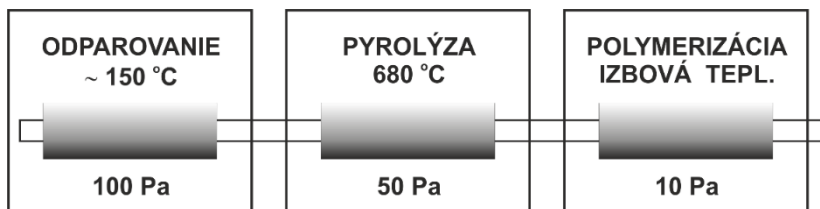
V tejto časti práce sme demonštrovali, že elektrické vlastnosti a korózný proces vrstiev Ca nie sú závislé len od okolitého prostredia, ale tiež závisia od výrobného procesu a technológie. Vákuové sušenie substrátu je potrebné na odstránenie vody adsorbovanej na povrchu substrátu, pretože indukuje proces korózie z rozhrania, hoci tenká vrstva nie je vystavená okolitému prostrediu. Okrem toho sa preukázalo potlačenie procesu korózie Ca zvýšením teploty substrátu. Hrúbková závislosť vrstiev Ca poukazuje na morfológické zmeny a ich vplyv na elektrickú vodivosť ako aj na životnosť Ca. Okrem toho je prezentovaný vplyv prúdu na životnosť. Výsledkom je zistenie, že korózia Ca je závislá od prípravy substrátu a technológie depozície.

4.3 Nové postupy technológie prípravy dielektrických a pasivačných vrstiev pre integrované obvody

Tenké vrstvy parylénu (polypara-xylyén) predstavujú nový typ materiálu, ktorý sa môže použiť ako krycí materiál na redukciu oxidačných problémov organických elektronických prvkov, ako sú OTFT, OLED, solárne články a pod. Plyná povaha spôsobu depozície umožňuje parylénu dokonale pokryť povrchy, ktoré sú nedosiahnuteľné technikami depozície z roztoku, ako sú ostré body, hrany a hlboké dutiny. Proces depozície parylénu zabezpečuje plne konformné pokrytie vzoriek, pričom deponované vrstvy sú transparentné a môžu byť veľmi tenké (niekoľko nm) [14]. Proces rastu parylénovej vrstvy prebieha pri izbovej teplote polymerizáciou xylylénových oligomérov priamo na povrchu vzorky. Samotný pasivačný proces je veľmi jemný bez toho, aby vyvolal akúkoľvek degradáciu a tepelné namáhanie, ako je to v prípade iných procesov pasivácie. Vynikajúce izolačné elektrické vlastnosti parylénu z neho robia vynikajúce riešenie nielen pre pasiváciu OLED a OTFT, ale aj pre hradlové dielektrikum v OTFT. Niektoré novšie publikácie ukázali, že pohyblivosť nosičov náboja v organických tranzistoroch je pozoruhodne zlepšená povrchovou úpravou substrátu alebo použitím polymérového hradlového dielektrika [2, 4].

Parylénové polyméry sa vytvárajú z plynnej fázy procesom, ktorý sa v niektorých ohľadoch podobá vákuovej metalizácii. Na rozdiel od vákuovej metalizácie, ktorá prebieha pri tlakoch 1 mPa alebo nižších, sa parylén vytvára pri tlakoch okolo 10 Pa. Za týchto podmienok je priemerná voľná dráha molekúl plynu v depozičnej komore rádovo 1 mm. Preto na rozdiel od vákuovej metalizácie nie je depozícia cieľená (iba na miesta ktoré nie sú

zakryté) a všetky strany púzdreného predmetu sú rovnomerne obklopené plynným monomérom. Toto je zodpovedné za skutočne konformnú povahu pokrytia. Proces pozostáva z troch rôznych krokov, ako je znázornené na obr. 4.9.

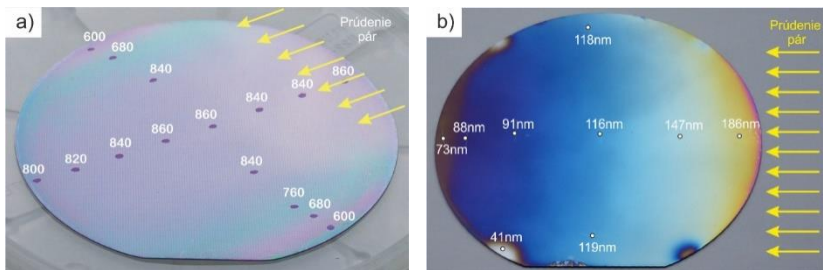


Obr. 4.9 Proces depozície parylénu.

Proces depozície začína zahriatím materiálu (dipara-xylyén) na teplotu 150 °C vo vákuovom systéme, až kým materiál nezačne sublimovať. V plynnom stave pri 680 °C sa dimér rozkladá na plynný monomér (para-xylylénu). Plyn potom prúdi do depozičnej komory v ktorej narazí na substrát. Pri narazení na sa plyn premieňa na pevný polymérny stav (polyparaxylyén), ktorý má formu úplne konformnej polymérnej vrstvy. Reguláciou množstva plynného monoméru (ďalej len *pary parylénu*) vstupujúceho do komory môže regulovať hrúbku vrstvy. Parylén sa nanáša v hrúbke od niekoľkých nanometrov do 50µm alebo aj viac, v závislosti od funkcie parylénovej vrstvy [14].

V súčasných depozičných aparátúrach je depozičná komora vo forme valca, ktorá väčšinou má rozmery 30–60 cm v priemere a vysoký je 30–85 cm. Na dosiahnutie homogénnej hrúbky nanášanej vrstvy v tejto konfigurácii sa musí vzorka otáčať v komore. Ďalšou veľmi vážnou nevýhodou tohto systému je nemožnosť merať hrúbku deponovanej vrstvy in-situ. To je dôvod, prečo bol navrhnutý úplne nový typ depozičnej komory, kde vzorka nemusí byť pohyblivá. Aby sme dosiahli vysoko homogénnu hrúbku nanášanej parylénovej vrstvy, potrebujeme zabezpečiť homogénny laminárny prietok paryléno-vých pár cez depozičnú komoru. Preto na vstup do komory je nutné pridať difuzér, aby sme dosiahli homogénny a laminárny tok pár parylénu cez celú komoru. U prvej verzie tohto nového typu depozičnej komory parylénu pre substráty do 80×120mm bol tento difuzér navrhnutý podľa odhadu. Homogenita deponovanej parylénovej vrstvy, bola overená pomocou mechanického profilometra Dektak 150 na Si substráte o priemere 75mm (3") a je znázornená na obr. 4.10a. Jednotlivé body na substráte identifikujú

jednotlivé miesta, kde bola hrúbka meraná (uvedené hodnoty sú v nm). Z nameraných údajov vyplýva, že homogenita vrstvy v smere kolmom na prúdenie parylénových pár je 30% čo je pre pasiváciu postačujúce.



Obr. 4.10 Homogenita deponovanej parylénovej vrstvy na: (a) 3" Si substráte, (b) na 6" Si substráte (hrúbka vrstiev je v nm).

Pri potrebe použitia parylénu ako hradlové dielektrikum OTFT (nutná lepšia homogenita) a pri potrebe väčšieho depozičného systému, ktorý by bol schopný používať substráty do veľkosti formátu A5 je potrebné pre návrh difuzéru použiť sofistikovanejšie metódy návrhu.

Z tohto dôvodu sme sa rozhodli simulovať tok parylénových pár v depozičnej komore. Pre simuláciu sme použili program (SolidWorks), ktorý vypočíta trajektóriu molekúl parylénu (monoméru) metódou konečných prvkov. Na základe simulácií bol na vstupe do komory navrhnutý a realizovaný nový difuzér. S jeho použitím dosiahnutá homogenita deponovanej parylénovej vrstvy, ktorá je znázornená na obr. 4.10b (overená pomocou mechanického profilometra na Si substráte o priemere 152mm (6")). Jednotlivé body na substráte identifikujú jednotlivé miesta, kde bola hrúbka meraná (uvedené hodnoty sú v nm). Z nameraných údajov vyplýva, že homogenita vrstvy v smere kolmom na prúdenie parylénových pár je vynikajúca a dosahuje hodnotu $\pm 1,26\%$. Pokles hrúbky vrstvy v smere prúdenia parylénových pár je spôsobený poklesom koncentrácie pár v objeme nad vzorkou, čo sa dá kompenzovať zmenšením objemu komory nad vzorkou na výstupe pár z komory, čo sa dá dosiahnuť náklonom vrchnej časti krytu komory.

4.4 Návrh a realizácia prototypu integrovaného obvodu

Pri návrhu CMOS IO (v našom prípade invertor) na báze organických polovodičov vychádzame z poznatkov že najlepšie výsledné parametre

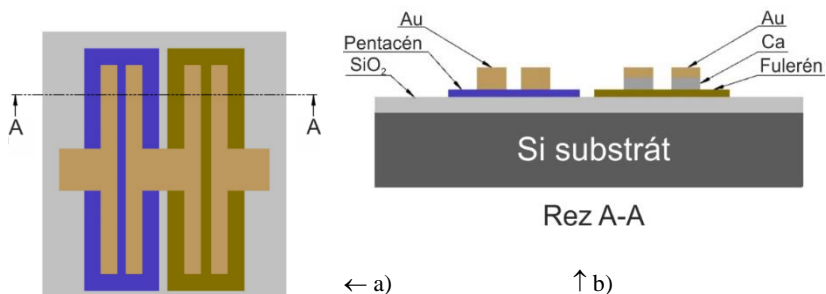
dosahuje komplementárny invertor zhotovený z dvoch rôznych polovodičov využívajúcich p- aj n-typ OTFT. Ako aktívnu vrstvu sme sa rozhodli použiť polovodiče na báze malých molekúl (pentacén a fullerén C-60) kvôli lepšej reprodukovateľnosti a lepším parametrom ich výsledných prvkov pripravených vákuovou depozíciou. Pre zjednodušenie technologického procesu a dosiahnutie väčšej reprodukovateľnosti parametrov OTFT, sme sa rozhodli testovacie štruktúry OTFT vytvoriť na Si substrátoch pokrytých termickým oxidom, ktoré nám súčasne slúžia pri príprave a charakterizácii OTFT ako substrát, hradlový kontakt a hradlové dielektrikum. Pre tvarovanie OTFT sme sa rozhodli použiť depozíciu cez tieniace masky s vysokou rozlišovacou schopnosťou z nehrdzavejúcej ocele (rozlíšenie menšie ako 10 μ m). Ako kontakty pre pentacén / fullerén OTFT sme sa rozhodli použiť Au a Ca. Aby sme dokázali navrhnuť funkčný invertor bolo potrebné najskôr odladiť technologický proces prípravy základných prvkov, ktorými sú tranzistory p- aj n-typu, aby sme dosiahli čo najlepšiu reprodukovateľnosť parametrov. Až na základe dosiahnutých parametrov jednotlivých tranzistorov (p- aj n-typu) budeme môcť navrhnuť topológiu finálneho invertora.

Návrh geometrie invertora

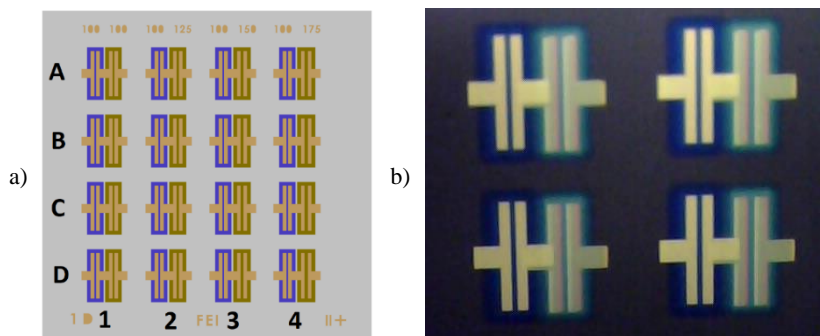
Na základe vyhodnotení vlastností tranzistorov p- a n-typu sme navrhli sadu tieniacich masiek pre prípravu invertorov. Kvôli zjavnému rozptylu prahového napätia ako aj pohyblivosti nosičov náboja pri rovnakej dĺžke kanála sme navrhli masky s rozdielnymi kombináciami dĺžok kanála aby sme našli najlepšiu kombináciu pre invertovací komplementárny integrovaný obvod na báze organických polovodičov. Po vyžihnutí substrátu vo vákuu sme nechali substrát vychladnúť a následne sme naparili polovodičovú vrstvu n-typu cez tieniacu masku určenú pre polovodič n-typu, potom sme naparili polovodič p-typu. Na polovodič n-typu sme naparili vrchný kontakt pre tranzistory n-typu (75nm Ca) a na to ako pasivačnú vrstvu zlato rovnakej hrúbky. Nakoniec sme naparili horný kontakt (Au) pre tranzistory p-typu hrúbky 150nm.

Na obr. 4.11a je znázornená topológia navrhovaného invertora za ideálnych podmienok, keď by všetky masky boli dokonale súkrytované. Na obr. 4.11b je v reze znázornená štruktúra tohoto invertora. Návrh topológie substrátu s invertormi je zobrazený na obr. 4.12a, kde môžeme vidieť rôzne dĺžky kanálov pre invertor. Pre p-typ sme použili konštantnú dĺžku kanálov 100 μ m

a pre n–typ boli dĺžky kanálov v rozmedzí 100-175 μm s rozstupom 25 μm . Na obr. 4.12b je zobrazená časť substrátu s pripravenými invertormi.



Obr. 4.11 (a) Topológia navrhovaného invertora, (b) štruktúra tohto invertora v reze.



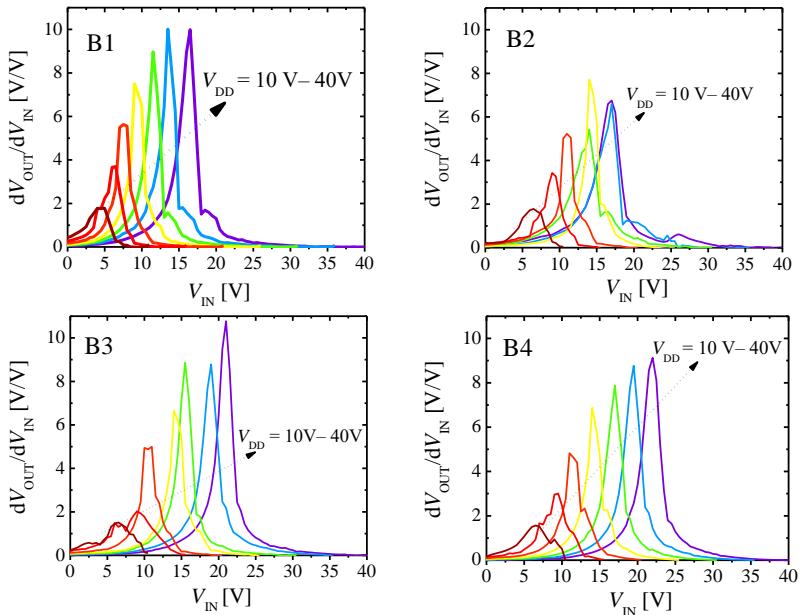
Obr. 4.12 (a) Navrhnutá topológia invertorov na substráe, (b) detail 4 pripravených invertorov

Postup prípravy IO

Na vyčistený substrát bola cez tieniacu masku najprv naparená vrstva fullerénu o hrúbke 50nm, nasledovaná 50nm vrstvou pentacénu ktorá bola naparená cez tieniacu masku. Následne v tom istom vákuovom cykle boli naparené kovové elektródy. Najprv bola cez tieniacu masku na vrstvu fullerénu naparená vrstva Ca o hrúbke 75nm nasledovaná 75nm pasivačnou vrstvou Au o hrúbke 75nm. Celý proces prípravy invertora bol završený naparením zlata na pentacén. Cez tieniacu masku bola naparená 150nm hrubá vrstva Au.

Vlastnosti zhotoveného invertora

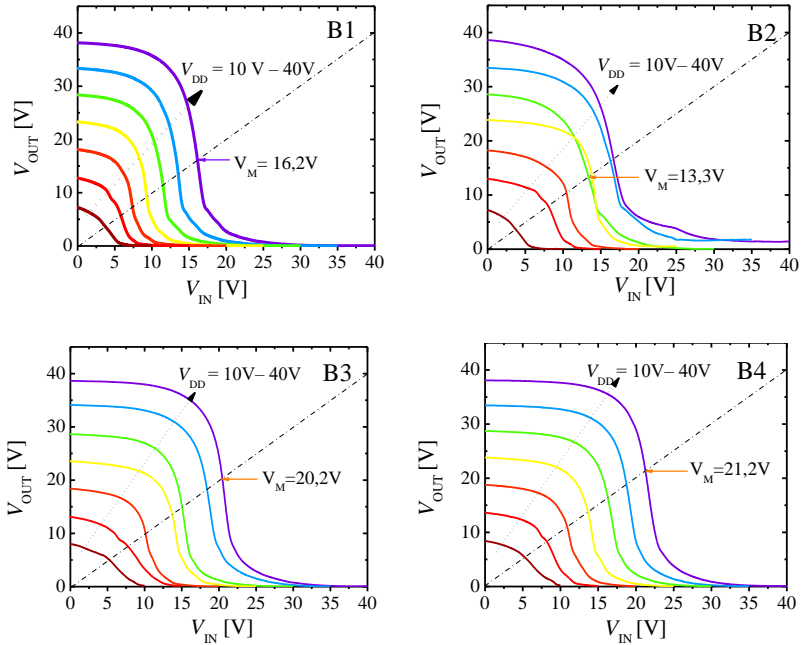
Pre demonštráciu dosiahnutých parametrov zhotoveného invertora boli vybrané invertory z jednej rady, ktorá nie je na kraji, aby sme predišli možným chybám. Chyby by mohli byť spôsobené tým, že sa kanál tranzistorov nachádza blízko okraja vzorky (možné škrabance alebo mikropraskliny). Obrázok 4.13 zobrazuje zisk jednotlivých invertorov (B1 – B4) pri rôznych napájacích napätiach, u ktorých tranzistory n–typu majú rôznu dĺžku kanála. Najväčší zisk bol dosiahnutý u invertora B1, ktorý bol väčší ako 10 pri napájacom napätí v rozmedzí 30V– 40V a u invertora B3 pri napájacom napätí 40V.



Obr. 4.13 zisk invertorov s rôznymi dĺžkami kanála B1 - B4 pri rôznych napätiach V_{DD} .

Prevodové charakteristiky jednotlivých invertorov (B1 – B4) s rôznymi dĺžkami kanála tranzistora n–typu (B1 \cong 100 μ m, B2 \cong 125 μ m, B3 \cong 150 μ m, B4 \cong 175 μ m) pri rôznych napájacích napätiach sú uvedené na obr. 4.14. Ako vidno z tohto obrázku, invertujúce napätie V_M označujúce bod prevodovej

charakteristiky, kedy V_{IN} sa rovná V_{OUT} (v ideálnom prípade V_M by malo byť $V_{DD}/2$) je závislé od dĺžky kanála n–typu polovodiča.



Obr. 4.14 Prevodové charakteristiky invertorov s rôznymi dĺžkami kanála B1 – B4 ($B1 \cong 100\mu\text{m}$, $B2 \cong 125\mu\text{m}$, $B3 \cong 150\mu\text{m}$, $B4 \cong 175\mu\text{m}$) pri rôznych napájacích napätiach.

Najbližšie sa k tomuto napätiu približuje inverter B3 s dĺžkou kanála $150\mu\text{m}$ (zrejme aj inverter B2, ale tento pri napájacích napätiach nad 30V nie je plne funkčný – nedá sa úplne zatvoriť), z čoho sa dá usudzovať že optimálna dĺžka kanála n–typu polovodiča je niekde tesne pod hodnotou $150\mu\text{m}$. Boli tiež vyhodnocované prevodové charakteristiky jednotlivých tranzistorov týchto invertorov (B1 – B4) pri rôznych napájacích napätiach. U každého z nich bolo potom určené prahové napätie a pohyblivosť voľných nosičov náboja. U fullerénových tranzistorov prahové napätie V_T sa pohybuje v rozmedzí 7,9V – 19,3V a pohyblivosť je v rozmedzí $0,10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ – $0,16 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. U pentacénových tranzistorov sa prahové napätie pohybuje v rozmedzí -1,8V – 11,1V a pohyblivosť je v rozmedzí $0,09 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ – $0,19 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Je zaujímavé, že väčší percentuálny rozptyl parametrov sa vyskytuje u pentacénových tran-

zistorov oproti fulerénovým tranzistorom. Veľký rozptyl prahových napätí u oboch typov polovodičov sa dá interpretovať ako veľký rozdiel pasív na rozhraní hradlovej dielektrikum – organický polovodič pozdĺž celého povrchu substrátu, čo indikuje na veľké rozdiely v kvalite povrchu hradlovej dielektrika. Z toho vyplýva nutnosť lepšej prípravy hradlovej dielektrika a to buď zlepšením čistiaceho procesu, použitím samousporiadaných monovrstiev organických materiálov (HMDS, OTS a pod.) alebo použitím parylénu ako hradlovej dielektrika pod organickým polovodičom.

5 Záver

Nový smer rozvoja mikroelektroniky má novú oblasť: organická elektronika. Nastupujúca organická elektronika využíva elektrické vlastnosti organických materiálov v aktívnych alebo pasívnych vrstvách. V súvislosti s dnešnými požiadavkami na nové materiály a zariadenia sa objavilo mnoho nových technológií pre vývoj základných prvkov organickej elektroniky. Jeden z jej základných prvkov a to organický tenkovrstvový tranzistor (OTFT) má potenciál na využitie v aplikáciách, ktoré vyžadujú nízku alebo strednú zložitosť na veľkých plochách a netradičných substrátoch, ako sú sklo alebo flexibilné plastové substráty. Hlavne sa jedná o aplikácie v ktorých je využitie obvodov z monokryštalického alebo polykryštalického kremíka z technických alebo ekonomických dôvodov nerealizovateľné.

Hlavným cieľom práce bol preto výskum v oblasti návrhu a optimalizácie technológie prípravy perspektívnych integrovaných obvodov realizovaných na báze organických polovodičových materiálov. Ťažisko dizertačnej práce bolo preto zamerané na dôležité technologické procesy a nové materiály potrebné na vytvorenie základných funkčných blokov najjednoduchšieho CMOS IO – invertora, a to OTFT oboch typov vodivosti organického polovodiča. Tu boli skúmané nové materiály na báze naftalénových derivátov s oligotiofénovými ramienkami ktoré sme testovali s cieľom pre aplikáciu v OTFT. Ďalším veľmi dôležitým problémom bolo vytvorenie technológie prípravy kvalitných ohmických pontaktov na n-type organických polovodičových materiáloch, kde bolo potrebné použiť ako elektródu kov s nízkou výstupnou prácou (napr. Ba, Ca, Sm, Eu). Tieto sú však veľmi reaktívne, čo spôsobuje veľké technologické problémy. Okrem toho, v rámci vývoja tenkých dielektrických a pasivačných vrstiev parylénu, ktorý môže byť použitý nielen pre pasiváciu prvkov organickej elektroniky, ale aj

ako hradlové dielektrikum v OTFT, bol skúmaný laminárny prietok parylénových pár cez depozičnú komoru, aby sme dosiahli čo najvyššiu homogenitu deponovaných parylénových vrstiev po celom 6" substráte.

Záverečná časť práce bola zameraná na návrh a realizáciu prototypu CMOS IO – invertora.

Hlavné prínosy dizertačnej práce vývoja technologických procesov pre vytvorenie CMOS IO na báze organických polovodičov sú nasledovné:

1. Boli získané nové poznatky o novovyvinutých organických polovodičových materiáloch a ich technologických procesoch ich prípravy na báze naftalénových derivátov s oligotiofénovými ramienkami potrebnými pre vytvorenie integrovaných obvodov na báze organických polovodičov. Organické polovodičové vrstvy na báze týchto materiálov boli deponované vákuovým naparovaním a aj technikou depozície z kvapalnej fázy, a to tilt-casting. Najlepšie vlastnosti z nich vykazoval materiál H2T26N. Pre materiál deponovaný z roztoku pri 110°C bola dosiahnutá pohyblivosť $3,6 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{Vs}$ a prahové napätie bolo približne -10V. Pomer *ON/OFF* ($=I_{DS}(V_{GS,max})/I_{DS}(V_{GS,min})$) pre tieto OTFT je rádovo 10^6 . Pre tento materiál deponovaný vákuovou depozíciou bola dosiahnutá pohyblivosť $1,2 \times 10^{-1} \text{cm}^2/\text{Vs}$ a prahové napätie -15V. Aby sa zlepšila kryštalinita a aj elektrické vlastnosti vybrané prvky boli žihané vo vákuu lepším ako $5 \times 10^{-6} \text{Pa}$ pri teplote 150°C. OTFT po vákuovom žihaní vykazovali pohyblivosť $3,4 \times 10^{-1} \text{cm}^2/\text{Vs}$ a prahové napätie bolo -6V.
2. Boli získané nové poznatky o vývoji elektrických vlastností Ca kontaktu počas korózneho procesu. a postupy technológie prípravy kontaktných vrstiev na báze kalcia, kde bolo poukázané, že elektrické vlastnosti a korózný proces vrstiev Ca nie sú závislé len od okolitého prostredia, ale tiež závisia od výrobného procesu a technológie. Vákuové sušenie substrátu je potrebné na odstránenie vody adsorbovanej na povrchu substrátu, pretože indukuje proces korózie z rozhrania, hoci tenká vrstva nie je vystavená okolitému prostrediu. Tiež bol pozorovaný vplyv zvýšených teplôt na potlačenie korózie Ca pomocou ohrevu substrátu alebo nepretržitého štvorbodového merania.

3. Boli získané nové poznatky o šírení parylenových pár v depozičnej komore parylénovacej aparatúry. Na základe týchto poznatkov boli navrhnuté a realizované difuzéry, pomocou ktorých homogenita parylénovej vrstvy na substráte o priemete 6" dosiahla v smere kolmom na prúdenie parylénových pár vynikajúcu hodnotu $\pm 1,26\%$.
4. Boli vyvinuté technologické postupy a procesy umožňujúce vytvorenie CMOS IO na báze organických polovodičov a to invertora. Následne na základe týchto komplementárnych OTFT bol vyvinutý prototyp invertora, ktorý pri napájacích napätiach v rozmedzí 30V– 40V dosahoval zisk väčší ako 10.

Použitá literatura

- [1.] KLAUK, H. (ed.) *Organic Electronics: Materials, Manufacturing and Applications*, 2nd edn. Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
- [2.] REESE, C.; ROBERTS, M.; LING, M-M.; BAO, Z. *Organic thin film tranzistors*, *Materials today*, 2004, September, 20-27.
- [3.] RISTESKA, A.; Kah-Yoong CH.; ANTHOPOULOS, T.D.; GORDIJN, A.; Helmut STIEBIG, H.; NAKAMURA, M.; KNIPP, D. *Designing organic and inorganic ambipolar thin-film transistors and inverters: Theory and experiment*. *Organic Electronics*, 2012, vol. 13, 2816-2824.
- [4.] CRONE, B. K.; A. DODABALAPUR, R.; SARPESHKAR, R.; FILAS, W.Y.-Y.; LIN, Z.; BAO, J.; O'NEILL, H.; LI W.; KATZ, H.E. *Design and fabrication of organic complementary circuits*. *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 89, 5125- 5132.
- [5.] RISTESKA, A.; Kah-Yoong CH.; ANTHOPOULOS, T.D.; GORDIJN, A.; Helmut STIEBIG, H.; NAKAMURA, M.; KNIPP, D. *Designing organic and inorganic ambipolar thin-film transistors and inverters: Theory and experiment*. *Organic Electronics*, 2012, vol. 13, 2816-2824.
- [6.] LALVANI, S.B. a X. LIN. *A revised model for predicting corrosion of materials induced by alternating voltages*. *Corrosion Science* [online]. 1996, 38(10), 1709-1719.
- [7.] NISSEN, D. A. *The low-temperature oxidation of calcium by water vapor*. *Oxidation of Metals* [online]. 1977, 11(5), 241-261
- [8.] CROS, S., M. FIRON, S. LENFANT, P. TROUSLARD a L. BECK. *Study of thin calcium electrode degradation by ion beam analysis*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* [online]. 2006, 251(1), 257-260.
- [9.] Doremus, R.H. (Ed.), *Glass Science*, second ed., Wiley, New York, 1994, p. 184.
- [10.] ASAY, David B. a Seong H. KIM. *Evolution of the Adsorbed Water Layer Structure on Silicon Oxide at Room Temperature*. *The Journal of Physical Chemistry B* [online]. 2005, 109(35), 16760-16763.
- [11.] VERDAGUER, Albert, Christoph WEIS, Gerard ONCINS, Guido KETTELER, Hendrik BLUHM a Miquel SALMERON. *Growth and Structure of Water on SiO₂ Films on Si Investigated by Kelvin Probe Microscopy and in Situ X-ray Spectroscopies*. *Langmuir* [online]. 2007, 23(19), 9699-9703.
- [12.] HODGSON, A. a S. HAQ. *Water adsorption and the wetting of metal surfaces*. *Surface Science Reports* [online]. 2009, 64(9), 381-451.
- [13.] BERTOCCI, U. *AC Induced Corrosion. The Effect of an Alternating Voltage on Electrodes Under Charge-Transfer Control*. *CORROSION* [online]. 1979, 35(5), 211-215.
- [14.] CHUA, Lay-Lay, Jana ZAUMSEIL, Jui-Fen CHANG, Eric C.-W. OU, Peter K.-H. HO, Henning SIRRINGHAUS a Richard H. FRIEND. *General observation of n-type field-effect behaviour in organic semiconductors*. *Nature* [online]. 2005, 434(7030), 194-199.

Zoznam publikácií

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- ADC01 JUHÁSZ, Peter [20 %] - NEVŘELA, Juraj [5 %] - MIČJAN, Michal [5 %] - NOVOTA, Miroslav [5 %] - **UHRÍK, Ján** [15 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %] - JAKABOVIČ, Ján [15 %] - HARMATHA, Ladislav [5 %] - WEIS, Martin [15 %]. Charge injection and transport properties of an organic light-emitting diode. In *Beilstein Journal of Nanotechnology*. Vol. 7, (2016), s. 47-52. ISSN 21904286. V databáze: CC: 000368133100001.
- ADC02 KUZMA, Anton [20 %] - WEIS, Martin [20 %] - DAŘIČEK, Martin [10 %] - **UHRÍK, Ján** [10 %] - HORÍNEK, František [10 %] - DONOVÁL, Martin [10 %] - UHEREK, František [10 %] - DONOVÁL, Daniel [10 %]. Plasmonic properties of Au-Ag nanoparticles: Distinctiveness of metal arrangements by optical study. In *Journal of Applied Physics*. Vol. 115, Iss. 5 (2014), Art. No. 053517. ISSN 0021-8979 (P).
- ADC03 **UHRÍK, Ján** [16 %] - JAKABOVIČ, Ján [7 %] - ŠATKA, Alexander [7 %] - VINCZE, Andrej [7 %] - FLICKYNGEROVÁ, Soňa [7 %] - SLÁDEK, Ľubomír [7 %] - KUZMA, Anton [7 %] - JUHÁSZ, Peter [7 %] - HORÍNEK, František [7 %] - RENDEK, Karol [7 %] - TELEK, Peter [7 %] - DONOVÁL, Martin [7 %] - WEIS, Martin [7 %]. Effects of substrate condition on calcium corrosion and its role in the calcium test for water vapour transmission rate. In *Corrosion Science*. Vol. 88 (2014), s. 400-404. ISSN 0010-938X.

ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

- ADM01 JAGELKA, Martin [30 %] - NOVÁKOVÁ, Tereza [10 %] - **UHRÍK, Ján** [30 %] - WEIS, Martin [30 %]. Preliminary testing of flexible electrodes for biosignal measurement: Abrasion resistance. In *Lékař a technika*. Roč. 45, č. 1 (2015), s. 16-20. ISSN 0301-5491. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-84944753096.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 JAGELKA, Martin [20 %] - NOVÁKOVÁ, Tereza [20 %] - **UHRÍK, Ján** [15 %] - VANČO, Peter [15 %] - ŠTIBRANÝ, Tomáš [15 %] - WEIS, Martin [15 %]. Abrasion resistance of flexible electrodes for biosignal measurement. In *YBERC 2014 [elektronický zdroj] : Proceedings of the 6th international young biomedical engineers and researchers conference*. Bratislava, Slovak Republic, July 2-4, 2014. 1. vyd. Bratislava : Institute of Electronics and Photonics, FEI STU, 2014, CD-ROM, s. 120-124. ISBN 978-80-971697-0-1.

- AFD02 JAKABOVIČ, Ján [20 %] - UHRÍK, Ján [20 %] - WEIS, Martin [20 %] - FILO, Juraj [20 %] - PUTALA, Martin [20 %]. Effect of Processing Parameters on Performance of 2,6-bis(5'-hexyl-2,2'-bithiophene-5-yl)naphthalene-Based Organic Field-Effect Transistors. In *ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2013, s.119-122. ISBN 978-80-554-0689-3.
- AFD03 JUHÁSZ, Peter [30 %] - UHRÍK, Ján [10 %] - MIČJAN, Michal [10 %] - NEVŘELA, Juraj [10 %] - NOVOTA, Miroslav [10 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [5 %] - VÁRY, Michal [5 %] - WEIS, Martin [20 %]. Charge behaviour in materials for OLED application. In *ADEPT 2016 : 4th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-23, 2016*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2016, S. 75-78. ISBN 978-80-554-1226-9.
- AFD04 MIČJAN, Michal [25 %] - NEVŘELA, Juraj [15 %] - NOVOTA, Miroslav [15 %] - FLICKYNGEROVÁ, Soňa [5 %] - JUHÁSZ, Peter [10 %] - UHRÍK, Ján [5 %] - JAKABOVIČ, Ján [10 %] - WEIS, Martin [15 %]. Ferroelectric polymer films for flexible memory devices. In *ASDAM 2014 : The 10th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice Castle, Slovak Republic, October 20-22, 2014*. 1.vyd. Danvers : IEEE, 2014, s. 93-96. ISBN 978-1-4799-5474-2.
- AFD05 NOVÁKOVÁ, Tereza [20 %] - JAGELKA, Martin [20 %] - FLICKYNGEROVÁ, Soňa [20 %] - UHRÍK, Ján [20 %] - WEIS, Martin [20 %]. Resistance of flexible electrodes for biosignal measurement to chemical exposure. In *YBERC 2014 [elektronický zdroj] : Proceedings of the 6th international young biomedical engineers and researchers conference. Bratislava, Slovak Republic, July 2-4, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Institute of Electronics and Photonics, FEI STU, 2014, CD-ROM, s. 22-26. ISBN 978-80-971697-0-1.
- AFD06 UHRÍK, Ján [20 %] - WEIS, Martin [20 %] - FLICKYNGEROVÁ, Soňa [20 %] - JAKABOVIČ, Ján [20 %] - FILO, Juraj [10 %] - PUTALA, Martin [10 %]. Application of 2,6-bis(5'-hexyl-2,2'-bithiophene-5-yl)naphthalene for Organic Semiconductor Devices. In *ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2013, s.123-126. ISBN 978-80-554-0689-3.

AFD07 **UHRÍK, Ján** [34 %] - **WEIS, Martin** [33 %] - **JAKABOVIČ, Ján** [33 %]. Optimization of parylene deposition chamber to achieve high-uniform thin films suitable as a gate dielectric OTFT. In *ADEPT 2014 : 2nd International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies; Tatranská Lomnica, Slovakia; June 1-4, 2014*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2014, s. 120-123. ISBN 978-80-554-0881-1.

AGJ Autorské osvedčenia, patenty, objavy

AGJ01 **WEIS, Martin** [10 %] - **UHRÍK, Ján** [5 %] - **JAKABOVIČ, Ján** [10 %] - **KUZMA, Anton** [10 %] - **DONOVAL, Martin** [10 %] - **JUHÁSZ, Peter** [10 %] - **FLICKYNGEROVÁ, Soňa** [10 %] - **DAŘÍČEK, Martin** [10 %] - **TELEK, Peter** [10 %] - **SLÁDEK, Ľubomír** [5 %] - **DONOVAL, Daniel** [10 %]. *Spôsob prípravy stabilnej vrstvy kalcia : Patent č. 288433, Dátum udelenia : 29.9.2016*. Banská Bystrica : Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2016. 5 s.

BFA Abstrakty odborných prác zo zahraničných podujatí (konferencie...)

BFA01 **JUHÁSZ, Peter** [20 %] - **NEVŘELA, Juraj** [10 %] - **MIČJAN, Michal** [10 %] - **NOVOTA, Miroslav** [10 %] - **UHRÍK, Ján** [10 %] - **STUHLÍKOVÁ, Ľubica** [10 %] - **HARMATHA, Ladislav** [5 %] - **JAKABOVIČ, Ján** [5 %] - **WEIS, Martin** [20 %]. Charge transport properties of organic light emitting diode. In *ECOF-14 [elektronický zdroj] : 14th European conference on organized films. Genova, Italy. June 29 - July 2, 2015*. Genova : University of Genova, 2015, USB, [O69].

BFA02 **JUHÁSZ, Peter** [30 %] - **UHRÍK, Ján** [10 %] - **MIČJAN, Michal** [10 %] - **NEVŘELA, Juraj** [10 %] - **NOVOTA, Miroslav** [10 %] - **WEIS, Martin** [20 %] - **STUHLÍKOVÁ, Ľubica** [5 %] - **VÁRY, Michal** [5 %]. Layer by layer electrical analysis of organic light emitting diodes OLED. In *ICOE 2016 : Book of Abstracts : 12th International conference on organic electronics. Bratislava, Slovakia. June 13-15, 2016*. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, S. 36-37. ISBN 978-80-227-4571-0.

BFA03 **MIČJAN, Michal** [12 %] - **JUHÁSZ, Peter** [11 %] - **UHRÍK, Ján** [11 %] - **NEVŘELA, Juraj** [11 %] - **NOVOTA, Miroslav** [11 %] - **VÁRY, Michal** [11 %] - **PAVÚK, Milan** [11 %] - **DONOVAL, Martin** [11 %] - **WEIS, Martin** [11 %]. Application of ferroelectric polymers for memory devices. In *ICOE 2016 : Book of Abstracts : 12th International conference on organic electronics. Bratislava, Slovakia. June 13-15, 2016*. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, S. 54. ISBN 978-80-227-4571-0.

BFA04 NEVŘELA, Juraj [16 %] - MIČJAN, Michal [12 %] - NOVOTA, Miroslav [12 %] - JUHÁSZ, Peter [12 %] - UHRÍK, Ján [12 %] - PAVŮK, Milan [12 %] - DONOVAL, Martin [12 %] - WEIS, Martin [12 %]. High-conductive PEDOT:PSS films for OLED applications. In *ICOE 2016 : Book of Abstracts : 12th International conference on organic electronics*. Bratislava, Slovakia. June 13-15, 2016. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, S. 55. ISBN 978-80-227-4571-0.

Zoznam citácií

- ADC01 JUHÁSZ, Peter [20 %] - NEVŘELA, Juraj [5 %] - MIČJAN, Michal [5 %] - NOVOTA, Miroslav [5 %] - UHRÍK, Ján [15 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %] - JAKABOVIČ, Ján [15 %] - HARMATHA, Ladislav [5 %] - WEIS, Martin [15 %]. Charge injection and transport properties of an organic light-emitting diode. In *Beilstein Journal of Nanotechnology*. Vol. 7, (2016), s. 47-52. ISSN 21904286. V databáze: CC: 000368133100001.
1. S.S. Swayamprabha, D.K. Dubey, W-Ch. Song, Y-T. Lin, R.A.K. Yadav, M. Singh and J-H. Jou: An Approach for Measuring the Dielectric Strength of OLED Materials. In: *Materials* 2018, Vol.11(6), 979; pp. 1-8.
 2. M. Socol, N. Preda, C. Breazu, C. Florica, A. Costas, C.M. Istrate, A. Stanculescu, M. Girtan, F. Gherendi: Organic heterostructures obtained on ZnO/Ag/ZnO electrode. In: *Vacuum*, 2018, Vol. 154, pp. 366–370.
 3. C.C. Ciobotaru, S. Polosan, I.C. Ciobotaru: Electroluminescence Properties of IrQ(ppy)₂ Dual-Emitter Organometallic Compound in Organic Light-Emitting Devices. In: *Journal of Electronic Materials*, Vol. 47, 2018, pp. 1490-1496.
 4. S.H Yang, J.P Wu, T.L Huang, B.F Chung: Tunneling Injection and Exciton Diffusion of White Organic Light-Emitting Diodes with Composed Buffer Layers. In: *Journal of Electronic Materials*, Vol. 47, 2018, pp. 1232–1238.
 5. O. Taboubi, M. Radaoui, A.B. Fredj, S. Romdhane, M.C. Scharber, N.S. Saricifci, and H. Bouchriha: Magnetic Field Effects on the Current of PCPDTBT-Based Diode. In: *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 121, 2017, pp. 11727–11732.
 6. S. Polosan, E. Matei, I.C. Ciobotaru, C.C. Ciobotaru: Templateless electrodeposition ZnO nanowires for charge transport optimization in OLED structures. In: *Materials Research Express*, 2016, Vol. 3, pp. 105018.

ADC03 UHRÍK, Ján [16 %] - JAKABOVIČ, Ján [7 %] - ŠATKA, Alexander [7 %] - VINCZE, Andrej [7 %] - FLICKYNGEROVÁ, Soňa [7 %] - SLÁDEK, Ľubomír [7 %] - KUZMA, Anton [7 %] - JUHÁSZ, Peter [7 %] - HORÍNEK, František [7 %] - RENDEK, Karol [7 %] - TELEK, Peter [7 %] - DONOVAL, Martin [7 %] - WEIS, Martin [7 %]. Effects of substrate condition on calcium corrosion and its role in the calcium test for water vapour transmission rate. In *Corrosion Science*. Vol. 88 (2014), s. 400-404. ISSN 0010-938X.

1. Bird D, Cook A, Melgari P, Robbins D, Hollis P, Brewer P, Ferracci V.. Production and measurement of large-area moisture barriers for electronic applications. In *Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, 2016 6th (pp. 1-6). IEEE (2016)

AFD04 MIČJAN, Michal [25 %] - NEVŘELA, Juraj [15 %] - NOVOTA, Miroslav [15 %] - FLICKYNGEROVÁ, Soňa [5 %] - JUHÁSZ, Peter [10 %] - UHRÍK, Ján [5 %] - JAKABOVIČ, Ján [10 %] - WEIS, Martin [15 %]. Ferroelectric polymer films for flexible memory devices. In *ASDAM 2014 : The 10th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice Castle, Slovak Republic, October 20-22, 2014*. 1.vyd. Danvers : IEEE, 2014, s. 93-96. ISBN 978-1-4799-5474-2.

1. B. Prince, D. Prince: *Memories for the Intelligent Internet of Things*. Wiley, May 2018, ISBN: 978-1-119-29635-5, 344 pages