

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Michal Mičjan

VÝVOJ TECHNOLÓGIE PRE RÝCHLE PRVKY ORGANICKEJ ELEKTRONIKY

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR FAST DEVICES OF ORGANIC ELECTRONICS

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe: elektronika a fotonika

Miesto a dátum: Bratislava, Júl 2019

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave Fakulta Elektrotechniky a Informatiky Ústav Elektroniky a fotoniky

Ing. Michal Mičjan

VÝVOJ TECHNOLÓGIE PRE RÝCHLE PRVKY ORGANICKEJ ELEKTRONIKY

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR FAST DEVICES OF ORGANIC ELECTRONICS

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe: elektronika a fotonika

Miesto a dátum: Bratislava, Júl 2019

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Ústave Elektroniky a fotoniky, FEI STU v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Michal Mičjan Ústav elektroniky a fotoniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ:	doc. Ing. Martin Weis, DrSc. Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave	
Oponenti:	Ing. Andrej Vincze, PhD. Medzinárodné Laserové Centrum, Ilkovičoca 3, Bratislava	
	doc. RNDr. Martin Kopáni, PhD. Ústav lekárskej fyziky, biofyziky, informatiky a telemedicíny, Lekárska fakulta, Univerzita Komenského, Sasinkova 2, Bratislava	

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa,o, hod. 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	7
2.1.	Definícia ohmického kontaktu	10
2.2.	Dôvod kontaktného odporu	11
2.3.	Vyhodnocovanie kontaktného odporu	12
3.	Dosiahnuté výsledky	13
3.1.	OFET s dielektrickou vrstvou termického oxidu	13
3.2.	Modifikácia pomocou pridanej vrstvy polyméru PMMA	17
3.3.	Vyhodnotenie kontaktného odporu OFET prvkov	20
3.4.	Zníženie kontaktného odporu pomocou SAM materiálu	26
3.5.	Vplyv kovu použitého na vytvorenie vrchných elektród	28
3.6.	Pôvod kontaktného odporu	31
4.	Záver	36
5.	Zhrnutie dizertačnej práce	40
	Summary	41
	Zusammenfassung	42
6.	Zoznam použitej literatúry	44
7.	Zoznam publikácií:	46

1. Úvod

Polovodičové prvky využívajúce organické materiály sa stali v posledných desaťročiach centrom záujmu výskumu a inovácií v elektronike [1]. Tieto materiály nachádzajú uplatnenie najmä v organických tenkovrstvových tranzistoroch - OTFT (z angl. Organic Thin-Film Transistor), medzi ktoré patria aj organické poľom riadené tranzistory (z angl. Organic Field-Effect Transistor), ďalei v elektroluminiscenčných diódach - OLED (z angl. Organic Light-Emitting Diode), ako aj v solárnych článkoch [2,3]. Organické tranzistory sa stávajú alternatívou k anorganickým tranzistorom a nachádzajú svoje uplatnenie všade tam, kde je žiadaná mechanická flexibilita, či nízka cenová náročnosť. Avšak, napriek viacerým výhodám a širokej škále uplatnení sa organické polovodiče stále stretávajú s istými problémami, ako je napríklad nízka pohyblivosť nosičov náboja, ktorá obmedzuje rýchlosť týchto prvkov. Veľkým problém je tiež citlivosť organických materiálov na rôzne vplyvy prostredia, nedostatočná stabilita na vzduchu alebo malá tepelná odolnosť. Tieto problémy majú veľký vplyv na výsledné parametre OTFT a preto je aktuálny výskum v organickej elektronike stále zameraný na vyriešenie týchto nedostatkov.

Donedávna bol jeden z hlavným výskumných smerov v organickej elektronike zameraný hlavne na zvyšovanie pohyblivosti voľných nosičov náboja organických polovodičov. Za týmto účelom bolo preskúmaných množstvo rôznych organických materiálov, ako aj experimentálnych techník prípravy prvkov organickej elektroniky [4,5]. Avšak popri snahe o dôkladný materiálový výskum sa tiež ukázalo, že je extrémne dôležité naďalej pokračovať aj v základnom výskume. fyziky transportu náboja organických Pokrok vo výskume elektronických prvkov, ktorá v porovnaní s anorganickými prvkami zatiaľ nie je dostatočne objasnená je tak nutnou podmienkou pre zvýšenie kvality týchto prvkov. Bolo vypracovaných viacero teoretických štúdií o fyzike OTFT prvkov [6-8], ale pozornosť sa doteraz zameriavala skoro výlučne na transport náboja v kanáli tranzistora. Avšak elektrický prúd pretekajúci cez OTFT je z veľkej

časti tvorený nábojom injektovaným z elektródy source (emitor), takže aj zlepšenie injekcie náboja z kovovej elektródy do organického polovodiča zohráva dôležitú úlohu pre zlepšenie týchto prvkov.

Ďalším problémom je nutnosť neustále zmenšovať elektronické prvky. Moorov zákon [9] bezpochyby platí v anorganickej elektronike a ani organická elektronika nie je výnimkou. V ideálnych organických tenkovrstvových tranzistoroch vytvárajú elektródy source a drain (kolektor) ohmický kontakt, čo znamená, že veľkosť kontaktného odporu je oproti odporu kanála (odporu polovodiča) zanedbateľná. No pretože skracovanie kanálov tranzistorov výrazne znižuje elektrický odpor kanála, kontaktný odpor sa stáva hlavným príspevkom k celkovému odporu tranzistora pre kanály kratšie ako 1 μ m [10]. Trend miniaturizácie je preto narušený a kontaktný odpor sa tak stáva dôležitým parametrom pri návrhu organických prvkov s rozmermi v nanometrovej oblasti. Preto môžeme konštatovať, že kontaktný odpor sa stáva najvýznamnejším problémom rýchlych organických prvkov s rozmermi v oblasti nanometrov.

Táto dizertačná práca sa zameriava na poukázanie dôležitosti kontaktného odporu, ako aj na pátranie po vzniku tohto fenoménu v organických tenkovrstvových riadených tranzistoroch.

1. Tézy dizertačnej práce

Tézy dizertačnej práce sú definované nasledovne:

1) Vykonajte určenie kontaktného odporu organického tranzistora s pentacénom ako organickým polovodičom a rôznymi kovmi elektród source a drain (zlato, striebro, meď a iné). Určite napäťové závislosti, vzájomne porovnajte a vysvetlite namerané závislosti.

2) Vykonajte modelovanie kontaktného odporu organického tranzistora s pentacénom ako organickým polovodičom pomocou makroskopických a mikroskopických modelov (current crowding, resistive network, Fowler-Nordheimove tunelovanie, Schottkyho jav) a porovnajte so získanými údajmi za účelom vyhodnotenia validity modelov.

3) Modifikujte povrch elektródy alebo hradlového dielektrika pomocou tenkej vrstvy samousporiadaného materiálu (self-assembled materiál, SAM) za účelom zmeny dipólového momentu na rozhraní za účelom zníženia kontaktného odporu organického tranzistora. Využite štandardné SAM materiály (napr. alkyltioláty) a navrhnite využitie nových materiálov. Porovnajte a vysvetlite získané výsledky hodnôt kontaktného odporu organického tranzistora.

2. Kontaktný odpor

V minulosti kontaktný odpor nepatril medzi priority v oblasti výskumu organických tenkovrstvových tranzistorov, pretože parametre týchto prvkov boli tak nízke, že prúd tečúci medzi elektródami source a drain bol limitovaný výlučne odporom kanála. Aktuálny výskum organických materiálov ako aj technológie ich depozície sa pričinili o zvýšenie pohyblivosti nosičov náboja experimentálne až na úroveň 100 cm²/V.s. Vysoká pohyblivosť nosičov náboja tak znižuje celkový elektrický odpor kanála tranzistora, ktorý prestáva byť tou časťou štruktúry, ktorá limituje transport náboja. Vďaka zvýšeniu pohyblivosti sa teda všetko zmenilo a hľadanie spôsobu ako znížiť vplyv kontaktného odporu zohráva kľúčovú úlohu k dosiahnutiu zvýšenia rýchlosti organických tenkovrstvových tranzistorov. Zvýšenie pohyblivosti tiež poukazuje na injekciu náboja ako na limitujúci faktor, ktorým je potrebné sa taktiež zaoberať. Znižovanie kontaktného odporu R_k je nevyhnutné minimálne pre dve operačné požiadavky OTFT prvkov, pre nízko-napäťovú prevádzku a vysoko-frekvenčné aplikácie [11].

2.1. Definícia ohmického kontaktu

Transport nosičov náboja cez OTFT môžeme rozdeliť na 3 procesy. Prvý proces je injekcia nosičov náboja z elektródy source do polovodičovej vrstvy. Druhý proces je transport nosičov náboja cez kanál tranzistora a posledná časť je extrakcia nosičov náboja do elektródy drain. Tieto tri procesy si môžeme predstaviť ako tri odpory zapojené sériovo (obrázok 1). Odpor súvisiaci s transportom nosičov náboja cez kanál OTFT nazývame odpor kanála, R_{kan} a odpor súvisiaci s injekciou a extrakciou nosičov náboja nazývame kontaktný odpor, R_k . Pre vyhotovenie dobrých ohmických kontaktov v OTFT je podstatné udržanie malého kontaktného odporu v porovnaní s odporom kanála ($R_k \ll R_{kan}$). Pri zachovaní tejto podmienky nie sú prekážky na tok prúdu pretekajúceho do kanála tranzistora. Je dôležité poznamenať, že kontakt, ktorý je ohmický pre určitú dĺžku kanála už nemusí byť ohmický po zmenšení dĺžky kanála tranzistora. Dôvodom je, že odpor kanála je priamo úmerný aj jeho dĺžke, takže pri neustále sa zmenšujúcich prvkoch je stále ťažšie zachovať podmienku kladenú na prijateľnú hodnotu kontaktného odporu ($R_k \ll R_{kan}$). Druhým problémom ohmických kontaktov je znižovanie odporu kanála so zvyšujúcim sa napätím na elektróde gate, a preto pri vyššom napätí musí byť kontaktný odpor čo najnižší v porovnaní s odporom kanála.



Obrázok 1: Štruktúra organického tenkovrstvového tranzistoru s odporom kanála R_{kan} a kontaktným odporom R_k .

2.2. Dôvod kontaktného odporu

Kontaktný odpor je elektrickým odporom v oblasti kontaktov, a preto predstavuje spád potenciálu na rozhraní kov-organický polovodič, ako aj spád potenciálu cez organický polovodič v normálovom smere k rovine šírenia sa náboja v kanáli tranzistora. Spád potenciálu naprieč organickým tranzistorom (obrázok 2a) je funkciou nielen transportných vlastností organického polovodiča, ale aj funkciou injekcie náboja do tranzistora. Injekcia náboja je obmedzená energetickou bariérou na rozhraní kov-organický polovodič. Táto injekčná bariéra je energetický rozdiel medzi hladinou HOMO organického polovodiča a výstupnou prácou kovovej elektródy (pre prípad injekcie dier), viď obrázok 2(b). Energetická bariéra vedie ku kontaktnému odporu R_k na rozhraní kov-organický polovodič, ktorý predstavuje vážny problém pre efektívne využitie OTFT prvkov [12]. Kontaktný odpor môže mať mnoho príčin, napríklad nehomogenity v organickom polovodiči, odpor elektródy alebo nábojové stavy na rozhraniach [13-15]. Viaceré experimentálne štúdie a teoretické simulácie ukázali, že kontaktný odpor je taktiež závislí na napätí na elektróde gate, teplote alebo atmosférickom prostredí, ktorému sú prvky vystavené [16-21].



Obrázok 2: (a) Spád potenciálu naprieč organickým tranzistorom. (b) Názorná ukážka vzniku injekčnej bariéry na rozhraní kovorganický polovodič.

2.3. Vyhodnocovanie kontaktného odporu

Najpoužívanejšia technika na stanovenie kontaktného odporu vo fyzike elektronických prvkov je metóda rozložených parametrov inak označovaná ako TLM (*z angl.* Transfer Length Method). Technika TLM bola vyvinutá na meranie kontaktného odporu tenkovrstvových tranzistorov na báze monokryštalického kremíka [22]. Táto metóda spočíva v meraní veľkosti odporu kanála pri rôznych dĺžkach kanála a poskytuje priemernú hodnotu kontaktného odporu celej meranej sérií tranzistorov. Celkový odpor tranzistora R_c je počítaný ako súčet odporu kontaktov R_k a odporu kanála R_{kan} , ktorý je lineárne závislý od dĺžky kanála:

$$R_{\rm c} = R_{\rm k} + R_{\rm kan} = R_{\rm k} + \frac{L}{W.C_{\rm g}.\mu.(V_{\rm gs}-V_{\rm th})}$$
(1)

Na základe lineárnej extrapolácie celkového odporu smerom k nulovej dĺžke kanála môžeme jednoducho vyhodnotiť veľkosť kontaktného odporu ako zložky, ktorá je nezávislá od dĺžky kanála.

3. Dosiahnuté výsledky

3.1. OFET s dielektrickou vrstvou termického oxidu

V tejto práci sme sa zaoberali najmä s využitím organického polovodičového materiálu pentacén, ktorý sa zaraduje do skupiny malých molekúl. Pentacén je v súčasnosti najpopulárnejší organický polovodičový materiál s dierovou vodivosťou používaný na výrobu OFET vďaka jeho relatívne vysokej pohyblivosti voľných nosičov náboja a dobrej stabilite. Práve kvôli týmto vlastnostiam sa stal štandardným a referenčným materiálom pre OFET čo poskytuje možnosť porovnávania rôznych technológií. Ďalšie vrstvy tranzistora môžu byť z organických alebo anorganických materiálov, prípadne ich vzájomnej kombinácie.

V našej práci sme zvolili štruktúru OFET s rozložením elektród vrchný kontakt - spodné hradlo (obrázok 3). Takúto štruktúru sme zvolili na prvotné experimenty pre jej jednoduchú výrobu a veľmi nízky kontaktný odpor oproti iným štruktúram. V našej sérií experimentov sme využili vysoko dopovaný kremíkový substrát veľkosti 18 mm ×18 mm s narastenou vrstvou termického oxidu hrúbky 110 nm.



Obrázok 3: Použitá štruktúra OFET - vrchný kontakt a spodné hradlo (gate).

Tenká polovodičová vrstva pentacénu s hrúbkou 100 nm bola vytvorená technikou tepelného naparovania vo vysokom vákuu.

Vrstva bola deponovaná pri tlaku približne 1×10^{-4} Pa rýchlosťou približne 6 nm/min. Následne boli deponované elektródy source a drain s využitím tieniacej masky. V našom prípade bolo pre elektródy využité zlato, ktoré bolo deponované s hrúbkou 100 nm pri tlaku približne 1×10^{-4} Pa rýchlosťou približne 6 nm/min.

Meranie prevodových a výstupných charakteristík prebiehalo na meracom pracovisku zloženom z analyzátora Keysight B1500A a hrotového prípravku použitého na kontaktovanie tranzistorov. Pre meranie prúdu cez elektródu drain sa využil modul s vysokým rozlíšením poskytujúcim merania prúdov od 1 fA a chybou merania na úrovni 0,46 %. Výsledné prevodové a výstupné charakteristiky sú zobrazené na obrázku 4 a 5. Obrázok 4 zobrazuje prevodovú charakteristiku vybraného OFET prvku v saturovanom režime $(V_{ds} = -40 \text{ V}) \text{ s dĺžkou kanála 50 } \mu\text{m a šírkou kanála 2,5 mm (a), ako aj$ odmocninu z prúdu I_{ds} prevodovej charakteristiky (b). V súlade s normou IEEE 1620 sa efektívna pohyblivosť voľných nosičov náboja určuje zo saturovaného režimu tranzistora, kde napätie na elektróde drain V_{ds} je oveľa väčšie ako hradlové napätie V_{gs} znížené o výšku prahového napätia V_{th} , teda $|V_{ds}| >> |V_{as} - V_{th}|$. Ako bolo spomenuté v teoretickej časti tejto práce, prahové napätie a efektívnu pohyblivosť voľných nosičov náboja (v tomto prípade dier) je možné vyhodnotiť z prevodovej charakteristiky modifikáciou rovnice 2 na rovnicu číslo 3.

$$I_{\rm ds} = \frac{WC_g}{2L} \ \mu \ (V_{\rm gs} - V_{\rm th})^2 \tag{2}$$

$$(I_{\rm ds})^{1/2} = \left(WC_{\rm g}\mu_{\rm sat}/2L\right)^{1/2} \left(V_{\rm gs} - V_{\rm th}\right)$$
(3)

kde *W* a *L* sú šírka, resp. dĺžka kanála tranzistora, *C*_g je kapacita dielektrika na jednotku plochy a μ je pohyblivosť voľných nosičov náboja. Pohyblivosť voľných nosičov náboja je lineárne úmerná sklonu lineárnej časti závislosti druhej odmocniny prúdu *I*_{ds} od hradlového napätia *V*_{gs}. Prahové napätie je definované ako lineárna extrapolácia tejto funkcie k nulovému prúdu. Efektívna pohyblivosť môže byť určená z grafu (*I*_{ds})^{1/2} ako funkcia *V*_{gs} použitím sklonu lineárnej časti v rovnici 3. Výsledná efektívna pohyblivosť $\mu_{sat} = 0,24 \text{ cm}^2/\text{V.s}$

a prahové napätie $V_{\text{th}} = -5,89$ V boli teda určené zo saturovaného režimu OFET prvkov. Táto hodnota pohyblivosti zapadá medzi najčastejšie dosahované hodnoty inými svetovými výskumnými skupinami, ktoré sa pohybujú väčšinou hlboko pod 1 cm²/V.s [23-26]. Tu je nevyhnutné poznamenať, že aj keď efektívna pohyblivosť voľných nosičov náboja definuje kvalitu prenosu náboja cez organický polovodič, je taktiež ovplyvňovaná aj inými procesmi, ako je napríklad záchyt náboja v organickom polovodiči alebo nedostatočná injekcia z elektródy source. Pomer prúdov v zapnutom a vypnutom stave $(I_{on/off})$ charakterizujúci spínacie schopnosti tranzistorov bol dosiahnutý na úrovni 10⁵. Táto hodnota je porovnateľná s bežne dosiahnutými parametrami Ion/off OFET prvkov, v experimentálnej praxi sa pohybuje v rozmedzí 10^5 až 10^8 .



Obrázok 4: (a) Prevodová charakteristika OFET s Au kontaktmi pre napätie $V_{ds} = -40$ V a (b) odmocnina z prúdu I_{ds} rovnakej prevodovej charakteristiky. Dĺžka kanála 50 µm a šírka kanála 2,5 mm.

V momente keď je napätie V_{gs} menšie ako prahové napätie V_{th} kanál tranzistora by mal byť už uzavretý a tranzistorom by nemal pretekať prúd. Avšak v skutočnosti je možné stále merať veľmi malé prúdy v podprahovej oblasti tranzistora. Obrázok 5 zobrazuje prevodovú charakteristiku v semi-logaritmickej mierke využívanú pre vyhodnotenie hodnoty podprahového sklonu prúdu (S_{th} , z angl. subthreshold slope). Z praktického hľadiska je pre výrobu OFET

prvkov s aplikačnými vlastnosť ami najvýhodnejší čo najstrmejšie sklon podprahového prúdu.



Obrázok 5: (a) Prevodová charakteristika v semi-logaritmickej mierke. (b) Výstupná charakteristika OFET pre napätie V_{gs} v rozsahu od 0 do -40 V s krokom 5 V. Dĺžka kanála 50 µm a šírka kanála 2,5 mm.

však zvyčajne vyhodnocuje recipročná V praxi sa hodnota podprahového sklonu prúdu ($S_{s th}$, z angl. subthreshold swing). Parameter S_{s th} definuje schopnosť tranzistora prechodu zo zatvoreného do otvoreného stavu, pričom jeho hodnota vyjadruje veľkosť napätia potrebného o nárast prúdu o jednu dekádu. Ako môžeme vidieť na obrázku pokles napätia V_{gs} pod prahové napätie V_{th} vedie k exponenciálnemu poklesu prúdu, ktorý sa následne ustáli na úrovni, ktorú označujeme ako prúd vo vypnutom stave tranzistora. Je nutné taktiež poznamenať, že parameter S_{s th} definuje kvalitu rozhrania organický polovodič - dielektrikum. Veľký vplyv na tento parameter sa prisudzuje najmä zvodovým prúdom cez dielektrickú vrstvu [27] či vplyvu okolitého prostredia [28]. Obrázok 5(b) zobrazuje výstupnú charakteristiku rovnakého OFET prvku pre napätie V_{gs} v rozsahu od 0 do -40 V s krokom 5 V. Analýza prvých meraní OFET taktiež ukázala zvodové prúdy v podprahovej oblasti ($I_z \sim 1-2 \mu A$). Takéto zvodové prúdy sú zapríčinené nedokonalosťou dielektrického materiálu, v tomto prípade vrstvou termického oxidu.

Na obrázku 6 je zobrazená prevodová charakteristika tranzistorov v lineárnom režime pri aplikovanom napätí $V_{ds} = -1$ V s dĺžkou kanála 50 µm a šírkou kanála 2,5 mm (a), ako aj odmocninu z prúdu I_{ds} prevodovej charakteristiky (b). Pohyblivosť voľných nosičov náboja v lineárnom režime tranzistora môžeme vyhodnotiť pomocou vzťahu

$$\mu_{\rm lin} = \frac{I_{\rm ds}}{c_{\rm g} \frac{W}{L} \left[(v_{\rm gs} - v_{\rm th}) v_{\rm ds} - \frac{v_{\rm ds}^2}{2} \right]} \tag{4}$$

Priemerná efektívna pohyblivosť vyhodnotená z lineárneho režimu (μ_{lin}) bola 0,08 cm²/V.s.



Obrázok 6: (a) Prevodová charakteristika OFET s Au elektródami pre napätie $V_{ds} = -1$ V a (b) odmocnina z prúdu I_{ds} prevodovej charakteristiky. Dĺžka kanála 50 µm a šírka kanála 2,5 mm.

3.2. Modifikácia pomocou pridanej vrstvy polyméru PMMA

V našich ďalších experimentoch sme modifikovali dielektrickú vrstvu pridaním tenkej vrstvy polyméru PMMA (poly(metylmetakrylát)). Takto modifikovaná štruktúra je zobrazená na obrázku 7. Polymér bol rozpustený v toluéne s koncentráciou 3hm% a následne nanesený odstredením na vrstvu termického Takáto koncentrácia zodpovedala hrúbke pripravenej vrstvy približne 70 nm. Hrúbka vrstvy bola meraná pomocou profilometra *Dektak* okamžite po vykonaní elektrických meraní.



Obrázok 7: Použitá modifikovaná štruktúra OFET - vrchný kontakt a spodné hradlo s pridanou dielektrickou vrstvou PMMA.

Obrázok 8 zobrazuje prevodovú charakteristiku organického tranzistora s pridanou vrstvou PMMA v saturovanom režime $(V_{ds} = -40 \text{ V})$ s dĺžkou kanála 50 µm a šírkou kanála 2,5 mm (a), ako aj odmocninu z prúdu I_{ds} prevodovej charakteristiky (b). Výsledná efektívna pohyblivosť µ_{sat} = 0,2 cm²/V.s a prahové napätie $V_{th} = -9,17$ V boli určené zo saturovaného režimu OFET prvkov. Tu je nevyhnutné poznamenať, že v tomto prípade pri výpočtoch efektívnej pohyblivosti počítame kapacitu dielektrika C_g ako sériové zapojenie dvoch kondenzátorov. Prvý kondenzátor s dielektrickou vrstvou termického oxidu a druhý s dielektrickou vrstvou polyméru PMMA:

$$C_{\rm g} = \frac{1}{\frac{1}{C_{S_i O_2}} + \frac{1}{C_{PMMA}}}$$
(5)

Pomer prúdov v zapnutom a vypnutom stave ($I_{on/off}$) bol 10⁵, rovnako ako pri tranzistoroch bez PMMA. Pri tranzistoroch s využitím kombinácie termického oxidu a PMMA ako dielektrickej vrstvy boli dosiahnuté zanedbateľné zvodové prúdy na úrovni jednotiek nanoampérov. Podprahový sklon prúdu vykazoval vysokú strmosť, viď. obrázok 9(a) a recipročná hodnota podprahového sklonu prúdu $S_{s th}$ dosahovala hodnotu 1,3 V/dec. Obrázok 9(b) zobrazuje výstupnú charakteristiku rovnakého OFET prvku. Výstupná charakteristika ukazuje, že pri nízkych napätiach V_{ds} je prúd I_{ds} lineárne úmerný napätiu V_{ds} a tranzistor sa dostáva do saturovaného režimu až pri vyšších napätiach V_{ds} .



Obrázok 8: (a) Prevodová charakteristika OFET s pridanou dielektrickou vrstvou PMMA s Au kontaktmi pre napätie $V_{ds} = -40$ V a (b) odmocnina z prúdu I_{ds} rovnakej prevodovej charakteristiky. Dĺžka kanála 50 µm a šírka kanála 2,5 mm.



Obrázok 9: (a) Prevodová charakteristika v semi-logaritmickej mierke. (b) Výstupná charakteristika OFET s pridanou dielektrickou vrstvou PMMA pre napätie V_{gs} v rozsahu od 0 do -40 V s krokom 5 V. Dĺžka kanála 50 µm a šírka kanála 2,5 mm.

Na obrázku 10 je zobrazená prevodová charakteristika tranzistora pri aplikovanom napätí $V_{ds} = -1$ V (a), ako aj odmocnina z prúdu I_{ds} prevodovej charakteristiky (b). Výsledná priemerná efektívna pohyblivosť voľných nosičov náboja vyhodnotená z lineárneho režimu (μ_{lin}) bola 0,14 cm²/V.s.



Obrázok 10: (a) Prevodová charakteristika OFET s využitím dielektrickej vrstvy PMMA na termickom oxide a s Au elektródami pre napätie $V_{ds} = -1$ V a (b) odmocnina z prúdu I_{ds} rovnakej prevodovej charakteristiky. Dĺžka kanála 50 µm a šírka kanála 2,5 mm.

3.3. Vyhodnotenie kontaktného odporu OFET prvkov

Ako bolo spomenuté v teoretickej časti práce najpoužívanejšia technika na určenie kontaktného odporu tranzistorov je metóda TLM. Keďže metóda TLM vyžaduje meranie celkového odporu tranzistora pri rôznych dĺžkach kanála bola na depozíciu horných elektród pripravená tieniaca maska, ktorá nám umožňuje v jednej sérií pripraviť sedem tranzistorov s rôznymi dĺžkami kanála a to od 50 až po 200 μ m, pri šírke kanála 2,5 mm. Namerané prevodové a výstupné charakteristiky celej série tranzistorov sú spoločne zobrazené na obrázkoch 11 a 12. Obrázok 11 zobrazuje prevodové charakteristiky celej série OFET prvkov v saturovanom režime tranzistora ($V_{ds} = -40$ V) s dĺžkou kanála od 50 do 200 μ m a šírkou kanála 2,5 mm (a), ako aj odmocninu z prúdu I_{ds} prevodovej charakteristiky (b).



Obrázok 11: (a) Prevodové charakteristiky serie OFET prvkov s Au kontaktmi pre napätie $V_{ds} = -40$ V a (b) odmocnina z prúdu I_{ds} rovnakých prevodových charakteristík. Dĺžka kanála od 50 – 200 µm a šírka kanála 2,5 mm.



Obrázok 12: Výstupné charakteristiky série OFET prvkov pre napätie V_{gs} v rozsahu od 0 do -40 V s krokom 5 V. Dĺžka kanála od 50 – 200 µm a šírka kanála 2,5 mm.

Výstupné charakteristiky na obrázku 12 dokazujú funkčnosť vyrobených OFET prvkov a slúžia najmä pre názornú ukážku poklesu prúdu I_{ds} v závislosti od zväčšujúcej sa dĺžky kanála tranzistorov. Na týchto výstupných charakteristikách môžeme ďalej vidieť lineárny nárast prúdu v lineárnej oblasti tranzistorov ($V_{ds} < V_{gs} - V_{th}$) čo predpovedá nízky kontaktný odpor. Pri vyšších napätiach V_{ds}

 $(V_{ds} > V_{gs} - V_{th})$ sa tranzistory dostávajú do saturovaného režimu a prúd I_{ds} tečúci medzi elektródami source a drain sa už ďalej nezvyšuje.

Pri našej ďalšej analýze sme sa zameriavali na vyhodnotenie prahového napätia, efektívnej pohyblivosti v saturovanom, ako aj v lineárnom režime celej série OFET prvkov (obrázok 13). Z vyhodnotených výsledkov vyplynulo priemerné prahové napätie -12,87 V. Avšak po vynechaní tranzistorov s dĺžkou kanála 50 μ m z vyhodnocovania parametrov, pretože majú nezanedbateľnú odchýlku od ostatných kanálov tranzistorov môžeme povedať, že výsledné priemerné prahové napätie je -14,04 V. Takáto odchýlka parametrov tranzistorov môže byť spôsobená nehomogenitou hrúbky termického oxidu alebo defektami v tejto dielektrickej vrstve. Druhým dôvodom môže byť aj podparenie kanála tranzistora, ku ktorému mohlo dôjsť pri depozícií vrchných elektród source a drain s malými dĺžkami kanálov pri použití tieniacej masky. Výsledná priemerná efektívna pohyblivosť voľných nosičov náboja (dier) vyhodnotená zo saturovanej oblasti OFET prvkov (μ_{sat}) bola 0,21 cm²/V.s.

Ako už bolo spomenuté v teoretickej časti celkový odpor tranzistora R_c je počítaný ako súčet odporu kontaktov R_k a odporu kanála R_{kan}, ktorý je lineárne závislý od dĺžky kanála. Na základe lineárnej extrapolácie celkového odporu smerom k nulovej dĺžke kanála zobrazenej na obrázku 14(a) môžeme jednoducho vyhodnotiť veľkosť kontaktného odporu ako zložky, ktorá je nezávislá od dĺžky kanála. Na obrázku 14(a) je vidieť demonštratívne vyhodnotenie kontaktného odporu pri troch rôznych napätiach Vgs. Výsledná závislosť kontaktného odporu od napätia na elektróde gate je zobrazená na obrázku 14(b). Ako môžeme vidieť prvé experimenty potvrdili, že kontaktný odpor nie je konštantný, ale je závislí od napätia V_{gs} . Injekcia nosičov náboja ako aj ich transport vykazujú závislosť na aplikovanom napätí na elektróde gate. Tieto prvé výsledky potvrdzujú aj viaceré výskumné skupiny, ktoré taktiež demonštrovali, že kontaktný odpor a pohyblivosť sú parametre závislé od napätia [29-31]. Taktiež si treba uvedomiť, že kontaktný odpor je dôležité vyhodnocovať až pri napätiach väčších ako je prahové napätie. Na obrázku 13(b) môžeme vidieť napäťovú závislosť pohyblivosti voľných nosičov náboja vyhodnotenú z lineárnej oblasti série tranzistorov (plné symboly). Po analýze a vyhodnotení

kontaktného odporu sme sa zamerali na vyhodnotenie pohyblivosti voľných nosičov náboja bez vplyvu kontaktného odporu. Na základe vzťahov 6 a 7 môžeme vyhodnotiť pohyblivosť voľných nosičov náboja bez vplyvu kontaktného odporu:

$$\mu_{bez R_k} = \frac{1}{W.C_g(V_{gs} - V_{th})\rho_{ch}} \tag{6}$$

$$\rho_{ch} = \frac{R_{kan}}{L} \tag{7}$$

pričom parameter ρ_{ch} je smernica zo závislosti celkového odporu tranzistora od jednotlivých dĺžok kanálov celej série tranzistorov. Ako môžeme vidieť hodnoty pohyblivosti bez vplyvu kontaktného odporu sú viac ako dvojnásobné oproti efektívnej pohyblivosti vyhodnotenej z lineárneho režimu tranzistora. Je zrejmé, že efektívna pohyblivosť voľných nosičov náboja je potláčaná kontaktným odporom, ktorý spôsobuje nedostatočnú injekciu voľných nosičov náboja do polovodičovej vrstvy.



Obrázok 13: (a) Vyhodnotenie efektívnej pohyblivosti v saturovanej oblasti tranzistora a prahového napätia. (b) Porovnanie pohyblivosti voľných nosičov náboja bez vplyvu kontaktného odporu a pohyblivosti v lineárnom režime tranzistora (plné symboly).



Obrázok 14: (a) Vyhodnotenie celkového odporu v závislosti od dĺžky kanála pri rôznych napätiach V_{gs} . Napäťová závislosť kontaktného odporu série OFET prvkov s Au kontaktmi.

Pre porovnanie vplyvu dielektrickej vrstvy sme vykonali celkovú analýzu aj série tranzistorov s pridanou vrstvou izolačného polyméru PMMA. Ako môžeme vidieť na nameraných prevodových a výstupných charakteristikách (obrázok 15 a 16) tranzistory s pridanou vrstvou PMMA dosahovali nižšie prúdy ako OFET prvky s dielektrickou vrstvou termického oxidu.



Obrázok 15: (a) Prevodové charakteristiky serie OFET prvkov s pridanou dielektrickou vrstvou PMMA a Au kontaktmi pre napätie $V_{ds} = -40$ V a (b) odmocnina z prúdu I_{ds} rovnakých prevodových charakteristík. Dĺžka kanála od 50 - 200 µm a šírka kanála 2,5 mm.



Obrázok 16: Výstupné charakteristiky série OFET prvkov s pridanou dielektrickou vrstvou PMMA pre napätie V_{gs} v rozsahu od 0 do -40 V s krokom 5 V.

Výsledná priemerná efektívna pohyblivosť voľných nosičov náboja (dier) vyhodnotená zo saturovanej oblasti OFET prvkov (μ_{sat}) bola 0,19 cm²/V.s. Priemerné prahové napätie z celej série nameraných tranzistorov bolo -10,46 V. Je zrejmé, že hodnoty kontaktných odporov oboch napäťových závislosti (obrázok 17) sa rádovo pohybujú v rovnakých hodnotách. Pričom tranzistory s pridanou vrstvou PMMA dosahujú nižší kontaktný odpor ako tranzistory s vrstvou termického oxidu. Príčinou môže byť fakt, že organický polovodič pentacén rastie lepšie na vrstve PMMA ako na vrstve termického oxidu.



Obrázok 17: Porovnanie kontaktného odporu OFET prvkov s dielektrickou vrstvou tvorenou vrstvou termického oxidu alebo kombináciou vrstvy termického oxidu a tenkou vrstvou polyméru PMMA.

3.4. Zníženie kontaktného odporu pomocou SAM materiálu

V tejto etape výskumu sa na modifikáciu povrchu hradlového dielektrika pomocou tenkej vrstvy samousporiadaného materiálu. Pri týchto experimentoch bol použitý polycyklický benzéntiofénový organický polovodič C8-BTBT ((1) benzotieno (3,2-b) - benzotiofénu). Je jednu zo základných štruktúr týchto molekúl, v ktorých je tiofénová skupina obalená dvoma benzénovými jadrami. Rast a kryštalizácia organického polovodiča výrazne závisí od povrchových vlastnosti a správna SAM vrstva môže silno ovplyvniť usporiadanie molekúl. Boli pripravené OFET prvky využívajúce SAM vrstvy pre určenie vplyvu SAM materiálu na elektrické vlastnosti prvkov. Jednou z hlavných tried funkčných skupín samousporiadaných materiálov sú silány, napríklad trietoxy(oktyl)silán (TEOS). Modifikácia dielektrika bola dosiahnutá umiestnením substrátov s narasteným termickým oxidom do pár SAM materiálu TEOS, kde boli po dobu 3 hodín zahrievané na teplote 70°C.

Ako referenčné prvky boli vyrobené rovnaké tranzistory (v tom istom naparovacom cykle), ale bez využitia SAM materiálu. Vrstva organického polovodiča (C8-BTBT) bola pripravená pomocou tepelného naparovania vo vákuu s hrúbkou 100 nm. Vrchné elektródy source a drain boli pripravené zo zlata, rovnako pomocou depozície tepelným naparovaním vo vákuu s hrúbkou 50 nm. Takýmto spôsobom bola pripravená celá séria organických tranzistorov s dĺžkami kanála od 50 do 200 µm a šírkou kanála 2,5 mm.

Na nameraných výsledných prevodových a výstupných charakteristikách OFET prvkov (obrázok 18) je jasne vidieť, že po aplikovaní silánov na vrstvu SiO₂ sa významne zmenili elektrické vlastnosti následne deponovaného organického polovodiča. Vďaka modifikácií SAM materiálom TEOS bolo dosiahnuté zlepšením kryštalinity organického polovodiča a eliminácia defektov na rozhraní dielektrikum – organický polovodič, čoho výsledkom bolo zlepšenie vlastností vyhotovených OFET prvkov. Modifikáciou pomocou vrstvy SAM materiálu sme dosiahli výrazne zlepšenie v oblasti prahového napätia ($V_{th} = 13,3 \text{ V} \rightarrow V_{th (TEOS)} = -1,6 \text{ V}$).

Výsledná pohyblivosť voľných nosičov náboja sa taktiež zvýšila o jeden rád na hodnotu $\mu_{sat} = 0,087 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$



Obrázok 18: (a) Prevodová charakteristika pre napätie $V_{ds} = -40$ V a (b) výstupná charakteristika OFET s využitím polovodiča BTBT pre napätie V_{gs} v rozsahu od 0 do -40 V. Dĺžka kanála 50 µm a šírka kanála 2,5 mm.



Obrázok 19: Závislosť hradlového napätia a kontaktného odporu R_k tranzistorov s Au elektródami source a drain s využitím SAM vrstvy a bez SAM vrstvy.

Taktiež došlo k zníženiu výsledných hodnôt kontaktného odporu (obrázok 19) tranzistorov s využitím tenkej vrstvy materiálu TEOS. Avšak dôvodom zlepšenia kvality vyrobených OFET prvkov s využitím SAM vrstvy môže byť aj jej nenulový elektrický dipólový moment. Čím dochádza k vytvoreniu lokálnych elektrických polí na rozhraní dielektrikum – organický polovodič, čo má za následok zníženie kontaktného odporu. Pretože vytvorené elektrické pole je potom hybnou silou pre injekciu náboja a môže znižovať energetickú bariéru na injekčnej elektróde.

3.5. Vplyv kovu použitého na vytvorenie vrchných elektród

Ako bolo spomínané v teoretickej časti práce v kapitole č. 7.2 injekcia náboja je obmedzená energetickou (injekčnou) bariérou na rozhraní kov - organický polovodič. Injekčná bariéra pre prípad P-typ organického polovodiča je energetický rozdiel medzi jeho HOMO hladinou a výstupnou prácou injekčnej elektródy. V ďalších experimentoch bola vykonaná séria experimentov s rôznymi kovmi elektród source a drain pre získanie závislosti typu použitého kovu na injekčné vlastnosti. Ako modelové kovy sme zvolili materiály s výstupnými prácami čo najbližšie k HOMO hladine organického polovodiča pentacén ($E_{HOMO} = 5,1 \text{ eV}$) a to zlato (5,1 eV), meď (4,65 eV), striebro (4,6 eV), polokov germánium (4,8 eV). Všetky typy tranzistorov boli pripravené v rovnakej štruktúre, s rovnakými hrúbkami jednotlivých vrstiev a taktiež s rovnakými parametrami pri použití tepelného naparovania vo vákuu.

Výstupné a prevodové charakteristiky vyrobených OFET prvkov so štyrmi rôznymi injekčnými elektródami sú zobrazené na obrázkoch 20 a 21. Napriek tomu, že všetky prvky vykazovali správanie charakteristické pre tranzistory, prúdy tečúce medzi elektródami source a drain sa líšili v závislosti od použitého kovu na prípravu vrchných elektród. Prúd tečúci tranzistormi s vrchnými elektródami vyrobenými zo striebra a germánia bol očividne ovplyvnený slabou injekciou voľných nosičov náboja. Slabá injekcia je pravdepodobne spôsobená vysokou energetickou bariérou vznikajúcou na rozhraní kov-organický polovodič. Naopak tranzistory so zlatými a medenými elektródami dosahovali najvyššie prúdy. Z dostupnej literatúry je taktiež známe, že zlato a meď majú plynulú injekciu dier do organického polovodiča pentacén, pričom v prípade striebra dochádza k vytvoreniu značnej energetickej bariéry [32-34].



Obrázok 20: Prevodové charakteristiky OFET prvkov pre napätie $V_{ds} = -40$ V so štyrmi rôznymi vrchnými elektródami source a drain. Dĺžka kanála od 50 - 200 µm a šírka kanála 2,5 mm.



Obrázok 21: Výstupná charakteristika OFET so štyrmi rôznymi hornými elektródami source a drain pre napätie V_{gs} v rozsahu od 0 do -40 V. Dĺžka kanála od 50 – 200 µm a šírka kanála 2,5 mm.

Na obrázku 22(a) môžeme vidieť vyhodnotenú efektívnu pohyblivosť zo saturovanej oblasti tranzistorov s všetkými typmi kovov horných elektród, ako aj ich prahové napätia. Ako bolo spomenuté analyzované OFET prvky sa líšili iba typom kovu použitého na výrobu vrchných elektród, rozdielna efektívna pohyblivosť by mala pochádzať z rozdielnej výšky energetickej bariéry na rozhraní kov-organický polovodič. Závislosti celkového odporu od dĺžky kanálov vyrobených OFET prvkov vyhodnotené pomocou metódy TLM sú zobrazené na obrázku 22(b). Výsledne porovnanie kontaktného odporu pri štyroch rôznych elektródach (Au, Ag, Cu a Ge) source a drain je zobrazené na obrázku 23(b). Tieto experimentálne výsledky potvrdzujú, že kontaktný odpor R_k je funkciou kovu použitého na vytvorenie vrchných elektród.



Obrázok 22: (a) Vyhodnotenie efektívnej pohyblivosti v saturovanej oblasti tranzistorov so štyrmi rôznymi hornými elektródami source a drain, ako aj ich prahové napätia. (b) Vyhodnotenie celkového odporu v závislosti od dĺžky kanála pri rôznych napätiach $V_{\rm gs}$ (-20 V, -30 V a -40 V).

Na obrázku 23(a) môžeme vidieť napäťovú závislosť pohyblivosti voľných nosičov náboja vyhodnotenú z lineárnej oblasti série tranzistorov (plné symboly) všetkých typov kovov použitých na vytvorenie elektród source a drain. Zhrnutie všetkých parametrov vyrobených tranzistorov je zobrazené v tabuľke číslo 1.

Hoci vrchné elektródy source a drain vyrobené zo zlata a medi dosahujú najnižší kontaktný odpor, taktiež vykazujú závislosť od aplikovaného hradlového napätia. Pre dosiahnutie ohmických kontaktov by mal byť kontaktný odpor nezávislí od napätia. Avšak aj keď tieto kovy majú nízky kontaktný odpor, tvoria iba neohmické kontakty. Inými slovami aj keď použitie týchto kovov značne znižujú kontaktný odpor, tak ani zlato a meď netvoria ohmické kontakty.



Obrázok 23: (a) Porovnanie pohyblivosti voľných nosičov náboja bez vplyvu kontaktného odporu a pohyblivosti v lineárnom režime tranzistora (plné symboly). (b) Napäťová závislosť kontaktného odporu série OFET prvkov so štyrmi rôznymi hornými elektródami source a drain.

Typ kovu	μ_{sat} (cm ² /V.s)	μ_{lin} (cm ² /V.s)	$\mu_{\rm ef}$ (cm ² /V.s)	$V_{\mathrm{th}}\left(\mathbf{V}\right)$	$R_k(\mathbf{k}\Omega)$
Zlato	0,19	0,14	0,196	-10,46	119
Striebro	0,16	0,09	0,162	-12,63	267
Meď	0,20	0,17	0,213	-8,23	80
Germánium	0,01	0,003	0,060	0,47	9667

Tabuľka 1: Zhrnutie parametrov OFET prvkov s využitím vrstvy PMMA so štyrmi kovmi použitými na výrobu elektród source a drain. Jedna sa o priemerné hodnoty celej série s dĺžkami kanálov od 50 do 200 μ m. Zobrazené hodnoty kontaktného odporu boli určované pri napätí $V_{\rm gs} = -40$ V.

3.6. Pôvod kontaktného odporu

Na detailné pochopenie napäťovej závislosti kontaktného odporu je potrebné pochopiť širokú škálu fyzikálnych procesov. V posledných rokoch boli skúmané rôzne príčiny napäťovej závislosti injekcie voľných nosičov náboja. Napríklad (i) tunelovanie elektrónov cez bariéru na rozhraní kov-organický polovodič, ktoré sa najviac prejavuje v oblastiach nízkych teplôt a pri pripojení nízkeho napätia. (ii) Nárast teploty, ktorý spôsobuje zvyšovanie elektrického poľa zosilňujúci termionickú injekciu. (iii) Aplikácia väčšieho vonkajšieho elektrického poľa spôsobujúca Fowler-Nordheim tunelovanie atď. Na druhej strane injekcia náboja môže byť taktiež ovplyvnená aj vlastnosťami transportu náboja.

V tejto časti práce sme sa zameriavali na skúmanie rôznych javov opisujúcich napäťové závislosti kontaktného odporu organických poľom riadených tranzistorov. Boli navrhnuté rôzne modely opisujúce fungovanie OFET prvkov:

(i) makroskopické modely: resistive network a current crowding,
(ii) mikroskopické modely: Richardson-Schottky termionická emisia a Fowler-Nordheim tunelovanie.

(i) Makroskopické modely

Current crowding:

Model current crowding je opísaný vzťahom:

$$R_k = \frac{A}{V_{gs} - V_{th}} + R_0 \tag{8}$$

kde $A = (\mu C)^{-1}$ je parameter fitu (pochádzajúci z pohyblivosti μ a efektívnej kapacity *C*) a súvisí s hrúbkou aktívnej vrstvy a R_0 je napäťovo nezávislí parazitný odpor.

Resistive network:

Tento jav sa dá predpokladať hlavne pri veľkom prekrytí elektród source a gate, keďže vychádza z geometrickej architektúry elektronického prvku:

$$R_k = \frac{1}{W} \sqrt{\frac{\rho_k}{\mu_{lin} C_g(V_{gs} - V_{th})}} + R_0 \tag{9}$$

kde ρ_k je funkciou injekčnej bariéry Φ_b , μ_{lin} a C_g sú parametre fitu. Tento model, ktorý predstavili Knipp a spol. [35] je navrhnutý tak aby bol kontaktný odpor silne závislý od injekčnej bariéry, ale nezávislí od hrúbky aktívnej vrstvy.

(ii) Mikroskopické modely

Termionická emisia:

S využitím Schottkyho emisie (elektricky stimulovaná termoemisia) cez bariéru na rozhraní kov/organický polovodič sme odvodili vzťah pre napäťovú závislosť dodatočného odporu vznikajúceho na rozhraní:

$$R_k = R_{Sch} \frac{\left(B\sqrt{V_{gs} - V_{th}}\right)^2}{\exp\left(B\sqrt{V_{gs} - V_{th}}\right)} + R_0 \tag{10}$$

Parameter $R_{Sch} = (k_B T/\beta)^2 / C_R T^2 \exp(\Delta \Phi_b / k_B T)$ je úmerný veľkosti energetickej bariéry bez pripojenia vonkajšieho elektrického napätia, kde $k_B T$ tepelná energia pri teplote $T,\beta = \sqrt{e^3/4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}$, C_R je Richardsonova konštanta (= $4\pi em^*k_B^2/h^3$), parameter $B = \beta/k_B T$. Je vhodné poznamenať, že v tomto modeli parametre R_{Sch} , B a R_0 majú iba fyzikálny význam, a tak nie sú závislé od rozmerov organického tranzistora (šírky kanála W alebo dĺžky kanála L) ak je prvok dostatočne veľký pre zanedbanie rozptylových polí a stále je možné uplatniť jednorozmerné priblíženie pre indukovaný kanál tranzistora [36].

Fowler-Nordheim tunelovanie:

Tunelovanie častice cez energetickú bariéru je proces známy z kvantovej fyziky. Fowler-Nordheim tunelovanie (model) môžeme opísať vzťahom:

$$R_{k} = \frac{R_{fn}V_{0}}{V_{gs} - V_{th} - 1/2} \exp\left(-\frac{V_{0}}{V_{gs} - V_{th}}\right) + R_{0}$$
(11)

kde R_{fn} a V_0 sú parametre fitu. [37].

Výsledné porovnanie štvroch rôznych modelov a ich zhodu s reálnymi hodnotami závislosti kontaktného odporu od hradlového napätia môžeme vidieť na obrázku 24. Z charakteristík je očividné, že makroskopické modely ako current crowding a resistive network neponúkajú dobru zhodu s experimentálnymi výsledkami. Tieto prístupy sú však založené len na analýze elektrických náhradných obvodov ako modelov elektrických prvkov. Avšak modely Fowler-Nordheim tunelovania, ako aj model termionickéj emisie (Schottkyho emisie) dosahujú vysokú zhodu s experimentálnymi výsledkami a taktiež aj medzi sebou. Koeficient determinácie určujúci presnosť zhody všetkých modelov s experimentálnymi výsledkami napäťových závislostí kontaktného odporu je zobrazený na obrázku 25. Napriek tomu, že táto analýza neumožnila rozlíšiť medzi tunelovaním poháňaným elektrickým poľom (termionická emisia) a procesom znižovania energetickej bariéry za pomoci aplikácie vyššieho elektrického poľa (FN tunelovanie) – je faktom, že oba javy sú založené na lokálnych elektrických poliach a/alebo na elektrostatickým poľom náboja.

Zároveň treba poznamenať, že všetky pripravené elektródy source a drain vykazujú principiálne zhodnú napäťovú závislosť aj keď rozdiel v kontaktom odpore je 2 až 3 rády. Kovy ako je Au alebo Cu sú vzhľadom na svoj nízky kontaktný odpor považované za materiály tvoriace ohmický kontakt s organickým polovodičom pentacén, kým iné kovy sú považované za materiály tvoriace bariérny kontakt. Vykonané merania jednoznačne preukázali podobnú napäťovú závislosť pre všetky skúmané kovy. Porovnanie s vybranými makroskopickými a mikroskopickými modelmi poukázalo na mikroskopický pôvod kontaktného odporu v skúmaných prvkoch. Preto môžeme konštatovať, že zmena návrhu geometrie prvku nemôže signifikantne ovplyvniť normalizovaný kontaktný odpor (kontaktný odpor na jednotku šírky kanála).

Taktiež môžeme konštatovať, že ani jeden skúmaný kov nevytvára ohmické kontakty, keďže tieto kontakty by nemali mať napäťovú závislosť kontaktného odporu. Nami pripravené kontakty boli vytvorené štandardnými technológiami a dosiahnuté hodnoty kontaktného odporu sú plne porovnateľné s výsledkami publikovanými v známej literatúre. Preto si môžeme dovoliť tvrdiť že ohmické kontakty zatiaľ nie je možné pripraviť na OFET prvkoch, no napriek tomu tieto prvky vykazujú tranzistorové charakteristiky a sú aplikovateľné v praxi.



Obrázok 24: Napäťová závislosť kontaktného odporu OFET prvkov s rôznymi kovmi elektród source a drain (prázdne symboly). Neprerušovaná krivka ukazuje zhodu rôznych modelov s vyhodnotenými výsledkami kontaktného odporu.



Obrázok 25: Vyhodnotenie koeficientu determinácie pre ukážku presnosti rôznych modelov. Current crowding (CC), Resistive network (RN), Fowler-Nordheim tunelovanie (FN) a Richardson-Schottky termionická emisia (Sch).

4. Záver

Prvá časť teórie dizertačnej práce sa venuje základným poznatkom z fyziky organických polovodičov, ich klasifikácií, ako aj princípom prenosu náboja na rozhraní kov - organický polovodič. Následne sú rozobraté jednotlivé materiály, s ktorými sa stretávame pri výrobe organických tenkovrstvových tranzistorov. Zo štrukturálneho hľadiska OFET sú to organické polovodičové vrstvy, tenké dielektrické vrstvy (organická, ako aj anorganické) a materiály používané na výrobu vrchných elektród source a drain. Na základe dôkladnej analýzy a štúdia v tejto etape výskumu boli zvolené jednotlivé materiály, ktoré sme následne používali pri výrobe OFET prvkov.

Druhá časť teórie dizertačnej práce sa venuje princípu činnosti organických tenkovrstvových tranzistorov a ich rôznym variáciám (horizontálne a vertikálne štruktúry), ako aj technológiám, ktoré sa využívajú pri výrobe OFET. V tejto etape sme na základe teoretických poznatkov navrhli štruktúru OFET prvkov (vrchný kontakt-spodné hradlo). Takúto štruktúru sme zvolili na prvotné experimenty pre jej jednoduchú výrobu a veľmi nízky kontaktný odpor oproti iným štruktúram. Pre depozíciu polovodiča a kovových elektród boli navrhnuté a vyrobené tieniace masky. Následne boli odladené jednotlivé technológie nevyhnutné pre budúcu výrobu OFET prvkov (tepelné naparovanie vo vákuu, odstreďovanie).

Tretia časť teórie dizertačnej práce sa venuje charakterizácií kontaktného odporu, jeho príčinám a rôznym vplyvom pôsobiacim na tento fenomén. Kontaktný odpor bol v tejto časti práce identifikovaný ako kľúčový parameter pre ďalšie zvýšenie rýchlosti a zmenšenie rozmerov organických tranzistorov a boli predstavené metódy určenia kontaktného odporu.

Nadobudnuté výsledky sú zahrnuté v experimentálnej časti dizertačnej práce. Výskumné aktivity sa zameriavali na odladenie technológie nevyhnutnej pre následnú výrobu kvalitných OFET prvkov. Bolo nutné zvoliť štruktúru tranzistorov vhodnú pre reprodukovateľnú prípravu série prvkov potrebných pre určenie kontaktného odporu pomocou metódy rozložených parametrov. Pri prvých experimentoch boli použili najbežnejšie používané zlaté vrchné elektródy source a drain. Prvé experimenty slúžili na odladenie technológie a na vyhodnotenie všetkých potrebných parametrov OFET prvkov, ktoré následne slúžili ako referencia pre ďalšie experimenty.

Následne bola vyhodnocovaná celá séria OFET prvkov (s použitím dielektrickej vrstvy termického oxidu, ako aj kombinácie termického oxidu a vrstvy PMMA) s rôznymi dĺžkami kanálov za účelom vyhodnotenia kontaktného odporu. Tranzistory s pridanou vrstvou PMMA dosahovali nižšie prúdy ako OFET prvky s dielektrickou vrstvou termického oxidu. Nižšie prúdy tečúce medzi elektródami source a drain, ako aj nižšia efektívna pohyblivosť voľných nosičov náboja bola spôsobená väčšou hrúbkou dielektrickej vrstvy. Pretože hrubšie dielektrikum znižuje kapacitu a tým dochádza k poklesu prúdu *I*_{ds}. Väčšia hrúbka dielektrickej vrstvy by mala mať vplyv aj na zvýšenie prahových napätí. Pretože prahové napätie OFET prvkov je najčastejšie ovplyvňované práve hrúbkou dielektrickej vrstvy. Avšak v týchto experimentoch sa ukázalo, že na nedokonalostiach povrchu termického oxidu dochádza k záchytu náboja čoho následkom boli aj vyššie prahové napätia pri tranzistoroch bez použitia pridanej dielektrickej vrstvy PMMA. Výsledky môžeme interpretovať tak, že práve vrstva PMMA eliminuje všetky nedokonalosti povrchu tenkej vrstvy termického oxidu a preto OFET prvky s pridanou vrstvou PMMA dosahovali nižšie hodnoty prahových napätí. V tejto etape výskumu sme sa taktiež zamerali na experimenty za účelom zníženia kontaktného odporu pomocou vrstvy samousporiadaného materiálu na rozhraní dielektrikum-organický polovodič. Boli pripravené OFET prvky s využitím organického polovodiča C8-BTBT, na ktorých sa porovnával vplyv SAM vrstvy (TEOS) na výsledné parametre OFET prvkov. Ako referenčné prvky boli vyrobené rovnaké tranzistory, ale bez využitia SAM materiálu. Na vyhodnotených OFET prvkoch bolo jasne vidieť, že po aplikovaní silánov na vrstvu SiO₂ sa významne zmenili elektrické vlastnosti organického polovodiča. Vďaka modifikácií SAM materiálom TEOS bolo dosiahnuté zlepšením kryštaliniy organického polovodiča a eliminácia defektov na rozhraní dielektrikum-organický polovodič, čoho výsledkom bolo zlepšenie vlastností vyhotovených OFET prvkov. Modifikáciou pomocou vrstvy SAM materiálu bolo dosiahnuté výrazne zlepšenie v oblasti prahových napätí a pohyblivosti

voľných nosičov náboja. Taktiež došlo k zníženiu výsledných hodnôt kontaktného odporu tranzistorov s využitím tenkej vrstvy materiálu TEOS.

Navrhnutá metóda TLM použitá na analýzu série tranzistorov pomohla určiť výšku kontaktného odporu R_k v závislosti od prahového napätia. Kontaktný odpor pre konkrétny organický polovodič (v našom prípade pentacén) závisí od Fermiho energie kovovej elektródy a polohy energetickej hladiny HOMO. Preto hralo presné dolaďovanie energetických stavov na rozhraní nezastupiteľnú úlohu v dosiahnutí lepšej injekcie nosičov náboja do organického polovodiča. Nastavenie injekčnej bariéry bolo vykonané výberom vhodného materiálu pre elektródu tak, aby výstupná práca kovu bola porovnateľná s energiou hladiny HOMO. Preto boli nevyhnutné ďalšie experimenty, v ktorých boli vyskúšane ďalšie typy kovov ako meď, striebro a germánium.

V ďalších experimentoch bola teda vykonaná séria experimentov s rôznymi kovmi elektród source a drain pre získanie závislosti typu kovu použitého na vytvorenie elektród a jeho vplyvu na injekčné vlastnosti. Ako modelové kovy sme zvolili materiály s výstupnými prácami čo najbližšie k HOMO hladine organického polovodiča pentacén ($E_{HOMO} = 5.1 \text{ eV}$) a to zlato (5.1 eV), meď (4.65 eV), striebro (4,6 eV), germánium (4,8 eV). Všetky typy tranzistorov boli pripravené v rovnakej štruktúre, s rovnakými hrúbkami jednotlivých vrstiev a taktiež s rovnakými parametrami vákuovej depozície. Pomocou metódy TLM boli vyhodnotené napäťové závislosti kontaktného odporu so štyrmi rôznymi kovmi použitými na vytvorenie elektród source a drain. Okrem iného nám tieto experimentálne výsledky taktiež dokázali, že meď použitá na výrobu elektród source a drain môže nahradiť štandardne používané zlato, pričom ponúka lacnú výrobu pri zachovaní rovnakých parametrov. Hoci vrchné elektródy source a drain vyrobené zo zlata a medi dosahovali najnižší kontaktný odpor, taktiež vykazovali závislosť od aplikovaného hradlového napätia.

Vykonané experimenty dokázali možnosť prípravy OFET prvkov a určenie kontaktného odporu v týchto štruktúrach, preto bolo nutné zaoberať sa ďalším detailným štúdiom kontaktného odporu ako funkcie napätia. Na detailné pochopenie napäťovej závislosti kontaktného odporu je potrebné pochopiť širokú škálu fyzikálnych procesov. V poslednej experimentálne časti práce sme sa teda zameriavali na skúmanie rôznych javov opisujúcich napäťové závislosti kontaktného odporu organických poľom riadených tranzistorov. Boli navrhnuté rôzne modely opisujúce fungovanie OFET. Makroskopické modely: resistive network, current crowding a mikroskopické modely: termionickej emisie a Fowler-Nordheim tunelovanie. Porovnanie s vybranými makroskopickými a mikroskopickými modelmi poukázalo na mikroskopický pôvod kontaktného odporu v skúmaných prvkoch. Preto môžeme konštatovať, že zmena návrhu geometrie prvku nemôže signifikantne ovplyvniť normalizovaný kontaktný odpor (kontaktný odpor na jednotku šírky kanála).

Zároveň treba poznamenať, že všetky pripravené elektródy source a drain vykazovali principiálne zhodnú napäťovú závislosť aj keď rozdiel v kontaktom odpore bol 2 až 3 rády. Kovy ako je Au alebo Cu sú vzhľadom na svoj nízky kontaktný odpor považované za materiály tvoriace ohmický kontakt s organickým polovodičom pentacén, kým iné kovy sú považované za materiály tvoriace bariérny kontakt. Avšak vykonané merania jednoznačne preukázali podobnú napäťovú závislosť pre všetky skúmané kovy. Môžeme teda konštatovať, že ani jeden skúmaný kov nevytvára ohmické kontakty, keďže tieto kontakty by nemali mať napäťovú závislosť kontaktného odporu. Nami pripravené kontakty boli vytvorené štandardnými technológiami a dosiahnuté hodnoty kontaktného odporu sú plne porovnateľné s výsledkami publikovanými v známej literatúre. Preto si môžeme dovoliť tvrdiť, že ohmické kontakty zatiaľ nie je možné pripraviť na OFET prvkoch, no napriek tomu tieto prvky vykazujú tranzistorové charakteristiky a sú aplikovateľné v praxi.

5. Zhrnutie dizertačnej práce

Hlavné ciele dosiahnuté v tejto dizertačnej práci môžeme sumarizovať nasledovne:

- boli nadobudnuté nové poznatky o organických polovodičoch, organických dielektrických materiáloch, ako aj o technológiách prípravy tenkých vrstiev,
- boli nadobudnuté nové poznatky o fungovaní organických tenkovrstvových tranzistoroch, ako aj o procese injekcie náboja a transportu náboja,
- boli predstavené metódy vyhodnocovania kontaktného odporu,
- kontaktný odpor bol identifikovaný ako kľúčový parameter pre ďalšie zvýšenie rýchlosti a zmenšenie rozmerov organických tranzistorov,
- výskumné aktivity sa zameriavali na odladenie technológie nevyhnutnej pre následnú výrobu kvalitných OFET prvkov,
- vykonané experimenty dokázali možnosť prípravy OFET prvkov, ako aj určenie kontaktného odporu a jeho závislosti od hradlového napätia, preto bolo nutné zaoberať sa ďalším detailným štúdiom kontaktného odporu ako funkcie napätia.
- výsledné porovnanie kontaktného odporu pri štyroch (Au, Ag, Cu, Ge) elektródach source a drain potvrdilo, že kontaktný odpor *R*_k je funkciou experimentálnych parametrov medzi, ktoré patrí aj typ kovu použitý na vytvorenie vrchných elektród,
- boli navrhnuté rôzne modely opisujúce fungovanie OFET, makroskopické modely: resistive network, current crowding a mikroskopické modely: termionickej emisie a Fowler-Nordheim tunelovanie,
- z charakteristík bolo očividné, že model Fowler-Nordheim tunelovania, ako aj model termionickéj emisie (Schottkyho emisie) dosahovali vysokú zhodu s experimentálnymi výsledkami a taktiež aj medzi sebou.

Summary

Main achievements of the dissertation thesis can be summarized as follows:

- acquire new knowledge of organic semiconductors, organic dielectric materials, and technology thin film preparation,
- acquire skills to prepare organic thin-film transistors, and acquire new knowledge of charge carrier injection, transport in these materials,
- contact resistance evaluation methods were introduced,
- contact resistance has been identified as a key parameter for enhancement of the device switching rate and reduction of the channel length,
- research activities focused on fine-tuning the technology necessary for the subsequent production of high-quality elements,
- we had reported voltage dependences of contact resistances observed on
- pentacene OFET devices. All fabricated devices exhibited strong voltage dependence of the contact resistance, therefore it was further necessary to study the contact resistance as a function of voltage.
- evaluation of contact resistance observed on pentacene OFET devices with four different source/drain electrodes' metals, namely Cu, Au, Ag, and Ge confirmed that the contact resistance Rk is a function of the experimental parameters, which include the type of metal used to fabricate the top electrodes,
- various models describing the behavior of OFET devices have been suggested: (i) macroscopic models the resistive network and the current crowding, (ii) microscopic models Fowler-Nordheim tunneling and the thermionic emission (Schottky),
- it was obvious that the Fowler-Nordheim tunnelling model as well as thermionic emission model (the Schottky emission model) are in good agreement with experimental observations.

Zusammenfassung

Die Hauptziele die in dieser Dissertation eingefüllt wurden, koennen wir folgendsweise zusammenfassen:

- die neuen Kentnisse über die organischen Halbleiter, organischen dielektrischen Materialien und über die Technologievorbereitung von den dünnen Schichten wurden erreicht,
- die neuen Kenntnisse über die Funktion von den organischen Dünnschichttransistoren und über den Prozess von Ladungsinjektion und Ladungstransport wurden erreicht,
- die Auswertungsmethoden von den Kontaktwiderstand wurden erwähnt und der Kontaktwiderstand wurde als Hauptparameter für die folgende Geschwindigkeitserhöhung und Abmessungsreduzierung von den organischen Transistoren identifiziert,
- Forschungsaktivitäten wurden sich auf die Technologieentdeckung orientiert, die für Produktion von den qualiten OTFT Elementen benutzt wurde,
- die durchgeführten Experimente haben die Vorbereitungsmöglichkeit von OTFT Elementen so wie auch Kontaktwiderstandsstatus und sein Abhängigkeit von der Gate-Spannung gezeigt. Deswegen war es nötig nächstes detailische Studium über Kontaktwiderstand und seine Funktion machen,
- die durchgeführten Experimente haben die Möglichkeit von den Kontaktwiderstandsreduzierung durch die SAM Materials dünne Schichte, die auf die Grenzfläche von der dielektrische Schichteorganischer Halbleiter liegt, bestimmt,
- Endvergleich von Kontaktwiderstand bei vier (Au, Ag, Cu, Ge) Elektroden source und drain hat bestimmt, dass Kontaktwiderstand Rk die Funktion von den experimentallen Parameter ist, wo auch ein Metalltype aus welchen die obigen Elektroden erstellt wurden, gehört.

- die verschiedenen Modelle, die OTFT Funktion beschreiben, wurden vorgeschlagt, makroskopische Modelle: resistive network, current crowding und mikroskopische modelle: termionisches Emission und Fowler-Nordheim Tunnel
- aus den Eigenschaften war es sichtbar, dass Fowler-Nordheim Tunnel und auch das termionisches Emission Model (Schottky's Emision) mit den experimentalen Ergebnisse sowie auch miteinander hochentsprechen.

6. Zoznam použitej literatúry

[1] KATZ, H. E. Organic molecular solids as thin film transistor semiconductors. *Journal of Materials Chemistry*. 1997. Vol. 7, no. 3p. 369–376.

[2] SIRRINGHAUS, H. Device Physics of Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors. *Advanced Materials*. 2005. Vol. 17, no. 20p. 2411–2425.

[3] TANG, C. W. and VANSLYKE, S. A. Organic electroluminescent diodes. *Applied Physics Letters*. 1987. Vol. 51, no. 12p. 913–915.

[4] KIM, C., FACCHETTI, A. and MARKS, T. J. Polymer Gate Dielectric Surface Viscoelasticity Modulates Pentacene Transistor Performance. *Science*. 2007. Vol. 318, no. 5847p. 76–80.

[5] KNIPP, D., STREET, R. A., VÖLKEL, A. and HO, J. Pentacene thin film transistors on inorganic dielectrics: Morphology, structural properties, and electronic transport. *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 93, no. 1p. 347–355.

[6] TECKLENBURG, Rita, PAASCH, Gernot and SCHEINERT, Susanne. Theory of organic field effect transistors. *Advanced Materials for Optics and Electronics*. 1998. Vol. 8, no. 6p. 285–294.

[7] ZAUMSEIL, Jana, BALDWIN, Kirk W. and ROGERS, John A. Contact resistance in organic transistors that use source and drain electrodes formed by soft contact lamination. *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 93, no. 10p. 6117–6124.

[8] HOROWITZ, Gilles. Organic Field-Effect Transistors. Advanced Materials. 1998. Vol. 10, no. 5p. 365–377.

[9] MOORE, Gordon E. Cramming more components onto integrated circuits. New York : McGraw-Hill, 1965.

[10] KLAUK, Hagen, SCHMID, Günter, RADLIK, Wolfgang. et al. Contact resistance in organic thin film transistors. *Solid-State Electronics*. 2003. Vol. 47, no. 2p. 297-301.

[11] WAGNER, Veit, et al. Megahertz operation of organic field-effect transistors based on poly (3-hexylthiopene). *Applied physics letters*, 2006, 89.24: 243515.

[12] BLANCHET, Graciela B., et al. Contact resistance in organic thin film transistors. *Applied Physics Letters*, 2004, 84.2: 296-298.

[13] WANG, S. D., et al. Bias stress instability in pentacene thin film transistors: Contact resistance change and channel threshold voltage shift. *Applied Physics Letters*, 2008, 92.6: 45.

[14] MIYADERA, Tetsuhiko, et al. Investigation of complex channel capacitance in C60 field effect transistor and evaluation of the effect of grain boundaries. *Current Applied Physics*, 2007, 7.1: 87-91.).

[15] MINARI, Takeo; NEMOTO, Takashi; ISODA, Seiji. Fabrication and characterization of single-grain organic field-effect transistor of pentacene. *Journal of applied physics*, 2004, 96.1: 769-772.

[16] COROPCEANU, Veaceslav, et al. Charge transport in organic semiconductors. *Chemical reviews*, 2007, 107.4: 926-952.

[17] GUNDLACH, D. J., et al. An experimental study of contact effects in organic thin film transistors. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100.2: 024509.

[18] WANG, S. D., et al. Contact-metal dependent current injection in pentacene thin-film transistors. *Applied Physics Letters*, 2007, 91.20: 203508.

[19] STADLOBER, Barbara, et al. Orders-of-magnitude reduction of the contact resistance in short-channel hot embossed organic thin film transistors by oxidative treatment of Auelectrodes. *Advanced functional materials*, 2007, 17.15: 2687-2692.

[20] WANG, S. D., et al. Contact resistance instability in pentacene thin film transistors induced by ambient gases. *Applied Physics Letters*, 2009, 94.8: 64.

[21] HILL, I. G. Numerical simulations of contact resistance in organic thin-film transistors. *Applied Physics Letters*, 2005, 87.16: 163505.

[22] LUAN, Shengwen; NEUDECK, Gerold W. An experimental study of the source/drain parasitic resistance effects in amorphous silicon thin film transistors. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72.2: 766-772.

[23] ZAUMSEIL, Jana, BALDWIN, Kirk W. and ROGERS, John A. Contact resistance in organic transistors that use source and drain electrodes formed by soft contact lamination. *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 93, no. 10p. 6117-6124.

[24] WEIS, Martin, et al. Thermionic emission model for contact resistance in organic fieldeffect transistor. *Thin Solid Films*, 2009, 518.2: 795-798.

[25] XU, Yong, et al. Understanding thickness-dependent charge transport in pentacene transistors by low-frequency noise. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, 34.10: 1298-1300.

[26] XU, Yong, et al. Direct evaluation of low-field mobility and access resistance in pentacene field-effect transistors. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107.11: 114507.

[27] VERES, J. et al., Gate insulators in organic field effect transistors, *Chem. Mater.* 16, 4543–4555, 2004.

[28] TORSI, L., et al. NTCDA organic thin-film-transistor as humidity sensor: weaknesses and strengths. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2001, 77.1-2: 7-11.

[29] MINARI, Takeo; NEMOTO, Takashi; ISODA, Seiji. Temperature and electric-field dependence of the mobility of a single-grain pentacene field-effect transistor. *Journal of applied physics*, 2006, 99.3: 034506.

[30] BLANCHET, Graciela B., et al. Contact resistance in organic thin film transistors. *Applied Physics Letters*, 2004, 84.2: 296-298.

[31] REESE, Colin; BAO, Zhenan. Detailed Characterization of Contact Resistance, Gate-Bias-Dependent Field-Effect Mobility, and Short-Channel Effects with Microscale

Elastomeric Single-Crystal Field-Effect Transistors. Advanced Functional Materials, 2009, 19.5: 763-771.

[32] WANG, S. D., et al. Contact-metal dependent current injection in pentacene thin-film transistors. *Applied Physics Letters*, 2007, 91.20: 203508.

[33] DIAO, Lei, et al. Electrical characterization of metal/pentacene contacts. *Journal of applied physics*, 2007, 101.1: 014510.

[34] JAECKEL, B.; SAMBUR, J. B.; PARKINSON, B. A. The influence of metal work function on the barrier heights of metal/pentacene junctions. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103.6: 063719.

[35] MARINKOVIC M et al., On the origin of contact resistances of organic thin film transistors. *Adv. Mater.* 24 4005–9, 2012

[36] LI, Jun; OU-YANG, Wei; WEIS, Martin. Electric-field enhanced thermionic emission model for carrier injection mechanism of organic field-effect transistors: understanding of contact resistance. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 50.3: 035101.

[37] SCHROEDER, R.; MAJEWSKI, L. A.; GRELL, M. A study of the threshold voltage in pentacene organic field-effect transistors. *Applied physics letters*, 2003, 83.15: 3201-3203.

7. Zoznam publikácií:

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- ADC01 DONOVAL, Martin [12 %] MIČJAN, Michal [8 %] NOVOTA, Miroslav [8 %] NEVŘELA, Juraj [8 %] KOVÁČOVÁ, Soňa [8 %] PAVÚK, Milan [8 %] JUHÁSZ, Peter [8 %] JAGELKA, Martin [8 %] KOVÁČ, Jaroslav jr. [8 %] JAKABOVIČ, Ján [8 %] CIGÁŇ, Marek [8 %] WEIS, Martin [8 %]. Relation between secondary doping and phase separation in PEDOT:PSS films. In Applied Surface Science. Vol. 395, (2017), s. 86-91. ISSN 0169-4332 (2017: 4.439 IF, 1 JCR Best Q, 1.093 SJR, Q1 SJR Best Q). V databáze: CC: 000390428300015.
- ADC02 JUHÁSZ, Peter [20 %] NEVŘELA, Juraj [5 %] MIČJAN, Michal [5 %] NOVOTA, Miroslav [5 %] UHRÍK, Ján [15 %] STUCHLÍKOVÁ, 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.
- ADC03 NEVŘELA, Juraj [12 %] MIČJAN, Michal [12 %] NOVOTA, Miroslav [12 %] KOVÁČOVÁ, Soňa [11 %] PAVÚK, Milan [11 %] JUHÁSZ, Peter [11 %] KOVÁČ, Jaroslav Jr. [11 %] JAKABOVIČ, Ján [10 %] WEIS, Martin [10 %]. Secondary doping in poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Poly(4-styrenesulfonate) thin films. In Journal of polymer science. Part B. Polymer physics. Vol. 53, No. 16 (2015), s. 1139–1146. ISSN 0887-6266 (2015: 3.318 IF, 1 JCR Best Q). V databáze: CC: 000357287100006.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 JUHÁSZ, Peter [20 %] - MIČJAN, Michal [20 %] - WEIS, Martin [20 %] -BENKO, Peter [20 %] - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %]. E-learning as an effective tool for the first meeting of public with modern materials and technologies. In Distance learning, simulation and communication 2017 : International conference. Selected papers. Brno, Czech Republic. May 31-June 2, 2017. Brno : University of Defence, 2017, S. 81-86. ISBN 978-80-7231-415-7. V databáze: WOS: 000451519900011.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 HANIC, Michal [12 %] NEVŘELA, Juraj [11 %] MIČJAN, Michal [11 %] -JAKABOVIČ, Ján [11 %] - DONOVAL, Martin [11 %] - FLICKYNGEROVÁ, Soňa [11 %] - HORÍNEK, František [11 %] - MIKLOVIČ, Peter [11 %] - WEIS, Martin [11 %]. Conductive fabrics and polymers for biomedical applications. 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. 208-211. ISBN 978-80-554-0881-1.
- AFD02 JAGELKA, Martin [50 %] JUHÁSZ, Peter [10 %] MIČJAN, Michal [10 %] -NOVOTA, Miroslav [10 %] - NEVŘELA, Juraj [10 %] - WEIS, Martin [10 %]. Organické vodivé polyméry pre senzorické aplikácie. In Fotonika 2017 : 12.

výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 09.-10. február 2017. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 56-60. ISBN 978-80-972238-1-6.

- AFD03 JUHÁSZ, Peter [30 %] STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %] MIČJAN, Michal
 [20 %] HARMATHA, Ladislav [5 %] JAKABOVIČ, Ján [5 %] WEIS, Martin
 [20 %]. Determination of defect states in P3HT material for solar cell application.
 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. 295-298. ISBN 978-1-4799-5474-2.
- AFD04 JUHÁSZ, Peter [30 %] UHRÍK, Ján [10 %] MIČJAN, Michal [10 %] -NEVŘELA, Juraj [10 %] - NOVOTA, Miroslav [10 %] - STUCHLÍKOVÁ, Eubica [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.
- AFD05 JUHÁSZ, Peter [20 %] MIČJAN, Michal [20 %] NOVOTA, Miroslav [20 %]
 VÁRY, Michal [20 %] WEIS, Martin [20 %]. Determination of charge relaxation times in organic diode by small- and large signal analysis. In ADEPT 2017 : 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2017, S. 163-166. ISBN 978-80-554-1342-6.
- AFD06 JUHÁSZ, Peter [40 %] MIČJAN, Michal [15 %] NOVOTA, Miroslav [15 %] - NEVŘELA, Juraj [15 %] - WEIS, Martin [15 %]. Injekcia a transport elektrického náboja v OLED prvkoch. In Fotonika 2017 : 12. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 09.-10. február 2017. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 65-68. ISBN 978-80-972238-1-6.
- AFD07 JUHÁSZ, Peter [25 %] MIČJAN, Michal [25 %] NOVOTA, Miroslav [25 %]
 WEIS, Martin [25 %]. Temperature dependence of electrical properties of organic transistors. In ADEPT 2018 : 6th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 18-21, 2018. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, S. 212-215. ISBN 978-80-554-1450-8.
- AFD08 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.
- AFD09 MIČJAN, Michal [25 %] NOVOTA, Miroslav [25 %] JUHÁSZ, Peter [25 %]
 WEIS, Martin [25 %]. Contact resistance of organic field-effect transistors: The effect of metal work-function. In ADEPT 2017 : 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-

22, 2017. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2017, S. 76-79. ISBN 978-80-554-1342-6.

- AFD10 MIČJAN, Michal [40 %] JUHÁSZ, Peter [15 %] NOVOTA, Miroslav [15 %] - NEVŘELA, Juraj [15 %] - WEIS, Martin [15 %]. Organické feroelektrické diódy ako pamäťové prvky. In Fotonika 2017 : 12. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 09.-10. február 2017. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 45-50. ISBN 978-80-972238-1-6.
- AFD11 MIČJAN, Michal [40 %] JUHÁSZ, Peter [15 %] NOVOTA, Miroslav [15 %] - NEVŘELA, Juraj [15 %] - WEIS, Martin [15 %]. Vplyv kontaktného odporu v organických tranzistoroch. In Fotonika 2017 : 12. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 09.-10. február 2017. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 51-55. ISBN 978-80-972238-1-6.
- AFD12 MIČJAN, Michal [30 %] NOVOTA, Miroslav [25 %] JUHÁSZ, Peter [20 %]
 WEIS, Martin [25 %]. Evaluation of organic semiconductor parameters in organic field-effect transistors devices. In ADEPT 2018 : 6th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 18-21, 2018. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, S. 140-143. ISBN 978-80-554-1450-8.
- AFD13 NEVŘELA, Juraj [25 %] MIČJAN, Michal [15 %] NOVOTA, Miroslav [10 %] FLICKYNGEROVÁ, Soňa [10 %] KOVÁČ, Jaroslav Jr. [10 %] PAVÚK, Milan [5 %] JUHÁSZ, Peter [5 %] JAKABOVIČ, Ján [10 %] WEIS, Martin [10 %]. Technology of conductive polymer PEDOT:PSS films. 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. 29-32. ISBN 978-1-4799-5474-2.
- AFD14 NEVŘELA, Juraj [20 %] MIČJAN, Michal [20 %] NOVOTA, Miroslav [20 %] KOVÁČOVÁ, Soňa [5 %] JUHÁSZ, Peter [10 %] KOVÁČ, Jaroslav Jr. [5 %] JAKABOVIČ, Ján [5 %] WEIS, Martin [10 %] PAVÚK, Milan [5 %]. Využitie a tvarovanie vodivého polyméru PEDOT:PSS. In 19. Škola vákuovej techniky : Vákuum a nové materiály. Štrbské Pleso, Slovensko. 9.-12. november 2016. Bratislava : Slovenská vákuová spoločnosť, 2016, S. 119-122. ISBN 978-80-971179-7-9.
- AFD15 NOVOTA, Miroslav [20 %] MIČJAN, Michal [10 %] NEVŘELA, Juraj [10 %] FLICKYNGEROVÁ, Soňa [10 %] JUHÁSZ, Peter [10 %] MIŠICÁK, Róbert [10 %] PUTALA, Martin [10 %] JAKABOVIČ, Ján [10 %] WEIS, Martin [10 %]. New phenanthrene-based organic semiconductor material for electronic 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. 97-100. ISBN 978-1-4799-5474-2.

- AFD16 NOVOTA, Miroslav [40 %] MIČJAN, Michal [20 %] JUHÁSZ, Peter [20 %]
 WEIS, Martin [20 %]. Nové organické polovodiče pre prvky organickej elektroniky. In Fotonika 2017 : 12. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 09.-10. február 2017. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 61-65. ISBN 978-80-972238-1-6.
- AFD17 NOVOTA, Miroslav [25 %] WEIS, Martin [20 %] TISOVSKÝ, Pavol [10 %] -GÁPLOVSKÝ, Anton [10 %] - JUHÁSZ, Peter [15 %] - MIČJAN, Michal
 [20 %]. Electrical characterization of a [1]benzothieno[3,2-b]benzothiophenebased derivatives with different side chains. In ADEPT 2018 : 6th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 18-21, 2018. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, S. 136-139. ISBN 978-80-554-1450-8.
- AFD18 WEIS, Martin [12 %] NEVŘELA, Juraj [11 %] MIČJAN, Michal [11 %] NOVOTA, Miroslav [11 %] FLICKYNGEROVÁ, Soňa [11 %] KOVÁČ, Jaroslav Jr. [11 %] PAVÚK, Milan [11 %] JUHÁSZ, Peter [11 %] JAKABOVIČ, Ján [11 %]. The role of doping in high-conductive PEDOT:PSS films. 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. 1-4. ISBN 978-80-554-0881-1.
- AFD19 WEIS, Martin [20 %] JUHÁSZ, Peter [16 %] MIČJAN, Michal [16 %] -NOVOTA, Miroslav [16 %] - NEVŘELA, Juraj [16 %] - PAVÚK, Milan [16 %]. Secondary doping of polymer films. In ADEPT 2017 : 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2017, S. 5-8. ISBN 978-80-554-1342-6.
- AFD20 WEIS, Martin [20 %] JUHÁSZ, Peter [20 %] NOVOTA, Miroslav [20 %] -MIČJAN, Michal [20 %] - TELEK, Peter [10 %] - DONOVAL, Martin [10 %]. Activation energy analysis of injection and transport processes in organic fieldeffect transistor. In ASDAM 2018 : 12th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. November 13-16, 2016. 1. ed. Danvers : IEEE, 2018, S. 199-202. ISBN 978-1-5386-7488-8. V databáze: IEEE: 8544473 ; WOS: 000468753600044.

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

- BFA01 DONOVAL, Martin [16 %] NEVŘELA, Juraj [12 %] NOVOTA, Miroslav [12 %] MIČJAN, Michal [12 %] JUHÁSZ, Peter [12 %] PAVÚK, Milan [12 %] JAKABOVIČ, Ján [12 %] WEIS, Martin [12 %]. Phase separation in PEDOT:PSS films as a consequence of secondary doping. In *ICOE 2016 : Book of Abstracts : 12th International conference on organic electronics. Bratislava, Slovakia. June 13-15, 2016.* 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, S. 16. ISBN 978-80-227-4571-0.
- BFA02 JUHÁSZ, Peter [20 %] NEVŘELA, Juraj [10 %] MIČJAN, Michal [10 %] NOVOTA, Miroslav [10 %] UHRÍK, Ján [10 %] STUCHLÍKOVÁ, Eubica [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].

- BFA03 JUHÁSZ, Peter [30 %] UHRÍK, Ján [10 %] MIČJAN, Michal [10 %] -NEVŘELA, Juraj [10 %] - NOVOTA, Miroslav [10 %] - WEIS, Martin [20 %] -STUCHLÍKOVÁ, 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.
- BFA04 JUHÁSZ, Peter [40 %] MIČJAN, Michal [20 %] NOVOTA, Miroslav [20 %]
 WEIS, Martin [20 %]. Small- and large-signal analysis of relaxation times in pentacene diode. In ICOE 2017 : Book of Abstracts : 13th International conference on organic electronics. Saint Petersburg, Russia. June 4-8, 2017. Saint Petersburg : Printeltech LLC, 2017, S. 115.
- BFA05 JUHÁSZ, Peter [25 %] MIČJAN, Michal [25 %] NOVOTA, Miroslav [25 %]
 WEIS, Martin [25 %]. Contact resistance temperature dependence of organic transistor. In *IFSOE-2018 : 4th International fall school on organic electronics and satellite event "IFSOE sensor day". Book of abstracts. Moscow region, Russia. September 16-21, 2018.* Moscow : Lomonosov Moscow State University, 2018, S. 82.
- BFA06 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.
- BFA07 MIČJAN, Michal [40 %] NOVOTA, Miroslav [20 %] JUHÁSZ, Peter [20 %]
 WEIS, Martin [20 %]. Influence of electrode material on contact resistance of organic field-effect transistors. In ICOE 2017 : Book of Abstracts : 13th International conference on organic electronics. Saint Petersburg, Russia. June 4-8, 2017. Saint Petersburg : Printeltech LLC, 2017, S. 137.
- BFA08 MIČJAN, Michal [30 %] JUHÁSZ, Peter [20 %] NOVOTA, Miroslav [20 %]
 WEIS, Martin [30 %]. Electrode material impact on contact resistance of organic field-effect transistor. In ISFOE 18 : 11th International symposium on flexible organic electronics. Book of abstracts. Theasaloniki, Greece. July 2-5, 2018. Thessaloniki : PRAXI Network, 2018, S. [1].
- BFA09 NEVŘELA, Juraj [16 %] MIČJAN, Michal [12 %] NOVOTA, Miroslav [12 %] JUHÁSZ, Peter [12 %] UHRÍK, Ján [12 %] PAVÚK, 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.

- BFA10 NOVOTA, Miroslav [16 %] MIŠIČAK, Róbert [12 %] NEVŘELA, Juraj [12 %]
 MIČJAN, Michal [12 %] DONOVAL, Martin [12 %] JAKABOVIČ, Ján [12 %] PUTALA, Martin [12 %] WEIS, Martin [12 %]. Application of phenanthrene derivatives with alkyl bithiophene arms for organic 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. 56. ISBN 978-80-227-4571-0.
- BFA11 NOVOTA, Miroslav [40 %] MIČJAN, Michal [10 %] PAVÚK, Milan [10 %]
 MIŠICÁK, Róbert [10 %] PUTALA, Martin [10 %] JUHÁSZ, Peter [10 %] WEIS, Martin [10 %]. Characterization of naphthalene derivatives with different alkyl side chains. In ICOE 2017 : Book of Abstracts : 13th International conference on organic electronics. Saint Petersburg, Russia. June 4-8, 2017. Saint Petersburg : Printeltech LLC, 2017, S. 144.
- BFA12 NOVOTA, Miroslav [30 %] WEIS, Martin [15 %] TISOVSKÝ, Pavol [15 %] GÁPLOVSKÝ, Anton [15 %] JUHÁSZ, Peter [5 %] MIČJAN, Michal [10 %]
 PAVÚK, Milan [10 %]. Electrical characterization of [1]benzothieno[3,2-b]benzothiophene-based derivatives with different side chains. In ISFOE 18 : 11th International symposium on flexible organic electronics. Book of abstracts. Theasaloniki, Greece. July 2-5, 2018. Thessaloniki : PRAXI Network, 2018, S. [1].
- BFA13 WEIS, Martin [16 %] FLICKYNGEROVÁ, Soňa [14 %] NEVŘELA, Juraj [14 %] - MIČJAN, Michal [14 %] - NOVOTA, Miroslav [14 %] - JUHÁSZ, Peter [14 %] - JAKABOVIČ, Ján [14 %]. High-conductive PEDOT:PSS films: The true role of doping. In ICOE 2014 [elektronický zdroj] : Book of Abstracts. 10th International Conference on Organic Electronics. Modena, Italy, June 11-13, 2014. Modena : Universita di Modena, 2014, online, [2] p.
- BFA14 WEIS, Martin [40 %] JUHÁSZ, Peter [15 %] NOVOTA, Miroslav [15 %] -MIČJAN, Michal [15 %] - PAVÚK, Milan [15 %]. Making polymers conductive by secondary doping. In ICOE 2017 : Book of Abstracts : 13th International conference on organic electronics. Saint Petersburg, Russia. June 4-8, 2017. Saint Petersburg : Printeltech LLC, 2017, S. 26.

FAI Redakčné a zostavovateľské práce knižného charakteru (bibliografie, encyklopédie, katalógy, slovníky, zborníky...)

- FAI01 NEVŘELA, Juraj [20 %] (ed.) MIČJAN, Michal [20 %] (ed.) NOVOTA, Miroslav [20 %] - (ed.) - KOVÁČ, Jaroslav jr. [20 %] - (ed.) - SZOBOLOVSZKÝ, Robert [20 %] - (ed.). International workshop on devices and applications project : Escel ju Osiris. Bratislava, Slovakia. December 14-15, 2017. 1.vyd. Bratislava : Desidia Tech I.t.d, 2017. 42 s. ISBN 978-80-972928-1-2.
- FAI02 NEVŘELA, Juraj [25 %] (ed.) MIČJAN, Michal [25 %] (ed.) NOVOTA, Miroslav [25 %] - (ed.) - KOVÁČ, Jaroslav jr. [25 %] - (ed.). ADEPT 2018 : 6th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 18-21, 2018. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018. 234 s. ISBN 978-80-554-1450-8.