



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ
UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY

doc. Ing. Martin Weis, PhD.

Technológia prípravy a charakterizácia
prvkov organickej elektroniky

**Fabrication technology and characterization
of organic electronics devices**

Vedný odbor: 020211 – Mikroelektronika

Autoreferát dizertačnej práce
na získanie vedeckej hodnosti doktora technických vied

Miesto a dátum: V Bratislave, Jún 2017

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

doc. Ing. Martin Weis, PhD.

Technológia prípravy a charakterizácia
prvkov organickej elektroniky

**Fabrication technology and characterization
of organic electronics devices**

Vedný odbor: 020211 – Mikroelektronika

Autoreferát dizertačnej práce
na získanie vedeckej hodnosti doktora technických vied

Miesto a dátum: V Bratislave, Jún 2017

Dizertačná práca bola vypracovaná na Ústave Elektroniky a Fotoniky, Fakulte Elektrotechniky a Informatiky, Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave.

Uchádzač: doc. Ing. Martin Weis, PhD.

Ústav elektroniky a fotoniky, Fakulta elektrotechniky
a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Ilkovičova 3, 81219 Bratislava

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa ,o hod.
pred komisiou obhajoby doktorských dizertácií vo vednom obore : 020211
„Mikroelektronika“ v zasadačke Elektrotechnického ústavu SAV v Bratislave,
Dúbravská cesta 9.

S dizertáciou je možné sa oboznámiť v knižnici Elektrotechnického ústavu
SAV.

Ing. Karol Fröhlich, DrSc.
Predseda komisie pre obhajoby doktorských
dizertačných prác v odbore 020211 Mikroelektronika
Elektrotechnický ústav SAV

OBSAH

1	ÚVOD.....	6
2	TÉZY DOKTORSKEJ DIZERTAČNEJ PRÁCE	10
3	KOMENTÁR KU DOSIAHNUTÝM VÝSLEDKOM S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV	11
3.1	TRANSPORT NÁBOJA V ORGANICKOM TRANZISTORE V USTÁLENON STAVE A PRE PRECHODOVÝ STAV	11
3.1.1	<i>Štúdium transportu náboja v organickom tranzistore a vplyv akumulovaného náboja na potenciálový profil v kanáli tranzistora.....</i>	12
3.1.2	<i>Štúdium transportu náboja v organickom tranzistore s časovým rozlíšením.....</i>	13
3.1.3	<i>Modely transportu náboja v organickom tranzistore s časovým rozlíšením.....</i>	14
3.1.4	<i>Metóda elektrických meraní prechodovej odozvy prúdu pre určenie pohyblivosti.....</i>	15
3.2	INJEKCIÁ A TRANSPORT NÁBOJA V ORGANICKOM TRANZISTORE PRE ELEKTRÓDY S RÔZNOU ENERGETICKOU BARIÉROU	15
3.2.1	<i>Štúdium injekcie a transportu náboja v organickom tranzistore s časovým rozlíšením</i>	16
3.2.2	<i>Spád potenciálu na rozhraní kov-organický polovodič v štruktúre organického tranzistora</i>	17
3.3	ZLEPŠENIE TENKOVrstvových technológií pre nové materiály POUŽÍVANÉ PRE PRVKY ORGANICKEJ ELEKTRONIKY	18
3.3.1	<i>Chemická depozícia z párs elektricky izolačnej polymérnej vrstvy....</i>	19
3.3.2	<i>Modifikácia povrchov pre predĺženie stability vrstiev kovov s nízkou výstupnou prácou</i>	20
3.3.3	<i>Druhotná dopácia polymérov pre zvýšenie elektrickej vodivosti ...</i>	21
3.3.4	<i>Využitie vodivých polymérov pre prípravu OLED prvkov s organickou anódou</i>	22
4	VYMEDZENIE VÝSLEDKOV DIZERTÁCIE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV A ZÁVERY PRE ďALŠÍ ROZVOJ VEDY	24
5	VYMEDZENIE OSOBNÉHO PODIELU UCHÁDZAČA K PUBLIKOVANÝM PRÁCAM	27
6	ZOZNAM NAJDÔLEŽITEJŠÍCH PRÁC AUTORA SÚVISIACICH S TÉMOU DOKTORSKEJ DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	29
7	CITAČNÝ OHLAS UCHÁDZAČA	31
8	SUMMARY	43
9	ZUSAMMENFASSUNG	46
10	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	49

1 Úvod

V priebehu minulého storočia sa udial obrovský krok v ľudskej spoločnosti, hlavne vďaka pokroku vo vede a technike. Svoju nezastúpiteľnú úlohu tu zohráva hlavne elektronika založená na polovodičových prvkoch. Kremík, ako hlavný a najčastejší reprezentant používaných polovodičových materiálov, sa stal neodmysliteľnou súčasťou všetkých zariadení a rozvinutá spoločnosť si nedokáže predstaviť existenciu bez tohto materialu.

Napriek tomu sa v posledných desaťročiach pozornosť výskumu sústredí aj na takzvané organické polovodiče. Jedná sa o skupinu materiálov založených na molekulách ako stavebných jednotkách, vykazujúcich niektoré vlastnosti podobné tým, ktoré majú klasické anorganické polovodiče. Molekulárne materiály však poskytujú nové možnosti depozície tenkých vrstiev, keďže medzi molekulami neexistuje silná kovalentná väzba. Preto je možné takýto organický materiál odparovať vo vákuu aj pri pomerne nízkych teplotách, alebo rozpustiť v organických rozpúšťadlách a využiť „mokré technológie“ na vytváranie tenkých polovodičových vrstiev. Treba poznamenať, že tieto materiály sa dajú zaradiť medzi intrinické (nedopované) polovodiče a dopácia sa neukázala ako vhodný spôsob zlepšenia elektrických vlastností.

Ako prvý úspech v tejto oblasti sa dá považovať príprava MIS diódy (*z angl.* Metal-Oxide-Semiconductor diode, dióda kov-oxid-polovodič) využívajúcej polyacetány ako organický polovodič [1]. Táto práca z roku 1983 slúžila ako náznak konceptu využitia organických materiálov ako istej alternatívy ku klasickým anorganickým polovodičom. O tri roky neskôr výskumníci Tsumura, Koezuka a Ando zo spoločnosti Mitsubishi Chemical publikovali prípravu organického poľom riadeného tranzistora (*z angl.* Organic

Field-Effect Transistor, OFET) s polytiofénom ako organickým polovodičom [2]. Aj keď efektívna pohyblivosť dosahovala len úroveň 10^{-5} cm²/V.s, tak to bol revolučný výsledok. Je zaujímavé, že aj prvý organický solárny článok, Tang v roku 1986 [3], a prvá organická elektroluminiscenčná dióda (z angl. Organic Light-Emitting Diode, OLED), Tang a Van Slyke v roku 1987 [4], vznikli vo výskumných oddeleniach súkromnej spoločnosti, v tomto prípade to bola spoločnosť Eastman Kodak Company. Tieto úspechy boli začiatkom novej éry výskumu, kde sa pozornosť zamerala na využitie organických materiálov v známych štruktúrach elektronických prvkov. Nasledovalo desaťročie výskumu nových materiálov. Kým prévé elektronické prvky využívali nerozpustné polyméry ktoré sa zosiečovali priamo na podložke, tak vypracovaná syntéza nových polovodivých rozpustných polymérov [5] značne uľahčila prípravu tenkých vrstiev a elektronických prvkov. Bolo tak možné navrhnuť rôzne depozičné technológie (napr. využie tlačiarenských technológií) ktoré zaistili zniženie nákladov prípravy elektronických prvkov. Avšak aj napriek tomu sa väčšina výskumných pracovísk zatiaľ pozerala na organické polovodiče s dešpektom a pochybnosťami. Preto ako ďalší dôležitý miľník vo vývoji organickej elektroniky sa dá považovať publikácia od Gillesa Horowitza [6], kde opisoval organický tranzistor na základe upraveného konceptu klasickej fyziky polovodičov. Táto publikácia nie je dôležitá tým, že by zaviedla nový fyzikálny náhľad na problém, ale práve naopak. Navrhovala pre organické materiály prístup pásmovej teórie známej z fyziky polovodičov aj napriek tomu že tieto materiály nie sú dopované. Dôsledkom toho boli začaté rozsiahle výskumy využitia týchto molekulárnych materiálov a boli uskutočnené výrazné investície zo strany súkromného sektora. V priebehu jedného desaťročia tak nastal dôležitý pokrok v oblasti organickej elektroniky, ktorá sa tak etablovala ako novovznikajúci odbor. A to nie len v akademickej sfére, ale aj komerčnej. Organické solárne články dnes dosahujú účinnosť nad 11% [7], čo je porovnatelné alebo lepšie ako bežne využívané solárne články.

na báze amorfného alebo polykryštalického kremíka. Displeje využívajúce OLED sa stali novou generáciou nielen pre ich využitie v televíznej technike, ale hlavne pre prenosné zariadenia vyžadujúce nízku spotrebu energie. Rovnako aj svietidlá na báze OLED si našli svoje miesto na trhu. Práve toto očakávané široké uplatnenie organickej elektroniky v ľudskej spoločnosti je hybnou silou súčasného vývoja. Technológie používané pre organickú elektroniku sľubujú kvalitné a cenovo dostupnejšie elektronické zariadenia, ktoré budú poskytovať aj pridanú hodnotu ako napr. prieľadnosť, nižšiu hmotnosť, ohybnosť, atď. Možeme preto očakávať rozvoj budúceho trhu s organickou elektronikou hlavne v týchto oblastiach:

- Pamäte a logické obvody: nízka výrobná cena a flexibilita sú zaujímavé hlavne pre aplikácie „smart“ obalov (rádiovrekvenčných identifikátorov, RFID)
- OLED displeje a svietidlá: vysoká kvalita oproti LCD displejom a nízka cena oproti anorganickým LED stavia OLED do popredia. Lacné a energeticky efektívne osvetlenie s farebným spektrom príjemným pre človeka je taktiež hľadanou alternatívou pre anorganické LED. Navyše ohybné substráty poskytujú vyššiu mechanickú odolnosť displejov pri páde alebo náraze.
- Fotovoltaika: lacné organické materiály sa už dnes stali plnohodnotnou náhradou pre kremíkové fotovoltaické panely.
- Lekárska elektronika a senzorika: monitorovanie pacientov a prevencia chorôb vytvárajú trh pre senzorické aplikácie ktoré musia byť cenovo dostupné pre širokú verejnosť.

Aj keď tieto predpoklady robia organickú elektroniku sľubnou variantou vývoja elektroniky a techniky, elektronické obvody založené na organických tranzistoroch sú však zatiaľ len v štádiu výskumu. Rovnako ako pre organické solárne články a OLED displeje, aj tu nastal výrazný pokrok v

technológiach, avšak ukazuje sa že pre vyžadované zlepšenie elektrických vlastností je potrebné najprv lepšie pochopiť fyzikálnu podstatu týchto elektronických prvkov. Napriek počiatočnému nadšeniu sa ukázalo, že fyzikálna podstata transportu náboja je odlišná od klasických anorganických polovodičov. Aj sám Horowitz v neskoršej práci navrhuje, že názov organický polovodič je zavádzajúci a presnejšie označenie by bolo „poloizolant“ [8]. Organické polovodiče tak spadajú do všeobecnej kategórie dielektrík, kde sa nachádzajú niekde medzi polovodičmi a izolantami. Je preto zaujímavé poznamenať, že organická elektronika si našla úspešné komerčné aplikácie aj keď nie je dobre známy fyzikálny princíp prenosu náboja v týchto elektronických prvkoch.

Organická elektronika je ešte pomerne mladým odborom v rámci elektroniky ale už v súčasnosti poskytuje nové aplikácie vďaka skoro nekonečnej variabilite organických materiálov, nízko-nákladovej výrobe, vhodným elektrickým vlastnostiam, mechanickej ohybnosti, atď. Prvé elektronické prvky zariadenia sú už komerčne dostupné a bola dosiahnutá vysoká ekonomická úspešnosť aj napriek tomu že sa očakáva ešte výrazné zlepšenie vlastností ako aj zníženie nákladov na výrobu. Treba však aj poznamenať, že aj keď niektoré základné princípy fungovania týchto prvkov sú už známe, tak základný výskum je stále potrebný a žiadany. Môžeme to zhrnúť do jednoduchého vyhlásenia: „*Áno, funguje to, ale stále nevieme prečo tomu tak je*“.

2 Tézy doktorskej dizertačnej práce

Tézy doktorskej dizertačnej práce sú definované nasledovne:

1. Analyzovať profil elektrického potenciálu v oblasti kanálu organického tranzistora za účelom získania nových poznatkov o transporte elektrického náboja. Analýza by mala byť vykonaná pre ustálený stav, ako aj pre prechodový stav po aplikovaní vonkajšieho napäťia.
2. Analyzovať vplyv injekčnej bariéry na profil elektrického potenciálu organického tranzistora za účelom získania nových poznatkov o injekcii a transporte elektrického náboja. Analýza by mala byť vykonaná pre ustálený stav, ako aj pre prechodový stav po aplikovaní vonkajšieho napäťia.
3. Využiť nové organické materiály a vyvinúť nové technológie vhodné pre prvky organickej elektroniky. Navrhované inovácie v technológiach prípravy prvkov by mali preukazovať zlepšenie vlastností ako sú elektrická vodivost, stabilita vrstiev, alebo zníženie výrobných nákladov.

3 Komentár ku dosiahnutým výsledkom s uvedením nových poznatkov

Dizertačná práca je tvorená súborom publikovaných prác vo vedeckých recenzovaných časopisoch vedených v databázach Web of Science (Current Contents). Publikácie vybrané pre túto prácu boli zvolené pre ilustráciu príspevku ku rozšíreniu súčasného poznania a každá publikácia je komentovaná na preukázanie nového prínosu. Publikácie sú delené na tri skupiny podľa objektu štúdia:

- (i) Transport náboja v organickom tranzistore v ustálenom stave a pre prechodový stav;
- (ii) Injekcia a transport náboja v organickom tranzistore s elektródami vykazujúcimi energetickú bariéru na rozhraní kov/org. polovodič;
- (iii) Zlepšenie tenkovrstvových technológií pre nové materiály používaných pre prvky organickej elektroniky.

3.1 Transport náboja v organickom tranzistore v ustálenom stave a pre prechodový stav

Štúdium transportu náboja v organických polovodičoch je centrom záujmu už dlhodobo. Vo väčšine prípadov sa ale jedná len o mikroskopický prístup. Sleduje sa rozloženie náboja na molekulárnych orbitáloch a spôsob prenosu náboja medzi molekulami. Tento prístup je súčasťou veľmi dôležitý a nevyhnutný pre popis vybraných závislostí vodivosti (napr. teplotná závislosť), jeho využitie pre elektronické prvky s rozmermi v rozsahu desiatok až stoviek mikrometrov je však prakticky nemožné. Nasledujúce vybrané 4 práce popisujú transport náboja všeobecnejšie na makroskopickej úrovni. Keďže

organické polovodiče nie sú dopované a zároveň majú nízku hodnotu relatívnej permitivity (zvyčajne na úrovni 3 až 4), Debayova dĺžka nadobúda extrémne veľké hodnoty. Inak povedané, elektrostatické polia vytvorené externým napäťím priloženým na elektrody alebo generované injektovaným nábojom sú ďalekodosahové a nedajú sa zanedbať.

3.1.1 Štúdium transportu náboja v organickom tranzistore a vplyv akumulovaného náboja na potenciálový profil v kanáli tranzistora

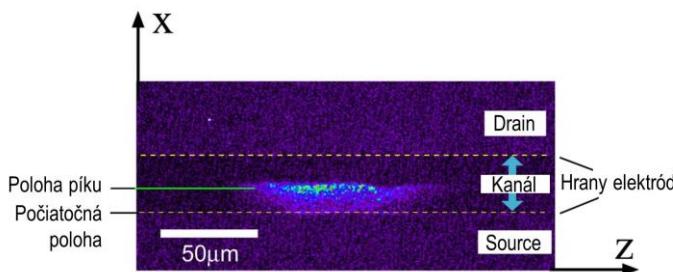
Publikácia: Martin Weis, “Gradual channel approximation models for organic field-effect transistors: The space-charge field effect”, *Journal of Applied Physics*, **111**, 054506/1 – 054506/5 (2012).

Táto práca je založená na analýze profilu elektrického potencialu v kanáli organického tranzistora (merania sú prevzaté z publikácie [9]). Profil elektrického potenciálu jednoznačne ukazuje, že v lineárnej oblasti tranzistora je lineárne priblíženie profilu potenciálu korektné, kým v saturovanej oblasti tranzistora je nepostačujúce. Preto bol navrhnutý alternatívny model ktorý zohľadňuje akumulovaný náboj na rozhraní organický polovodič – hradlové dielektrikum. Na základe zhody medzi modelom a experimentom boli modifikované vzťahy pre prúd medzi elektródami source a drain. Je zaujímavé poznamenať, že upravené vzťahy sú stále v zhode s klasickým prístupom známym z fyziky polovodičov [10], kde lineárny profil potenciálu je vhodný len pre nízke úrovne dopácie. Tento model bol neskôr úspešne aplikovaný aj na organický tranzistor s ambipolárny transportom a rekombináciou nosičov v kanáli, tzv. organický elektroluminiscenčný tranzistor (z angl. organic light-emitting transistor, OLET) [11].

3.1.2 Štúdium transportu náboja v organickom tranzistore s časovým rozlíšením

Publikácia: Takaaki Manaka, Fei Liu, Martin Weis, Mitsumasa Iwamoto, "Diffusion-like electric field migration in the channel of organic field-effect transistors", *Physical Review B*, **78**, 121302/1 – 121302/4 (2008).

V tejto práci je využité meranie elektrických polí pomocou metódy nelineárnej optiky. V prítomnosti lokálnych elektrických polí sa v dôsledku nerovnomerného rozloženia náboja na molekule vytvára nenulový elektrický dipól. Preto je (pre niektoré materiály) možné pri osvetlení materiálu svetlom vhodnej vlnovej dĺžky pozorovať generovanie optickej druhej harmonickej, ktoré je priamo úmerné druhej mocnine intenzity elektrického poľa. Takýmto spôsobom sa podarilo zobrazenie elektrického poľa generovaného elektrickým nábojom injektovaným z elektródy source a následne postupujúcim cez kanál.



Obrázok 1: Typické meranie rozloženia el. poľa v kanále organického tranzistora v čase 100 ns po aplikovaní vonkajšieho napäcia ($V_{ds}=V_{gs}=-100$ V).

Meranie poskytuje priestorové rozlíšenie na úrovni približne $0,5 \mu\text{m}$ a časové rozlíšenie na úrovni 1 ns. S týmto rozlíšením bolo možné zaznamenať postupný transport náboja naprieč kanálom tranzistora. Merania preukázali že pre transport náboja je vzdialenosť úmerná odmocnine z času podobne ako je známe pre difúzne procesy. Výsledky boli porovnávané so simuláciami ako aj

analytickým modelom založeným na rovnici kontinuity. Týmto spôsobom bolo dokázané, že táto časová závislosť nie je difúziou nosičov náboja na rozhraní, ale dôsledkom interakcie nábojov medzi sebou.

3.1.3 Modely transportu náboja v organickom tranzistore s časovým rozlišením

Publikácia: Martin Weis, Jack Lin, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, "The charge transport in organic field-effect transistor as an interface charge propagation: the Maxwell-Wagner effect model and transmission line approximation", *Japanese Journal of Applied Physics*, **49**, 071603/1 – 071603/8 (2010).

Na základe poznatkov z predchádzajúcich experimentov vznikol návrh veľmi jednoduchého prístupu ku problematike transportu náboja. V tejto práci je prezentovaný model odvodený od Maxwellových rovníc na rozhraniach ako aj od modelu rozložených parametrov (z angl. transmission line model, TLM). Tento prístup je najprv ukázaný na jednoduchej MIM štruktúre (z angl. Metal-Insulator-Metal structure, štruktúre kov-izolant-kov) a následne na štruktúre OFET. Tu treba poznamenať, že metóda merania času preletu (z angl. Time-Of-Flight, TOF), teda prechodu nosičov náboja cez vrstvu medzi kovovými elektródami, bola pôvodne navrhnutá pre dielektriká. Navrhnutými modelmi sme nielen ukázali, že pre transport náboja je vzdialenosť úmerná odmocnine z času, ale aj predpovedali že laterálne pole medzi elektródami source a drain nehrá žiadnu úlohu v prechodových javoch šírenia sa náboja. To bolo následne dokázané aj experimentálne s využitím merania generácie druhej harmonickej. Po aplikovaní napäťového impulzu na obidve elektródy (source a drain) sa pozorovala injekcia náboja z oboch elektród s totožným transportom ako keď

bola injekcia len z jednej elektródy (source). Navrhnutý prístup tak umožnil interpretáciu organických polovodičov ako dielektrických materiálov.

3.1.4 Metóda elektrických meraní prechodovej odozvy prúdu pre určenie pohyblivosti

Publikácia: Martin Weis, Jack Lin, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, “Transient currents in organic field-effect transistor: the time-of-flight method”, Journal of Physical Chemistry C, 113, 18459 – 18461 (2009).

Vzhľadom na skúsenosti nadobudnuté pri využívaní komplikovaných experimentálnych metód ako je meranie elektrických polí pomocou generácie druhej harmonickej sme sa rozhodli navrhnúť analýzu jednoduchých elektrických meraní prechodovej odozvy prúdu. Tento spôsob merania nie je nový a zvykne sa rôzne označovať, v oblasti organickej elektroniky je zaužívaný názov metódy TOF. Na základe modelu zrkadlového náboja na elektróde drain sme vyjadrili prúdovú prechodovú odozvu po aplikovaní napäťového impulzu. Vykonané merania boli analyzované navrhnutým modelom a potvrdili správnosť prístupu. Elektrické merania prechodovej odozvy prúdu tak umožnili určenie efektívnej pohyblivosti nosičov náboja pomocou dostupnejších experimentálnych metód.

3.2 Injekcia a transport náboja v organickom tranzistore pre elektródy s rôznou energetickou bariérou

Doteraz spomínané práce sa zaoberali s organickými tranzistormi ktoré mali skoro zanedbateľný kontaktný odpor. Kontaktný odpor je pritom témou tak starou ako tranzistory samotné. Už sám Shockley v roku 1964 uviedol túto tému [12] pri odchýlke od ideálneho správania sa tranzistorov. Tento problém

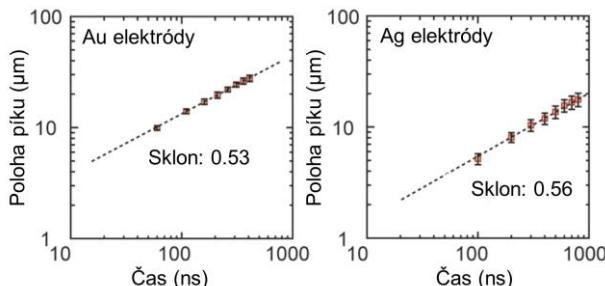
je však v organickej elektronike vážny, keďže kontaktný odpor sa pohybuje od desiatok $k\Omega$ až do jednotiek $M\Omega$. Je pozoruhodné, že napriek závažnosti tohto problému je doteraz pomerne málo známe o jeho pôvode, napäťových a teplotných závislostiach, ako aj o jeho dopade na určovanie parametrov organického tranzistora. Kým na začiatku sa predpokladalo že kontaktný odpor je len funkciou materiálového zloženia systému elektróda – organický polovodič, tak neskôr sa ukázalo že kontaktný odpor je funkciou priloženého napätia, geometrie elektród, drsnosti rozhrania, teploty, či iných parametrov.

3.2.1 Štúdium injekcie a transportu náboja v organickom tranzistore s časovým rozlíšením

Publikácia: Takaaki Manaka, Fei Liu, Martin Weis, Mitsumasa Iwamoto, “Studying Transient Carrier Behaviors in Pentacene Field Effect Transistors Using Visualized Electric Field Migration”, *Journal of Physical Chemistry C*, **113**, 10279 – 10284 (2009).

V prípade prítomnosti kontaktného odporu bol v minulosti navrhnutý prístup modifikovania vzťahov pre prúd medzi elektródami source a drain, kde sa napätie medzi týmito elektródami znižuje o spád potenciálu spôsobený kontaktným odporom. Takýto prístup by mal zaručovať vyjadrenie pohyblivosti bez vplyvu kontaktného odporu, avšak efektívna pohyblivosť bola vždy nižšia ako pri elektródach s malou injekčnou bariérou. Nás experiment bol vykonaný na tranzistoroch využívajúcich pentacén ($C_{22}H_{14}$) ako organický polovodič a zlatými (injekčná bariéra približne 0.1 až 0.2 eV) alebo striebornými elektródami (injekčná bariéra 0.5 až 0.8 eV). Meraním časovej závislosti profilu elektrického poľa v kanáli pomocou generácie druhej harmonickej sa ukázalo, že aj keď bariéra na rozhraní striebro-pentacén má

výrazný spád potenciálu, tak časová závislosť transportu náboja stále vykazuje závislosť priamu úmeru medzi vzdialenosťou náboja a odmocinou z času. Merania tiež poukázali na nepresnosť štandardného prístupu z dôvodu závislosti pohyblivosti volných nosičov náboja na priloženom napäti. Dôkladná analýza meraní ukázala že pohyblivosť nosičov náboja v organickom polovodiči je nezávislá od materiálového zloženia injekčnej elektródy (teda výšky injekčnej bariéry), ale príliš zjednodušený prístup k analýze meraní môže zapríčiniť nesprávne určenie parametrov prvku.



Obrázok 2: Časová závislosť polohy piku intenzity elektrického poľa v kanáli organického tranzistora pre dva rôzne materiály elektród source a drain. Log-log mierka je zvolená pre ukádzanie postupu poľa s odmocninou času.

3.2.2 Spád potenciálu na rozhraní kov-organický polovodič v štruktúre organického tranzistora

Publikácia: Martin Weis, Jack Lin, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, “Insight Into the Contact Resistance Problem by Direct Probing of the Potential Drop in Organic Field-Effect Transistors”, *Applied Physics Letters*, **97**, 263304 (2010).

Základnou a štandardnou metódou vyhodnocovania kontaktného odporu je TLM, kde sa vyhodnocuje celkový odpor prvku pre rôzne dĺžky kanála. Za

predpokladu konštantného kontaktného odporu a lineárnej závislosti odporu kanála od jeho dĺžky je tak možné extrapoláciou do nulovej dĺžky kanála určiť kontaktný odpor. Tu je vhodné poznamenať, že Shockley [12] pôvodne nezaviedol kontaktný odpor, ale späť potenciálu na rozhraní kov – polovodič a meranie vykonal na jednom prvku. Až v neskoršej literatúre iných autorov bol navrhnutý „kontaktný odpor“ ako prvak elektrického náhradného obvodu reprezentujúci spádu potenciálu v blízkosti elektródy. Tento prístup pri uvažovaní konštantného kontaktného odporu tiež znamená závislosť spádu potenciálu od dĺžky kanála. Vykonané merania rozloženia potenciálu pozdĺž kanála organického tranzistora však ukázali konzervovanie potenciálového spádu na rozhraní elektróda – organický polovodič, čo spôsobuje lineárnu závislosť kontaktného odporu od dĺžky kanála. Napriek tomu že sa poprela idea konštantného kontaktného odporu však základný koncept TLM navrhnutý Shockleym ostáva zachovávaný a správny

3.3 Zlepšenie tenkovrstvových technológií pre nové materiály používané pre prvky organickej elektroniky

Aplikovaný vývoj v oblasti nových materiálov je ďalším významným výskumom v zlepšovaní prvkov organickej elektroniky. Nové materiály môžu priniesť nové elektrické, optické, mechanické, alebo chemické vlastnosti, ktoré môžu poskytnúť vyššiu pohyblivosť voľných nosičov náboja, efektívnu injekciu náboja, zlepšenú environmentálnu stabilitu prvkov, mechanickú flexibilitu, atď. Materiály ktorých použitie v elektronike nie je obvyklé si vyžadujú nielen nové technológie depozície, ale aj detailné pochopenie materiálových vlastností, ktoré určujú transport náboja. V nasledujúcich odsekoch budú popísané štyri rôzne príspevky k rozvoju technológií. Prvá publikácia popisuje technológiu depozície tenkej vrstvy a dielektrické

vlastnosti izolačného polyméru, zatiaľ čo ďalšie tri publikácie sa zaoberajú vodivými vrstvami vhodnými pre elektródy prvkov organickej elektroniky.

3.3.1 Chemická depozícia z pár elektricky izolačnej polymérnej vrstvy

Publikácia: Ján Jakabovič, Jaroslav Kováč, Martin Weis, Daniel Haško, Rudolf Srnánek, Peter Valent, Roland Resel, “Preparation and properties of thin parylene layers as the gate dielectrics for organic field effect transistors”, *Microelectronics Journal*, **40**, 595 (2009).

Hoci existuje veľa polymérnych materiálov s elektricky izolačnými vlastnosťami, takmer všetky z nich môžu byť nanesené len pomocou „mokrých“ metód založených na rozpustení polymérneho materiálu v organickom rozpúšťadle a následnej depozícii na nosnú podložku. Tento prístup má však silné nedostatky v konformnom pokrytí tvarovaných povrchov a preto vyžaduje hrubé polymérne vrstvy pre zabránenie vzniku skratov na hranách tvarovaného povrchu substrátu. To viedie ku pomerne vysokým hodnotám prahovým napäťa vyžadovaného na otvorenie organického tranzistora. Alternatívny prístup je založený na odparení dimérov, krakovanie na monoméry v pyrolíznej komore a následnom zosietovaní po kondenzácii na tuhý substrát. To poskytuje schopnosť konformného pokrytia, ktorý nie je možné dosiahnuť pri technológiách využívajúcich vysoké vákuum alebo pri nanášaní z roztoku. Táto publikácia ilustruje proces prípravy a elektrických vlastností tenkých vrstiev polypara-chlóroxylénu (známeho aj ako *parylén C*). Prínosom tejto práce nie je nezvyčajná metóda charakterizácie alebo vyvinuté teoretické modely, ale prínosom sú presne vyrobené vrstvy a dôkladná charakterizácia tenkých vrstiev, čo slúži ako užitočná referencia ďalšie výskumné kolektívy. Je vhodné spomenúť, že depozičné zariadenie

použité pre tento experiment nie je komerčne dostupné a bolo vyvinuté v laboratóriu.

3.3.2 Modifikácia povrchov pre predĺženie stability vrstiev kovov s nízkou výstupnou prácou

Publikácia: Jan Uhrik, Jan Jakabovic, Alexander Satka, Anderej Vincze, Sona Flickyngerova, Lubomir Sladek, Anton Kuzma, Peter Juhasz, Frantisek Horinek, Karol Rendek, Peter Telek, Martin Donoval, Martin Weis, “Effects of substrate condition on calcium corrosion and its role in the calcium test for water vapour transmission rate”, *Corrosion Science*, **88**, 400 (2014).

Nízky kontaktný odpor na rozhraní kov-organický polovodič si vyžaduje dobrú zhodu medzi výstupnou prácou kovovej elektródy a úrovňou energie pre prenos náboja v organickom polovodiči. Organické polovodiče s elektrónovou vodivosťou často vyžadujú využitie kovu s nízkou výstupnou prácou, napríklad vápnik. Stabilita týchto prvkov organickej elektroniky je však oveľa nižšia ako je požadované pre komerčné výrobky, čo značne znižuje výhody lacnej prípravy týchto prvkov. Degradácia prvkov je zväčša spôsobená nedostatočným zapúzdrením na ktoré sú kladené vysoké požiadavky. Táto práca demonštruje koróziu tenkej vrstvy vápnika na tuhej podložke ako dôsledok povrchovej vrstvy vody ako aj vplyv na meranie bariérnych vlastností púzdrenia pre určenie rýchlosťi prestupu vodnej pary (*z angl. Water Vapor Transmission Rate, WVTR*). Bolo preukázané že povrchová úprava žíhaním vo vákuu je schopná výrazne predĺžiť životnosť vrstiev a tieto zistenia sú tiež súčasťou udeleného patentu [15]. Je vhodné spomenúť, že vápnik je žiadaný materiál pre katódy OLED prvkov, ako aj pre organické tranzistory s elektrónovou vodivosťou. Okrem toho sa používajú tenké vrstvy vápnika na

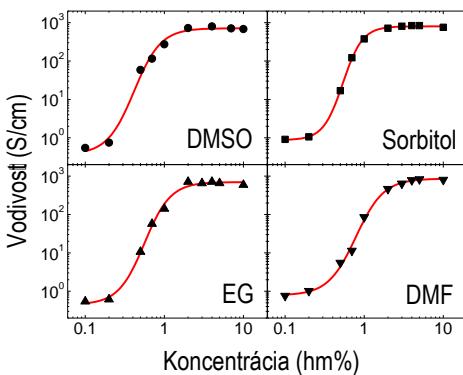
veľmi pokročilé testovanie nových bariérových vrstiev, keďže tzv. "vápnikový test" je výrazne citlivejší než bežné normy Americkej spoločnosti pre testovanie a materiály (American Society for Testing and Materials, ASTM), ako je napr. izostatická metóda.

3.3.3 Druhotná dopácia polymérov pre zvýšenie elektrickej vodivosti

Publikácia: Juraj Nevrela, Michal Micjan, Miroslav Novota, Sona Kovacova, Milan Pavuk, Jaroslav Kovac Jr, Jan Jakabovic, Martin Weis, "Secondary doping in poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(4-styrenesulfonate)thin films", *Journal of Polymer Science B: Polymer Physics* **53**, 1139 (2015).

Organické optoelektronické prvky, ako sú OLED alebo organické solárne články, sú zvyčajne reprezentované sendvičovými štruktúrami a vyžadujú aplikáciu priehľadnej vodivej vrstvy pre jednu z elektród. Avšak „priehľadné vodiče“ nikdy nie sú ani dokonalo opticky priehľadné, ani dokonalo elektricky vodivé. Kombinácia týchto dvoch vlastností v jednom materiáli je vo vzájomnom rozpore a je nutné hľadať kompromisné riešenie. Preto výskum v oblasti týchto materiálov je o hľadaní rovnováhy medzi priehľadnosťou vo viditeľnej časti spektra a dostatočnou elektrickou vodivosťou. Transparentné vodivé oxidy, ako je oxid cínu a india (z angl. Indium Tin Oxide, ITO) alebo dopovaný oxid zinočnatý (ZnO) sú materiály dobre známe na dosiahnutie tejto kombinácie na prijateľnej úrovni, avšak mechanické vlastnosti často nevhodné pre flexibilné aplikácie. To vytvára potrebu nájsť lacnú a zaároveň aj mechanicky ohybnú náhradu priehľadných vodivých oxidov. Jedným z najslubnejších materiálov je polymér poly(3,4-etyléniodioxytiofén): poly(4-styrensulfonát) (PEDOT: PSS), ale jeho vodivosť sa pohybuje od 10^{-6} do 10^{-3} S/cm, čo je nedostatočné pre väčšinu aplikácií. Táto publikácia ilustruje možnosť zvýšenia elektrickej vodivosti o 3 rády druhotnou dopáciou.

Označenie „druhotná dopácia“ definovali MacDiarmid a Epstein pre látky zvyšujúce vodivosť už raz dopovaného polyméru. Napriek tomu, že už bolo známe zvýšenie vodivosti rôznymi látkami, táto práca ilustruje technologické detaľy a dosahuje vyššiu vodivosť ako iné porovnatelné práce. V tejto práci okrem toho nebolo pozorované žiadne zabudovanie dopantu do vrstiev vodivého polyméru, čo je v dobrej zhode s ideou druhotej dopácie. Inými slovami, ukázalo sa, že druhotné dopanty nie sú prítomné v pripravených vrstvách PEDOT: PSS a že pôsobia len ako pomocné rozpúšťadlá (kosolventy).



Obrázok 3: Závislosť elektrickej vodivosti PEDOT:PSS od koncentrácie druhotného dopantu vo vodnom roztoku. Ako dopanty boli použité dimethylsulfoxid (DMSO), sorbitol, etylénglykol (EG) a *N,N*-dimetylformamid (DMF).

3.3.4 Využitie vodivých polymérov pre prípravu OLED prvkov s organickou anódou

Publikácia: Martin Weis, Takako Otsuka, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, “Charge injection and accumulation in organic light-emitting diode with PEDOT:PSS anode”, *Journal of Applied Physics* **117**, 155503 (2015).

Kedžže hrúbka používanej vrstvy polyméru PEDOT:PSS je zvyčajne okolo 100 nm a elektrická vodivosť na úrovni 10^3 S/cm, tak merný plošný elektrický odpor vrstvy dosahuje hodnotu na úrovni 100Ω na štvorec. Treba poznamenať, že pre túto hrúbku vrstvy je optická prieplustnosť viac ako 90% (pri vlnovej dĺžke 550 nm). Kombinácia optickej priehľadnosti a dostatočnej vodivosti robí tieto polymérne vrstvy vhodné pre použitie v optoelektronických aplikáciach. Táto publikácia popisuje využitie vrstvy PEDOT:PSS ako organickej anódy pre OLED prvok a porovnáva ju s bežne používanou vrstvou ITO. Zaujímavé je, že hoci elektrická vodivosť vrstvy PEDOT:PSS ešte stále nemôže konkurovať ITO, tak celková účinnosť OLED prvku s organickou anódou je lepšia. Detailná analýza OLED prvku s PEDOT: PSS anódou odhalila vyššiu svetelnú účinnosť, nižšie „prahové“ napätie a rýchlejsiu odozvu prvku na priložené napätie. Všetky tieto výhody pochádzajú z nižšej injekčnej bariéry na rozhrani anóda-organická vrstva s dierovou vodivosťou. Inými slovami, PEDOT: PSS poskytuje nielen lacnú náhradu ITO, ale súčasne ponúka vyššiu účinnosť prvku vďaka efektívnej injekcii nábojov do OLED.

4 Vymedzenie výsledkov dizertácie s uvedením nových poznatkov a závery pre ďalší rozvoj vedy

Súbor publikácií vybraných pre túto doktorskú dizertačnú prácu sa venuje injekcii a transport náboja v prvkoch organickej elektroniky ako aj vybraných technológia prípravy tenkých vrstiev. Tieto publikácie prinášajú nové experimentálne metódy charakterizácie organických prvkov, modifikované modely pre analýzu vlastností prvkov alebo zdokonalené technologické postupy pre prípravu jednotlivých vrstiev a prvkov.

Prvé štyri publikácie sú zamerané na skúmanie transportu náboja v organickom tranzistore v ustálenom stave alebo v prechodovom stave po aplikácii vonkajšieho napäťa. Je navrhnutá špeciálna mikroskopická metóda schopná zobraziť elektrické pole pomocou využitia nelineárnych optických javov a následne je táto metóda využitá na priame pozorovanie migrácie elektrického poľa v oblasti kanála organického tranzistora. Tieto pozorovania nás motivovali k vývoju modelov založených na fyzike dielektrických materiálov, ako aj na všeobecnejšom prístupe k organickým polovodičom. Myšlienka dielektrických materiálov bola rozšírená na rôzne modely správania sa náboja v prvkoch organickej elektroniky v ustálenom stave ako aj v prechodovom stave. Je zrejmé, že počas tohto výskumu organických polovodičov bola fyzika dielektrických materiálov vždy východiskom pre všetky predpoklady a pozorované správanie sa organických prvkov bolo vysvetlené bez použitia štandardnej fyziky polovodičov. V dôsledku toho táto práca podporuje myšlienku, že „organické polovodiče“ nie sú polovodiče v zmysle zaužívanom pre anorganické polovodiče. Na druhej strane, polovodičové chovanie sa týchto

materiálov je možné vysvetliť všeobecnejším prístupom bežným skôr pre dielektrické materiály a izolanty.

Druhý zoznam publikácií obsahuje dva články zamerané na kontaktný odpor v organických tranzistoroch. Vzhľadom na to, že kontaktný odpor je jedným z významných limitov organických tranzistorov, je potrebné mať k dispozícii vhodné nástroje na jeho charakterizáciu a následné zníženie. Výskum bol v minulosti často zameraný len na hľadanie vhodných materiálov, ktoré poskytujú nízky kontaktný odpor v rovnovážnom stave organických tranzistorov. Avšak kontaktný odpor v organických tranzistoroch nie je len konštantným materiálovým parametrom, ale závisí aj na aplikovanom napäti, geometrii prvku, atď. Pochopenie kontaktného odporu by umožnilo konkurenciu anorganickým tranzistorom a urýchliло implementáciu organických tranzistorov do priemyselných aplikácií pri riešení výziev starnúcej spoločnosti alebo ochrany životného prostredia. Publikácie vybrané pre túto časť doktorskej dizertačnej práce opisujú vplyv injekčnej bariéry, ako dôvodu kontaktného odporu, na injekciu a transport náboja v organických tranzistoroch. Bolo ukázané že transport náboja sa zachováva, aj keď je efektívna pohyblivosť voľných nosičov náboja znížená kvôli poklesu potenciálu na injekčnej elektróde. Preto táto časť práce poukazuje na to, že reprezentácia potenciálového spádu na injekčnej elektróde je skôr vhodnejšia ako využitie kontaktného odpor – prvku elektrického náhradného obvodu.

Posledné štyri publikácie sa týkajú výskumu nových materiálov a technológií. Vynikajúce materiály a vysoko vyvinutá technológia boli vždy kľúčovou otázkou pri výrobe nových prvkov zariadení ako aj hnacou silou pre aplikovaný výskum. Na rozdiel od vyššie spomínaných publikácií založených na charakterizácii prkov, táto časť doktorskej dizertačnej práce ilustruje vývoj nových technológií a neobvyklé správanie sa nových materiálov. Dôkladne

vykonané experimenty a príprava tenkých vrstiev prinášajú nielen rozšírenie vedeckého poznania a odborné publikácie, ale prispievajú aj k vývoju nových technológií ktoré sú jedinečné vo svete.

Na záver, moja práca vykonaná v oblasti organickej elektroniky bola vo veľkej miere zameraná na pochopenie správania sa náboja v prvkoch organickej elektroniky. Výskum sa podrobne zameriaval na injekciu, transport a záchyt náboja v ustálenom stave ako aj v prechodových stavoch. Na vývoj modifikovaných modelov založených na fyzike dielektrických materiálov sa použili experimentálne pozorovania. Výsledky výskumu boli publikované v desiatkach recenzovaných časopisov a niekoľkých kapitolách knižných publikácií (Wiley, Springer, ...), ktoré pomohli vytvoriť nové pochopenie organických polovodičov ako dielektrických materiálov.

5 Vymedzenie osobného podielu uchádzača k publikovaným prácам

Osobný podiel uchádzača k publikovaným prácам spočíva v aktívnom podieľaní sa na návrhu experimentu a prvkov, príprave vrstiev a prvkov, charakterizácii a aj následnej analýze a interpretácií nameraných údajov. Takisto sa významou mierou podieľal na tvorbe odborných publikácií. Skoro každá odborná publikácia je dielom viacerých autorov a každý z autorov má svoj prínos

Na pracovisku Tokijského technologického inštitútu (*z angl.* Tokyo Institute of Technology) sa uchádzač najprv ako postdok (2 ročný pobyt v rokoch 2007 až 2009) a potom ako pozvaný hostujúci výskumník (12 mesiacov v rokoch 2010 až 2014) venoval výskumu organickej elektroniky. Takmer všetky experimenty vykonával osobne a to buď samostatne alebo v spolupráci s kolegami. Uchádzač sa aktívne podieľal na analýze meraní a vytvorení teoretických modelov injekcie a transportu náboja v prvkoch organickej elektroniky.

Na Ústavе elektroniky a fotoniky, Fakulte elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzite (ÚEF FEI STU) uchádzač pôsobí od roku 2011 a pokračuje vo výskume prvkov organickej elektroniky. Uchádzač sa osobne podieľal na návrhu a realizácii experimentu, interpretácií meraní, ako aj príprave odborných publikácií. Uchádzač publikuje viaceré publikácie ako jediný autor alebo je ÚEF FEI STU ako jediné pracovisko.

V priebehu pôsobenia na ÚEF FEI STU sa uchádzač nevenoval len vedecko-výskumnej činnosti, ale aj časť svojej aktivity zameral aj na zabezpečenie finančných zdrojov potrebných na prevádzku laboratória,

financovanie ľudských zdrojov, ale aj na získavanie a koordinovanie vedeckých projektov. Uchádzač je zodpovedným riešiteľom projektov VEGA a APVV ako aj zástupca EÚ projektu za STU (Scientist-in-Charge). S podporou ÚEF FEI STU uchádzač založil samostatnú vedeckú skupinu (Laboratórium organickej elektroniky) ktorá v súčasnosti okrem uchádzača pozostáva z postdoka, PhD študentov ale aj študentov prvého a druhého stupňa vysokoškolského štúdia. Uchádzač sa taktiež aktívne podieľal na dobudovaní infraštruktúry v čistých priestoroch STU ktoré sú nielen významným prínosom pre samostatnú vedeckú prácu členov kolektívu vedeckej skupiny ale tieto technológie sú využívané aj pri vzdelávaní a odbornom raste študentov a mladých vedeckých pracovníkov.

Z pedagogického hľadiska sa uchádzač venuje vedeniu bakalárskych, diplomových a doktorandských prác. Študentom poskytol potrebné teoretické poznatky ale aj technologické zázemie. V súčasnosti je školiteľom dvoch už úspešne obhájených doktoranských prác, P. Juhász (2016) a M. Jagelka (2017).

V oblasti výskumu organickej elektroniky uchádzač odborne zastrešuje spolupráce so zahraničnými pracoviskami ale taktiež je členom programových komisií významných medzinárodných vedeckých konferencií ako napr. International Conference on Organic Electronics, alebo European Conference on Organized Films, ktoré patria medzi najvýznamnejšie v oblasti výskumu uchádzača.

6 Zoznam najdôležitejších prác autora súvisiacich s térou doktorskej dizertačnej práce

- (1) M. Weis, „Organic field effect transistors“, in: *Encyclopedia of Physical Organic Chemistry*, editor Z. Wang, John Wiley & Sons, USA, pp. 3565-3604, 2017.
- (2) M. Weis, „Gradual channel approximation models for organic field-effect transistors: the space-charge effect“, *Journal of Applied Physics*, **111**, 054506/1 – 054506/5 (2012).
- (3) M. Weis, T. Manaka, M. Iwamoto, „Origin of electric field distribution in organic field-effect transistor: experiment and analysis“, *Journal of Applied Physics*, **105**, 024505-1 – 024505-7 (2009).
- (4) M. Weis, J. Lin, D. Taguchi, T. Manaka, M. Iwamoto, „Analysis of Transient Currents in Organic Field Effect Transistor: The Time-of-Flight Method“, *Journal of Physical Chemistry C*, **113**, 18459 – 18461 (2009).
- (5) T. Manaka, F. Liu, M. Weis, M. Iwamoto, „Diffusionlike electric field migration in the channel of organic field-effect transistors“, *Physical Review B*, **78**, 121302-1 – 121302-4 (2008).
- (6) M. Weis, J. Lin, D. Taguchi, T. Manaka, M. Iwamoto, „Insight Into the Contact Resistance Problem by Direct Probing of the Potential Drop in Organic Field-Effect Transistors“, *Applied Physics Letters*, **97**, 263304 (2010).
- (7) P. Juhasz, M. Vary, L. Stuchlikova, L. Harmatha, J. Jakabovic, M. Weis, „Characterization of Charge Traps in Pentacene Diode by Electrical Methods“, *Organic Electronics* **17**, 240 – 246 (2015).
- (8) J. Jakabovič, J. Kováč, M. Weis, D. Haško, R. Srnánek, P. Valent, R. Resel, "Preparation and properties of thin parylene layers as the gate

- dielectrics for organic field effect transistors", *Microelectronics Journal*, **40**, 595-597 (2009).
- (9) J. Uhrik, J. Jakabovic, A. Satka, A. Vincze, S. Flickyngrova, L. Sladek, A. Kuzma, P. Juhasz, F. Horinek, K. Rendek, P. Telek, M. Donoval, M. Weis, „Effects of substrate condition on calcium corrosion and its role in the calcium test for water vapour transmission rate“, *Corrosion Science* **88**, 400 – 404 (2014).
- (10) J. Nevrela, M. Micjan, M. Novota, S. Kovacova, M. Pavuk, J. Kovac Jr, J. Jakabovic, M. Weis, “Secondary doping in poly (3, 4-ethylene dioxythiophene): poly (4-styrenesulfonate) thin films”, *Journal of Polymer Science B: Polymer Physics* **53**, 1139-1146 (2015).

7 Citačný ohlas uchádzača

Uchádzač je autorom alebo spoluautorom 112 odborných článkov publikovaných v recenzovaných časopisoch vedných v databáze Web of Science (Current Contents). Citačný ohlas na tieto práce je viac ako 400 citácií a Hirschov index dosahuje hodnotu 9. Nasledujúci súpis uvádza iba ohlas na najdôležitejšie práce uchádzača, ktoré majú vzťah k skúmanej problematike. Úplný citačný ohlas je samostatne priložený vo forme elektronickej prílohy.

- (a) Ján Jakabovič, Jaroslav Kováč, Martin Weis, Daniel Haško, Rudolf Srnánek, Peter Valent, Roland Resel, „Preparation and properties of thin parylene layers as the gate dielectrics for organic field effect transistors“, *Microelectronics Journal*, **40**, 595 (2009).
1. Kahouli A, Sylvestre A, Ortega L, Jomni F, Yangui B, Maillard M, Berge B, Robert JC, Legrand J, „Structural and dielectric study of parylene C thin films“, *Applied Physics Letters*, **94**(15), 152901 (2009).
 2. Kubota, K., Kato, T., Adachi, C., „Control of the molecular orientation of a 2, 2'-bithiophene-9,9-diocetylfluorene copolymer by laser annealing and subsequent enhancement of the field effect transistor characteristics“, *Applied Physics Letters*, **95**(7), 073303 (2009).
 3. Cho, K.H., Seong, T.G., Choi, J.Y., Kim, J.S., Kwon, J.H., Shing, S.I., Chung, M.H., Ju, B.K., Nahm, S., „A flexible amorphous $\text{Bi}_5\text{Nb}_3\text{O}_{15}$ film for the gate insulator of the low-voltage operating pentacene thin-film transistor fabricated at room temperature“, *Langmuir*, **25**, 12349 (2009).
 4. Chang, S., Dong, K.-Y., Park, J.-H., Oh T.-Y., Kim J.-W., Lee S.Y., Ju B.-K., „Scaling down of amorphous indium gallium zinc oxide thin film transistors on the polyethersulfone substrate employing the protection layer of parylene-C for the large-scale integration“, *Applied Physics Letters*, **96**, 243504 (2010).
 5. Perkas N, Amirian G, Girshevitz O, Charmet J, Laux E, Guibert G, Keppner H, Gedanken A, „Modification of Parylene film-coated glass with TiO_2 nanoparticles and its photocatalytic properties“, *Surface & Coatings Technology* **205** (10), 3190 (2011).
 6. Wen Y, Liu Y, Guo Y, Yu G, Hu W, „Experimental Techniques for the Fabrication and Characterization of Organic Thin Films for Field-Effect Transistors“, *Chemical Reviews*, **111**(5), 3358 (2011).
 7. Schwabegger G, Ullah M, Irimia-Vladu M, Baumgartner M, Kanbur Y, Ahmed R, Stadler P, Bauer S, Sariciftci NS, Sitter H, „High mobility, low voltage operating C60 based n-type organic field effect transistors“, *Synthetic Metals*, **161**, 2058 (2011).

8. Czajkowski J, Fabritius T, Ułański J, Marszałek T, Gazicki-Lipman M, Nosal A, Śliż R, Alarousu E, Prykäri T, R. Myllylä, Jabbour G, „Ultra-high resolution optical coherence tomography for encapsulation quality inspection“, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, **105**, 649 (2011).
9. Flueckiger J, Bazargan V, Stoeber B, Cheung KC, „Characterization of postfabricated parylene C coatings inside PDMS microdevices“, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **160**, 864 (2011).
10. Bayraktar E, Eroglu, D, Ciftlik AT, Kulah H, „A MEMS based gravimetric resonator for mass sensing applications“, *2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, p. 817 (2011).
11. Kahouli A, Jomni F, Sylvestre A, Yangui B, Legrand J, „I-t, J-1/T and J-E characteristics for the understanding of the main mechanism of electric conduction and the determination of the glass transition temperature of parylene C thin films“, *Journal of Physics D: Applied Physics* **44**(50), 505302 (2011).
12. Kahouli A, Sylvestre A, Jomni F, Yangui B, Legrand J, „AC-conductivity and dielectric relaxations above glass transition temperature for parylene-C thin films“, *Applied Physics A: Material Science & Processing* **106**, 909 (2012).
13. Kahouli A, Sylvestre A, Laithier J-F, Pairis S, Garden J-L, André E, Jomni F , Yangui B, „Effect of O₂, Ar/H₂ and CF₄ plasma treatments on the structural and dielectric properties of parylene-C thin films“, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **45**, 215306 (2012).
14. Kahouli A, André E, Sylvestre A, Pairis S, Jomni F, Yangui B, Garden J-L, „Structure and Dielectric Study of Poly(α,α difluoro-p-xylylene) Thin Films: Highlight of the Substrate Temperature Effect“, *Chemical Vapor Deposition*, **18**, 147 (2012).
15. Kahouli A, Sylvestre A, Pairis S, Laithier J-F, „Effect of Cl-H aromatic substitution on structural and dielectric properties of poly(p-xylylene)“, *Polymer*, **53**, 3001 (2012).
16. Santos M, Soo S, Petridis H, „The effect of Parylene coating on the surface roughness of PMMA after brushing“, *Journal of Dentistry* **41**, 802 (2013).
17. Mandal S, Katiyar M, „Processing and performance of organic insulators as a gate layer in organic thin film transistors fabricated on polyethylene terephthalate substrate“, *B. Mater. Sci.* **36**(4), 653 (2013).
18. Streletsov DR, Buzin AI, Dmitryakov PV, Bessonova NP, Kamasa P, Ivanov DA, Chvalun SN, „A Study of p-Xylylene Polymerization Kinetics by Isoconversional Analysis“, *Thermochimica Acta*, **573**, 175 (2013).
19. Yang S, Kymmissis I, Leland ES, Liu S, O'Brien S, „Influence of electromigration on the maximum operating field of (Ba,Sr)TiO₃/parylene-C composite capacitors“, *Journal of Vacuum Science & Technology B* **31**, 060603 (2013).
20. Kahouli Sylvestre A, Laithier J-F, Lutsen L, Pairis S, André E, Garden J-L, „Structural and dielectric properties of parylene-VT4 thin films“, *Materials Chemistry and Physics* **143**, 908 (2013).
21. Chamlagain B, Li Q, Ghimire NJ, Chuang H-J, Perera MM, Tu H, Xu Y, Pan M, Xao D, Yan J, Mandrus D, Zhou Z, „Mobility Improvement and Temperature Dependence in MoSe₂ Field-Effect Transistors on Parylene-C Substrate“, *ACS Nano* **8**, 5079 (2014).
22. Tung BT, Cheng X, Watanabe N, Kato F, Kikuchi K, Aoyagi M, „Investigation of low-temperature deposition high-uniformity coverage Parylene-HT as a dielectric

- layer for 3D interconnection“, *2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 1926 (2014).
- 23. Pitayatanakul O, Higashino T, Kadoya T, Tanaka M, Kojima H, Ashizawa M, Kawamoto T, Matsumoto H, Ishikawaa K, Mori T, „High performance ambipolar organic field-effect transistors based on indigo derivatives“, *Journal of Materials Chemistry C* **43**, 9311 (2014).
 - 24. Shao H, Hu X, Tang C, Zhou Y, Shuai M, Mei J, Zhu Y, Lau W, „Enhanced water vapor barrier property of poly(chloro-p-xylylene) film by formation of dense surface cross-linking layer via hyperthermal hydrogen treatment“, *RSC Advances* **5**, 55713 (2015).
 - 25. Liu Y, Wang R, Zhang G, Du J, Zhao L, Xue C, Zhang W, Liu J, „Lollipop-shaped“ high-sensitivity Microelectromechanical Systems vector hydrophone based on Parylene encapsulation“, *Journal of Applied Physics* **118**, 044501 (2015).
 - 26. Mokni M, Kahouli A, Jomni F, Garden J-L, Andre E, Sylvestre A, „Dielectric Investigation of Parylene D Thin Films: Relaxation and Conduction Mechanisms“, *Journal of Physical Chemistry A* **119**, 9210 (2015).
 - 27. Pelvillain C, Cussac P, Diahiam S, Valdez-Nava Z, Locatelli ML, Lebey T, „Dielectric and thermal properties of parylene N and D films for power electronic surface insulation“, *IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 19-22 July 2015, 508 (2015).
 - 28. Bui TT, Watanabe N, Cheng X, Kato F, Kikuchi K, Aoyagi M, „Copper-Filled Through-Silicon Vias With Parylene-HT Liner“, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* **PP(99)**, 1-8 (2016).
 - 29. Alt M, Melzer C, Mathies F, Deing K, Hernandez-Sosa G, Lemmer U, „Adjustable passivation of SiO₂ trap states in OFETs by an ultrathin CVD deposited polymer coating“, *Applied Physics A* **122**(3), 1 (2016).
 - 30. Ravariu C, Dragomirescu D, Babarada F, Prelipceanu D, Patrichi B, Gorciu C, Manuc D, Salageanu A, „Organic field effect transistor OFET optimization considering volume channel conduction mechanism“. *Proceedings of the International Semiconductor Conference*, CAS, 2015-December, art. no. 7355179, pp. 113-116.
 - 31. Chindam C, Brown NR, Lakhtakia A, Awadelkarim OO, Orfali W, „Temperature-dependent dynamic moduli of Parylene-C columnar microfibrous thin films“, *Polymer testing*, **53**, 89 (2016).
 - 32. Kondo M, Uemura T, Matsumoto T, Araki T, Yoshimoto S, Sekitani T, „Ultraflexible and ultrathin polymeric gate insulator for 2 V organic transistor circuits“, *Applied Physics Express* **9**, 061602 (2016).
 - 33. Bui TT, Cheng X, Watanabe N, Kato F, Kikuchi K, Aoyagi M, „A prospective low-k insulator for via-last through-silicon-vias (TSVs) in 3D integration“, *2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference*, 2182 (2016).
 - 34. Park DW, Brodnick SK, Ness JP, Atry F, Krugner-Higby L, Sandberg A, Mikael S, Richner TJ, Novello J, Kim H, Baek DH, Bong J, Frye ST, Thongpang S, Swanson KI, Lake W, Pashaie R, Williams JC, Ma Z, „Fabrication and utility of a transparent graphene neural electrode array for electrophysiology, in vivo imaging, and optogenetics“, *Nature Protocols*, **11**, 2201 (2016).
 - 35. Bonfante G, Chevalliot S, Toury B, Berge B, Maillard M, „Two liquids wetting properties as a surface polarity probe for hydrophobic coatings“, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **19**, 3214 (2017).

36. Lai S, Zucca A, Cosseddu P, Greco F, Mattoli V, Bonfiglio A, „Ultra-conformable Organic Field-Effect Transistors and circuits for epidermal electronic applications“, *Organic Electronics*, **46**, 60 (2017).
37. Shin EY, Choi EY, Noh YY, „Parylene based bilayer flexible gate dielectric layer for top-gated organic field-effect transistors“, *Organic Electronics* **46**, 14 (2017).
38. Lee JH, Kim A, „Structural and thermal characteristics of the fast-deposited parylene substrate for ultra-thin organic light emitting diodes“, *Organic Electronics*, **47**, 147(2017).
39. Spanu A, Viola F, Lai S, Cosseddu P, Ricci PC, Bonfiglio A, „A reference-less pH sensor based on an organic field effect transistor with tunable sensitivity“, *Organic Electronics* **48**, 188 (2017).
- (b) Wei Ou-Yang, Martin Weis, Dai Taguchi, Chen Xiangyu, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, “Modeling of threshold voltage in pentacene field-effect transistors”, *Journal of Applied Physics*, **107**, 124506 (2010).
1. Lutsyk P, Janus K, Sworakowski J, Generali G, Capelli R, Muccini M, „Photoswitching of an n-Type Organic Field Effect Transistor by a Reversible Photochromic Reaction in the Dielectric Film“, *Journal of Physical Chemistry C*, **115**, 3106 (2011)
 2. Xu WT, Rhee SW „Compromise of electrical leakage and capacitance density effects: a facile route for high mobility and sharp subthreshold slope in low-voltage operable organic field-effect transistors“, *Journal of Materials Chemistry*, **21**, 998 (2011).
 3. Celle C, Suspène C, Ternisien M, Lenfant S, Guérin D, Smaali K, Lmimouni K, Simonato JP, Vuillaume D, „Interface dipole: Effects on threshold voltage and mobility for both amorphous and poly-crystalline organic field effect transistors“, *Organic Electronics* **15**, 729 (2014).
 4. Tiwari S, Takashima W, Nagamatsu S, Balasubramanian SK, Prakash R, „A comparative study of spin coated and floating film transfer method coated poly (3-hexylthiophene)/poly (3-hexylthiophene)-nanofibers based field effect transistors“ *Journal of Applied Physics* **116**, 094306 (2014).
 5. Pankratov EL, Bulaeva EA, „Variation of redistribution of an infused dopant in a multilayer structure with variation of pressure of vapor of the dopant“, *The International Journal of Multiphysics*, **8**, 411 (2014).
 6. Magliulo M, Manoli K, Macchia E, PalazzoG, Torsi L, „Tailoring Functional Interlayers in Organic Field-Effect Transistor Biosensors“, *Advanced Materials*, **27**, 7528 (2015).
 7. Jung S, Kim C-H, Bonnassieux Y, Horowitz G, „Fundamental insights into the threshold characteristics of organic field-effect transistors“, *Journal of Physics D: Applied Physics* **48**, 035106 (2015).
 8. Pankratov EL, Bulaeva EA, „An approach to increase the integration rate of planar drift heterobipolar transistors“, *Materials Science in Semiconductor Processing* **34**, 260 (2015).

9. Ljubic D, Smithson CS, Wu Y, Zhu S, „Highly UV-Sensitive and Responsive Benzothiophene/Dielectric Polymer Blend-Based Organic Thin-Film Phototransistor“, *Advanced Electronic Materials*, **1**, 1500119 (2015).
 10. Pankratov EL, Bulaeva EA, „Optimization of manufacturing of emitter-coupled logic to decrease surface of chip“, *International Journal of Modern Physics B* **29**, 1550023 (2015).
 11. Park B, „Monolayer field effect transistor as a probe of electronic defects in organic semiconducting layers at organic/inorganic hetero-junction interface“, *Thin Solid Films*, **598**, 141 (2016).
 12. Oh JD, Kim DK, Kim JW, Ha YG, Choi JH, „Low-voltage pentacene thin-film transistors using Hf-based blend gate dielectrics“, *Journal of Materials Chemistry C*, **4**, 807 (2016).
 13. Yan Z, Wang J, Qiao J, Chen W, Yang P, Xiao T, Yang J, „Numerical simulation study of organic nonvolatile memory with polysilicon floating gate“, *Chinese Physics B* **25**, 067102 (2016).
- (c) [Martin Weis, Jack Lin, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, “Analysis of Transient Currents in Organic Field Effect Transistor: The Time-of-Flight Method”, *Journal of Physical Chemistry C*, **113**, 18459 \(2009\)](#).
1. Chang H-C, Ruden PP, Liang Y, Frisbie CD, „Transient effects controlling the charge carrier population of organic field effect transistor channels“, *Journal of Applied Physics* **107**, 104502 (2010).
 2. Rao M, Ortiz RP, Facchetti A, Marks TJ, Narayan KS, „Studies of photogenerated charge carriers from donor–acceptor interfaces in organic field effect transistors. implications for organic solar cells“, *Journal of Physical Chemistry C*, **114**(48), 20609 (2010).
 3. Chen XY, Zhu H, Wang SD, „Charge accumulation dynamics in organic thin film transistors“, *Applied Physics Letters*, **97**, 243301 (2010).
 4. Liu W, Sasaoka K, Yamamoto T, Watanabe S, „Quantum transient currents in molecular systems weakly coupled with electrodes“, *Journal of Applied Physics* **109**, 123705 (2011).
 5. Liang Y, Chang H-C, Ruden PP, Frisbie CD, „Examination of Au, Cu, and Al contacts in organic field-effect transistors via displacement current measurements“, *Journal of Applied Physics*, **110**, 064514 (2011).
 6. Lucas B, El Amrani A, Moliton A, Skaiky A, El Hajj A, Aldissi M, „Charge transport properties in pentacene films: Evaluation of carrier mobility by different techniques“, *Solid-State Electronics*, **69**, 99 (2012).
 7. Gagorik AG, Hutchison GR, „Simulating charge injection and dynamics in micro-scale organic field-effect transistors“, *Journal of Physical Chemistry C*, **116**, 21232 (2012).
 8. Cho SJ, Nan ZX, Seo IJ, Koo JY, Kim YH, Soek BY, „An investigation on the parameters affecting the conductivity of pressboard in oil by measuring leakage current under DC“, *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2012*, 258 (2012)
 9. Juška G, Nekrašas N, Genevičius K, Pivrikas A, „Current transients in organic field

- effect transistors“, *Applied Physics Letters* **102**, 163306 (2013).
- 10. Lu ND, Li L, Sun PX, Liu M, „Charge carrier relaxation model in disordered organic semiconductors“, *AIP Advances*, **3**, 112119 (2013).
 - 11. Juška G, Nekrasas N, Genevičius K, Grigaitis, T, „The determination of charge carrier mobility from the current transients in organic field effect transistor“, *Journal of Applied Physics* **116**, 023702 (2014).
 - 12. Lago N, Cester A, Wrachien N, Tomasino I, Toffanin S, Quiroga S, Benvenuti E, Natali M, Muccini M, Meneghesso G, „On the Pulsed and Transient characterization of Organic Field-Effect Transistors“, *IEEE Electron Device Letters*, **36**, 1359 (2015).
 - 13. Lago N, Cester A, Wrachien N, Benvenuti E, Quiroga SD, Natali M, Toffanin S, Muccini M, Meneghesso G, „Investigation of Mobility Transient on Organic Transistor by Means of DLTS Technique“, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **99**, 1 (2016).
- (d) Takaaki Manaka, Fei Liu, Martin Weis, and Mitsumasa Iwamoto, „Diffusionlike electric field migration in the channel of organic field-effect transistors“, *Physical Review B*, **78**, 121302(R) (2008).
- 1. Matsui H, Hasegawa T, „Visualization of accumulated charge density in operating organic thin-film transistors“, *Applied Physics Letters* **95**, 223301 (2009).
 - 2. Anglin T.C., O'Brien D.B., Massari A.M., „Monitoring the Charge Accumulation Process in Polymeric Field-Effect Transistors via in Situ Sum Frequency Generation“, *the Journal of Physical Chemistry C*, **114**, 17629 (2010).
 - 3. Wen Y, Liu Y, Guo Y, Yu G, Hu W, „Experimental Techniques for the Fabrication and Characterization of Organic Thin Films for Field-Effect Transistors“, *Chemical Reviews*, **111**(5), 3358 (2011).
 - 4. Satoh N, Katori S, Kobayashi K, Watanabe S, Fujii T, Matsushige K, Yamada H, „Surface potential measurement of organic thin film on metal electrodes by dynamic force microscopy using a piezoelectric cantilever“, *Journal of Applied Physics* **109**, 114306 (2011).
 - 5. Jarosz G, Signerski R, „Small signal admittance spectroscopy applied for extraction of charge carrier mobility in thin organic layers“, *Opto-Electronics Review*, **19**(4), 66 (2011).
 - 6. Liang Y, Chang H-C, Ruden PP, Frisbie CD, „Examination of Au, Cu, and Al contacts in organic field-effect transistors via displacement current measurements“, *Journal of Applied Physics*, **110**, 064514 (2011).
 - 7. Tanaka Y, Noguchi Y, Kraus M, Brüttung W, Ishii H, „Impedance spectroscopy for pentacene field-effect transistor - Channel formation process in transistor operation“, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* **8117**, 811713 (2011).
 - 8. Walter SR, Youn J, Emery JD, Kewalramani S, Hennek JW, Bedzyk MJ, Facchetti A, Marks TJ, Geiger FM, „In-Situ Probe of Gate Dielectric-Semiconductor Interfacial Order in Organic Transistors: Origin and Control of Large Performance Sensitivities“, *Journal of American Chemical Society*, **134**, 11726 (2012).
 - 9. Bittle EG, Brill JW, Straley JP, „Dynamics of charge flow in the channel of a thin-film field-effect transistor“, *Journal of Applied Physics*, **112**, 094507 (2012).

10. Akimoto I, Ohata M, Ozaki N, Gu P, „Size dependent optical properties of quinacridonequinone nanoparticles prepared by liquid laser ablation in water“, *Chemical Physics Letters*, **552**, 102 (2012).
 11. Juska G, Nekrasas N, Genevicius K, Grigaitis T, „The determination of charge carrier mobility from the current transients in organic field effect transistor“, *Journal of Applied Physics* **116**, 023702 (2014).
 12. Nagauchi J, Kojima O, Kita T, Shim YG, „Fabrication of cyanine dye thin films grown by a layer-by-layer method“, *Material Research Express* **2**, 076402 (2015).
- (e) [Martin Weis, Jack Lin, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, “Insight Into the Contact Resistance Problem by Direct Probing of the Potential Drop in Organic Field-Effect Transistors”, Applied Physics Letters, 97, 263304/1-3 \(2010\).](#)
1. Lee S, Kang S-J, Jo G, Choe M, Park W, Yoon J, Kwon T, Kahng YH, Kim D-Y, Lee BH, Lee T, „Enhanced characteristics of pentacene field-effect transistors with graphene electrodes and substrate treatments“, *Applied Physics Letters*, **99**, 083306 (2011).
 2. Natali D, Caironi M, „Charge Injection in Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors: Physics, Models and Characterization Methods“, *Advanced Materials*, **24** 1357 (2012).
 3. Scheinert S, Grobosch M, Paasch G, Hörselmann I, Knupfer M, Bartsch J, „Contact characterization by photoemission and device performance in P3HT based organic transistors“, *Journal of Applied Physics* **111**, 064502 (2012).
 4. Shu L, Shi W, Huang W, Yu J, „Performance improvement of pentacene organic field-effect transistor through introducing polymer buffer layers“, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **25**, 5540 (2014).
 5. Noda K, Wada Y, Toyabe T, „Experimental and numerical analysis of channel-length-dependent electrical properties in bottom-gate, bottom-contact organic thin-film transistors with Schottky contact“, *Organic Electronics* **15**, 3681 (2014).
 6. Cho JY, Ahn S, Bae, S-H, Kim, G-R, Han J-H, Lee D-H, Kim J-S, Song KJ, Park C, „The Effect of Bi/Sn Ratio of Bi–Sn–Ag Solder on the Mechanical and Electrical Properties of Interfaces Between Solder/Thermoelectric Material and Solder/Electrode“, *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* **10**, 504 (2015).
 7. He L, Ji D, Wang E, Zhen Y, Dong H, Hu W, „Modulating the metal/organic interface via CuTCNQ decorated layer toward high performance bottom-contact single-crystal transistors“, *Science China Chemistry* **58**, 1027 (2015).
 8. Murawski J, Mönch T, Milde P, Hein MP, Nicht S, Zerweck-Trogisch U, Eng LM, „Tracking speed bumps in organic field-effect transistors via pump-probe Kelvin-probe force microscopy“, *Journal of Applied Physics* **118**, 244502 (2015).
 9. Island JO, Blanter SI, Buscema M, van der Zant HSJ, Castellanos-Gomez A, „Gate Controlled Photocurrent Generation Mechanisms in High-Gain In2Se3 Phototransistors“, *Nano Letters* **15**, 7853 (2015).
 10. Takagaki S, Yamada H, Noda K, „Extraction of contact resistance and channel parameters from the electrical characteristics of a single bottom-gate/top-contact organic transistor“, *Japanese Journal of Applied Physics* **55**, 03DC07 (2016).

11. Watanabe T, Tada T, Yasuno S, Oji H, Yoshimoto N, Hirosawa I, „Observation of electric potential in organic thin-film transistor by bias-applied hard X-ray photoemission spectroscopy“, *Japanese Journal of Applied Physics* **55**, 03DD12 (2016).
- (f) Juraj Nevrela, Michal Micjan, Miroslav Novota, Sona Kovacova, Milan Pavuk, Peter Juhasz, Jaroslav Kovac Jr, Jan Jakabovic, Martin Weis, „Secondary doping in poly(3,4-ethylenedioxothiophene):poly(4-styrenesulfonate) thin films“, *Journal of Polymer Science B: Polymer Physics* **53**, 1139-1146 (2015).
1. Diah AWM, Quirino JP, Belcher W, Holdsworth CI, „An Assessment of the Effect of Synthetic and Doping Conditions on the Processability and Conductivity of Poly(3,4-ethylenedioxothiophene)/Poly(styrene sulfonic acid)“, *Macromolecular Chemistry and Physics*, **217**, 1907 (2016).
 2. Chen L, Qiu S, Liu P, Xiong F, Lu J, Liu Y, Li G, Liu Y, Ren F, Xiao Y, Gao L, Zhao Q, Ding B, Li Y, Guo Y, Chen X, „The description of charge transfer in fast negative ions scattering on water covered Si(100) surfaces“, *Applied Surface Science*, **387**, 1174 (2016).
 3. Lee W, Song M, Park S, Nam S, Seo J, Kim H, Kim Y, „Acidity-Controlled Conducting Polymer Films for Organic Thermoelectric Devices with Horizontal and Vertical Architectures“, *Scientific Reports* **6**, 33795 (2016).
 4. García-Hernández C, García-Cabezón C, Martín-Pedrosa F, De Saja JA, Rodríguez-Méndez ML, „Layered composites of PEDOT/PSS/nanoparticles and PEDOT/PSS/phthalocyanines as electron mediators for sensors and biosensors“, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, **7**, 1948-1959 (2016).
 5. Yoon SS, Khang DY, „Roles of Nonionic Surfactant Additives in PEDOT:PSS Thin Films“, *Journal of Physical Chemistry*, **120**, 29525 (2017).
 6. Seo YK, Joo CW, Lee J, Han JW, Cho NS, Kim YH, „Post-treated PEDOT:PSS doped with 2-ethoxyethanol films as transparent electrodes for ITO-free organic light-emitting diodes“, *Journal of Luminescence*, **187**, 221 (2017).
 7. Syrový T, Janicek P, Mistrik J, Palka K, Hawlova P, Kubac L, Klanjšek Gunde M, „Optical, electrical and morphological study of PEDOT: PSS single layers spiral-bar coated with various secondary doping solvents“, *Synthetic Metals* **227**, 139 (2017).
 8. Chou TR, Chen SH, Chiang YT, Chang TT, Lin CW, Chao CY, „Highly conductive PEDOT:PSS film by doping *p*-toluenesulfonic acid and post-treatment with dimethyl sulfoxide for ITO-free polymer dispersed liquid crystal device“, *Organic Electronics*, **48**, 223 (2017).
 9. Lee HU, Kim SW, „Pen-lithography for flexible microsupercapacitors with layer-by-layer assembled graphene flake/PEDOT nanocomposite electrodes“, *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, 13581 (2017).
 10. Saxena N, Čorić M, Greppmair A, Wernecke J, Pflüger M, Krumrey M, Brandt MS, Herzig EM, Müller-Buschbaum P, „Morphology–Function Relationship of Thermoelectric Nanocomposite Films from PEDOT:PSS with Silicon Nanoparticles“, *Advanced Electronic Materials*, v tlači (2017).

- (g) Takaaki Manaka, Fei Liu, Martin Weis, and Mitsumasa Iwamoto, „Studying Transient Carrier Behaviors in Pentacene Field Effect Transistors Using Visualized Electric Field Migration”, *Journal of Physical Chemistry C*, **113**, 10279 (2009).
1. Nakai IF., Tachioka M, Ugawa A, Ueda T, Watanabe K, Matsumoto Y, „Molecular structure and carrier distributions at semiconductor/dielectric interfaces in organic field-effect transistors studied with sum frequency generation microscopy”, *Applied Physics Letters* **95**, 243304 (2009).
 2. Anglin TC, O'Brien DB, Massari AM, „Monitoring the Charge Accumulation Process in Polymeric Field-Effect Transistors via in Situ Sum Frequency Generation”, *Journal of Physical Chemistry C*, **114**, 17629 (2010).
 3. Chen XY, Zhu H, Wang SD, „Charge accumulation dynamics in organic thin film transistors“, *Applied Physics Letters*, **97**, 243301 (2010).
 4. Chang H-C,1 Ruden PP, Liang Y, Frisbie CD, „Charge carrier extraction dynamics for organic field effect transistor structures“, *Applied Physics Letters* **99**, 073306 (2011).
 5. Anglin TC, Sohrabpour Z, Massari AM, „Nonlinear Spectroscopic Markers of Structural Change During Charge Accumulation in Organic Field-Effect Transistors”, *Journal of Physical Chemistry C*, **115**, 20258 (2011).
 6. Tanaka Y, Noguchi Y, Kraus M, Brüttig W, Ishii H, „Impedance spectroscopy for pentacene field-effect transistor - Channel formation process in transistor operation“, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* **8117**, 811713 (2011).
 7. Tian CS, Shen YR, „Recent progress on sum-frequency spectroscopy“, *Surface Science Reports* **69**, 105 (2014).
 8. Yamamoto T, Doi M, „Electrochemical mechanism of ion current rectification of polyelectrolyte gel diodes“, *Nature Communications* **5**, 4162 (2014).
 9. Kearns P.M., O'Brien D.B., Massari A.M., „Optical Interference Enhances Nonlinear Spectroscopic Sensitivity: When Light Gives You Lemons, Model Lemonade“, *Journal of Physical Chemistry Letters* **7**, 62 (2016).
- (h) Martin Weis, Keanchuan Lee, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, „Contact resistance as an origin of the channel-length-dependent threshold voltage in organic field-effect transistors”, *Japanese Journal of Applied Physics*, **51**, 100205 (2012).
1. Zanella F, Marjanović N, Ferrini R, Gold H, Haase A, Fian A, Stadlober B, Müller R, Genoe J, Hirshy H, Droste A, König M, Lee K-D, Ring J, Prêtôt R, Enz CC, Salleseh J-M, „Design and modeling of self-aligned nano-imprinted sub-micrometer pentacene-based organic thin-film transistors“, *Organic Electronics*, **14**, 2756 (2013).
 2. Sworakowski J, Bielecka U, Lutsyk P, Janus K, „Effect of spatial inhomogeneity of charge carrier mobility on current-voltage characteristics in organic field-effect transistors“, *Thin Solid Films*, **571**, 56 (2014).
 3. Sworakowski J, „Current-voltage characteristics in organic field-effect transistors.

Effect of interface dipoles“, *Chemical Physics* **456**, 106 (2015).

4. Nawaz A, de Col C, Cruz-Cruz I, Kumar A, Kumar A, Hummelgen IA, „Gate dielectric surface treatments for performance improvement of poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) based organic field-effect transistors“, *Proceedings of SPIE Organic Field-Effect Transistors XIV; And Organic Sensors And Bioelectronics VIII*, **9568**, 95681A (2015).
5. Jastrombek D, Nawaz A, Koehler M, Meruvia MS, Hümmelgen IA, „Modification of the charge transport properties of the copper phthalocyanine/poly(vinyl alcohol) interface using cationic or anionic surfactant for field-effect transistor performance enhancement“, *Journal of Physics D: Applied Physics* **48**, 335104 (2015).
6. Kano M, Minari T, Marumoto K, „Effect of molecular ordering in active layer on organic thin-film transistor performance“, *Japanese Journal of Applied Physics* **55** 030301 (2016).
7. Landi G, Tunc AV, Sio AD, Parisi J, Neitzert HC, „Hole-mobility limits for the Zn(OC)₂ organic semiconductor obtained by SCLC and field-effect measurements“, *Physica Status Solidi A*, **213**, 1909 (2016).
8. Matsushima T, Hwang S, Terakawa S, Fujihara T, Sandanayaka ASD, Qin C, Adachi C, „Intrinsic carrier transport properties of solution-processed organic-inorganic perovskite films“, *Applied Physics Express* **10**, 024103 (2017).

- (i) [Martin Weis, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, “Origin of electric field distribution in organic field-effect transistor: experiment and analysis”, Journal of Applied Physics, 105, 024505 \(2009\).](#)

1. Babajanyan A, Melikyan H, Carnis J, Yoon Y, Lee H, Yoo HK, Lee K, Friedman B, „Characterization of the field-effect conductivity distribution in pentacene thin-film transistors by a near-field scanning microwave microscope“, *Synthetic Metals* **161**, 931 (2011).
2. Wen Y, Liu Y, Guo Y, Yu G, Hu W, „Experimental Techniques for the Fabrication and Characterization of Organic Thin Films for Field-Effect Transistors“, *Chemical Reviews* **111**(5), 3358 (2011).
3. Tanaka H, Hirate M, Watanabe S, Kaneko K, Marumoto K, Takenobu T, Iwasa Y, Kuroda S, „Electron spin resonance observation of charge carrier concentration in organic field-effect transistors during device operation“, *Physical Review B* **87**, 045309 (2013).
4. Zhang Y, Liu J, Nguyen T-Q, „Photoresponse of Donor/Acceptor Blends in Organic Transistors: A Tool for Understanding Field-Assisted Charge Separation in Small Molecule Bulk Heterojunction Solar Cells“, *ACS Applied Materials & Interfaces* **5**, 2347 (2013).
5. Juska G, Nekrasas N, Genevicius K, Pivrikas A, „Current transients in organic field effect transistors“, *Applied Physics Letters* **102**, 163306 (2013).
6. Li H, Duan L, Zhang D, Qiu Y, „Electric Field inside a Hole-Only Device and Insights into Space-Charge-Limited Current Measurement for Organic Semiconductors“, *Journal of Physical Chemistry C* **118**, 9990 (2014).
7. Juska G, Nekrasas N, Genevicius K, Grigaitis, T, „The determination of charge carrier mobility from the current transients in organic field effect transistor“,

Journal of Applied Physics **116**, 023702 (2014).

8. Cho J, Mori T, „Low-Temperature Band Transport and Impact of Contact Resistance in Organic Field-Effect Transistors Based on Single-Crystal Films of Ph-BTBT-C10“, *Physical Review Applied*, **5**, 064017 (2016).

- (j) [Martin Weis, Motoharu Nakao, Jack Lin, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, „Thermionic emission model for contact resistance in organic field-effect transistor“, *Thin Solid Films* **518** 795–798 \(2009\).](#)

1. Lee S, Jo G, Kang S-J, Wang G, Choe M, Park W, Kim D-Y, Kahng YH, Lee T, „Enhanced Charge Injection in Pentacene Field-Effect Transistors with Graphene Electrodes“, *Advanced Materials*, **23**, 100 (2011).
2. Keil C, Schlettwein D, „Development of the field-effect mobility in thin films of F₁₆PcCu characterized by electrical in situ measurements during device preparation“, *Organic Electronics*, **12**, 1376 (2011).
3. Jo G, Choe M, Lee S, Park W, Kahng YH, Lee T, „The application of graphene as electrodes in electrical and optical devices“, *Nanotechnology*, **23**, 112001 (2012).
4. Kumar B, Negi YS, Kaushik BK, „Modelling of top and bottom contact structure organic field effect transistor“, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **31**, 012401 (2013).
5. Kumar B, Kaushik BK, Negi YS, „Perspectives and challenges for organic thin film transistors: materials, devices, processes and applications“, *Journal of Materials Science-Materials in Electronics* **25**, 1 (2014).
6. Kim D, Shin H, Choi JS, Zhang X, Park JH, Baang S, Park J, „Analysis of the thickness-dependent electrical characteristics in pentacene field-effect devices“, *Journal of the Korean Physical Society* **65**, 87 (2014).
7. Tsai TD, Chang JW, Wang CG, Lin MW, Guo TF, Wen TC, Chang JH, Wu CI, „The origins in the transformation of ambipolar to n-type pentacene-based organic field-effect transistors“, *Organic Electronics* **15**, 1759 (2014).

- (k) [Martin Weis, Katarína Gmucová, Vojtech Nádaždy, Eva Majková, Daniel Haško, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, “Grain boundary effect on charge transport in pentacene thin films”, *Japanese Journal of Applied Physics*, **50**, 04DK03/1 – 04DK03/5 \(2011\).](#)

1. Kimura T, Miyato Y, Kobayashi K, Yamada H, Matsushige K, „Investigations of Local Electrical Characteristics of a Pentacene Thin Film by Point-Contact Current Imaging Atomic Force Microscopy“, *Japanese Journal of Applied Physics*, **51**, 08KB05 (2012).
2. Iazykov M, Erouel M, Tardy J, Skryshevsky VA, Phaner-Goutorbe M, „Atomic Force Microscopy analysis of morphology of thin pentacene films deposited on Parylene-C and Benzocyclobutene“, *Surface Science*, **607**, 170 (2013).
3. Salas-Villasenor AL, Mejia I, Sotelo-Lerma M, Gnade BE, Quevedo-Lopez MA, „Performance and stability of solution-based cadmium sulfide thin film transistors: Role of CdS cluster size and film composition“, *Applied Physics Letters* **101**, 262103 (2012).

4. Hunter S, Anthopoulos TD, „Observation of unusual, highly conductive grain boundaries in high-mobility phase separated organic semiconducting blend films probed by lateral-transport conductive-AFM“, *Advanced Materials* **25**, 4320 (2013).
 5. Mirza M, Wang J, Li D, Arabi SA, Jiang C, „Novel Top-Contact Monolayer Pentacene-Based Thin-Film Transistor for Ammonia Gas Detection“, *ACS Applied Material Interfaces* **6**, 5679 (2014).
 6. Bashir A, Heck A, Narita A, Feng X, Nefedov A, Rohwerder M, Muellen K, Elstner M, Wöll C, „Charge carrier mobilities in organic semiconductors: Crystal engineering and the importance of molecular contacts“, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **17**, 21988 (2015).
 7. Odinokov AV, Bagaturyants AA, „Computer Simulation of Shallow Traps Created by Impurity Molecules in Anthracene Crystal“, *Journal of Physical Chemistry C*, **120**, 25189 (2016).
- (I)
1. Martin Weis, Keanchuan Lee, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, „Modified transmission-line method for evaluation of the contact resistance: Effect of channel length-dependent threshold voltage“, *Japanese Journal Applied Physics* **53**, 011601 (2014).
 2. Sworakowski J, Bielecka U, Lutsyk P, Janus K, „Effect of spatial inhomogeneity of charge carrier mobility on current-voltage characteristics in organic field-effect transistors“, *Thin Solid Films*, **571**, 56 (2014).
 3. Noda K, Wada Y, Toyabe T, „Experimental and numerical analysis of channel-length-dependent electrical properties in bottom-gate, bottom-contact organic thin-film transistors with Schottky contact“, *Organic Electronics* **15**, 3681 (2014).
 4. Sworakowski J, „Current-voltage characteristics in organic field-effect transistors. Effect of interface dipoles“, *Chemical Physics* **456**, 106 (2015).
 5. Jastrombek D, Nawaz A, Koehler M, Meruvia MS, Hümmelgen IA, „Modification of the charge transport properties of the copper phthalocyanine/poly(vinyl alcohol) interface using cationic or anionic surfactant for field-effect transistor performance enhancement“, *Journal of Physics D: Applied Physics* **48**, 335104 (2015).
 6. Takagaki S, Yamada H, Noda K, „Extraction of contact resistance and channel parameters from the electrical characteristics of a single bottom-gate/top-contact organic transistor“, *Japanese Journal of Applied Physics* **55**, 03DC07 (2016).
 7. Carr A, Peethala B, Raymond M, Adusumilli P, Kamineni V, Niub C, Arceo De La Pena A, Canaperi DF, Siddiqui S, „Impact of surface preparation for n-type Si:P and p-type SiGe:B semiconductors on low resistance silicide contacts“, *Microelectronic Engineering* **173**, 22 (2017).
 8. Lai S, Cosseddu P, Bonfiglio A, „A method for direct contact resistance evaluation in low voltage coplanar organic field-effect transistors“, *Applied Physics Letters* **110**, 153304 (2017).

8 Summary

The collection of research papers selected for this thesis is related to the study of charge injection and transport in organic devices as well as selected fabrication technologies. These papers are introducing novel experimental methods for device characterization, modified models for device analysis or improved technology processes.

First four journal papers belong to the study of transient and steady-state charge transport in organic field-effect transistor. The electric field sensitive microscopy based on nonlinear optical phenomenon is developed and used for direct observation of the electric field migration across the channel region. These observations motivated us to develop models based on physics of dielectric materials as a more general approach to organic semiconductors. The idea of the dielectric materials has been extended to various models of charge behaviour in organic electronics devices in transient states as well as in the steady-state. Obviously, during my research of organic semiconductors the physics of dielectric materials was always an origin of all assumptions and observed behaviours were explained without semiconductor physics. As a result, my work supports an idea that “organic semiconductors” are not semiconductors in the meaning used for inorganic one. On the other hand, all semiconductor-like behaviour can be explained by more general approach common for dielectric materials.

The second list of journal papers contains two papers focused on the contact resistance. Since the contact resistance is one of significant bottlenecks of the organic transistors, it is necessary to have proper tools for its characterization and subsequent reduction. The research has been often focused

on the material science only, in search for appropriate materials, which provide low contact resistance in the steady-state of organic transistors. However, the contact resistance in organic transistors is not only a constant material parameter, but it depends on applied voltage, device geometry, etc. The understanding of contact resistance will qualify organic transistor for competition with inorganic one and accelerate its advantageous implementation into industrial applications with addressing the challenges of an aging society or environment protection. Paper selected for this part of my work describe impact of the injection barrier, as the origin of the contact resistance, on the charge injection and transport in organic transistors. It has been shown that the transport is conserved although the effective charge transport mobility is reduced due to the potential drop on the injection electrode. Hence, this part of presented work is pointing out that the representation by potential drop is more appropriate rather than contact resistance.

The last four journal papers belong to the study of new materials and novel technologies. Superior materials and highly developed technology is always a key issue for device fabrication and driving force for applied research. In the past I have participated on the study and characterization of new materials synthesized by colleagues – chemists; however, these works were not selected to this thesis since my contribution does not bring the novelty. On the other hand, my work improved fabrication technologies and application of new materials through deeper understanding of underlying physics. In contrast with device characterization based papers listed in first two selections, journal paper selected in this list illustrate development of new technologies and unexpected behaviour of new materials. Precisely done experiments and thin-film fabrications leaded not only to scientific publication, but also to the development of new in-house technologies that are unique in world-wide area.

In conclusion, my work done in the field of organic electronics was mostly focused on understanding the charge behaviour in organic electronics devices. In detail, research had been focused on charge injection, transport, and trapping in the transient states under voltage pulse application as well as in steady-state. New observations were used to develop models based on physics of dielectric materials. Results have been published in tens of peer-reviewed journal papers and few book chapters (Wiley, Springer, ...) that helped to establish the understanding of organic semiconductors as dielectrics.

9 Zusammenfassung

Die für diese Arbeit ausgewählte Sammlung von Forschungsarbeiten bezieht sich auf die Untersuchung der Ladungsinjektion und des Transports in organischen Geräten sowie ausgewählter Fertigungstechnologien. Diese Arbeiten stellen neue experimentelle Methoden zur Gerätecharakterisierung, modifizierte Modelle für Geräteanalysen oder verbesserte Technologieprozesse vor.

Die ersten vier Zeitschriftenpapiere gehören zum Studium des transienten und stationären Ladungstransports im organischen Feldeffekttransistor. Die auf einem nichtlinearen optischen Phänomen basierende elektrische Feldempfindliche Mikroskopie wird entwickelt und zur direkten Beobachtung der elektrischen Feldmigration über den Kanalbereich verwendet. Diese Beobachtungen motivierten uns, Modelle auf der Grundlage der Physik von dielektrischen Materialien als allgemeineren Ansatz für organische Halbleiter zu entwickeln. Die Idee der dielektrischen Materialien wurde auf verschiedene Modelle des Ladungsverhaltens in organischen Elektronikgeräten in transienten Zuständen sowie im stationären Zustand erweitert. Offensichtlich war bei der Untersuchung von organischen Halbleitern die Physik der dielektrischen Materialien immer ein Ursprung aller Annahmen und beobachtete Verhaltensweisen wurden ohne Halbleiterphysik erklärt. Infolgedessen unterstützt meine Arbeit eine Idee, dass "organische Halbleiter" keine Halbleiter sind, wie sie für anorganische verwendet werden. Auf der anderen Seite kann das gesamte halbleiterähnliche Verhalten durch allgemeinere Vorgehensweise für dielektrische Materialien erklärt werden.

Die zweite Liste der Zeitschriftenpapiere enthält zwei Papiere, die sich auf den Kontaktwiderstand konzentrieren. Da der Kontaktwiderstand eine der

bedeutenden Engpässe der organischen Transistoren ist, ist es notwendig, für seine Charakterisierung und anschließende Reduktion geeignete Werkzeuge zu haben. Die Forschung wurde oft nur auf die Materialwissenschaft konzentriert, auf der Suche nach geeigneten Materialien, die einen geringen Kontaktwiderstand im stationären Zustand von organischen Transistoren bieten. Allerdings ist der Kontaktwiderstand in organischen Transistoren nicht nur ein konstanter Materialparameter, sondern hängt auch von der angelegten Spannung, der Gerätegeometrie usw. ab. Das Verständnis des Kontaktwiderstands wird den organischen Transistor für den Wettbewerb mit anorganischen qualifizieren und seine vorteilhafte Umsetzung in industrielle Anwendungen beschleunigen mit der Bewältigung der Herausforderungen einer alternden Gesellschaft oder des Umweltschutzes. Das Papier, das für diesen Teil meiner Arbeit ausgewählt wurde, beschreibt den Einfluss der Einspritzbarriere als Ursprung des Kontaktwiderstandes auf die Ladungsinjektion und den Transport in organischen Transistoren. Es wurde gezeigt, dass der Transport konserviert ist, obwohl die effektive Ladungstransportbeweglichkeit aufgrund des möglichen Abfalls an der Injektionselektrode reduziert wird. Daher weist dieser Teil der präsentierten Arbeit darauf hin, dass die Darstellung durch potentielle Tropfen eher geeignet ist als Kontaktwiderstand.

Die letzten vier Zeitschriften gehören zum Studium neuer Materialien und neuartiger Technologien. Überlegene Materialien und hoch entwickelte Technologie sind immer ein wichtiges Thema für die Geräteherstellung und treibende Kraft für angewandte Forschung. In der Vergangenheit habe ich an der Untersuchung und Charakterisierung neuer Materialien teilgenommen, die von Kollegen - Chemiker synthetisiert wurden; Diese Arbeiten wurden jedoch nicht für diese These ausgewählt, da mein Beitrag nicht die Neuheit bringt. Auf der anderen Seite verbesserte meine Arbeit die Fertigungstechnologien und die

Anwendung neuer Materialien durch ein tieferes Verständnis der zugrunde liegenden Physik. Im Gegensatz zu den in den ersten beiden Wahlen aufgeführten Gerätecharakterisierungsbaserten veranschaulicht das in dieser Liste ausgewählte Zeitungspapier die Entwicklung neuer Technologien und das unerwartete Verhalten neuer Materialien. Präzise durchgeführte Experimente und Dünnschichtfabriken führten nicht nur zur wissenschaftlichen Publikation, sondern auch zur Entwicklung neuer Inhouse-Technologien, die im weltweiten Bereich einzigartig sind.

Abschließend konzentrierte sich meine Arbeit auf dem Gebiet der organischen Elektronik vor allem auf das Verständnis des Ladungsverhaltens in organischen Elektronikgeräten. Im Einzelnen konzentrierte sich die Forschung auf die Ladungsinjektion, den Transport und das Fallen in den transienten Zuständen unter Spannungsimpulsanwendung sowie im stationären Zustand. Neue Beobachtungen wurden verwendet, um Modelle auf der Grundlage von Physik von dielektrischen Materialien zu entwickeln. Die Ergebnisse wurden in zehn zentimENSIONierten Zeitschriftenpapieren und wenigen Buchkapiteln (Wiley, Springer, ...) veröffentlicht, die dazu beigetragen haben, das Verständnis von organischen Halbleitern als Dielektrika zu etablieren.

10 Zoznam použitej literatúry

- [1] F. Ebisawa, T. Kurokawa, S. Nara. *J. Appl. Phys.* **54**, 3255 (1983).
- [2] A. Tsumura, H. Koezuka, a T. Ando. *Appl. Phys. Lett.* **49**, 1210 (1986).
- [3] C. W. Tang. *Appl. Phys. Lett.* **48**, 183 (1986).
- [4] C. W. Tang a S. A. VanSlyke. *Appl. Phys. Lett.* **51**, 913 (1987).
- [5] K. Y. Jen, G. G. Miller, a R. L. Elsenbaumer. *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **17**, 1346 (1986).
- [6] G. Horowitz, *Adv. Mat.* **10**, 365 (1998).
- [7] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, a E. D. Dunlop, *Prog. Photovoltaics.* **21**, 827 (2013).
- [8] G. Horowitz, “Organic transistors”, in: *Organic Electronics, Materials, Manufacturing and Applications*, editor H. Klauk (Wiley VCH, Weinheim, 2006), s. 3.
- [9] M. Weis, “Organic field-effect transistors”, in: *Encyclopedia of Physical Organic Chemistry*, editor Z. Wang (John Wiley & Sons, 2017), s. 3565.
- [10] L. Bürgi, H. Sirringhaus, R. H. Friend, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 2913 (2002).
- [11] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2. vydanie (Wiley, New York, 1981), str. 438.
- [12] Y. Mashiko, D. Taguchi, M. Weis, T. Manaka, M. Iwamoto, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 243302 (2012).
- [13] W. Shockley, “Research and investigation of inverse epitaxial UHF power transistors,” *Report No. AI-TOR-64-207*, September 1964.
- [14] C. F. Pulvari, *J. Appl. Phys.* **22**, 1039 (1951).
- [15] M. Weis, J. Uhrík, J. Jakabovič, A. Kuzma, M. Donoval, P. Juhász, S. Kováčová, M. Daříček, P. Telek, L. Sládek, D. Donoval, “Technology for preparation of stable film of calcium”, Patent č. 288433, vydaný dňa 29. 9. 2016.

