

# **Příprava a charakterizace nanokompozitních tenkých vrstev s využitím v organické elektronice**

Bc. Jakub Ševčík

---

Diplomová práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Ševčík**  
Osobní číslo: **T13386**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Inženýrství polymerů**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Příprava a charakterizace nanokompozitních tenkých vrstev s využitím v organické elektronice**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše – polymerní elektronika.
2. Výběr materiálů vhodných pro polymerní elektroniku.
3. Příprava tenkých vrstev z vybraných materiálů a jejich charakterizace.
4. Příprava polymerních světlo emitujících zařízení.
5. Charakterizace připravených zařízení.
6. Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.
7. Formulace závěru.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Edited by Hartmut Yersin: **Highly Efficient OLEDs with Phosphorescent Materials**. ISBN 978-3-527-40594-7.

2. Edited by Christof Wöll: **Physical and Chemical Aspects of Organic Electronics**. ISBN 978-3-527-40810-8.

3. Edited by Kafafi Zakya: **Organic Luminescence**. ISBN 0-8247-0.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Pavel Urbánek**

Centrum polymerních materiálů

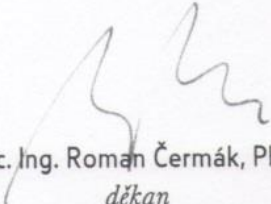
Datum zadání diplomové práce:

**16. ledna 2015**

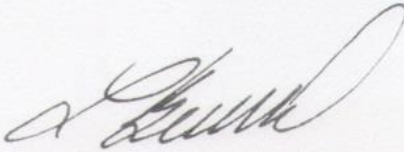
Termín odevzdání diplomové práce:

**25. května 2015**

Ve Zlíně dne 2. března 2015

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



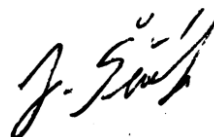
  
Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 15. 5. 2015



.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce pojednává o polymer/anorganických nanokompozitech aplikovatelných v tenkých vrstvách s využitím v organické elektronice. Byla provedena studie modifikace aktivní vrstvy OLED zařízení. Modifikace byla provedena prostřednictvím inkorporace nanočásticového plniva anebo vytvořením „host-guest“ systému v polymerních směsích. Byl zkoumán vliv modifikace na výsledné optoelektronické vlastnosti a stabilitu OLED zařízení, která byla z těchto materiálů připravena a charakterizována. Byla provedena diskuze a interpretace výsledků s ohledem na mikrofyzikální podstatu provedených modifikací.

Klíčová slova: vodivé polymery, blend, nanokompozit, polymerní elektronika, OLED

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with polymer/inorganic nanocomposites applicable in the organic electronic in form of thin films. A study of modification of active layer in the OLED devices was carried out. The modification was realized either via incorporation of inorganic nanoparticles into the active polymer or the second way was preparation of host-guest systems polymer blends. The influence of modification of the active layer on the optical and electrical performance of prepared OLED was investigated. Achieved results were discussed and interpreted within the microphysical framework of performed modifications.

Keywords: Conductive Polymers, Blend, Nanocomposite, Polymer Electronic, OLED

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Urbánkovi Ph.D., jehož zkušenosti a perfekcionistický přístup mi byly při práci vzorem a zdrojem mnohého užitku. Poděkování dále patří mé rodině za podporu a toleranci, kterých se mi během studia v hojné míře dostávalo. A v neposlední řadě bych také rád vyjádřil své díky doc. Ing. Ivu Kuřítkovi, Ph.D. a členům naší výzkumné skupiny za vytvoření příjemného pracovního prostředí.

Tato práce byla podpořena interní grantovou agenturou Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně (granty č. IGA/FT/2014/006 a IGA/CPS/2015/006).

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 VODIVÉ POLYMERY</b> .....	<b>13</b>
1.1 HISTORIE VODIVÝCH POLYMERŮ .....	14
1.2 VYUŽITÍ VODIVÝCH POLYMERŮ .....	15
1.3 MECHANISMUS VODIVOSTI POLYMERŮ .....	16
1.3.1 Solitony, polarony, bipolarony .....	17
1.4 OPTOELEKTRONICKÉ VLASTNOSTI .....	18
1.5 TENKÉ VRSTVY A JEJICH DEPOZICE .....	19
1.5.1 Spin coating .....	19
1.5.2 Drop-cast (volné kapání) .....	20
1.5.3 Dip coating (máčení) .....	21
1.5.4 Katodové naprašování .....	22
1.5.5 Ink-jetový tisk .....	22
1.5.5.1 Kontinuální tisk .....	23
1.5.5.2 Tisk „Drop on demand“ (DOD) .....	23
1.6 OLED .....	24
1.6.1 Složení OLED .....	25
1.6.2 Princip OLED .....	25
1.6.3 Účinnost OLED .....	26
1.6.4 Technologie OLED zařízení .....	27
1.6.4.1 Passive-matrix OLED .....	27
1.6.4.2 Active-matrix OLED .....	28
1.6.5 Konstrukční design OLED .....	28
1.6.5.1 Transparentní OLED .....	29
1.6.5.2 Top-emitting OLED .....	29
1.6.5.3 Foldable OLED .....	30
1.6.5.4 White OLED .....	30
1.6.6 Výhody a nevýhody .....	31
<b>2 MATERIÁLY PRO NANOKOMPOZITY VYUŽITELNÉ V ELEKTRONICE</b> .....	<b>33</b>
2.1 MEH-PPV .....	33
2.1.1 Příprava PPV a MEH-PPV .....	33
2.2 F8BT .....	34
2.3 PEDOT:PS .....	34
2.4 ZNO (NP) .....	35
2.5 ITO .....	35
<b>3 CÍL PRÁCE</b> .....	<b>36</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>37</b>



<b>4</b>	<b>POPIS EXPERIMENTU .....</b>	<b>38</b>
4.1	POUŽITÉ CHEMIKÁLIE A PŘÍSLUŠENSTVÍ .....	38
4.2	OLED NA BÁZI MEH-PPV, MEH-PPV/ZNO .....	39
4.2.1	Příprava roztoku MEH-PPV + ZnO (NP) .....	39
4.2.2	Příprava OLED zařízení .....	40
4.3	OLED NA BÁZI MEH-PPV/F8BT, MEH-PPV/F8BT/ZNO.....	42
4.3.1	Příprava polymerních roztoků.....	42
4.3.2	Depozice tenkých vrstev .....	43
4.4	CHARAKTERIZACE OLED .....	44
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....</b>	<b>45</b>
5.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ OLED NA BÁZI MEH-PPV, MEH-PPV/ZNO .....	45
5.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ OLED NA BÁZI MEH-PPV/F8BT, MEH-PPV/F8BT/12,5 HM% ZNO .....	50
(1)	MEH-PPV/F8BT .....	53
(2)	MEH-PPV/F8BT + 12,5 HM% ZNO.....	55
<b>6</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>57</b>
6.1	MEH-PPV/ZNO.....	57
6.1.1	Vliv inkorporace nanočástic na intenzitu a stabilitu elektroluminiscence.....	57
6.2	MEH-PPV/12,5 HM. % ZNO.....	59
6.2.1	Vliv tloušťky emisní vrstvy na intenzitu elektroluminiscence její pokles v čase.....	59
6.2.2	Vliv tloušťky emisní vrstvy na otevírací napětí OLED zařízení.....	60
6.3	MEH-PPV/F8BT .....	61
6.3.1	Vliv použitého materiálu v aktivní vrstvě (blend MEH-PPV/F8BT) na výkon OLED zařízení.....	61
6.4	MEH-PPV/F8BT/12,5 HM% ZNO .....	62
6.4.1	Vliv inkorporace nanočástic do fyzikálního blendu MEH-PPV/F8BT.....	62
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM ROVNIC .....</b>	<b>80</b>

## ÚVOD

V průběhu let se technologický pokrok lidstva neustále urychluje téměř ve všech odvětvích. Zdárným příkladem tohoto raketového progresu je oblast osvětlovací techniky. Po dlouhá tisíciletí lidské existence bylo osvětlení založeno na jediném zdroji – ohni. Teprve od konce 19. století se světelné zdroje stávali sofistikovanějšími.

Obecně lze osvětlení rozdělit do šesti vývojových stupňů.

Prvním uměle vytvořeným zdrojem světla byl již zmiňovaný oheň. Tato prehistorická „technologie“ byla nedílnou součástí životů našich předků po dlouhá tisíciletí. Během vzestupu zemědělské civilizace začaly být ohněm zapalovány i svíčky a lucerny, což bylo mnohem hospodárnější.

K dalšímu významnému pokroku v oblasti světelné technologie došlo za Viktoriánské éry - k Edisonovu vynálezu elektrické žárovky. Tehdy nevídaný objev, dnes standard a samozřejmost. Tato technologie s sebou však nese značná omezení – kvůli wolframovému vláknku jsou křehké skleněné žárovky nevhodné, vytvářejí totiž více tepla než samotného světla. Nicméně i navzdory tomu jsou využívány po celém světě.

Zmínka o zářivkovém osvětlení se poprvé objevila ve 30. letech 20. století. Toto lineární zařízení vyniká, na rozdíl od elektrických žárovek, mnohem delší životností – žárovky dosahují životnosti v průměru 1000 hodin, kdežto u zářivek je to až 20 000 hodin. Avšak i zářivky mají svá úskalí, která limitují jejich potenciální využití. Nejen, že se jejich záření příliš intenzivní a může škodit zraku, ale také obsahují rtuť a další toxické kovy.

Standardem 21. století a zároveň prvním „moderním“ osvětlením využívající bodové světelné zdroje jsou světlo-emitující diodová světla (LED). Vyzařování světla je u tohoto typu zařízení umožňováno díky „tečení“ proudu mezi dvěma různými polovodičovými materiály. V porovnání se zářivkami a žárovkami vynikají převážně v energetické úspoře a dominantní je také možnost vytvořit plošná LED zařízení, což predikuje uplatnění v kreativnějších aplikacích.

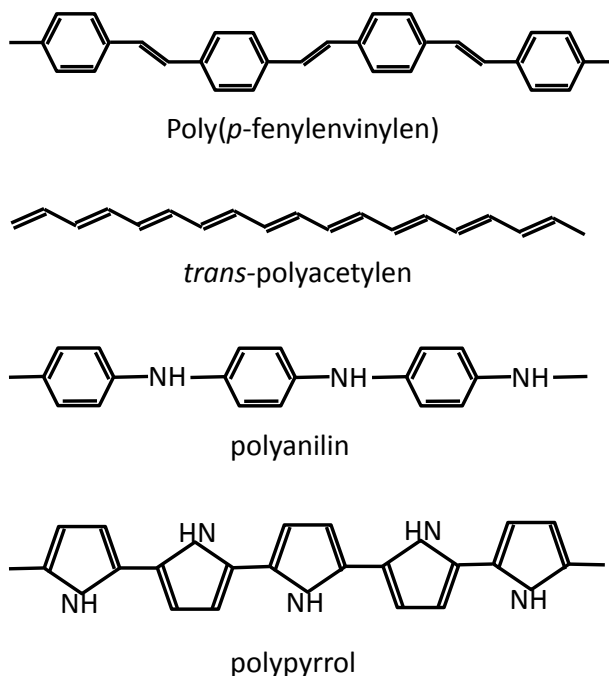
V dnešní době existují také OLED osvětlení - světově první zařízení s plošným zdrojem záření poskytující vysokou celistvost povrchu. Na rozdíl od LED jsou vrstvy OLED tvořeny pouze z organických materiálů. Světlo je vytvářeno jako reakce aktivní vrstvy OLED na protékající elektrický proud. OLED disponují životností až 40 000 hodin při maximální

hodnotě jasu až 3 000 cd/m<sup>2</sup> (LG Chem Company). Protože nevyžadují externí chlazení, které tvoří nedílnou součást LED světelných panelů, jsou OLED energeticky ještě úspornější. A navíc díky flexibilitě, je možno vytvořit mnohem sofistikovanější design celého zařízení [1], [2].

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 VODIVÉ POLYMERY

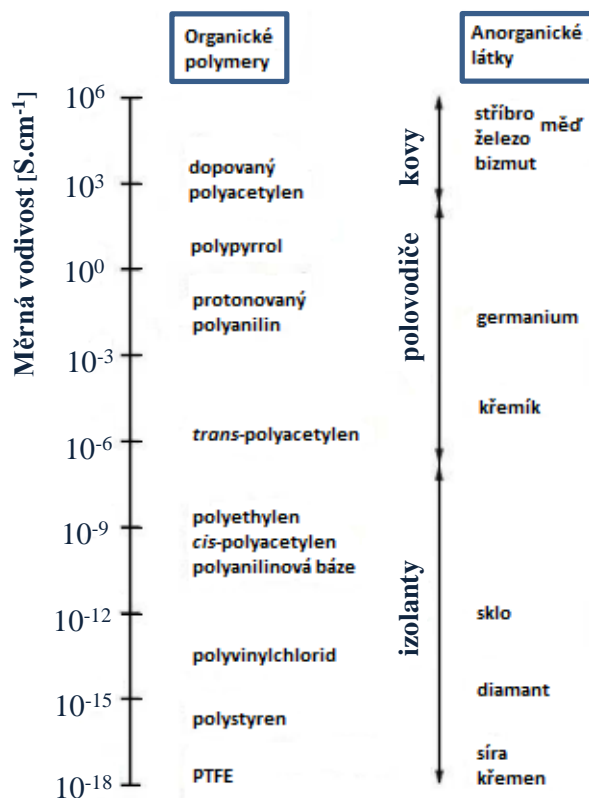
Mnoho polymerů je složeno převážně z uhlíkových atomů a ze své podstaty jsou řazeny mezi izolující materiály. Existuje však skupina materiálů, které svými vlastnostmi připomínají anorganické polovodiče. Takovým materiálům říkáme vodivé polymery [3], [4]. Ona vodivost je způsobena specifickou molekulární strukturou, ve které je přenos náboje umožněn. Buď to polymerní řetězec obsahuje konjugovaný systém vícenásobných vazeb ( $\pi$  – konjugované polymery; např. PANi, PPV), nebo  $\sigma$  konjugovaný systém, kdy  $\sigma$  vazebné elektrony jsou delokalizovány podél řetězce díky interakcím mezi jednotlivými atomy (např. polysilany, polygermanium) [4], [5]. Důležitou podmínkou pro to, aby konjugované polymery byly vodivé, je přítomnost nositelů náboje. Bez jejich přítomnosti by nebyl umožněn transport náboje po polymerním řetězci. Jejich existenci můžeme stejně jako u anorganických polovodičů zajistit dopováním, čili zavedením funkčních skupin nebo atomů s povahou donoru či akceptoru náboje [6]. Rozdílem je však množství dopované látky. Zatímco u anorganických polovodičů postačuje pouze stopové množství, u organických polovodičů, tedy konjugovaných polymerů, je zapotřebí o řád vyšších koncentrací. Jedná se o jednotky až desítky procent [7], [8].



Obrázek 1 – Významní zástupci vodivých polymerů, překresleno podle [9]

## 1.1 Historie vodivých polymerů

Je to již více než třicet let, co jsou intenzivně studovány materiály se zpracovatelskými vlastnostmi polymerů a při tom elektrickými vlastnostmi charakteristickými pro klasické polovodiče či kovy. Za rozvoj a objev těchto do té doby neznámých materiálů, jež označujeme jako vodivé polymery, byla udělena Nobelova cena za chemii pro rok 2000 A. J. Heegerovi, A. C. MacDiarmidovi a H. Shirakawovi [9], [10], kteří se v roce 1977 zasloužili o objev možnosti vytvoření nosičů náboje v *trans*-polyacetylenu halogenací (dopováním) parami jódu. Prostřednictvím dopování se zvýšila měrná vodivost *trans*-polyacetylenu až o několik řádů, (viz Obrázek č. 2). To znamená z řádu  $10^{-6} \text{ S.cm}^{-1}$  na cca  $38 \text{ S.cm}^{-1}$ . Takto dopované organické materiály se elektrickými vlastnostmi vyrovnaly anorganickým polovodičům [11], [12]. Není tedy divu, že začátkem osmdesátých let vzbudil objev vodivých polymerů velký zájem o tyto materiály. Zanedlouho na to byl tento zájem ještě podpořen demonstrací elektroluminiscenční organické multi-vrstevnaté struktury připravené společností Eastman Kodak.

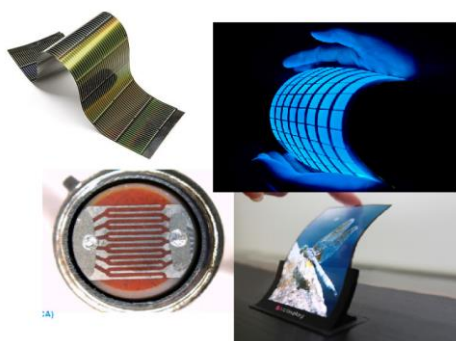


Obrázek 2 – Měrná elektrická vodivost vybraných zástupců, překresleno podle [11]

Následně se začíná výzkum a vývoj ubírat jiným směrem. Z důvodu nestability se upouští od modifikací aktuálních vodivých polymerů, kam patří již zmiňovaný *trans*-polyacetylen a nastává přechod k jiným, velice progresivním zástupcům, jako jsou polyanilín, polypyrol, či polythiofen. První objev na sebe nenechává dlouho čekat a objevuje se polem řízený transistor FET (z angl. Field effect transistor) z polythiofenu a konjugovaných oligomerů. O další příspěvek se postaral výzkumný tým z University v Cambridgi, který objevil elektroluminiscenci (EL) diod z konjugovaného polymeru (PPV) poly(para-fenylen vinylen) [13]. S přírůstkem nově objevených materiálů se ruku v ruce rozvíjí i aplikační potenciál vodivých polymerů. Přemýšlelo se o kompletní náhradě kovů vodivými polymery, avšak později se ukázalo, že tyto představy nejsou zcela reálné. Tuto ideu střídá jiná, mnohem realističtější. V podstatě šlo o to, že by mohly vodivé polymery v pestré škále aplikací doplňovat polovodivé materiály využívané v elektronice. V elektronice totiž není vysoká vodivost materiálů vždy vyžadována. Vzniká tedy tzv. plastová elektronika, která však nemá ambice zastoupit klasickou polovodičovou elektroniku. Díky svým vlastnostem je možno jí využít tam, kde jsou klasické anorganické polovodiče nedostačující, hlavně prostřednictvím možnosti měnit svou strukturu a tím i své vlastnosti v reakci na okolní dění [14].

## 1.2 Využití vodivých polymerů

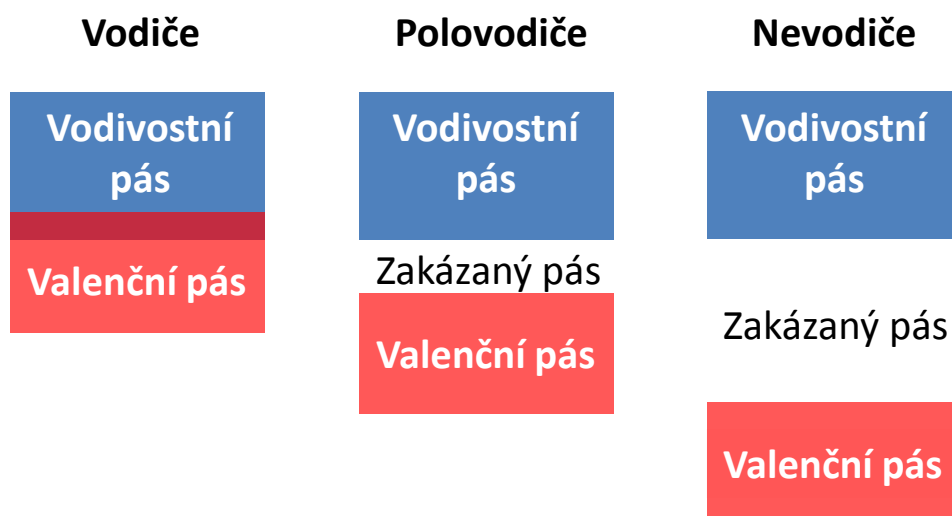
S objevem materiálů, jejichž mechanické a hlavně elektrické vlastnosti je možno do jisté míry ovlivňovat, přichází také nové možnosti jejich uplatnění. Mezi hlavní odvětví patří elektronika, optoelektronika, fotovoltaika. Finální produkty pak mohou mít podobu spínačů, organických tranzistorů, OLED diod (organické LED diody), solárních článků a mnoho dalších zařízení [15]-[17].



Obrázek 3 – Aplikační využití vodivých polymerů

### 1.3 Mechanismus vodivosti polymerů

Pro popis vodivosti kovů a anorganických polovodičů se nejčastěji používá pásová teorie. Jednotlivé atomy a tedy i elektrony nejsou v rámci daného materiálu rovnocenné, jak z hlediska polohy v materiálu, tak z hlediska vzájemné interakce mezi atomy. Pokud máme v krystalové mřížce mnoho atomů, pak dochází k překryvu orbitalů, a tím vznikají souvislé kontinuální pásy energií. Tyto pásy se dělí na valenční, zakázaný a vodivostní [18]. Elektrony, jež se nachází ve valenčním pásu, mohou přecházet do pásu vodivostního, pokud překonají energetickou bariéru, odpovídající šířce zakázaného pásu. Ta charakterizuje povahu daného materiálu z hlediska elektrické vodivosti. U kovů je tato energie rovna nule, pro polovodiče je menší než 3 eV a u nevodičů je zakázaný pás nejširší, zpravidla energie potřebná pro překonání zakázaného pásu je větší než 5 eV [18], [19]. Obecně můžeme říci, že polovodiče jsou látky, které na rozdíl od vodičů obsahují mnohem menší množství nosičů náboje. U anorganických polovodičů vznikají kovalentní krystaly, na kterých se podílí elektronová struktura jejich atomů či molekul. Za předpokladu, že je materiál složen pouze z jednoho typu atomů (molekul), nejsou v systému přítomny žádné volné nosiče náboje, jelikož všechny valenční elektrony vazebně interagují. Za těchto podmínek jde o materiál nevodivý (nevodič). Existuje však možnost, která vede k vytvoření nosičů náboje. Jde o fyzikálně-chemický přístup dopování. Je-li přidána látka povahy donoru, majoritním nosičem jsou záporné elektrony a vzniklý polovodič je typu N. Naopak, dochází-li k dopování prostřednictvím akceptoru, majoritní nosiče náboje jsou kladné díry a produktem je polovodič typu P [20].



Obrázek 4 – Pásový model, překresleno podle [20]



### 1.3.1 Solitony, polarony, bipolarony

Teoretické vysvětlení vodivosti organických polovodičů je poněkud komplikovanější. Základní podstata leží v konjugované struktuře. Na nejjednodušším zástupci (poly-acetylen) lze vysvětlit, že se v konjugovaném systému mohou vyskytovat jisté defekty, které zprostředkovávají přesun částic (elektronů) podél řetězce. K těmto defektům dochází vlivem neuniformity střídání jednoduchým a dvojných vazeb. Na jejich místě pak zůstane jeden izolovaný nepárový elektron, označovaný jako soliton. Tento nepárový elektron je v pásové vodivostní struktuře příčinou tvorby nové energetické hladiny, nacházející se v jinak zakázaném pásu [21]. Neutrální soliton nese náboj 0 a spin  $\frac{1}{2}$ . Přidáním náboje do systému může vzniknout i nabitý soliton. Za těchto okolností bude mít nabitý soliton náboj  $\pm e$  a spin 0. Další skupina konjugovaných polymerů se strukturou na bázi heterocyklů či polyaromatických sloučenin představuje stabilnější systém konjugace. Na řetězcích těchto sloučenin dochází taktéž k delokalizaci a k tvorbě defektů. Ty jsou však typově odlišné a nazývají se polarony a bipolarony.

Pojem polaron pochází z klasických polárních krystalů, ve kterých náboj (elektron), odsune okolní elektrony přitahované jádrem. Způsobí v jeho okolí polarizaci krystalické mřížky. Výskyt náboje mění energetickou strukturu materiálu tak, že snižuje energii stavu elektronu před polarizací. Polarony jsou lokalizované nosiče náboje, které svým pohybem mění elektronickou strukturu polymeru. Tím pádem jsou mnohem méně pohyblivé než klasické nosiče náboje a jejich existence snižuje vodivost materiálu. Bipolaron, neboli polaronový pár vzniká v systémech s nedegenerovanými základními stavy, když na sebe působí dva polarony. Bipolaron má nižší energii než je součet energií obou působících polaronů. Příkladem vzniku může být situace, kdy dojde k injektování elektronu do vodivého pásu. Vznikne geometrická relaxace a dva nové elektronové stavy v jinak zakázaném pásu. Dodaný elektron do systému se může podílet na vzniku záporně nabitého polaronu, naproti tomu odebrání elektronu ze systému umožní vznik pozitivně nabitého polaronu. Když se dva polarony dostanou do těsné blízkosti, sdílením stejného defektu sníží své energie, což vede k silné přitažlivosti. Pokud je přitažlivá interakce dostatečně velká vzniká bipolaron [22].

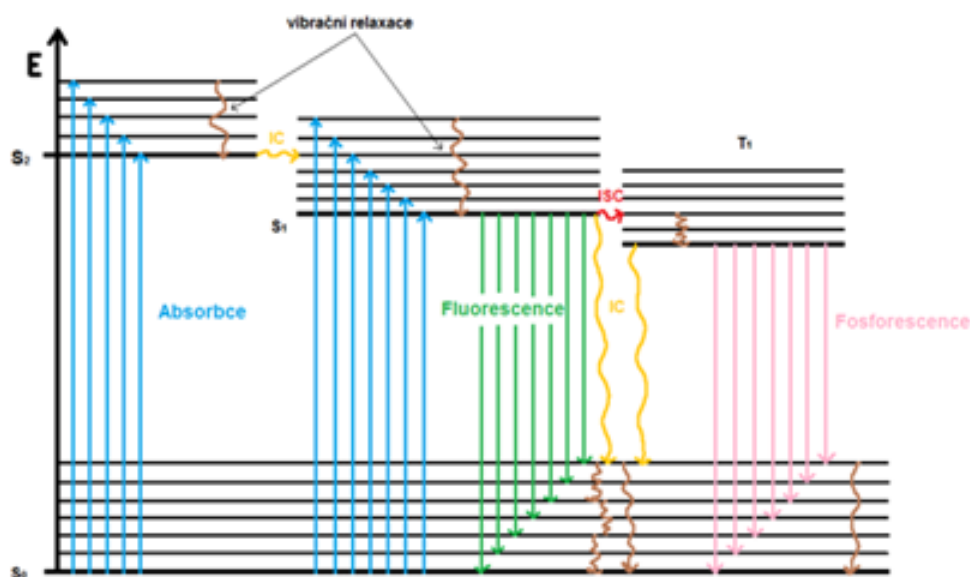
Díky znalosti solitonů, polaronů a bipolaronů je tak z velké části popsán vznik, transfer i rekombinace náboje v konjugovaných polymerech [23]. Nicméně vodivost pomocí těchto nosičů náboje není zcela prostudována a v současnosti se pro popis vodivosti u polymer-

ních polovodičů především uplatňuje teorie transportu pomocí hoppingu, která je platná pro široké teplotní spektrum [24].

## 1.4 Optoelektronické vlastnosti

Optoelektronické vlastnosti vykazují látky, které jsou schopny absorbovat elektromagnetické záření a generovat nosiče náboje elektronovými přechody. Další významnou optoelektronickou vlastností je luminiscence (způsobena např. absorpcí elektromagnetického záření nebo elektrickým nábojem). Pro vysvětlení nejlépe poslouží Jabloňského diagram (viz. Obrázek 5), ze kterého je patrné, že při relaxaci excitovaných elektronů, čili přechodu z excitovaných hladin zpět na základní energetický stav, může docházet k emisi fotonů. Podle způsobu relaxace elektronů pak mohou nastat tyto případy:

1. Dochází-li k relaxaci přes tzv. zakázané stavy (triplety), hovoříme o fosforescenci.
2. Naopak pokud k relaxaci dochází přes povolené stavy (singlety), jedná se o fluorescenci [25].



Obrázek 5 – Jabloňského diagram zobrazující elektronové přechody a jejich relaxace, překresleno podle [25]

## 1.5 Tenké vrstvy a jejich depozice

Při využití polymerních materiálů v optoelektronických aplikacích je kladen důraz na miniaturizaci a snižování nákladů (náhrada drahých kovů, ztenčování vrstev), neboť použitím vhodných typů materiálů je to možné. Dále pak na velikost povrchu při zachování co nejmenší tloušťky. Tenké vrstvy musí splňovat řadu požadavků s ohledem na jejich využití. Mezi ty majoritní patří: dobrá adheze na substrát, uniformita tloušťky v celé ploše, nízká nasákavost, odolnost vůči delaminaci [26], [26].

Kladené požadavky na kvalitu filmu je možno zabezpečit a) vhodnou volbou techniky nanášení a b) precizností přípravné fáze.

Ad a) Existuje celá řada jednoduchým i sofistikovaných metod pro tvorbu tenkých vrstev. Ne všechny však lze aplikovat na polymerní materiály. Mezi ty nezákladnější patří např.: spin coating (rotační nanášení), dip coating (máčení), spray coating, drop casting (volné kapání), katodové naprašování, PVD (depozice z plynné fáze), ink-jetový tisk.

Ad b) Přípravnou fázi můžeme rozdělit na dvě části. Přípravu substrátu a přípravu deponičního roztoku.

Příprava substrátu zahrnuje rozmanité čisticí postupy. Je potřeba odstranit běžně se vyskytující kontaminanty, jako jsou prachové částice, mastnota, otisky prstů, vlasy, vlákna z papírových produktů, ale také aplikačně specifické kontaminanty typu iontů, solí nebo částice kovů. Tyto kontaminanty mohou mít za následek špatnou adhezi filmu na substrát a proto je nutné je eliminovat. Po vyčištění je nutno substrát vhodně vysušit [28].

Vliv na anatomii výsledné vrstvy má také deponiční roztok, respektive jeho koncentrace (viskozita).

Následující kapitola obsahuje některé z technik nanášení tenkých vrstev.

### 1.5.1 Spin coating

Spin coating (rotační nanášení) je levná, velice rychlá a dobře reprodukovatelná technika nanášení tenkých homogenních vrstev z roztoku. Ve velké míře nachází uplatnění v mikroelektronice např. při výrobě fotorezistů [29].

Průběh celé metody může být rozdělen do několika kroků. Nejprve je substrát umístěn na těsnící kroužek rotoru a imobilizován pomocí vakuové vývěvy. V další fázi dochází

k akceleraci rotoru na požadovanou rychlost rotace, během níž je polymerní roztok na daný substrát nakapáván a formován vlivem odstředivých sil od středu ke krajům. Část rozpouštědla je přímo odstraněna, zbytek pak zahřátím nad  $T_v$ . Jednotlivé kroky jsou znázorněny na (Obrázku č. 6)

Tloušťka výsledné vrstvy může být predikována dle následujícího modelu:

$$\delta = Kc \cdot \left( \frac{\nu}{\omega^2 + R^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$\delta$  – tloušťka vrstvy

$c$  – koncentrace roztoku

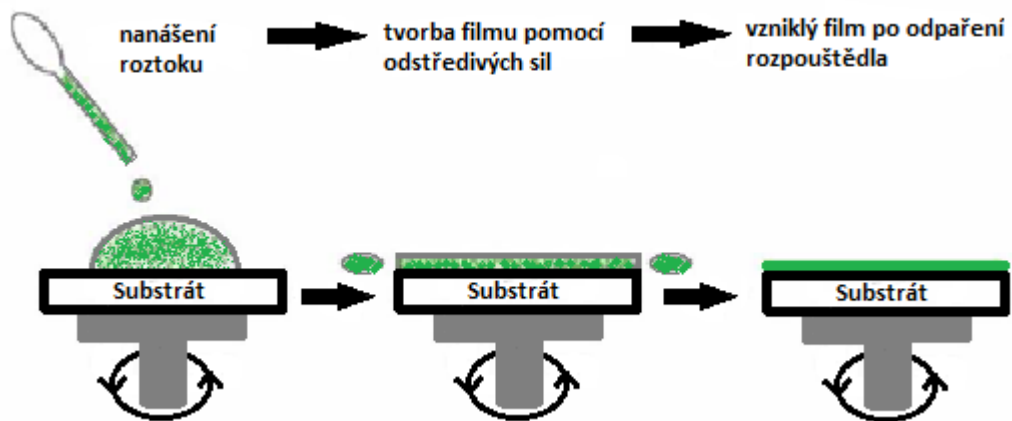
$\nu$  – kinematická viskozita roztoku

$\omega$  – otáčky

$R$  – poloměr substrátu

$K$  – konstanta  $(81Q/16\pi)^{1/3}$

$Q$  – objemový tok kapaliny po substrátu

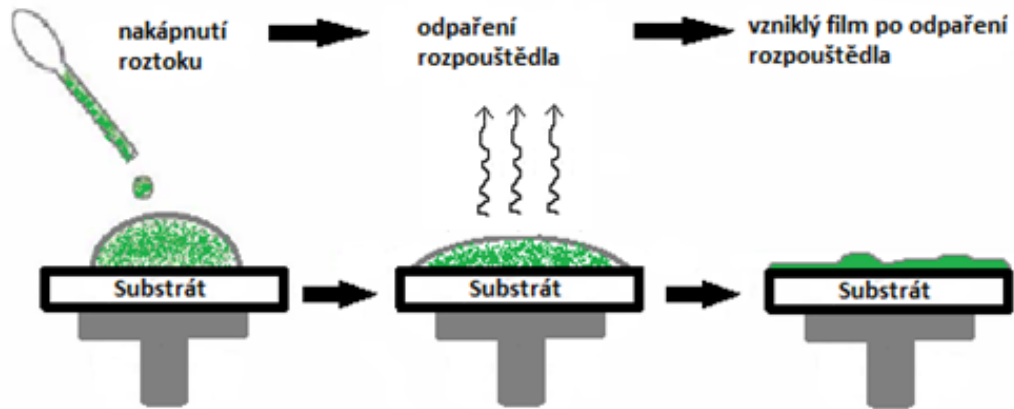


Obrázek 6 – Schéma procesu spin coating, překresleno podle [30]

### 1.5.2 Drop-cast (volné kapání)

Jedna z nejjednodušších metod nanášení tenkých vrstev, používána převážně pro experimentální popis polymerního materiálu. Drop casting spočívá v nakápnutí roztoku na substrát a jeho spontánnímu odpaření, přičemž tloušťka výsledné vrstvy je funkcí koncentrace roztoku.

Mezi výhody této techniky patří technologická jednoduchost a absence materiálových ztrát. Naopak problémem může být různorodost velikosti pokryté plochy, kontrola tloušťky či špatná uniformita vrstvy [31]. Jednotlivé kroky jsou znázorněny na (Obrázku č. 7).



Obrázek 7 – Schéma procesu drop casting, překresleno podle [32]

### 1.5.3 Dip coating (máčení)

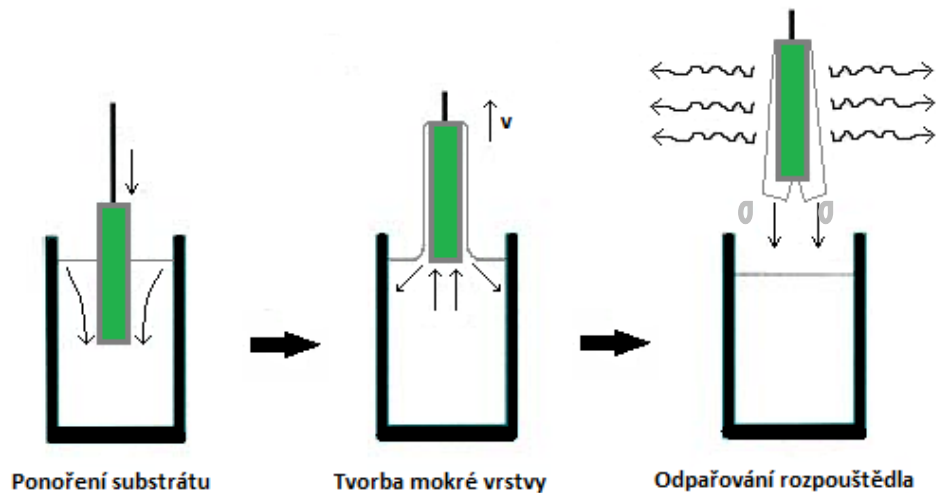
Dip coating je další nízko-nákladovou depoziční technikou.

Princip spočívá v ponoření substrátu do lázně a jeho vytahování kontrolovanou rychlostí. Tloušťka výsledné vrstvy  $H$  se určí z bilance sil na rozhraní kapalina-substrát dle Landau a Levichovy rovnice [33]:

$$H = \frac{0,94 \cdot (\eta \cdot v)^{2/3}}{\sigma^{1/6} (\rho \cdot g)^{1/2}} \quad (2)$$

- $\eta$  – viskozita kapaliny
- $\rho$  – hustota kapaliny
- $v$  – rychlost vytahování substrátu
- $g$  – gravitační zrychlení
- $\sigma$  – povrchové napětí (kapalina-voda)

Jednotlivé kroky metody dip coating jsou znázorněny na (Obrázku č. 8).



Obrázek 8 – Schéma procesu dip coating, překresleno podle [34]

#### 1.5.4 Katodové naprašování

Při katodovém naprašování je terč z vodivého materiálu umístěn ve vakuové komoře a je přiveden na vysoký záporný potenciál (řádově tisíce voltů). Do komory se přes jehlový ventil připoustí pracovní plyn (obvykle argon) a tlak se udržuje na hodnotě jednotek pascalů. Před terčem se zapálí doutnavý výboj, přičemž kladné ionty bombardují záporný terč (katoda) a záporné elektrony dopadají na uzemněnou kostru komory. Těžké ionty svým dopadem rozprašují terč a rozprašené atomy se usazují na vnitřních površích. Substráty se umísťují před terč, tenká vrstva tedy vzniká především na nich. Pro zajištění lepší homogeneity vrstvy se mohou substráty pohybovat, např. rotovat [35].

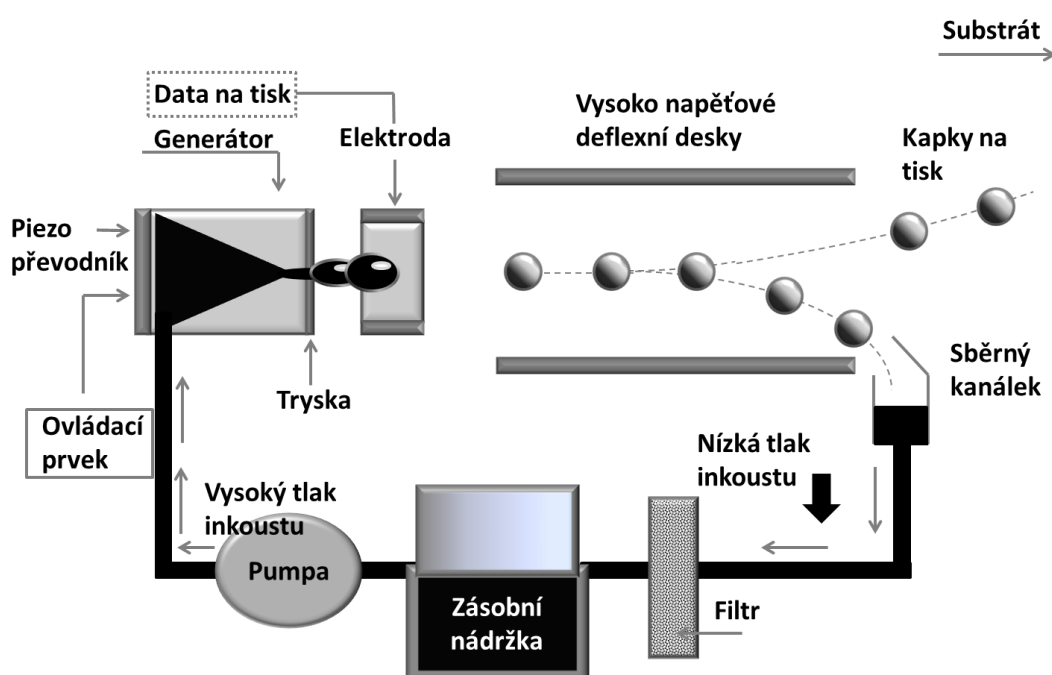
#### 1.5.5 Ink-jetový tisk

Inkjetový tisk (inkoustový tisk) je technikou, balancující na pomezí dvou kategorií. V podstatě je to povlaková (coatingová) technika, kterou ale můžeme, díky možnosti reprodukce komplexního vzoru a vztahu ke kancelářskému tisku, zařadit do technik tisku [36]. Ink-jetový tisk patří mezi nejvíce studované metody pro přípravu tištěné elektroniky.

Inkjet tiskárny jsou bezkontaktní zařízení, generující motivy prostřednictvím nasměrování malých kapiček nebo částic v rychlém sledu na povrch substrátu. Celý proces probíhá pod kontrolou počítače. Existují různé možnosti generování a projektování kapiček, avšak pro skutečné výrobní aplikace se využívají pouze následující [37].

### 1.5.5.1 Kontinuální tisk

Kontinuální inkjetový tisk (CIJ) se používá především pro kódování a označování výrobků a obalů. V této technice čerpadlo řídí tekutiny ze zásobní nádržky do jedné nebo více malých trysek, které vypouštějí nepřetržitý proud kapek při vysoké frekvenci, pomocí vibračního piezoelektrického krystalu. Kapky procházejí sadou elektrod, které každé kapce propůjčují náboj. Nabité kapky poté procházejí mezi vysoko napěťovými vychylovacími deskami. Tyto desky využívají elektrostatické pole k selekci kapek, tzn. kapky, které mají být tištěny, a kapky, které se sbírají k opětovnému použití [38].



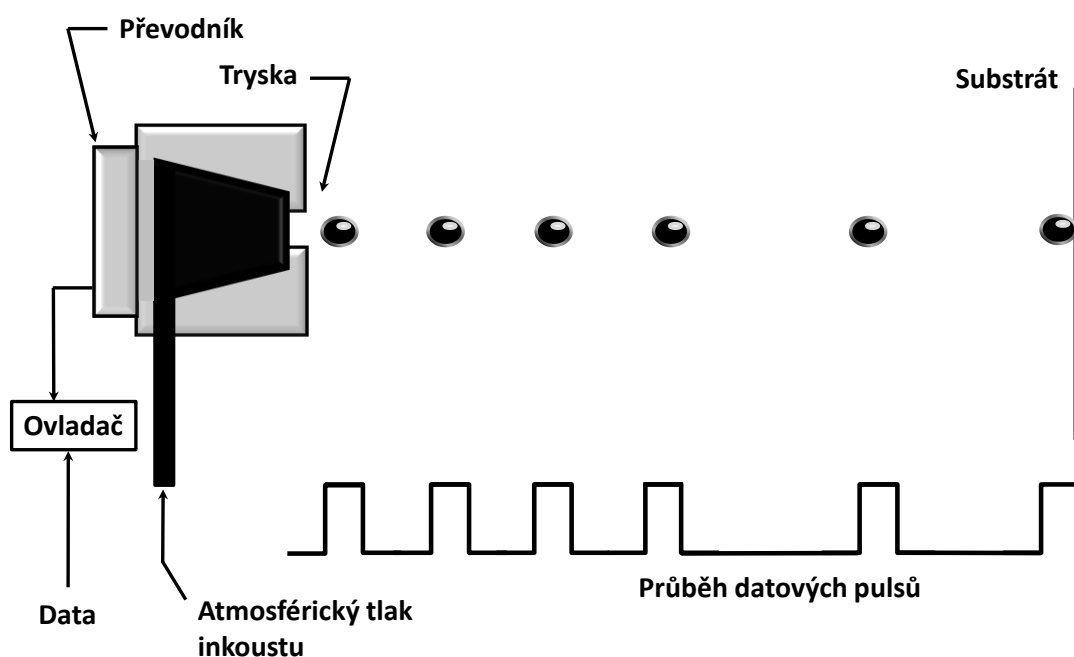
Obrázek 9 – Schéma kontinuální tiskové hlavy, překresleno podle [39]

### 1.5.5.2 Tisk „Drop on demand“ (DOD)

Druhá významná inkjetová technologie se nazývá „drop on demand“ (DOD). DOD tiskové hlavy obsahují obvykle řadu trysek, z nichž každá vystřikuje inkoustové kapky jen v případě potřeby formovat obraz. Obrázek č. 10 schematicky znázorňuje, jak každá tryska pracuje.

Impuls (spouštěč) jakéhokoliv druhu vytváří rychlou změnu v objemu dutiny a dodává na dynamice vystříknuté kapce. Jedná se o dynamický proces, ve kterém šíření vln v inkoustu a geometrie dutiny za tryskou mají významný vliv. I když byly prozkoumány i jiné způsoby spouštění, mezi dva nejčastější patří vytvoření bubliny páry v inkoustu pomocí ohřívací

podložky (bubble jet) nebo deformace piezoelektrického keramického prvku [40]. Vytvoření tiskové kapky předchází formování kontinuálního proudu inkoustu, vystupujícího z trysky. Tento proud pokračuje jako tzv. ocas (ligament), který je ještě stále spojen s inkoustem v trysce. Toto spojení je vlivem toku inkoustu, neustále ztenčováno až do přerušení. Poté je část inkoustu vrácena do trysky a zbytek je připojen k tiskové kapce, popřípadě rozdělen do menších satelitních kapek. Drop on demand technika je v některých ohledech jednodušší než CIJ, protože nevyžaduje externí výběr kapek a rekuperační systém [41].



Obrázek 10 – schéma tiskové hlavy „drop on demand“, překresleno podle [39]

## 1.6 OLED

Představte si televizor s vysokým rozlišením (HD – high definition), který bude 80 cm široký a méně než čtvrt palce tlustý (< cca 0,6 cm). Spotřebuje méně energie než většina na trhu dostupných televizorů a v době neaktivity jej bude možno jednoduše srolovat do ruličky.

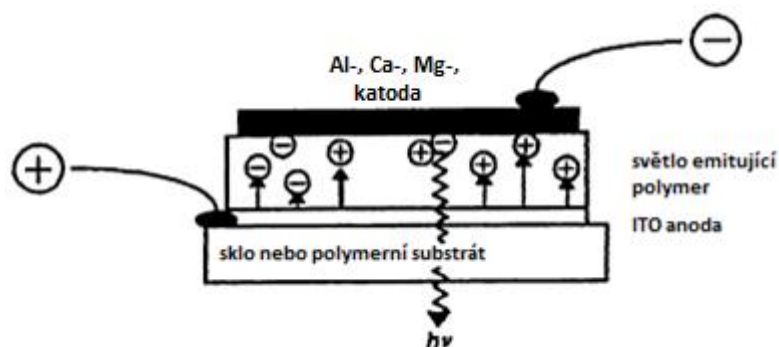
Nebo existence vymožeností typu průhledného (head-up) displeje, jako standartní výbava většiny automobilů, či monitoru vestavěného do vašeho oblečení. Konstrukce těchto zařízení je možná, a to již v blízké budoucnosti za pomoci technologie zvané OLED (organické světlo-emitující diody).



OLED jsou polovodičová zařízení složená z tenkých vrstev organických molekul, které vytvářejí světlo s použitím elektrické energie. OLED mohou poskytovat jasnější, ostřejší obraz elektronických zařízení a úsporu elektrické energie v porovnání s běžnými světelnými diodami (LED) či kapalně krystalickými (LCD) systémy používanými dnes [42], [43].

### 1.6.1 Složení OLED

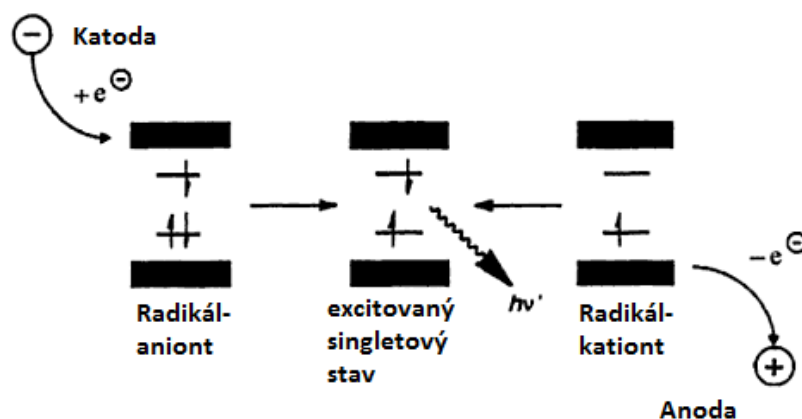
Organická světlo emitující dioda se skládá v podstatě ze čtyř komponent: z transparentního substrátu (např. skla); z elektricky vodivé transparentní vrstvy - anody (např. ITO); z „aktivní“ emisní organické vrstvy a z kovového kontaktu s nízkou výstupní prací - katody (např. Al, Ca, Mg) [44]. Pro znázornění poslouží (Obrázek č. 11).



Obrázek 11 – schématické zobrazení jednovrstvé OLED, překresleno podle [45]

### 1.6.2 Princip OLED

Při svícení takové OLED jsou elektrickým napětím injektovány kationty (tzv. kladně nabitě díry) a anionty (záporně nabitě elektrony) z kontaktů elektrod do světlo-emitující polymerní vrstvy a pod vlivem elektrického pole v elektroluminiscenční polymerní vrstvě se pohybují. Kvůli rekombinaci některých elektronů a děr uvnitř segmentů konjugovaného polymerního řetězce dochází k tvorbě singletových a tripletových stavů. Proces je blíže znázorněn na (Obrázku č. 12) [44].



Obrázek 12 – Schématické zobrazení principu elektroluminiscence v OLED – vazeb, překresleno podle [45]

Světlo je emitováno pouze na základě rozpadu singletového stavu, přičemž barva emitovaného záření závisí na aktivním materiálu, respektive na typu chromoforů v něm obsažených. Rovněž je také možný zánik záření excitovaného stavu, který vede k přeměně elektrické energie v tepelnou, a proto dochází k ohřátí zařízení, což je ovšem nežádoucí jev.

Pro vysokou životnost LED je důležité maximalizovat účinnost a svítivost za minimálního provozního napětí a hustoty elektrického proudu. To znamená optimalizovat strukturu diod a/nebo elektroluminiscenčního polymeru. Za těchto okolností se vyvinou nové kopolymery s přerušenou konjugací stejně jako vícevrstvé světlo emitující diody s doplňkovými vrstvami transportující náboje [44]-[46].

### 1.6.3 Účinnost OLED

Účinnost OLED zařízení je určena poměrem elektrické energie dodané do zařízení a energie vyzářené ve formě fotonu skrz skleněný substrát. Navíc ji můžeme rozdělit na dvě složky: Účinnost vnitřní, odpovídající počtu generovaných fotonů na jeden injektovaný elektron a účinnost optickou, odpovídající procentu vyzářeného světla, které je schopno uniknout ze zařízení přes skleněný substrát. Optická účinnost je silně závislá na indexech lomu emitujícího materiálu a substrátu a na odrazivosti katody. Analytický model pro stanovení optické účinnosti vyjadřuje Shellův zákon. Jeho aplikační potenciál je však omezen na tlustostěnná zařízení (v porovnání s vlnovou délkou světla) a výsledek také zkrsluje skutečnost, že do výpočtu není zahrnuta proměnná charakterizující rozptyl světla [47].

### 1.6.4 Technologie OLED zařízení

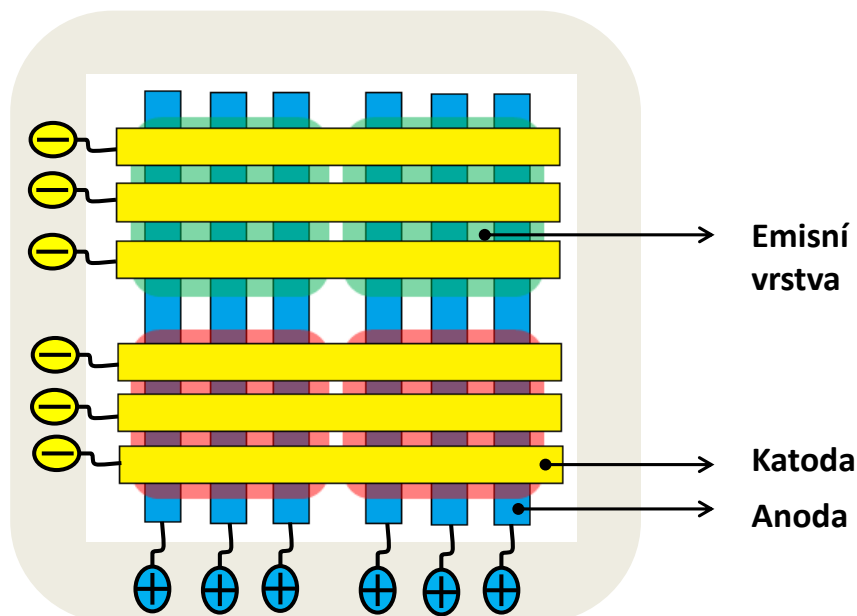
Existují dva základní typy OLED: PMOLED (passive-matrix OLED), AMOLED (active-matrix OLED).

#### 1.6.4.1 Passive-matrix OLED

PMOLED obsahují katodové pásy, organické vrstvy a pásy anody. Anodové pásy jsou uspořádány kolmo ke katodovým pásům. Křižovatky anody s katodou tvoří pixely, tzn. místa emise světla. Vnější obvod aplikuje elektrický proud do zvolených anodových a katodových pásů, což determinuje, který pixel bude zapnutý a naopak. Opět platí, že jas každého pixelu je úměrný množství aplikovaného proudu.

PMOLED jsou technologicky velice jednoduché, avšak spotřebovávají více energie v porovnání s jinými druhy OLED, hlavně kvůli energii potřebné pro externí obvod.

PMOLED jsou neúčinnější pro zobrazení textu a ikon a jsou velice vhodné spíše pro malé obrazovky (2- až 3- palcové). Nachází tedy uplatnění hlavně v menších zařízeních, jako jsou mobilní telefony, PDA (osobní digitální pomocník) a mp3 přehrávače. I s vnějším obvodem PMOLED spotřebovávají méně energie než konkurenční LCD, což je v současné době jejich hlavním potenciálem [48].

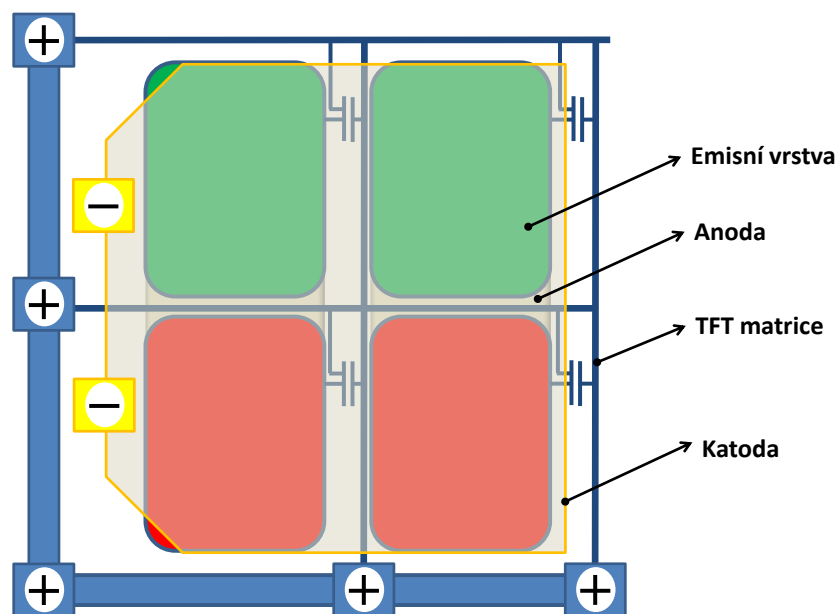


Obrázek 13 – Schéma PMOLED, překresleno podle [49]

### 1.6.4.2 Active-matrix OLED

AMOLED obsahují celistvé vrstvy katody, organických molekul a anody, přičemž anoda pokrývá TFT (tenko-vrstvý transistor) pole, které tvoří matici. TFT pole je pak obvod, který určuje, jaké pixely se mají zapnout na vytvoření obrazu. AMOLED technologie je v porovnání s PMOLED méně energeticky náročná, protože TFT vyžaduje méně energie, než vnější obvod.

Proto jsou AMOLED velice efektivní pro použití ve velkoplošných zařízeních. Jsou také mnohem dynamičtější, díky rychlejší obnovovací frekvenci, čehož se s výhodou využívá u zobrazování videí. Hlavní využití nachází u počítačových monitorů, velkoplošných televizorů, elektronických značek či billboardů [48].



Obrázek 14 – Schéma AMOLED, překresleno podle [49]

### 1.6.5 Konstrukční design OLED

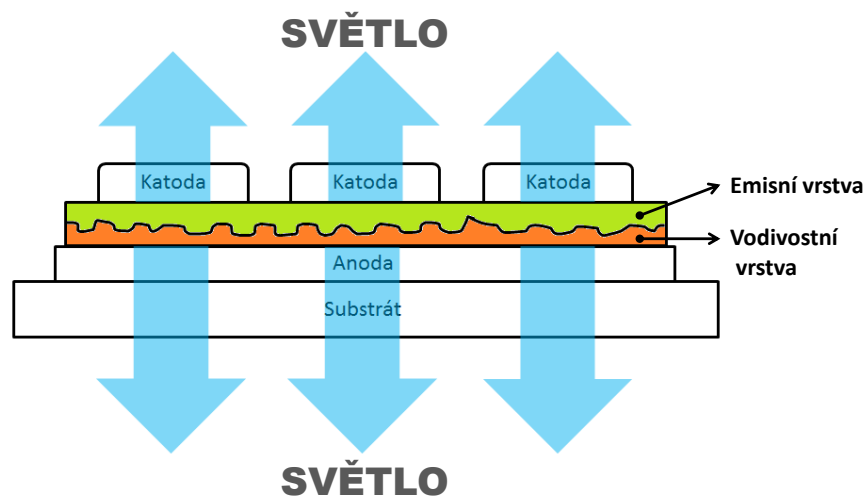
V dnešní době existuje řada designových konstrukcí OLED: TOLED (transparent OLED), TOEOLED (top-emitting OLED), FOLED (foldable „flexible“ OLED), WOLED (white OLED).

Každý typ má různé aplikační využití. V následujících kapitolách bude věnováno pár řádků jednotlivým typům [50].

### 1.6.5.1 Transparentní OLED

TOLED obsahuje pouze transparentní komponenty (substrát, katoda, anoda). Je-li zařízení vypnuté, má více než 85% transparentnost užitého substrátu (je přes ni dobře vidět). Při svícení transparentní OLED dochází k emisi světla oběma směry (viz. Obrázek č. 15).

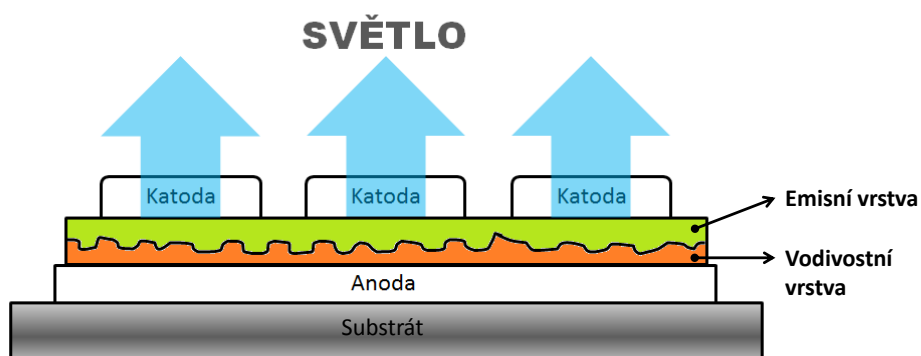
TOLED displej může být jak s aktivní, tak i pasivní maticí a nachází uplatnění jako tzv. „head-up“ displeje [51].



Obrázek 15 – Schéma TOLED, překresleno podle [49]

### 1.6.5.2 Top-emitting OLED

TOEOLED je světlo emitující dioda obsahující neprůhledný, či reflexní substrát. Velice často jsou takto designovány diody s technologií AMOLED [52]. Složení TOEOLED se nachází na (Obrázku č. 16).



Obrázek 16 – Schéma TOEOLED, překresleno podle [49]

### **1.6.5.3 Foldable OLED**

FOLED obsahují substráty vyrobené z velmi pružných kovových fólií či plastů. Flexibilní OLED jsou velmi lehké a odolné.

Velice často se používají v zařízeních, jako jsou mobilní telefony a PDA, za účelem zvýšení odolnosti proti poškození. Je tak možno předcházet zbytečným opravám či vrácení výrobků.

FOLED se používá také u tzv. „chytrého oblečení“, kdy je dioda připevněna na tkaninu. Spolu s ní jsou zde všity také např. GPS přijímač nebo mobilní telefon. Výsledná aplikace může mít podobu např. speciální kombinézy pro riziková odvětví (vojenství, extrémní sporty) [53].

### **1.6.5.4 White OLED**

WOLED emituje bílé světlo, které je jasnější, uniformnější a energetický účinnější než u klasických zářivek. Jejich světlo dosahuje téměř srovnatelné barevné kvality jako žárovkové osvětlení (tzv. „true-color quality“).

Bílé OLED mohou být připraveny jako velkoplošná osvětlení, která nahradí zářivky v domácnostech s výhodou úspory elektrické energie [54].

Bílá barva je nejčastěji tvořena barevnou kombinací RGB (červená, zelená, bílá), z čehož vyplývá, že WOLED obsahují více emisních vrstev.

V dnešní době je účinnost bílých OLED stále nedostačující, než je požadováno v displejích či elektronických osvětleních. Majoritním problémem se zda být modrá barva. Ačkoliv některé fosforescenční materiály (převážně se zelenou a červenou emisí světla) vykazují vysokou efektivitu a výkon, tak právě fosforescenční materiály s modrou emisí světla nikoliv [55].

Studie ukazují, že k získání bílého světla může být použita i kombinace modrého fosforescenčního materiálu a žlutého fosforescenčního materiálu (tzv. Yellow WOLED). Tato varianta se dokonce v mnoha ohledech jeví jako použitelnější. Příčinou je skutečnost, že u Yellow OLED je míra modrého světla v celém spektru bílé mnohem nižší, než u klasických RGB WOLED [56].

V následující části budou diskutovány pozitiva a negativa OLED technologie vůči konkurenčním LED a LCD technologiím.

### 1.6.6 Výhody a nevýhody

Proč by měly v budoucnu OLED nahradit LED a LCD? Stejně jako LCD mohou být OLED využívány jak v malých, tak velkoplošných zařízeních. Problémem také nebude konstrukce cifer na digitálních hodinách a ostatních elektronických zařízeních, kde v dnešní době dominují LED. Navíc OLED poskytuje mnoho výhod, které budou v této části více přiblíženy.

Organické (polymerní) vrstvy OLED mohou být mnohem tenčí, lehčí a flexibilnější než krystalické vrstvy LED a LCD. Díky tomu je možno použít, jak klasický rigidní substrát (např. sklo), tak substrát flexibilní (např. polymer).

OLED jsou také mnohem jasnější než LED. Příčinnou jsou tyto technologické odlišnosti:

- a. Protože organické diody jsou několikanásobně tenčí než odpovídající anorganické krystalické diody, vodivostní a emisní vrstvy mohou být vícevrstvé.
- b. Technologie OLED na rozdíl od LED a LCD nevyžaduje ve své konstrukci sklo, které absorbuje světlo a snižuje tak účinnost zařízení.

Organické diody emitují světlo samy, nepotřebují externí zdroj záření jako kapalně-krystalické displeje. LCD totiž k tvorbě obrazu využívají selektivního blokování oblastí záření externího zdroje. Absence externího zdroje záření se projeví velice pozitivně na spotřebě elektrické energie. Je to obzvláště dominantní faktor pro zařízení s bateriemi, jako jsou např. mobilní telefony [49].

Další výhodou OLED je široký zorný úhel (cca 170 °). Protože LCD fungují na principu blokace záření, mají v určitých úhlech vestavěné překážky. Ty pak brání světlu pronikat určitými směry.

Ač se může zdát, že po přečtení předchozích řádků jsou organické diody jasnou volbou pro všechny typy displejů, tak tato technologie má i své stinné stránky, které brání v úplném nahrazení diskutovaných technologií [49]-[56].

**Životnost** – zatímco červené a zelené OLED vrstvy mají dlouhou životnost (46 tis. – 230 tis. hodin), modré organické vrstvy ji mají výrazně kratší (max. 14 tis. hodin).

**Výroba** – výrobní proces je v dnešní době nesmírně drahý.

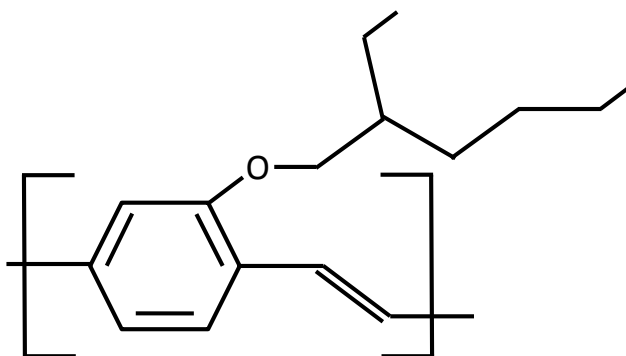
**Voda** – vysoká citlivost na vodu prakticky znemožňuje některé aplikace.



## 2 MATERIÁLY PRO NANOKOMPOZITY VYUŽITELNÉ V ELEKTRONICE

### 2.1 MEH-PPV

Mezi velice významné deriváty PPV patří MEH-PPV. Jde o foto- a elektroemisivní polymerní materiál s oranžovo-červenou emisí světla. Dle chemické struktury, zobrazené na Obrázku č. 11, si můžeme povšimnout, že hlavní řetězec je tvořen dokonale alternujícím p – fenylenem a trans–vinylenem. Metoxy a rozvětvené etylhexyloxy postranní substituenty, jejichž zásluhou je polymer dobře rozpustný a zpracovatelný v roztoku, jsou navázány na aromatickém kruhu. V porovnání s PPV je MEH-PPV méně krystalický a má nižší teplotu skelného přechodu. Rozpustnost je silně ovlivněna molekulovou hmotností a krystalinitou a platí, že s rostoucí molekulovou hmotností rozpustnost polymeru klesá. MEH-PPV dostupný na trhu disponuje relativní molekulovou hmotností okolo 1 000 000. Dobře podléhá účinkům organických polárních rozpouštědel ( $\text{CHCl}_3$ , THF). PPV a jeho alkoxy-substituované deriváty jsou velice uznávanou kategorií materiálů pro PLED (polymer light emitting diode) aplikace, organické fotovoltaické články, elektroluminiscenční zařízení, optoelektronické aplikace, elektrochromní zařízení a lasery [57], [58].



Obrázek 17 – Strukturní vzorec MEH-PPV, překresleno podle [57]

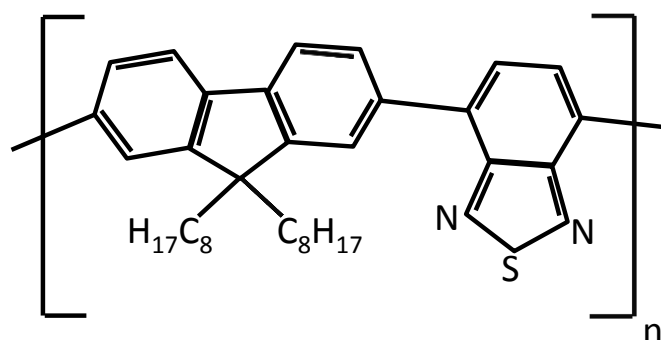
#### 2.1.1 Příprava PPV a MEH-PPV

Homopolymer PPV je připravován převážně dvěma způsoby: Wessling – Zimmermannovu syntézu a metodu ROMP (Ring-opening metathesis polymeration). V obou případech se jedná o postupy, které umožňují vznik homopolymeru PPV, dobře aplikovatelného v ten-

kých vrstvách. Při přípravě MEH-PPV, tak jako u většiny derivátů PPV převažuje Gilchova syntéza [59], [60].

## 2.2 F8BT

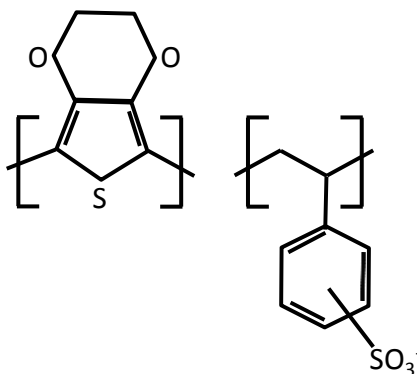
F8BT je zkrácené pojmenování polymeru Poly[(9,9-Di-N-Octylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-(benzo[2,1,3]thiadiazol-4,8-diyl)]. Spadá do skupiny konjugovaných, foto- a elektroemisních materiálů se zeleno-žlutou emisí světla. Je dobře rozpustný v THF a chloroformu [24]. F8BT se také hojně využívá ve směsích s jinými konjugovanými polymery, kde hraje roli činidla podporujícího transport elektronů [61].



Obrázek 18 - Schematický vzorec F8BT,  
překresleno podle [62]

## 2.3 PEDOT:PS

Přesněji Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Polystyrene sulfonate. Je to směs dvou ionomerů. První komponentu tvoří sulfonovaný polystyren a nese záporný náboj. Další komponentou je poly(3,4-ethylenedioxythiophene) neboli PEDOT. PEDOT je konjugovaný polymer nesoucí kladný náboj. Společně tvoří makromolekulární sůl. PEDOT:PSS je dostupný jako disperze ve vodě. Využití nachází v polymerní elektronice, přesněji je z něj tvořena vrstva pro lepší transport kladně nabitých děr [63].



Obrázek 19 – Schématický vzorec PEDOT:PSS, překresleno dle [63]

## 2.4 ZnO (NP)

Oxid zinečnatý je v poslední době velice studovaný materiál, především v oblasti nanotechnologie. Ve srovnání s ostatními anorganickými nanočásticemi dominuje svou komplexností. Popularitu získal hlavně díky svým specifickým fyzikálním a chemickým vlastnostem, jako jsou chemická stabilita, vysoká luminiscenční propustnost, vysoká katalytická aktivita, účinná antibakteriální a baktericidní funkce, intenzivní ultrafialová a infračervená absorpce [64], biokompatibilita, vysoký izoelektrický bod (9,5), vysoká elektronová pohyblivost. Navíc je to materiál, který právě v malém množství vykazuje své výhodné vlastnosti a nejeví se jako toxický, což je dominantním faktorem při jeho aplikacích do živého organismu [65].

## 2.5 ITO

Anglicky indium-tin oxide, zkráceně ITO, česky oxid india a cínu, je směs oxidů inditého a oxidu cíničitého v hmotnostním poměru 90% In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10% SnO<sub>2</sub>. V hromadné formě je to nažloutlý až šedý materiál, pokud jsou z něj ale vytvořeny tenké vrstvy, tak je bezbarvý a průhledný. Významné jsou jeho optické a elektrické vlastnosti a také snadnost, se kterou může být uložen do tenké vrstvy [66].

### 3 CÍL PRÁCE

Tato diplomová práce je zaměřena na přípravu a charakterizaci nanokompozitních tenkých vrstev s využitím v organické elektronice, především v oblasti přípravy zdrojů světla s možným využitím v zobrazovací technologii. Cíle této práce je možné na základě zadání shrnout do následujících bodů:

- Vypracovat literární rešerši, která uvede do problematiky polymerní elektroniky, technologií, které se při přípravě polymerní elektroniky využívají a seznámí s materiály využívanými pro polymerní elektroniku.
- Vybrat vhodné materiály pro přípravu polymerních elektronických zařízení,
- Připravit tenké vrstvy z vybraných materiálů a následně je charakterizovat,
- Připravit světlo emitující zařízení a charakterizovat je,
- Vyhodnotit výsledky, provést jejich diskuzi a formulovat závěr práce.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 POPIS EXPERIMENTU

Tato kapitola obsahuje přípravu vícevrstvých OLED zařízení, postupy práce a měření, jakožto i použité chemikálie, materiály, pomůcky a použité přístroje.

### 4.1 Použité chemikálie a příslušenství

*Výchozí materiály:*

- MEH-PPV – (Sigma Aldrich,  $\bar{M}_n = 40\,000 - 100\,000$ )
- ZnO nanočástice (Sigma Aldrich, velikost částic do průměru 50 nm, TEM)
- PEDOT:PSS (Heraeus)
- F8BT – (Sigma Aldrich,  $\bar{M}_n = 10\,000 - 20\,000$ )

*Použitá rozpouštědla:*

- Chloroform
- Toluén
- Metanol
- Etanol

*Substráty:*

- Křemenné sklo s nadeponovanou vrstvou ITO (směs oxidů inditého a cínitého) - (rozměry – 20 mm x 15 mm)

*Pomůcky:*

Pro přípravu světlo-emitujících diod byly použity následující pomůcky: Odměrné baňky (5 ml, 10 ml), Petriho misky, kádinka, skleněné Pasteurovy pipety, pipety (1 ml, 5 ml), injekční stříkačky, jehly, stojan (na odměrné baňky a substráty), pinzety, alobal, lepicí páska, nitrilové rukavice, nechlupatící ubrousky (Kim-tech), mikrofiltry, lžice, vatové tyčinky, skleněné tyčinky, magnetické míchací tyčinky, stříčky.

*Přístroje:*

Pro přípravu a charakterizaci OLED byly použity následující přístroje: Analytické váhy, Ultrazvuková lázeň Transsonic, magnetická míchačka Heidolph, spincoater Laurell, vakuová pec VacuCell 111 od firmy BMT. Tloušťky byly měřeny pomocí mechanického profilometru Talystep. Měření J-V charakteristik bylo provedeno na volt-ampérmetru HP. Mě-

ření intenzity EL připravených diod probíhalo pomocí spektrometru Avantes Avaspec a integrační koule s průměrem 50 mm.

## 4.2 OLED na bázi MEH-PPV, MEH-PPV/ZnO

Příprava OLED může být rozdělena do dvou základních kroků:

- Fáze, kdy se vhodně připraví substráty a roztoky pro depozici vrstev.
- Fáze, kdy se provede depozice tenkých vrstev, proběhne jejich sušení, napaří se elektrody a OLED zařízení se enkapsuluje.

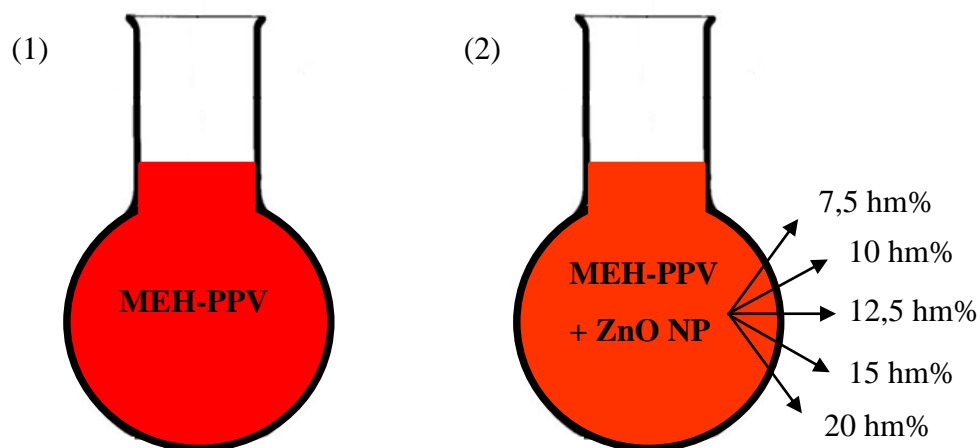
### 4.2.1 Příprava roztoku MEH-PPV + ZnO (NP)

Jako první byly připraveny kompozitní materiály. Ty byly připraveny mícháním roztoku MEH-PPV ve směsi rozpouštědel a přidáním nanočásticového ZnO.

50 mg práškového MEH-PPV bylo přeneseno do odměrné baňky a bylo přidáno 5 ml rozpouštědla (toluen + chloroform) tak, aby výsledná koncentrace roztoku byla 10 mg/ml. Pro rozpouštění polymeru byla zvolena technika, využívající kooperaci 30-ti minutové sonifikace v ultrazvukové lázni a 24 hodinového míchání na magnetické míchače.

Po uplynutí 24 hodin byl připraven kompozitní materiál. Celkem bylo připraveno 5 roztoků o objemu 1 ml, lišících se obsahem nanočásticového ZnO, který zaujímal (7,5; 10; 12,5; 15; 20) hmotnostních % vůči čistému polymeru.

Na analytických vahách bylo naváženo odpovídající množství práškového ZnO (viz Tabulka č. 1), které bylo v dalším kroku přidáno do 1 ml polymerního roztoku. Optimální dispergace a distribuce nanočástic v roztoku byla zajištěna působením ultrazvuku (30 minut) a magnetické míchačky (2 hod).



Obrázek 20 – Připravené roztoky

Tabulka 1 – navážky nanočásticového ZnO

množství ZnO [hm.%]	navážka na 1 ml [mg]
7,5	0,81
10	1,11
12,5	1,43
15	1,76
20	2,50

### Čištění substrátů

Užité substráty bylo nutno před depozicí patřičně připravit. Čistící postup v podstatě spočívá ve čtyřech desetiminutových krocích čištění v ultrazvukové lázni za současné aplikace následujících přípravků (saponát, demi-voda, etanol, aceton) [67]. Takto vyčištěné substráty byly nakonec vysušeny ve vakuové peci při 55 °C.

#### 4.2.2 Příprava OLED zařízení

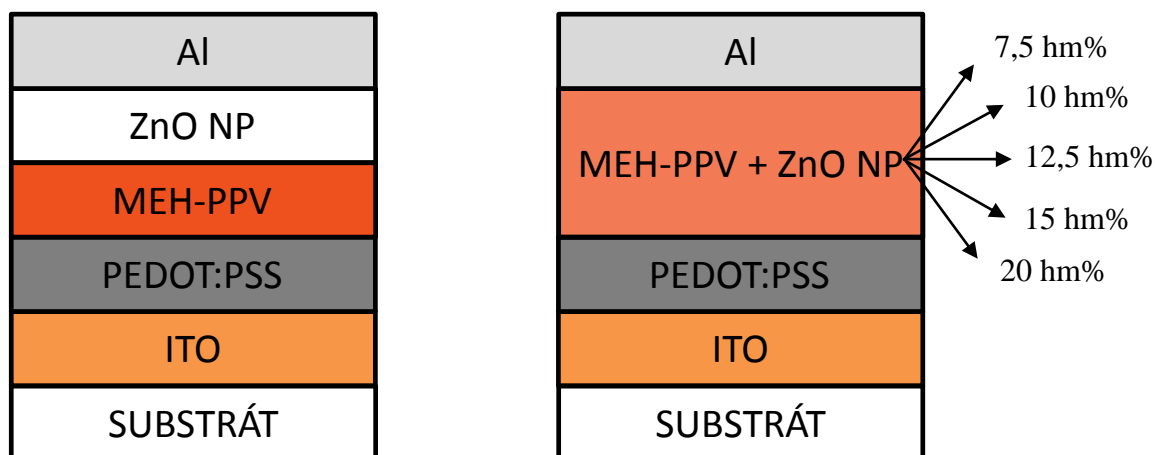
Jakmile jsou připraveny kompozitní materiály a substráty, je možno přistoupit k depozici jednotlivých tenkých vrstev, respektive kompletaci OLED zařízení. Jak bylo již řečeno, jednotlivé vrstvy diod byly deponovány pomocí technologie spin coatingu. Protože námi užité substráty obsahují již z výroby nanosenou vrstvu ITO, plnící funkci anody (injekce kladně nabitých děr), tak jako první byla nanosená tenká vrstva podporující transport těchto kladně nabitých děr. V našem případě tvořena PEDOT:PSS. Následovalo sušení při 100°C, po kterém byla nanosená emisní vrstva, sestávající se buď z čistého konjugovaného poly-



meru MEH-PPV (referenční), nebo MEH-PPV s inkorporovanými nanočásticemi ZnO. U zařízení, jehož emisní vrstvu tvoří čistý MEH-PPV, bylo ještě nutné nadeponovat vrstvu podporující transport elektronů. Ta byla v našem případě nanášena z disperze nanočástic ZnO ve směsi rozpouštědel (metanol + etanol) o koncentraci 50 mg/ml. U diod, jejichž emisní vrstva byla tvořena MEH-PPV s inkorporovanými nanočásticemi již depozice další vrstvy nebylo třeba. V dalším kroku byly naprášeny hliníkové katody a celé zařízení tak mohlo být enkapsulováno. Enkapsulace byla provedena pomocí UV tvrditelné pryskyřice a krycího sklíčka. Podrobnější technologické podmínky při depozici jednotlivých vrstev jsou zobrazeny v Tabulce č. 2.

Tabulka 2 – Podmínky při depozici

tenké vrstvy	rychlost [ot./min]
PEDOT:PSS	2500-4000
MEH-PPV	2500
disperze ZnO	3500
MEH-PPV + ZnO	2500
MEH-PPV + 12,5 hm% ZnO	2000, 2500, 3500, 5000



Obrázek 21 – Schéma připravených diod

### 4.3 OLED na bázi MEH-PPV/F8BT, MEH-PPV/F8BT/ZnO

Následující kapitola informuje o přípravě polymerních světlo emitujících diod za použití inovativní techniky tzv. host-guest systému. Celý postup je velice podobný předchozí přípravě OLED a může být opět rozdělen na dva kroky:

- Příprava polymerních roztoků
- Depozice tenkých vrstev

#### 4.3.1 Příprava polymerních roztoků

Byly připraveny dva typy polymerních roztoků:

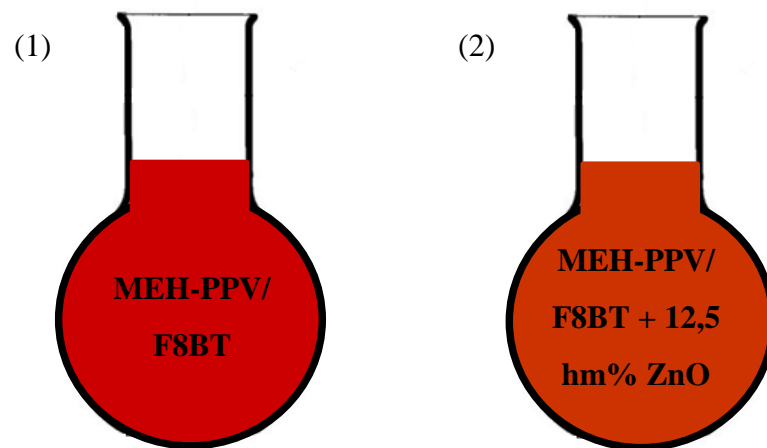
1. První byl připraven smícháním roztoku MEH-PPV o koncentraci 10 mg/ml a roztoku F8BT o koncentraci taktéž 10 mg/ml.

Na analytických vahách bylo naváženo 20 mg práškového MEH-PPV, ke kterému bylo následně přidáno 2 ml rozpouštědla. Tento roztok polymeru byl 30 minut sonifikován a 24 hodin míchán pomocí magnetické míchačky. Současně byl připraven roztok polymeru F8BT. Nejprve bylo naváženo 20 mg práškového F8BT, ke kterému bylo následně přidáno 2 ml rozpouštědla. Roztok polymeru F8BT byl rozpouštěn obdobným způsobem jako MEH-PPV. Jakmile byly oba roztoky připraveny, proběhlo jejich smísení v poměru 1:1.

2. Druhý byl připraven homogenizací ZnO nanočástic v roztoku MEH-PPV/F8BT, přičemž koncentrace ZnO nanočástic byla 12,5 hm% vůči polymerní matici.

Přídavek 12,5 hm. % ZnO byl zvolen na základě předchozích výsledků, kdy se jevil jako optimum pro dosažení dobrého otevíracího napětí diod a současně jejich dobré svítivosti měřené jako EL intenzita.

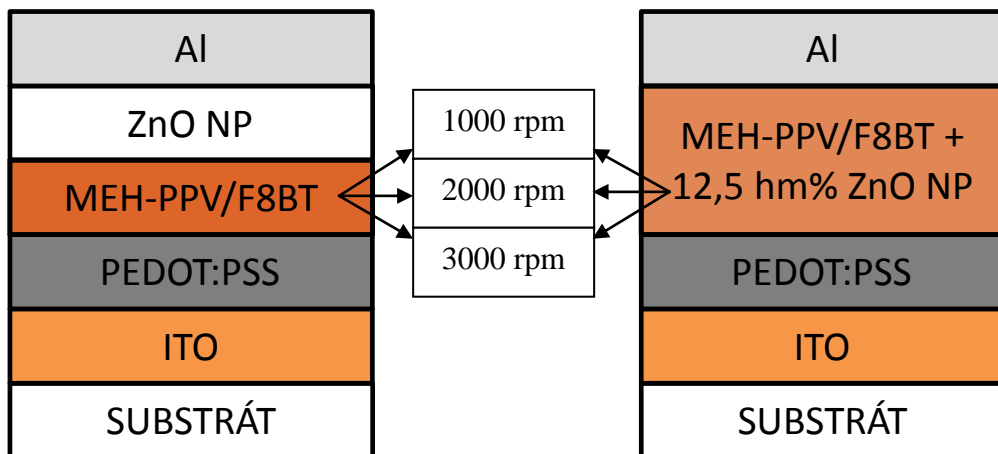
Na analytických vahách bylo naváženo 2,86 mg práškového ZnO, tak aby výsledná disperze obsahovala 12,5 hm% ZnO ve 2 ml roztoku MEH-PPV/F8BT.



Obrázek 22 – připravené polymerní blendy

#### 4.3.2 Depozice tenkých vrstev

K depozici tenkých vrstev bylo využito opět technologie spin coatingu. Postupovalo se obdobně jako při kompletaci předchozích OLED zařízení, avšak s rozdílem v emisní vrstvě, která byla zhotovena z jiných materiálů (Obrázek č. 22) a navíc při různých rychlostech rotace (1000, 2000, 3000 rpm - Obrázek č. 23).



Obrázek 23 – Schéma připravených diod

#### 4.4 Charakterizace OLED

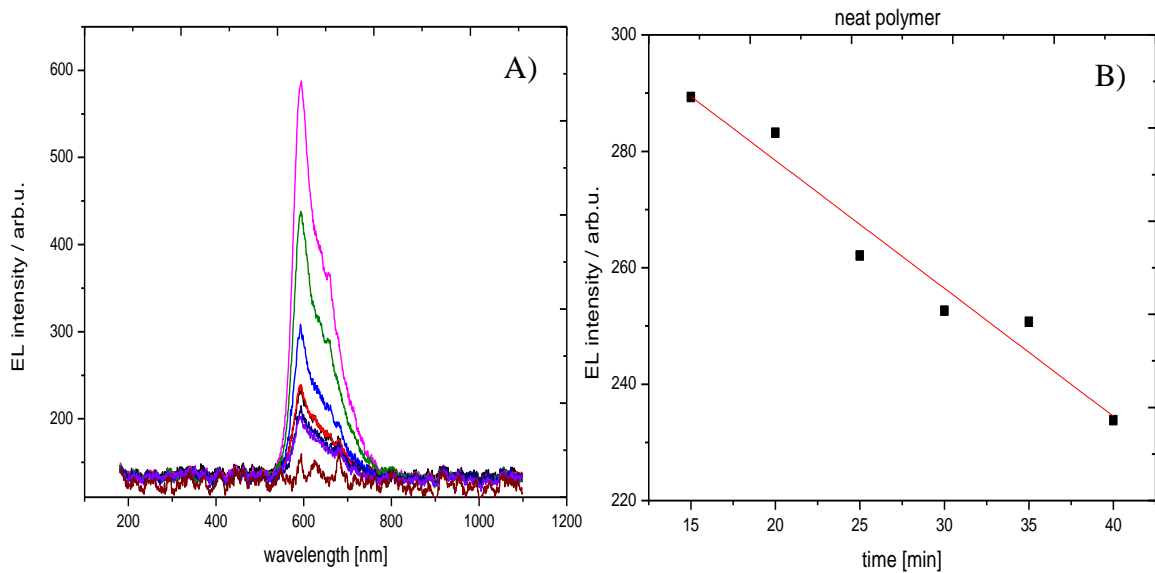
Během charakterizace připravených diod byly sledovány následující parametry: J-V charakteristiky, ze které je možné odečíst otevřací napětí diod, dále pak intenzita EL a její pokles v čase, což vypovídá o stabilitě daného materiálu.

Byla sledována závislost poklesu EL intenzity na čase a tato závislost byla v log-log škále lineárně fitována, čímž byla zjišťována rychlost degradace materiálu během zapojení ve stavu „ON“ u OLED s různým obsahem ZnO.

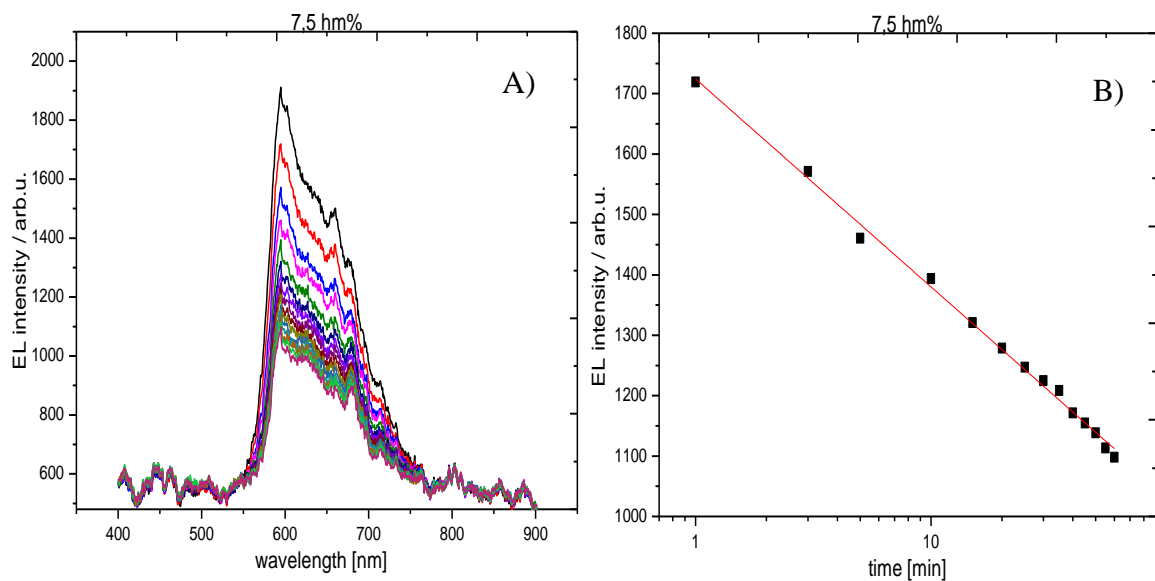
## 5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

### 5.1 Výsledky měření OLED na bázi MEH-PPV, MEH-PPV/ZnO

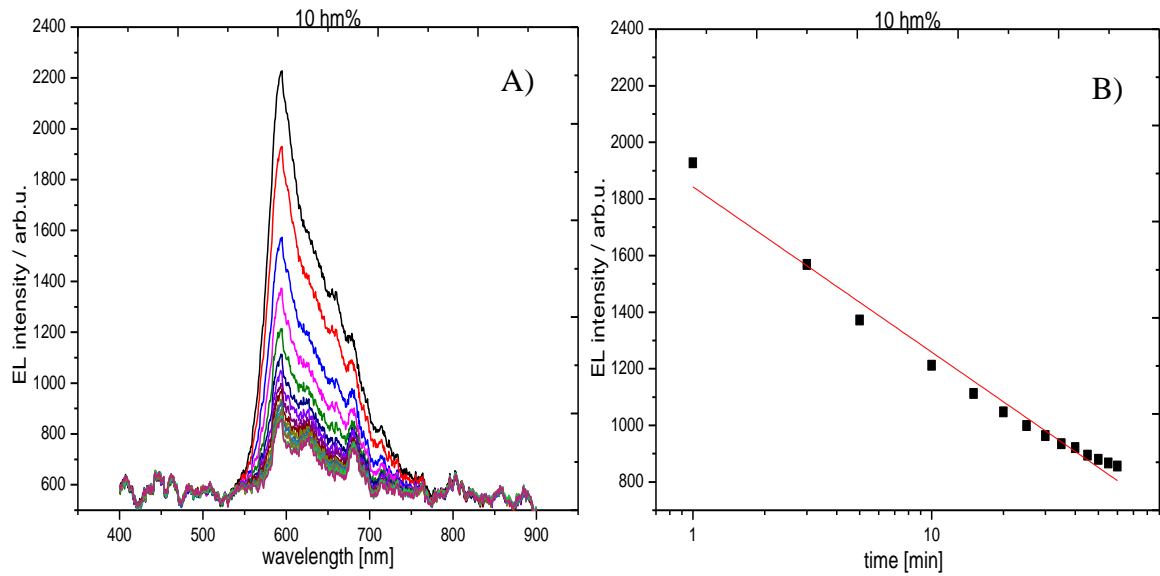
#### Intenzita elektroluminiscence a její pokles v čase



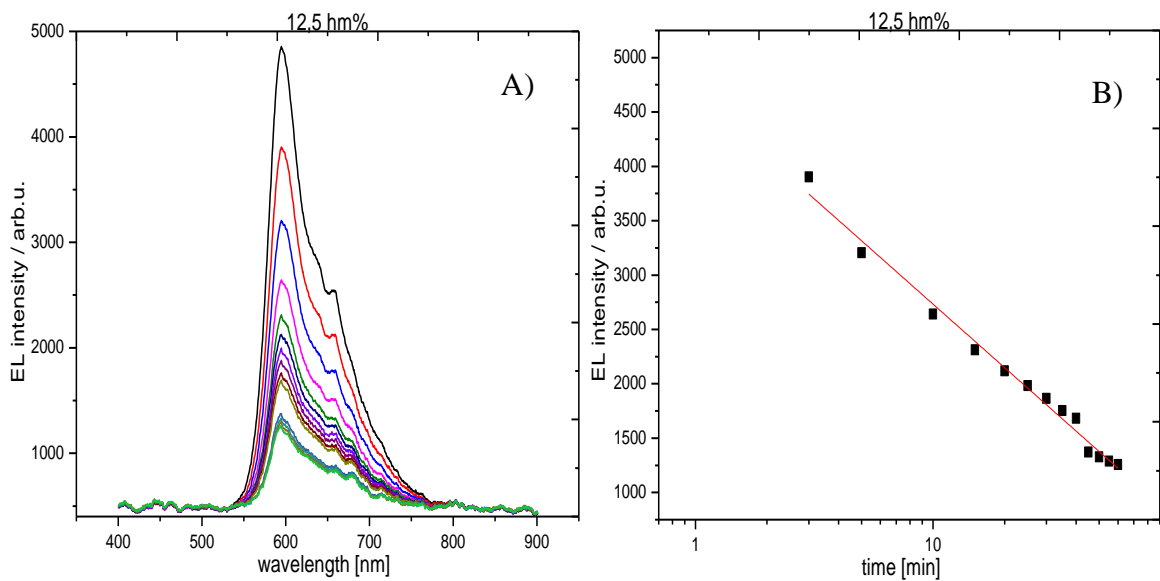
Obrázek 24 – a) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV b) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěz diodu.



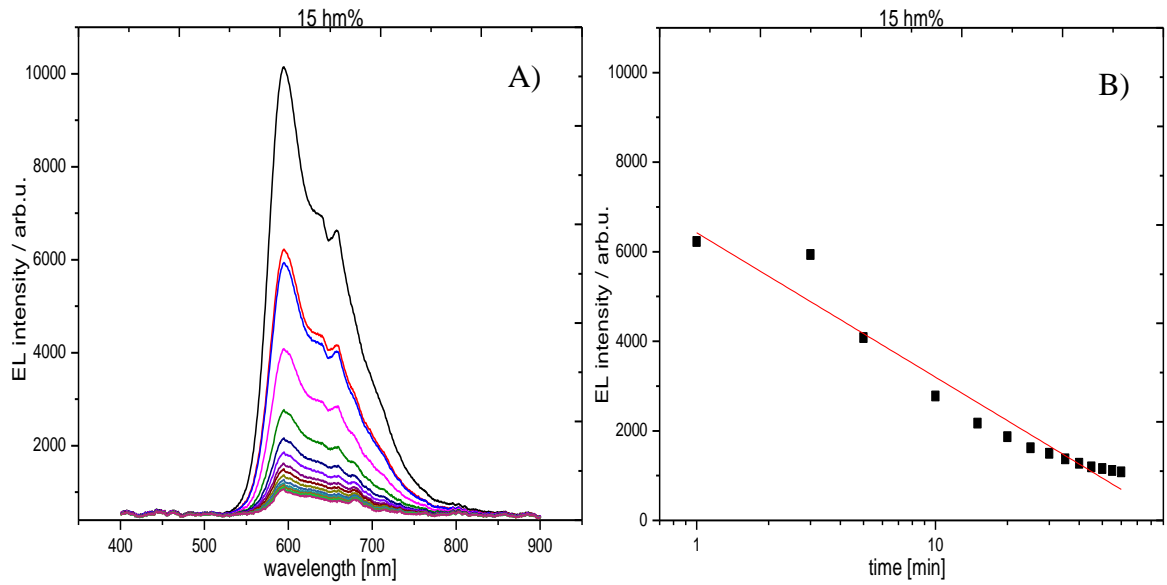
Obrázek 25 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 7,5 hm% B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěz diodu.



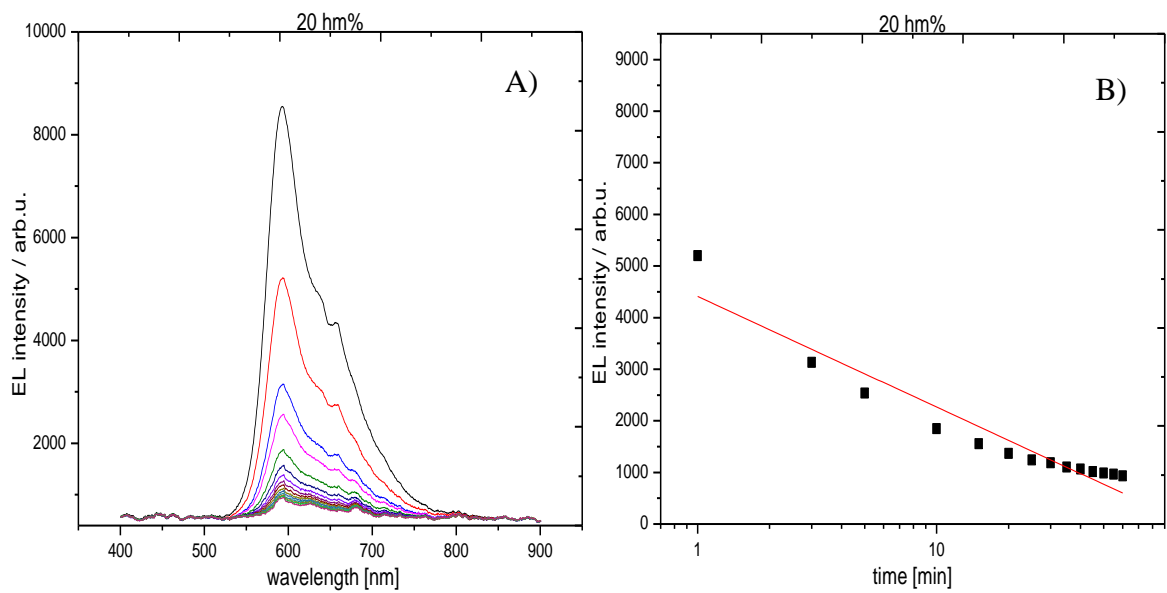
Obrázek 26 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 10 nm B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěz diodu.



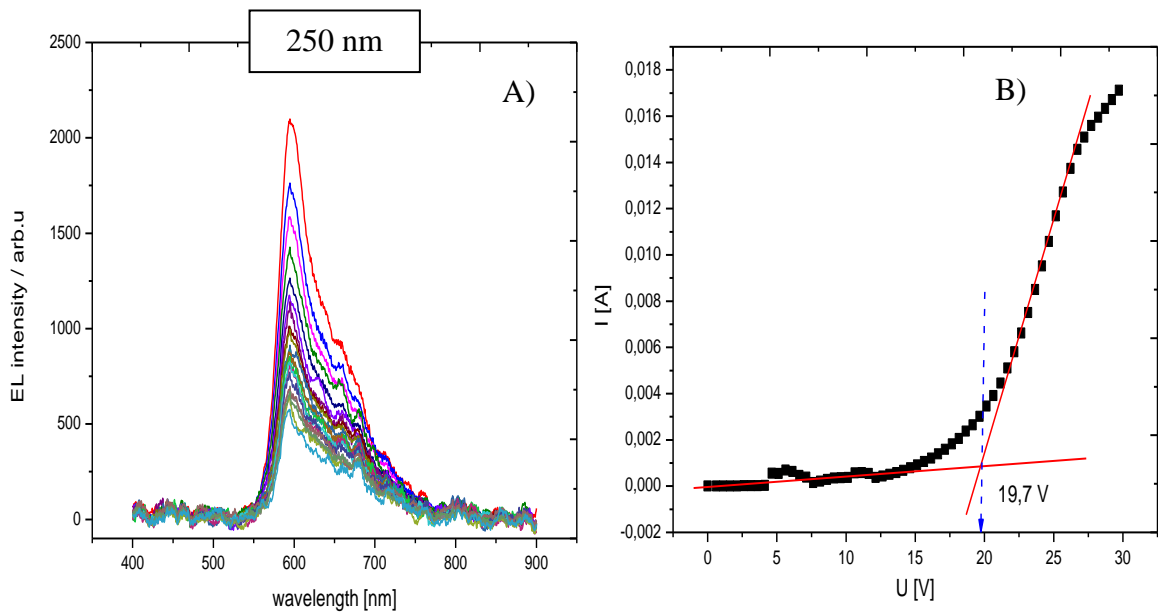
Obrázek 27 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 12,5 nm B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěz diodu.



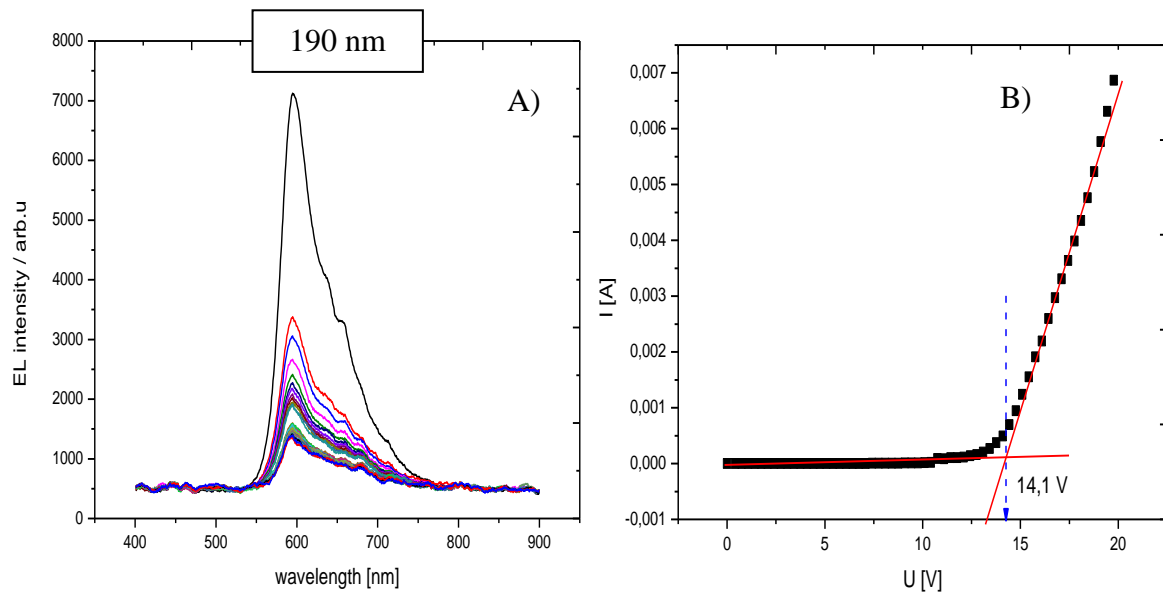
Obrázek 28 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 15 hm% B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutéž diodu



Obrázek 29 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 20 hm% B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutéž diodu

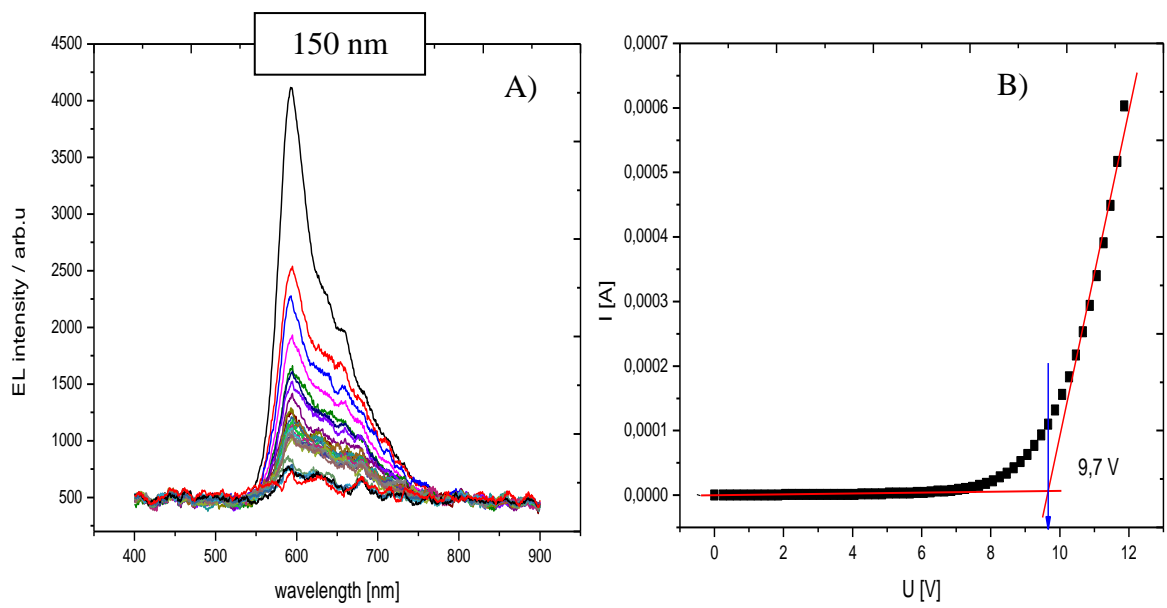
**Volt-ampérová charakteristika MEH-PPV/12,5 hm% ZnO**

Obrázek 30 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 12,5 hm% (s tloušťkou emisní vrstvy - 250 nm) B) Volt-ampérová charakteristika pro tutěž diodu



Obrázek 31 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 12,5 hm% (s tloušťkou emisní vrstvy - 190 nm) B) Volt-ampérová charakteristika pro tutěž diodu.



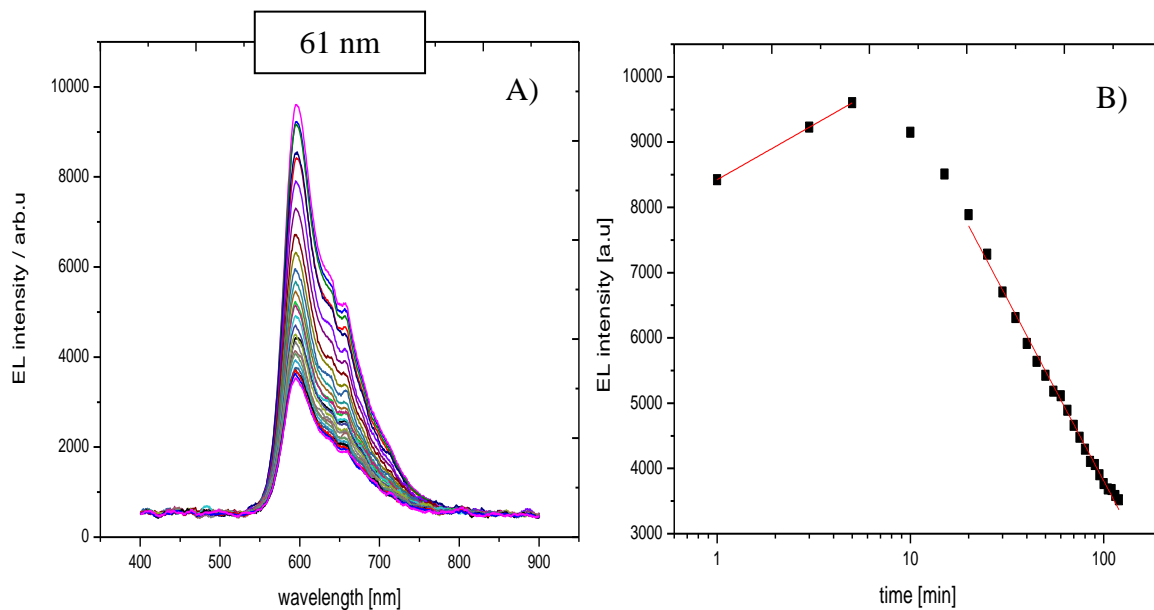


Obrázek 32 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 12,5 hm% (s tloušťkou emisní vrstvy - 150 nm) B) Volt-ampérová charakteristika pro tutéž diodu.

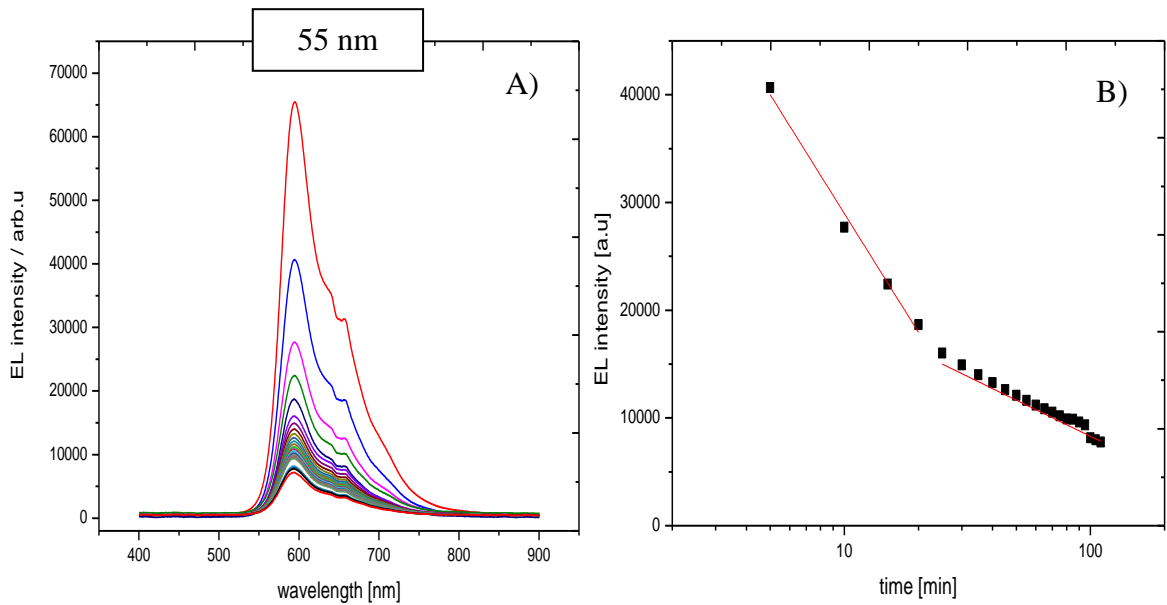
## 5.2 Výsledky měření OLED na bázi MEH-PPV/F8BT, MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO

Intenzita elektroluminiscence a její pokles v čase

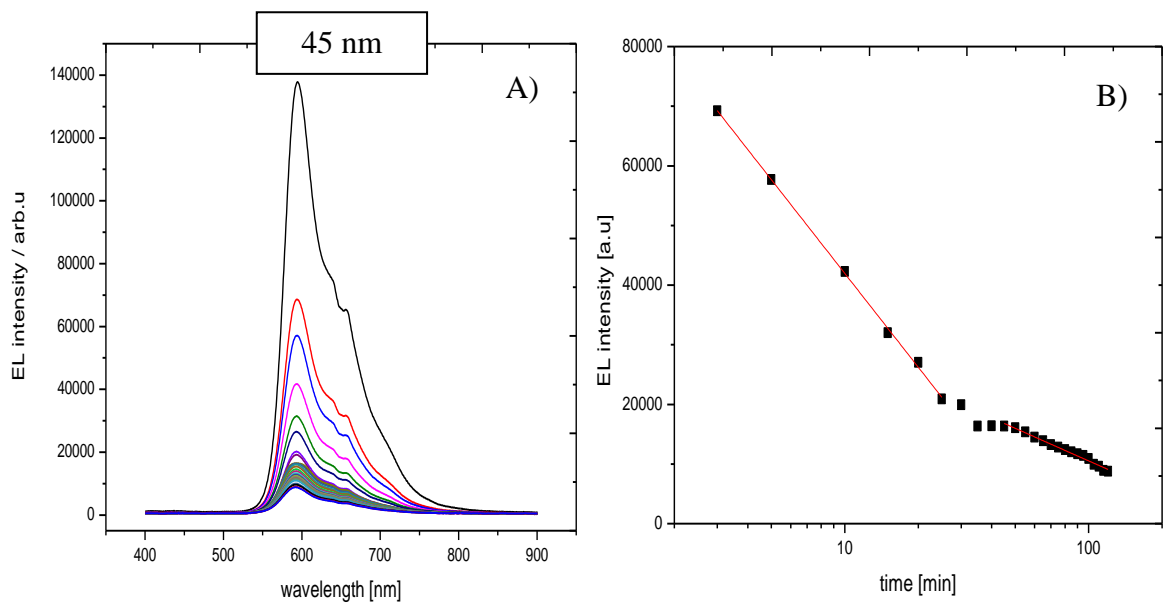
### (1) MEH-PPV/F8BT



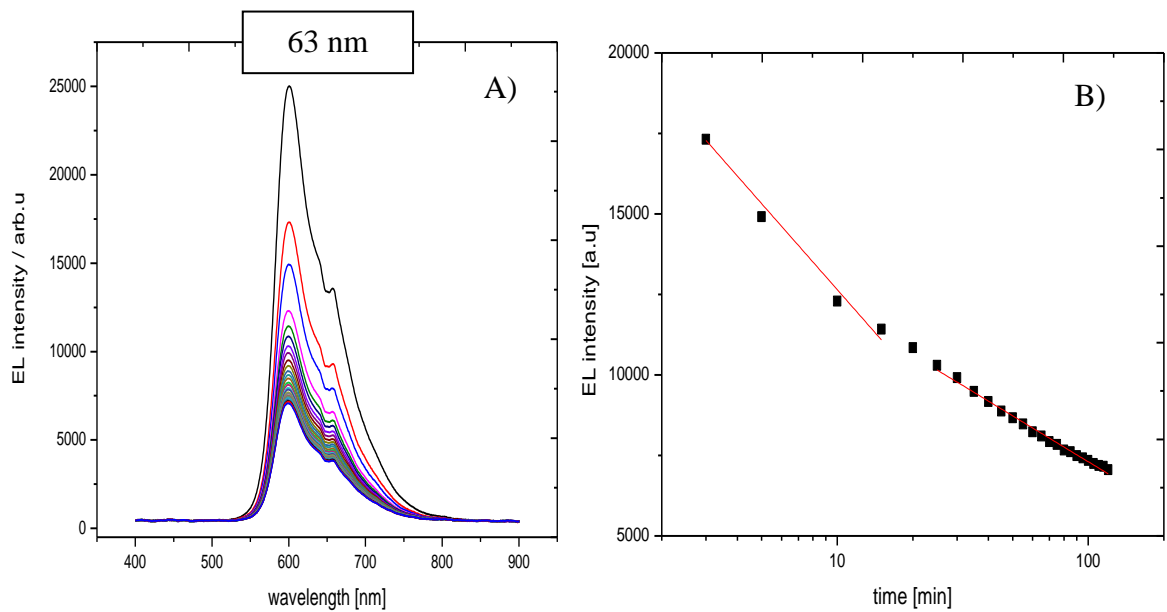
Obrázek 33 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 61 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutéž diodu.



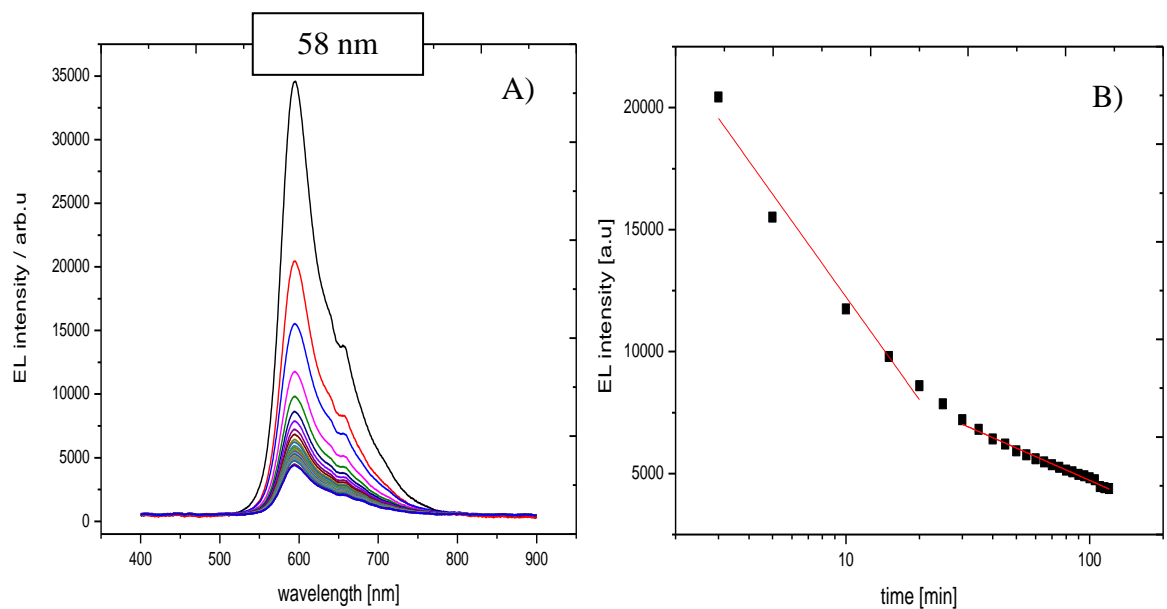
Obrázek 34 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 55 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutéž diodu.



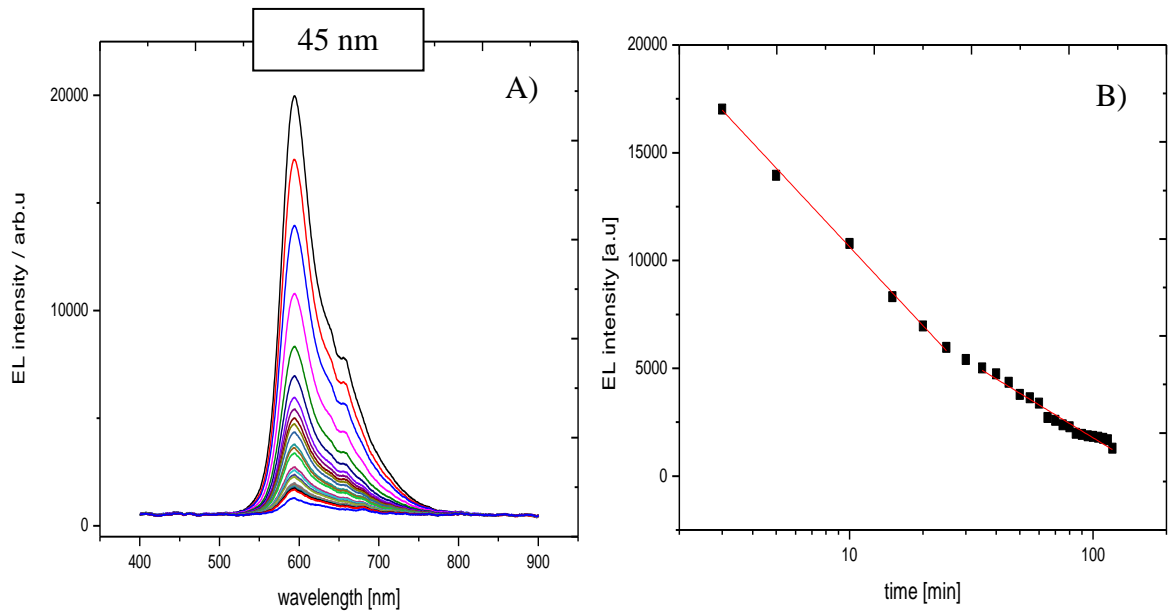
Obrázek 35 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy – 45 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutéž diodu.

**(2) MEH-PPV/F8BT + 12,5 hm% ZnO**

Obrázek 36 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 63 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu.



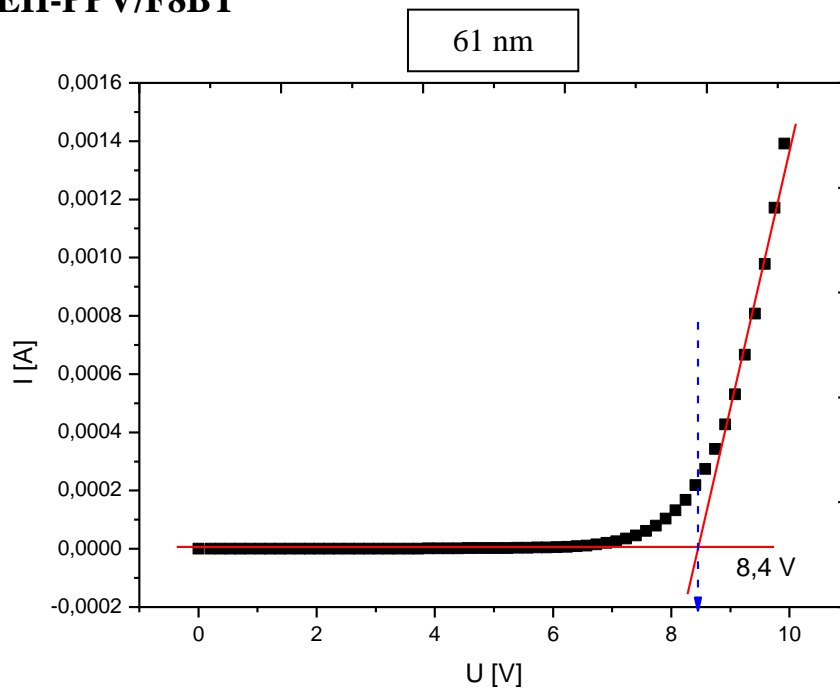
Obrázek 37 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 58 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu.



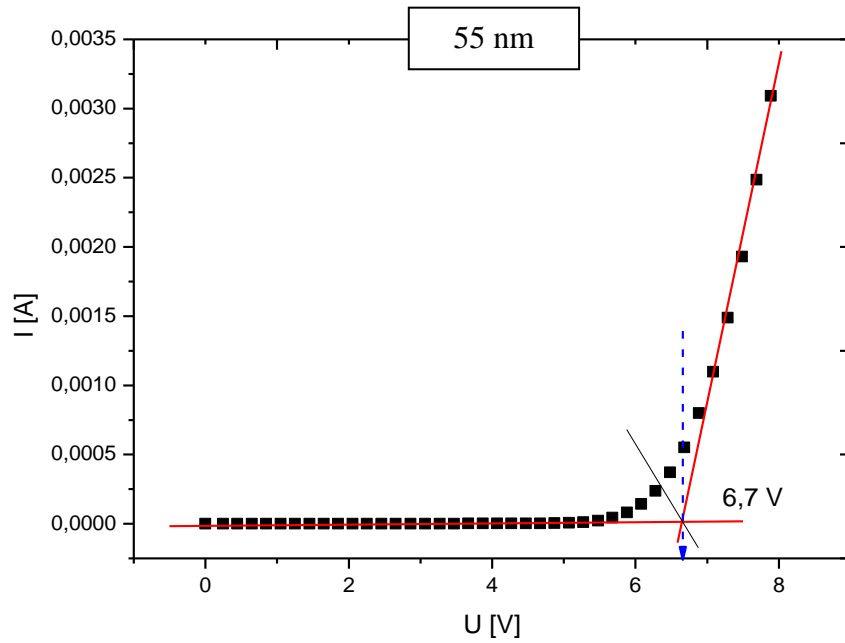
Obrázek 38 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 45 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutéž diodu

### Volt-ampérová charakteristika

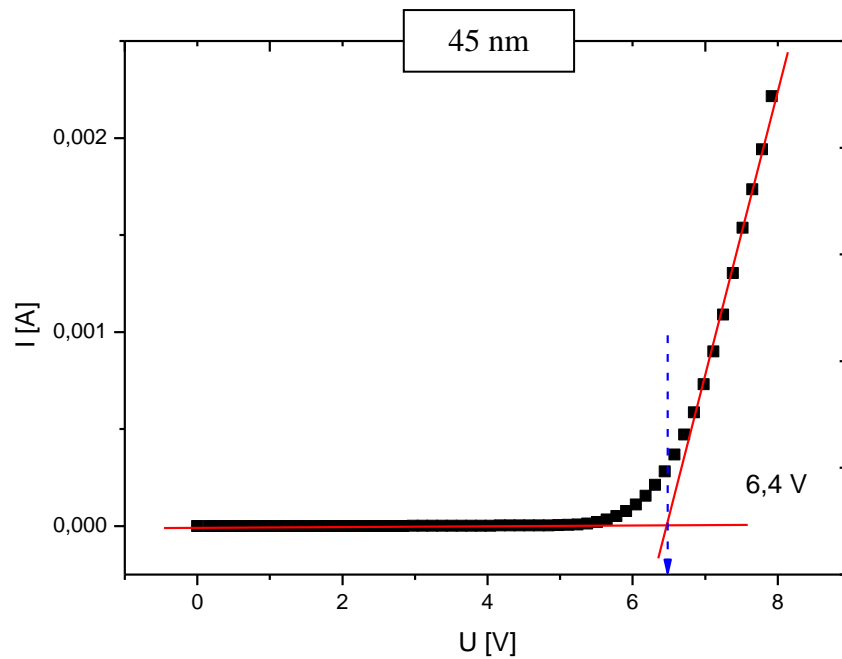
#### (1) MEH-PPV/F8BT



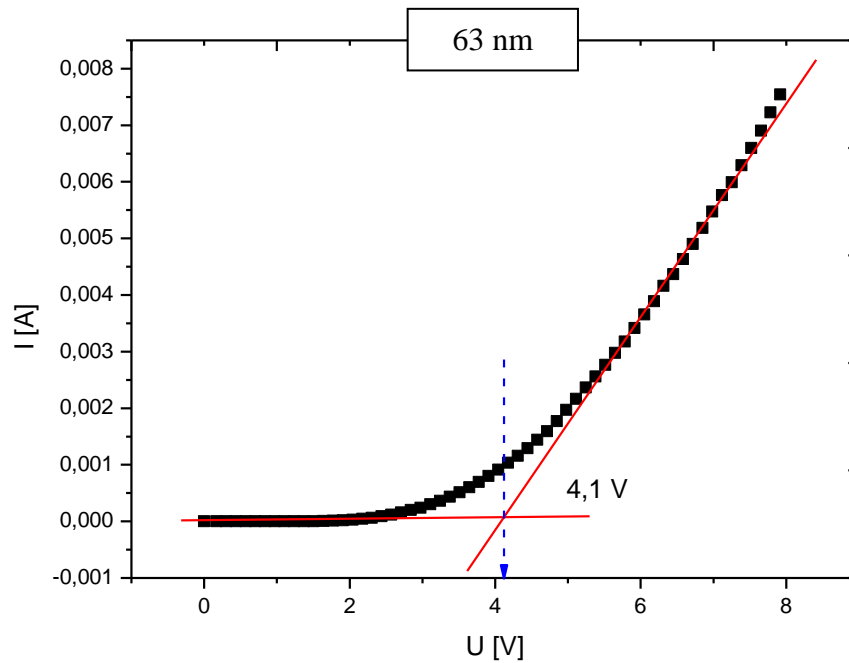
Obrázek 39 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 61 nm)



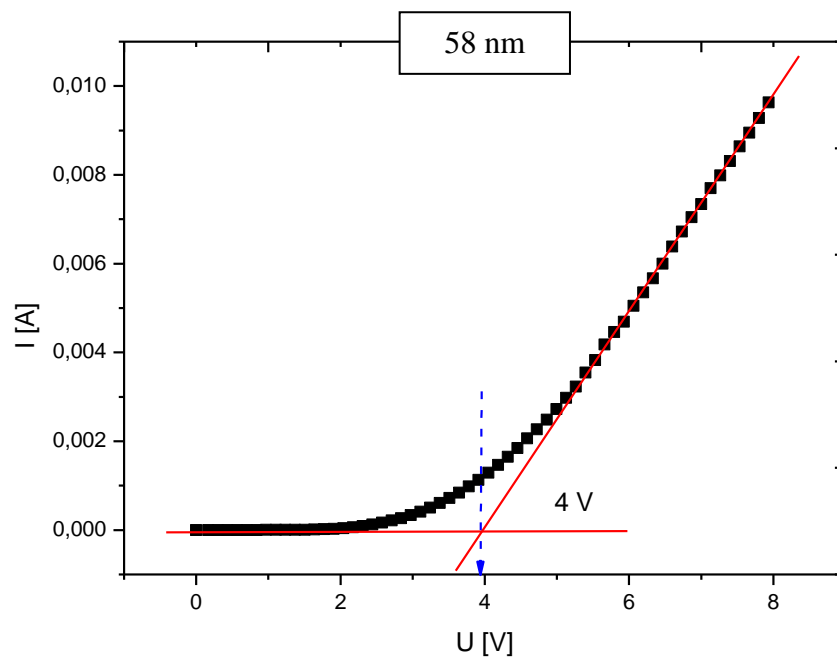
Obrázek 40 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 55 nm)



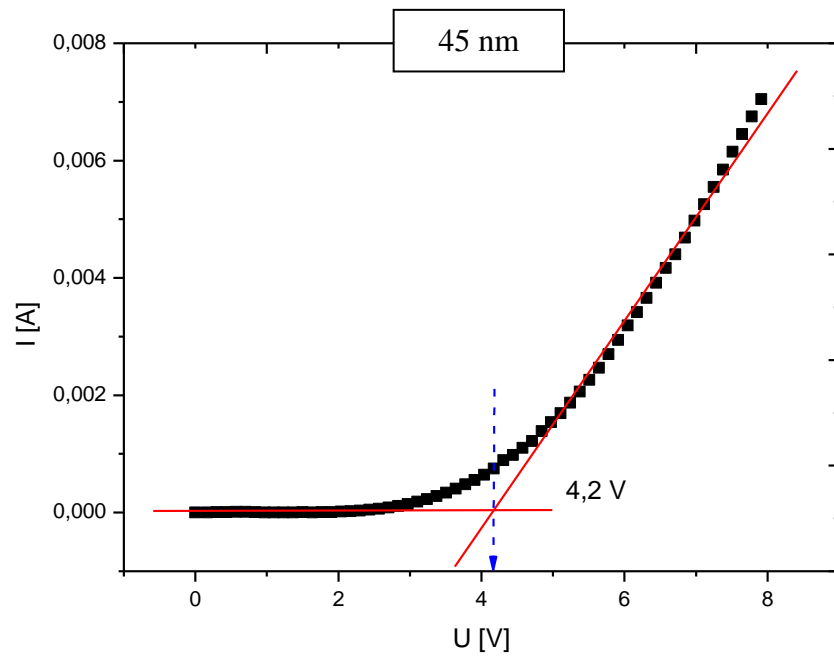
Obrázek 41 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 45 nm)

**(2) MEH-PPV/F8BT + 12,5 hm% ZnO**

Obrázek 42 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/  
F8BT + 12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 63 nm)



Obrázek 43 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/  
F8BT + 12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 58 nm)



Obrázek 44 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/  
F8BT + 12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 45 nm)



## 6 DISKUSE VÝSLEDKŮ

### 6.1 MEH-PPV/ZnO

#### 6.1.1 Vliv inkorporace nanočástic na intenzitu a stabilitu elektroluminiscence

Výsledky z měření intenzity EL a jejího poklesu v čase pro MEH-PPV a MEH-PPV/ZnO jsou zobrazeny na Obrázcích č. 24 – 29. Tato spektra jsou řazena od nejméně plněného systému po systém, který obsahoval konečných 20 hm% nanočásticového ZnO, který byl inkorporován do MEH-PPV matrice. Na Obrázcích č. 24 – 29 A jsou zobrazena spektra závislosti intenzity EL na vlnové délce, přičemž jednotlivé křivky (barevně rozlišené) vyjadřují intenzity EL daného zařízení, která byla snímána v daných časových krocích. Poloha píků je charakteristická pro užitý konjugovaný polymer MEH-PPV s oranžovo-červenou emisí světla (tři hlavní emisní pásy na 590, 640, 700 nm). Obrázky č. 24 – 29 B zobrazují právě hodnoty těchto píků intenzity EL v závislosti na čase, přičemž hodnoty jsou vynášeny v logaritmickém měřítku. Tyto hodnoty byly proloženy lineární regresí a byla zjištěna směrnice přímky, která udává rychlost poklesu EL, což do jisté míry vypovídá o stabilitě EL [68].

Tabulka 3 – Výsledky lineární regrese pro plněné systémy

conc. ZnO [hm%]	Intercept	Slope
7,5	1724	-344
10	1843	-584
12,5	4671	-1939
15	6425	-3225
20	4409	-2142

Výsledky mohou být shrnuty následovně:

- i. ZnO nanočástice výrazně zvyšují intenzitu elektroluminiscence u polymerních diod v porovnání s diodami, u kterých byl použit jen čistý polymer, přičemž nejvyšší intenzity se dosáhne při 15% naplnění polymeru částicemi.

Možné vysvětlení nárůstu intenzity EL po inkorporaci nanočásticového plniva ZnO do aktivní vrstvy je založeno na zkušenostech z předešlých výzkumů [69]. Na jeho objasnění si postačí uvědomit, jakou roli v samotném OLED zařízení hraje vrstva nanosená z disperze ZnO nanočástic. ZnO NP podporuje transport katodou injektovaných elektronů směrem

k aktivní vrstvě. Obdobná situace nastává na opačné straně zařízení, kde jsou k aktivní vrstvě dopravovány anodou injektované díry. Výsledný světelný vjem (emise) a jeho intenzita jsou tedy silně závislé na počtu zářivých rekombinací děr a elektronů. Nanočástice, které jsou inkorporovány uvnitř aktivní vrstvy, tak zlepšují transport elektronů skrze aktivní vrstvu a působí jako jejich koncentrátoři a to přímo v aktivní vrstvě. Existuje tedy větší pravděpodobnost, že kladně nabitá díra nalezne elektron a zrekombinuje s ním právě tam, což je žádoucí. S rostoucí koncentrací ZnO v aktivní vrstvě roste spád, se kterým jsou elektrony transportovány od elektrody. Intenzita elektroluminiscence taktéž roste avšak jen do určité meze. Tuto mez představuje velký nepoměr mezi elektrony a děrami. Přebytek nerekombinovaných elektronů může totiž „téct“ aktivní vrstvou dál a zrekombinovat mimo ni. To je důvodem snížení intenzity EL při plnění > 15 hm. %. V našem systému totiž nebyla zavedena vrstva, která by tok elektronů mimo aktivní vrstvu bránila, tzv. „electron blocking layer“.

- ii. Rychlost degradace materiálu během vyzařování je větší u systémů naplněných částicemi a dosahuje maxima u systému s největší emisí světla.

Důvodem může být pozorovaná skutečnost, že při dosažení vyšších intenzit EL je potřeba více protékajícího proudu, tím se zařízení více zahřívá a to vede k tepelné degradaci polymeru.

## 6.2 MEH-PPV/12,5 hm. % ZnO

### 6.2.1 Vliv tloušťky emisní vrstvy na intenzitu elektroluminiscence její pokles v čase

Jako optimální plnění kompozitu pro zvýšení EL bylo stanoveno 12,5 hm. %.

Výsledky z měření intenzity elektroluminiscence a jejího poklesu v čase pro OLED s emisní vrstvou tvořenou (MEH-PPV/12,5 hm% ZnO) jsou zobrazeny na Obrázcích č. 30 – 32. Nachází se zde EL spektra tří, co se složení týče, stejných diod. Rozdílem je však rychlost rotace, při které byly jejich emisní vrstvy nanесeny (2000, 3500, 5000). Různou depoziční rychlostí je potom ovlivňována výsledná tloušťka emisní vrstvy viz (Tabulka č. 4). Z naměřených spekter jsou patrné rozdíly v hodnotách intenzity elektroluminiscence v závislosti na tloušťce emisní vrstvy. V tomto případě byl zaznamenán skokový nárůst intenzity EL s maximem při 190 nm. Na druhou stranu, při tloušťce aktivní vrstvy 150 nm došlo ke snížení intenzity EL. Tento pozorovaný jev se dá vysvětlit dvěma způsoby. Za prvé, pro každé OLED zařízení existuje optimální tloušťka aktivní vrstvy, která je limitní z obou stran. Limit je dán jednak maximální tloušťkou, kdy je emitovaný foton ještě schopen opustit aktivní vrstvu, aniž by došlo k samoabsorpci tohoto fotonu. Dále pak minimální tloušťkou aktivní vrstvou, která musí být taková, aby právě na ní docházelo k vyvážené rekombinaci nosičů náboje. Účinnost OLED zařízení je pak dána tloušťkou tak, že jsou vyváženy parametry určující jednak počet fotonů opustivších zařízení a dále pak počet nábojů zrekombinovaných na aktivní vrstvě OLED zařízení [70]. Druhým úhlem pohledu může být výstavba organizované struktury polymerní vrstvy. U tenčích vrstev je aktivní vrstva méně uspořádaná (tj. řetězce nejsou uloženy v nejvýhodnějších konformacích) a tím pádem je zkrácena difuzní délka excitonů, což se projeví nižším počtem kolizí elektron-díra v aktivní vrstvě. U tlustších vrstev (190 nm) je struktura již více uspořádaná a pár elektron-díra se může dostat do termodynamicky výhodnějších míst k zářivé rekombinaci v aktivní vrstvě, tzn. k místům s větší konjugací a delokalizací nosičů náboje [71]. U OLED s tloušťkou aktivní vrstvy okolo 250 nm byla pozorována intenzita EL nižší než v obou případech předchozích. To může být dáno překročením horního tloušťkového limitu a následnou samoabsorpcí emitovaných fotonů.

Tabulka 4 – Naměřené hodnoty tloušťek emisních vrstev OLED systémů (MEH-PPV/12,5 hm% ZnO) a jim odpovídající intenzita EL

EMISSION LAYER	RPM	THICKNESS [nm]	EL INTENSITY (t = 0) [a.u]
MEH-PPV/ZnO	2000	250	2200
	3500	190	7100
	5000	150	4250

To, že je největší intenzita EL u OLED s aktivní vrstvou o tloušťce 190 nm, může být dáno právě tím, že aktivní vrstva je již dobře uspořádaná, řetězce polymerního materiálu mají optimální konformace a konjugace je tak maximální a dále také tím, že není překročen tloušťkový limit a nedochází k významné samoabsorpci emitovaného světla.

### 6.2.2 Vliv tloušťky emisní vrstvy na otevírací napětí OLED zařízení

Závislost otevíracího napětí „opening bias“ na tloušťce emisní vrstvy je diskutován na základě naměřených dat, zobrazených na Obrázcích č. 30 – 32 B. Otevírací napětí bylo vždy odečteno z křivky J-V charakteristiky. Hodnoty otevíracího napětí vykazují jednoznačnou závislost na tloušťce. Výsledky z měření jsou vedeny v Tabulce č. 5 a mohou být shrnuty následovně:

- S rostoucí tloušťkou emisní vrstvy, roste otevírací napětí OLED zařízení.

Pozorovaný trend může být vysvětlen tím, že při nárůstu tloušťky emisní vrstvy, dochází k poklesu proudové hustoty a rychlosti injekce náboje do aktivní vrstvy, což je spojeno s redukcí vnitřního elektrického pole na rozhraní [72].

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty tloušťek emisních vrstev OLED systémů (MEH-PPV/12,5 hm% ZnO) a jim odpovídající otevírací napětí

EMISSION LAYER	RPM	THICKNESS [nm]	BIAS VOLTAGE [V]
MEH-PPV/ZnO	2000	250	19,7
	3500	190	14,1
	5000	150	9,7

## 6.3 MEH-PPV/F8BT

### 6.3.1 Vliv použitého materiálu v aktivní vrstvě (blend MEH-PPV/F8BT) na výkon OLED zařízení

V následující kapitole budou diskutovány dosažené výsledky, které jsou uvedené v Obrázcích č. 33 – 35, na kterých jsou zobrazeny EL spektra diod, jejichž emisní vrstva byla vytvořena právě z fyzikálního blendu (MEH-PPV/F8BT). Zajímavostí je, že ač byly použity 2 konjugované polymery s rozdílnou barvou emise světla, výsledná červeno-oranžová světelná emise odpovídá užitému MEH-PPV. Tato skutečnost by mohla napovídat na zdárně vytvořený host-guest systém.

Z poznatků v literatuře [69], [70] vyplývá, že excitace (v případě OLED spíše tvorba excitonů) probíhá na obou polymerech. Ovšem v našem případě dochází k výhodnému překryvu absorpčních pásů MEH-PPV a emisních pásů F8BT. To je důležité pro energetický přenos, někdy též zvaný Försterův, přičemž excitony vzbuzené na polymeru F8BT se přesouvají na řetězce polymeru MEH-PPV, na kterém relaxují za současné emise světla. Na druhou stranu, nemusí se jednat jen o fenomén FRET (Förster energy transfer). V polymerním systému „host-guest“, kde jsou velice blízko sobě položeny valenční a vodivostní pásy obou polymerů (HOMO pás F8BT je 5,9 eV, HOMO pás MEH-PPV je 5,3 eV), může být přenos nosičů způsoben i běžnou kondukcí, nebo tzv. hoppingem a to z řetězce jednoho polymeru na druhý, v našem bariéra je velmi malá, oba materiály mají navíc děrovou vodivost. Takový princip přenosu je v současnosti velmi zkoumán a vyvíjí se blokové polymery, které mají část řetězce z jednotek o níže položených hladinách HOVB, druhou část o výše položených hladinách HOVB a využije se vhodného uspořádání těchto bloků k sobě tak, aby cesta náboje byla co nejméně obtížná, tzn., vytvoří se ideální potenciálový spád. Náš systém takovým blokovým kopolymerům konkuruje, neboť také vytváří vhodný potenciálový spád, ale navíc syntéza jednotlivých polymerů není tak náročná jako v případě blokových kopolymerů, což přináší technologickou úsporu.

Vytvoření funkčního „host-guest“ systému má ve svém důsledku zvýšení účinnosti OLED zařízení. Toto zvýšení účinnosti je založené především na zvýšení hodnoty faktoru  $\eta_{S/T}$ , který vyjadřuje poměr mezi excitony, které mají dovolený zářivý přechod dle spinové statistiky [73]. V nemodifikovaných aktivních vrstvách je tento faktor roven ve většině přípa-

dů jedné třetině, pokud se ovšem vytvoří účinný „host-guest“ systém, pak lze dosáhnout až hodnoty 1/2 [46]. U nemodifikovaných aktivních vrstev je rozpad tripletových excitovaných stavů doprovázen, spíše než emisí světla, vznikem tepla, které snižuje stabilitu OLED zařízení a zapříčiňuje degradaci polymeru v aktivní vrstvě.

Vhodnou modifikací aktivní vrstvy tak lze dosáhnout mnohonásobného zvýšení intenzity a stability EL při zachování stejné koncentrace konjugovaných polymerů v porovnání s předchozími systémy. S tím souvisí i snížení otevíracích napětí, která jsou zobrazena na Obrázcích č. 39 – 41.

Oproti čistému polymeru MEH-PPV, bylo užitím blendu dosaženo nižšího otevíracího napětí, to zhruba o 10 V. V porovnání tlouštěk aktivních vrstev z blendu pak můžeme ještě dále pozorovat snižování otevíracího napětí se snižující se tloušťkou vrstvy, což je dáno nižším odporem vrstvy u tenčích vrstev (viz. Tabulka č. 6).

Tabulka 6 – Naměřené hodnoty tlouštěk emisních vrstev OLED systémů (MEH-PPV/F8BT), jakožto i intenzity EL a otevíracího napětí

EMISSION LAYER	RPM	THICKNESS [nm]	EL INTENSITY (t = 0) [a.u]	BIAS VOLTAGE [V]
BLEND	1000	61	10000	8,4
	2000	55	68000	6,7
	3000	45	140000	6,4

## 6.4 MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO

### 6.4.1 Vliv inkorporace nanočástic do fyzikálního blendu MEH-PPV/F8BT

Intenzita EL a její pokles v čase pro OLED s emisní vrstvou tvořenou (MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO) jsou zobrazeny na Obrázcích č. 36 – 38. Výsledky z volt-ampérové charakteristiky jsou zobrazeny na Obrázcích č. 42 – 44.

Lze říci, že inkorporací nano-plniva do aktivní vrstvy bylo dosaženo nižších hodnot intenzity EL v porovnání s čistým blendem.

Příčinou může být již zmiňovaná situace přesycení aktivního systému elektrony, které pokud nezrekombinují s děrami na aktivní vrstvě, nebo pokud jim není bráněno v pohybu ve prospěch anody, pokračují dále systémem jako tzv. „leakage“ proud, což lze přeložit jako ztrátový proud.

Tabulka 7 - Naměřené hodnoty tlouštěk emisních vrstev OLED systémů (MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO), jakožto i intenzity EL a otevíracího napětí

EMISSION LAYER	RPM	THICKNESS [nm]	EL INTENSITY (t = 0) [a.u]	BIAS VOLTAGE [V]
BLEND-COMP	1000	63	26000	4,1
	2000	58	36000	4
	3000	45	21000	4,2

Co je ovšem podstatná změna, po přidání ZnO do aktivní vrstvy se výrazně zmenší otevírací napětí, oproti čistému blendu je to téměř o polovinu, což lze vysvětlit, tím, že nanočástice ZnO podporují transport elektronů do aktivní vrstvy a tam je zdržují, přičemž pak snadněji dochází k rekombinaci s děrami putujícími od anody. To je jev ovšem protichůdný vzhledem ke snižování intenzity EL, dalo by se očekávat, že v takovém případě by mohla intenzita EL narůstat, ale v našem případě klesá. Tuto diskrepanci lze objasnit na základě vztahu, který určuje účinnost OLED zařízení:

$$\eta_{EQE} = \gamma * \eta_{S/T} * q_{eff} * \eta_{out} \quad (3)$$

kde  $\gamma$  je faktor určující, zda náboje kladné a záporné jsou v rovnováze,  $\eta_{S/T}$  je poměr mezi excitony, které mají dovolený zářivý přechod dle spinové statistiky,  $q_{eff}$  je faktor určující účinnost excitonů podílejících se na zářivé rekombinaci a emisi světla,  $\eta_{out}$  je faktor určující počet fotonů, které opustí dané zařízení a nejsou pohlceny.

Na základě tohoto vztahu je pak evidentní, že i přes dobrý transport elektronů do aktivní vrstvy a snížení otevíracího napětí, může dojít ke snížení celkové účinnosti OLED zařízení. Poněvadž inkorporací nanočástic do aktivní vrstvy se zlepšil transport elektronů do aktivní vrstvy a dalo by se očekávat, že se tak zvýší i faktor  $\gamma$ , faktor  $\eta_{S/T}$  je také vyšší oproti neblendové aktivní vrstvě, díky vytvoření systému „host-guest“, je potřeba vzít do úvahy, že faktor  $\gamma$  je podíl zrekombinovaných nábojů vůči všem nábojům vstupujícím do aktivní vrstvy. Nicméně pokud zajistíme lepší transport elektronů do aktivní vrstvy a ponecháme stejný transport děr do aktivní vrstvy, bude v aktivní vrstvě přebytek elektronů, tím pádem i nosičů, které nezrekombinují, a v konečném důsledku nám faktor  $\gamma$  poklesne. Tím se i sní-

ží účinnost OLED zařízení a projeví se snížením intenzity EL. Navíc může oxid kovu působit i poměr S/T ve prospěch nežádoucích rekombinací tak, že působí jako zhasací koncentrátor excitovaných stavů [73]. Je proto nutné optimalizovat plnění nanočásticovým plnivem tak, aby výsledný efekt nebyl naopak horší než výchozí stav.



## 7 ZÁVĚR

Byla vypracována rešeršní studie na téma přípravy a charakterizace nanokompozitních tenkých vrstev s využitím v organické elektronice. Tato rešerše podává informace především o vodivých polymerech a materiálech, hojně využívaných v organické elektronice, dále pak o technologiích depozice těchto materiálů ve formě tenkých vrstev. V **Kapitole 1**, Podkapitole 1.6 je popsáno zařízení OLED a jeho další modifikace, jak vypadá, z jakých vrstev se skládá a jak funguje. V **Kapitole 2** je uveden výčet materiálů, které jsou vhodné pro konstrukci OLED a navíc které lze úspěšně modifikovat. Na základě rešerše a materiálových charakteristik byly definovány cíle, jež jsou uvedeny v **Kapitole 3**.

Praktická část diplomové práce pojednává o přípravě aktivních vrstev pro zařízení OLED, konstrukci samotných OLED zařízení a jejich charakterizaci. Postup práce, použité chemikálie a charakterizační metody jsou popsány v **Kapitole 4**. Výsledky jsou uvedeny v **Kapitole 5**, jejich diskuze je provedena v **Kapitole 6**.

Ze získaných výsledků během plnění cílů této práce lze provést shrnutí všech poznatků takto:

1. Byly úspěšně vybrány materiály pro přípravu nanokompozitů vhodných jako aktivní vrstva v OLED zařízení.
2. Z těchto nanokompozitů byly úspěšně připraveny OLED zařízení, která byla charakterizována.

Bylo zjištěno, že u aktivní vrstvy z MEH-PPV se výrazně sníží otevírací napětí po přidání nanočástic ZnO a emise světla ze zařízení se stává jasnější a homogennější v celé ploše zařízení. Po přidání částic do systému se ovšem urychluje degradace aktivní vrstvy, což se projeví zkrácením doby svícení na určité hladině intenzity luminiscence. Proto bylo stanoveno jako optimum množství ZnO v aktivní 12,5 hm.% vůči polymeru, přičemž byla degradace ještě únosná a už intenzita EL byla významně vysoká.

Naproti tomu u aktivní vrstvy tvořené blendem MEH-PPV/F8BT dochází jednak k výraznému zvýšení intenzity EL a navíc i doba svícení na dané intenzitní hladině se prodlužuje. Po přidání nanočástic do polymerního blendu pak intenzita EL mírně klesá, ale doba emise na dané intenzitní hladině se prodlužuje. Dalším důležitým fenoménem je další snížení otevíracího napětí až na 4 V, což je hodnota již velmi blízká diodám anorganickým.

Přínos práce je tedy v tom, že se podařilo připravit aktivní vrstvu z polymerního blendu a vytvořit v něm fungující „host-guest“ systém, což, jak bylo diskutováno výše, zvyšuje intenzitu EL a snižuje degradaci aktivní vrstvy. Navíc do tohoto systému byly inkorporovány nanočástice oxidu kovu a byl vytvořen nanokompozitní materiál, přičemž vlastnosti tohoto kompozitu se blíží anorganickým materiálům ve smyslu použití jako aktivní materiál v LED či OLED zařízeních.

Pro další výzkum a vývoj je potřeba se především zaměřit na další možnou stabilizaci aktivní vrstvy a prodlužování doby života. To by mohla umožnit práce v inertní atmosféře až po samotnou enkapsulaci zařízení.

Dále je také možné uvažovat o využití takových nanokompozitů v aktivních vrstvách u solárních panelů. Zde je ovšem nutné se zaměřit na červenou spektrální oblast a zajistit nevhodnou rekombinaci, ale snadnou separaci náboje.

Celkově má tato problematika velký potenciál a v dnešní době, kdy se anorganické materiály hojně nahrazují polymerními materiály, je téma nanokompozitních aktivních vrstev velmi aktuální.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ELECTRONICS. *Future of light: OLED's Place in the Spectrum* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://electronicsmaker.com/the-future-of-light>.
- [2] *Fluorescent (CFL) vs. Incandescent Bulbs: Comparison chart* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: [http://www.diffen.com/difference/Fluorescent\\_Bulbs\\_vs\\_Incandescent\\_Bulbs](http://www.diffen.com/difference/Fluorescent_Bulbs_vs_Incandescent_Bulbs).
- [3] SEDLÁK, Bedřich. *Elektřina a magnetismus*. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002, 632 s. ISBN 80-200-1004-1.
- [4] KATON, J.E. *Organic semiconducting polymers*, s. 1 – 188, 1968, Marcel Dekker INC, New York, ISBN 68-54854.
- [5] URBÁNEK, Pavel, Ivo KURITKA a Michal URBÁNEK. The Influence Of Thickness And Used Solvent On Luminescence And Photodegradation Of Polysilane Thin Films. In: *Nanocon 2011* [online]. Brno: TANGER Ltd., 2011, s. 94-100, ISBN 978-80-87294-27-7.
- [6] KUMAR, D. *Advances in Conductive Polymers*. Eur. Polym. J. 1998, č. 8, s. 1053-1060.
- [7] PFLEGER, J. Polymerní nanostruktury v optoelektronice, Článek ve sborníku, Akademie věd České republiky, 2006, s. 127-138.
- [8] GABRIELA, B., SHISHKANOVA, V., KRONĎÁK, m., ET AL. Potenciometrické senzory založené na vodivých polymerech: Příprava, mechanismus odezvy a aplikace, Chem. Listy 103, 2009, s. 795-799.
- [9] PROKEŠ, J., NEŠPUREK, S., STEJSKAL, J. Vodivé polymery, inteligentní materiály pro nové století, Časopis Vesmír 80, 2001, s. 35 – 38.
- [10] STENGER-SMITH, John D. *Intrinsically Electrically Conducting Polymers. Synthesis, Characterization and their Application*. Prog. Polym. Sci. 1998, č. 23, s. 57-79.
- [11] STEJSKAL, J. Polyanilin: vodivý polymer, Článek ve sborníku, Akademie věd České republiky, 2006, s. 173-182.
- [12] SHIRAKAWA, Hideki, Edwin J. LOUIS, Alan G. MACDIARMID, Chwan K. CHIANG a Alan J. HEEGER. Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH) x. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications* [online]. 1977, issue 16 [cit. 2015-03-05]. DOI: 10.1039/c39770000578.
- [13] NAVRÁTIL, J. *Optoelektronické vlastnosti organických polovodičů*. Brno, 2010, 7 s., Disertační práce na fakultě chemické VUT v Brně. Vedoucí disertační práce Martin Weiter.
- [14] GOTTWALD, T. *Vodivé polymery a jejich využití v superkondenzátorech*. Brno, 2010, 57 s., Diplomová práce na fakultě elektrotechniky a komunikační technologie VUT Brno. Vedoucí diplomové práce Petr Dvořák.
- [15] TRUONG, Nguyen Tam Nguyen, Chinh PARK a Jae Hak JUNG. Investigation of the morphology of an MEH-PPV/PCBM active layer and its application to bulk hetero-junction solar cell performance. *Journal of the Korean Physical Society*. 2012, vol. 60, is-

- sue 12, s. 2029-2033. DOI: 10.3938/jkps.60.2029. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.3938/jkps.60.2029>.
- [16] ALESHIN, A. N., I. P. SHCHERBAKOV, F. S. FEDICHKIN a P. E. GUSAKOV. Electrical and optical properties of light-emitting field-effect transistors based on MEH-PPV polymer composite films with ZnO nanoparticles. *Physics of the Solid State*. 2012, vol. 54, issue 12, s. 2508-2513. DOI: 10.1134/S1063783412120025. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1134/S1063783412120025>.
- [17] MUCUR, S., P., TUMAY, A., T. Sait Eren SAN a Emine TEKIN. Enhancing effects of nanoparticles on polymer-OLED performances. *Journal of Nanoparticle Research*. 2012, vol. 14, issue 10, s. -. DOI: 10.1007/s11051-012-1214-9. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11051-012-1214-9>.
- [18] HOUSECROFT, C., E., SHARPE, A. *Inorganic chemistry*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2005, xxxvi, 949 p. ISBN 0130399132.
- [19] SINGH, Yaduvir a Swarajya AGHNIHOTRI. *Semiconductor Devices*. New Delhi: International Publishing House, 2009. ISBN 978-93-80026-12-1.
- [20] OPAVA, Zdeněk. *Chemie kolem nás*. Praha: Albatros, 1986. ISBN 13-751-86.
- [21] CAMPBELL, S. A. Conducting Polymer Coatings in Electrochemical Technology: Part 1 – Synthesis and Fundamental Aspects. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 2007, č. 5, s. 237-244. DOI: 10.1179/174591907X229671.
- [22] ZHENG, Shijun, Stephen BARLOW, Chad RISKO, Tiffany L. KINNIBRUGH, Viktor N. KHRUSTALEV, Simon C. JONES, Mikhail Yu. ANTIPIN, Neil M. TUCKER, Tatiana V. TIMOFEEVA, Veaceslav COROPCEANU, Jean-Luc BRÉDAS a Seth R. MARDER. Isolation and Crystal Structures of Two Singlet Bis(Triarylamine) Dications with Nonquinoidal Geometries. *Journal of the American Chemical Society*. 2006, vol. 128, issue 6, s. 1812-1817. DOI: 10.1021/ja0541534. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja0541534>.
- [23] BREDAS, Jean Luc, G. Bryan STREET, Chad RISKO, Tiffany L. KINNIBRUGH, Viktor N. KHRUSTALEV, Simon C. JONES, Mikhail Yu. ANTIPIN, Neil M. TUCKER, Tatiana V. TIMOFEEVA, Veaceslav COROPCEANU, Jean-Luc BRÉDAS a Seth R. MARDER. Polarons, bipolarons, and solitons in conducting polymers. *Accounts of Chemical Research*. 1985, vol. 18, issue 10, s. 309-315. DOI: 10.1021/ar00118a005. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ar00118a005>.
- [24] AL-HAZMI, F. S. Electrical Conduction Mechanism in Chemical Vapour Deposition Grown Multi-Wall Carbon Nanotubes Film. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* [online]. 2015, vol. 15, issue 7, s. 5275-5279 [cit. 2015-04-13]. DOI: 10.1166/jnn.2015.9823.
- [25] MONZIR, Adbdel-Latif, *Molecular Luminescence Spectroscopy*. *Islamic University of Gaza* [online]. 2003 [cit. 2012-05-12].

- [26] Rheology and modeling of the spin coating process. *Microelectronics Reliability* [online]. 1977, vol. 16, issue 5 [cit. 2015-05-14]. DOI: 10.1016/0026-2714(77)90231-1.
- [27] HAN, H. LEE, S., NAHM, S., al. Correlation between Energy Transfer and Phase Separation in Emissive Polymer Blends, *Bull. Korean Chem. Soc.*, 1999, Volume 20, No. 9, p. 1093-1096.
- [28] MITZI, David B. *Solution processing of inorganic materials*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2009, xviii, 497 p., [4] p. of plates. ISBN 9780470406656.
- [29] D.B. Hall, R.D. Miller, and J.M. Torkelson, "Molecular Probe Techniques for Studying Diffusion and Relaxation in Thin and Ultrathin Polymer Films", *J. Polym. Sci.: Polym. Phys. Ed.* **35**, 2795 (1997).
- [30] LICARI, James J. *Coating materials for electronic applications: polymers, processes, reliability, testing*. Norwich: William Andrew Publishing, 2003, 531 s. ISBN 08-155-1492-1.
- [31] FARAG, A.A.M. a I.S. YAHIA. Structural, absorption and optical dispersion characteristics of rhodamine B thin films prepared by drop casting technique. *Optics Communications* [online]. 2010, vol. 283, issue 21, s. 4310-4317 [cit. 2015-03-10]. DOI: 10.1016/j.optcom.2010.06.081.
- [32] CAVALLINI, M. Status and perspectives in thin films and patterning of spin crossover compounds. *Physical Chemistry Chemical Physics* [online]. 2012, vol. 14, issue 34 [cit. 2015-03-11]. DOI: 10.1039/c2cp40879a.
- [33] MAYER, H. C. a R. KRECHETNIKOV. Landau-Levich flow visualization: Revealing the flow topology responsible for the film thickening phenomena. *Physics of Fluids* [online]. 2012, vol. 24, issue 5 [cit. 2015-03-10]. DOI: 10.1063/1.4703924.
- [34] SCHMIDT, H.; MENNIG, M. *Wet coating technologies for glass*. INM, Institut für Neue Materialien, Saarbrücken, Germany, 2000.
- [35] LIBRA, M: Vakuum – technologie moderní doby. *ELEKTRO*, 2003, č. 2, s. 8–10. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25484](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484).
- [36] KREBS, Frederik C. Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009, vol. 93, issue 4, s. 394-412. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.10.004.
- [37] LEACH, R. *The Printing ink manual*. 5th ed. /. New York: Blueprint, 1993, xxi, 993 p., [8] p. of plates. ISBN 09-489-0581-6.
- [38] CASTREJON-PITA, J. Rafael, W. R. S. BAXTER, J. MORGAN, S. TEMPLE, G. D. MARTIN, I. M. HUTCHINGS, Orasa TETIWAT a Magid IGBARIA. FUTURE, OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF INKJET TECHNOLOGIES. *Atomization and Sprays*. 2013, vol. 23, issue 6, s. 17-32. DOI: 10.4018/978-1-878289-60-5.ch002.

- [39] FANG, Mei. How Is Inkjet Printing Done?. [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: [http://www.science20.com/mei/how\\_inkjet\\_printing\\_done](http://www.science20.com/mei/how_inkjet_printing_done).
- [40] MCILROY, C., O.G. HARLEN a N.F. MORRISON. Modelling the jetting of dilute polymer solutions in drop-on-demand inkjet printing. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2013, vol. 201, s. 17-28. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2013.05.007.
- [41] DERBY, B. Inkjet printing ceramics: From drops to solid. *Journal of the European Ceramic Society*. 2011, vol. 31, issue 14, s. 2543-2550. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.01.016.
- [42] HOMER, Antoniadis. Overview of OLED Display Technology: Osram Optical Semiconductors. [online]. [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://www.ewh.ieee.org/soc/cpmt/presentations/cpmt0401a.pdf>.
- [43] WEBSTER, Howard. Better Displays with Organic Films: Scientific American. [online]. [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: [http://www.sciam.com/print\\_version.cfm?articleID=0003FCE7-2A46-1FFB-AA4683414B7F0000](http://www.sciam.com/print_version.cfm?articleID=0003FCE7-2A46-1FFB-AA4683414B7F0000).
- [44] TANG, C. W. a S. A. VANSLYKE. Organic electroluminescent diodes. *Applied Physics Letters*. 1987, vol. 51, issue 12, s. 913-. DOI: 10.1063/1.98799. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/51/12/10.1063/1.98799>.
- [45] GLOSCH, Von Oliver. *Synthese und Untersuchung von Chromophoren und Seitenkettenpolymeren mit Arylen-Vinyl-Segmenten*. Marburg: Tectum-Verl, 1999. ISBN 3828880274.
- [46] LEHNHARDT, Marcus, Thomas RIEDL, Torsten RABE a Wolfgang KOWALSKY. Room temperature lifetime of triplet excitons in fluorescent host/guest systems. *Organic Electronics*. 2011, vol. 12, issue 3, s. 486-491. DOI: 10.1016/j.orgel.2010.12.017. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1566119910004155>.
- [47] NEYTS K. and A. ULLAN NIETO, "Importance of scattering and absorption for the out-coupling efficiency in organic light-emitting devices," *J. Opt. Soc. Am. A* 23, 1201-1206 (2006)
- [48] WEBSTER, Howard. Better Displays with Organic Films: Scientific American. [online]. [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: [http://www.sciam.com/print\\_version.cfm?articleID=0003FCE7-2A46-1FFB-AA4683414B7F0000](http://www.sciam.com/print_version.cfm?articleID=0003FCE7-2A46-1FFB-AA4683414B7F0000)
- [49] FREUDENRICH, Craig. How OLEDs Work: Types of OLEDs: [online]. [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://electronics.howstuffworks.com/oled3.htm>.
- [50] HOMER, Antoniadis. Overview of OLED Display Technology: Osram Optical Semiconductors. [online]. [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://www.ewh.ieee.org/soc/cpmt/presentations/cpmt0401a.pdf>.

- [51] FELTON, Michael J. Thinner lighter better brighter: Today's Chemist at Work: [online]. [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/subscribe/journals/tcaw/10/i11/html/11felton.html>.
- [52] YANG, Chih-Jen, Chun-Liang LIN, Chung-Chih WU, Yung-Hui YEH, Chun-Cheng CHENG, Yen-Hsun KUO a Tai-Hong CHEN. High-contrast top-emitting organic light-emitting devices for active-matrix displays. *Applied Physics Letters* [online]. 2005, vol. 87, issue 14 [cit. 2015-03-15]. DOI: 10.1063/1.2081137.
- [53] TANG, C. W. a S. A. VANSLYKE. Organic electroluminescent diodes. *Applied Physics Letters* [online]. 1987, vol. 51, issue 12 [cit. 2015-03-15]. DOI: 10.1063/1.98799.
- [54] SONG, Wook, Mei MENG, You Hyun KIM, Chang-Bum MOON, Chul Gyu JHUN, Sang Youn LEE, Richard WOOD a Woo-Young KIM. High efficient and color stable WOLED using double white emissive layer. *Journal of Luminescence* [online]. 2012, vol. 132, issue 8, s. 2122-2125 [cit. 2015-03-15]. DOI: 10.1016/j.jlumin.2012.03.032.
- [55] REINEKE, Sebastian, LINDNER, Frank, SCHWARTZ, Gregor, SEIDLER, Nico, WALZER, Karsten, LÜSSEM, Björn, LEO, Karl. White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency. *Nature*. 2009-5-14, vol. 459, issue 7244, s. 234-238. DOI: 10.1038/nature08003.
- [56] WANG, Jun and Weizhi LI. Adjusting White OLEDs with Yellow Light Emission Phosphor Dye and Ultrathin NPB Layer Structure. *International Journal of Photoenergy* [online]. 2013, vol. 2013, s. 1-6 [cit. 2015-03-22]. DOI: 10.1155/2013/639843.
- [57] ADAMOVICH, Vadim I., Steven R. CORDERO, Peter I. DJUROVICH, Arnold TAMAYO, Mark E. THOMPSON, Brian W. D'ANDRADE a Stephen R. FORREST. New charge-carrier blocking materials for high efficiency OLEDs. *Organic Electronics*. 2003, vol. 4, 2-3, s. 77-87. DOI: 10.1016/j.orgel.2003.08.003.
- [58] JIN, Youngeup, Jaesung JEE, Kwanghyun KIM, Jinwoo KIM, Suhee SONG, Sung Heum PARK, Kwanghee LEE a Hongsuk SUH. Synthesis and electroluminescent properties of copolymers based on PPV with fluoro groups in vinylene units. *Polymer*. 2007, vol. 48, issue 6, s. 1541-1549. DOI: 10.1016/j.polymer.2007.01.060.
- [59] YANG, Chih-Jen, Chun-Liang LIN, Chung-Chih WU, Yung-Hui YEH, Chun-Cheng CHENG, Yen-Hsun KUO a Tai-Hong CHEN. High-contrast top-emitting organic light-emitting devices for active-matrix displays. *Applied Physics Letters* [online]. 2005, vol. 87, issue 14 [cit. 2015-03-15]. DOI: 10.1063/1.2081137.
- [60] SKOTHEIM, A., RENOLDS, J. Handbook of conducting polymers, Volume 4, 2007, Boca Raton: CRC Press, ISBN 978-1-4200-4358-7.
- [61] PALACIOS, Raquel, Pilar FORMENTÍN, Eugenia MARTÍNEZ-FERRERO, Josep FERRE-BORRULL, Josep PALLARÈS a Lluís F. MARSAL. F8BT nanopillars from porous anodic alumina. *Physica status solidi (a)* [online]. 2010, vol. 208, issue 6, s. 1422-1425 [cit. 2015-03-06]. DOI: 10.1002/pssa.201000131.

- [62] Poly[(9,9-di-n-octylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-(benzo[2,1,3]thiadiazol-4,8-diyl)]. SIGMA-ALDRICH CO. LLC. Sigma-Aldrich [online]. 2013 [cit. 2013-04-05].
- [63] CRISPIN, X., F. L. E. JAKOBSSON, A. CRISPIN, P. C. M. GRIM, P. ANDERSSON, A. VOLODIN, C. VAN HAESSENDONCK, M. VAN DER AUWERAER, W. R. SALANECK a M. BERGGREN. The Origin of the High Conductivity of Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-Poly(styrenesulfonate) (PEDOT-PSS) Plastic Electrodes. *Chemistry of Materials*. 2006, vol. 18, issue 18, s. 4354-4360. DOI: 10.1021/cm061032.
- [64] SAWAI, J. Quantitative evaluation of antibacterial activities of metallic oxide powders (ZnO, MgO and CaO) by conductimetric assay. *Journal of Microbiological Methods*. 2003, roč. 54, č. 2, s. 177-182. ISSN 01677012. DOI: 10.1016/S0167-7012(03)00037-X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016770120300037X>.
- [65] WANG, J. X., X. W. SUN, A. WEI, Y. LEI, X. P. CAI, C. M. LI a Z. L. DONG. Zinc oxide nanocomb biosensor for glucose detection. *Applied Physics Letters*. 2006, roč. 88, č. 23, s. 233106-. ISSN 00036951. DOI: 10.1063/1.2210078. Dostupné z: <http://link.aip.org/link/APPLAB/v88/i23/p233106/s1>.
- [66] KIM, Sunbo, Junhee JUNG, Youn-Jung LEE, Shihyun AHN, Shahzada Qamar HUSSAIN, Jinjoo PARK, Bong-Shik SONG, Sangmyeng HAN, Vinh Ai DAO, Jaehyeong LEE a Junsin YI. Role of double ITO/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer for high efficiency amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells. *Materials Research Bulletin*. 2014, vol. 58, s. 83-87. DOI: 10.1016/j.materresbull.2014.05.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025540814002608>.
- [67] ŠEVČÍK, J. Příprava a charakterizace nanokompozitních tenkých vrstev. Zlín, 2013, 40 s., Bakalářská práce na fakultě technologické UTB ve Zlíně. Vedoucí bakalářské práce Pavel Urbánek.
- [68] VLASENKO, N. A., Yu. V. KOPYTKO a V. S. PEKAR. Concentration and Field Dependences of Electroluminescence Decay Kinetics in ZnS: Mn Thin Film Structures. *Physica Status Solidi (a)* [online]. 1984, vol. 81, issue 2, s. 661-667 [cit. 2015-05-11]. DOI: 10.1002/pssa.2210810228.
- [69] KÖHLER, A. a H. BÄSSLER. 2009. Triplet states in organic semiconductors. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. **66**(4-6): 71-109. DOI: 10.1016/j.mser.2009.09.001. ISSN 0927796x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927796X09000886>.
- [70] FRIEND, R. H., R. W. GYMER, A. B. HOLMES, J. H. BURROUGHES, R. N. MARKS, C. TALIANI, D. D. C. BRADLEY, D. A. Dos SANTOS, J. L. BRDAS, et al. *Nature*. **397**(6715): 121-128. DOI: 10.1038/16393. ISSN 00280836. Dostupné také z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/16393>.
- [71] URBÁNEK, Pavel, Ivo KUŘITKA, Stanislav DANIŠ, Jana TOUŠKOVÁ a Jiří TOUŠEK. 2014. Thickness threshold of structural ordering in thin MEH-PPV films. *Polymer*. **55**(16):



- 4050-4056. DOI: 10.1016/j.polymer.2014.05.054. ISSN 00323861. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003238611400442X>.
- [72] ROMERO, B., B. ARREDONDO, A.L. ALVAREZ, R. MALLAVIA, A. SALINAS, X. QUINTANA a J.M. OTÓN. 2009. Influence of electrical operating conditions and active layer thickness on electroluminescence degradation in polyfluorene–phenylene based light emitting diodes. *Solid-State Electronics*. **53**(2): 211-217. DOI: 10.1016/j.sse.2008.11.005. ISSN 00381101. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038110108003778>.
- [73] *Physics of organic semiconductors*. 2nd completely new rev. ed. Editor Wolfgang Brütting, Chihaya Adachi. xxiii, 634 pages. ISBN 3527410538.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

LED	Světlo-emitující dioda
OLED	Organická světlo-emitující dioda
PLED	Polymerní světlo-emitující dioda
PAni	Polyanilín
PPV	Poly(para-fenylene vinylen)
FET	Polem řízený tranzistor
PVD	Depozice z plynné fáze
$T_v$	Teplota varu
CIJ	Kontinuální inkjetový tisk
DOD	Tisk „Drop on demand“
HD	Vysoké rozlišení
LCD	Zařízení využívající technologii tekutých krystalů
ITO	Směs oxidu inditého a cínitého
PMOLED	Organická světlo-emitující dioda s pasivní maticí
AMOLED	Organická světlo-emitující dioda s aktivní maticí
TOLED	Transparentní organická světlo-emitující dioda
FOLED	Flexibilní organická světlo-emitující dioda
WOLED	Bílá světlo-emitující dioda
PDA	Osobní digitální pomocník
RGB	Barevná sestava (červená, zelená, modrá)
MEH-PPV	Poly [2-metoxy-5- (2-etyl-hexyloxy)-1,4-fenylene-vinylen]
THF	Tetrahydrofuran
$\text{CHCl}_3$	Chloroform
ROMP	Polymerace otevřením kruhu

---

PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Polystyrene sulfonate
ZnO (NP)	Nanočásticový oxid zinečnatý
UV záření	Ultrafialové záření
EL	Elektroluminiscence
LUMO	Nejnižší neobsazený molekulový orbital
TTA	Rozpad tripletových stavů
RPM	Otáček za minutu
FRET	Försterův energetický přenos
HOVB	Nejvyšší obsazená hladina valenčního pásu
Blend	Směs
F8BT	Poly[(9,9-Di-N-Octylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-(benzo[2,1,3]thiadiazol-4,8-diyl)]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Významní zástupci vodivých polymerů, překresleno podle [9] .....	13
Obrázek 2 – Měrná elektrická vodivost vybraných zástupců, překresleno podle [11] .....	14
Obrázek 3 – Aplikační využití vodivých polymerů .....	15
Obrázek 4 – Pásový model, překresleno podle [20] .....	16
Obrázek 5 – Jabloňského diagram zobrazující elektronové přechody a jejich relaxace, překresleno podle [25] .....	18
Obrázek 6 – Schéma procesu spin coating, překresleno podle [30] .....	20
Obrázek 7 – Schéma procesu drop casting, překresleno podle [32] .....	21
Obrázek 8 – Schéma procesu dip coating, překresleno podle [34] .....	22
Obrázek 9 – Schéma kontinuální tiskové hlavy, překresleno podle [39] .....	23
Obrázek 10 – schéma tiskové hlavy „drop on demand“, překresleno podle [39] .....	24
Obrázek 11 – schématické zobrazení jednovrstvé OLED, překresleno podle [45] .....	25
Obrázek 12 – Schématické zobrazení principu elektroluminiscence v OLED – vazeb, překresleno podle [45] .....	26
Obrázek 13 – Schéma PMOLED, překresleno podle [49] .....	27
Obrázek 14 – Schéma AMOLED, překresleno podle [49] .....	28
Obrázek 15 – Schéma TOLED, překresleno podle [49] .....	29
Obrázek 16 – Schéma TOELED, překresleno podle [49] .....	29
Obrázek 17 – Strukturní vzorec MEH-PPV, překresleno podle [57] .....	33
Obrázek 18 - Schematický vzorec F8BT, překresleno podle [62] .....	34
Obrázek 19 – Schématický vzorec PEDOT:PSS, překresleno dle [63] .....	35
Obrázek 20 – Připravené roztoky .....	40
Obrázek 21 – Schéma připravených diod .....	41
Obrázek 22 – připravené polymerní blendy .....	43
Obrázek 23 – Schéma připravených diod .....	43
Obrázek 24 – a) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV b) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	45
Obrázek 25 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 7,5 hm% B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	45
Obrázek 26 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 10 hm% B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	46

Obrázek 27 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 12,5 hm% B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	46
Obrázek 28 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 15 hm% B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	47
Obrázek 29 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 20 hm% B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	47
Obrázek 30 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 12,5 hm% (s tloušťkou emisní vrstvy - 250 nm) B) Volt-ampérová charakteristika pro tutěž diodu .....	48
Obrázek 31 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 12,5 hm% (s tloušťkou emisní vrstvy - 190 nm) B) Volt-ampérová charakteristika pro tutěž diodu .....	48
Obrázek 32 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/ZnO 12,5 hm% (s tloušťkou emisní vrstvy - 150 nm) B) Volt-ampérová charakteristika pro tutěž diodu .....	49
Obrázek 33 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 61 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	50
Obrázek 34 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 55 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	51
Obrázek 35 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 45 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	51
Obrázek 36 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 63 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	52
Obrázek 37 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 58 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	52
Obrázek 38 - A) Elektroluminiscenční spektra diody MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 45 nm) B) Pokles maximálních hodnot elektroluminiscence v čase pro tutěž diodu .....	53

Obrázek 39 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 61 nm).....	53
Obrázek 40 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 55 nm).....	54
Obrázek 41 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/F8BT (s tloušťkou emisní vrstvy - 45 nm).....	54
Obrázek 42 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/ F8BT + 12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 63 nm).....	55
Obrázek 43 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/ F8BT + 12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 58 nm).....	55
Obrázek 44 - Volt-ampérová charakteristika pro diodu MEH-PPV/ F8BT + 12,5 hm% ZnO (s tloušťkou emisní vrstvy - 45 nm).....	56

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 – navážky nanočásticového ZnO .....	40
Tabulka 2 – Podmínky při depozici .....	41
Tabulka 3 – Výsledky lineární regrese pro plněné systémy.....	57
Tabulka 4 – Naměřené hodnoty tloušťek emisních vrstev OLED systémů (MEH-PPV/12,5 hm% ZnO) a jim odpovídající intenzita EL.....	60
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty tloušťek emisních vrstev OLED systémů (MEH-PPV/12,5 hm% ZnO) a jim odpovídající otevírací napětí .....	60
Tabulka 6 – Naměřené hodnoty tloušťek emisních vrstev OLED systémů (MEH-PPV/F8BT), jakožto i intenzity EL a otevíracího napětí.....	62
Tabulka 7 - Naměřené hodnoty tloušťek emisních vrstev OLED systémů (MEH-PPV/F8BT/12,5 hm% ZnO), jakožto i intenzity EL a otevíracího napětí.....	63

**SEZNAM ROVNIC**

(1) Spin coating model pro predikci tloušťky vrstvy .....	20
(2) Dip coating model pro predikci tloušťky vrstvy .....	21
(3) Matematický vztah pro externí účinnost OLED zařízení.....	63