

# **Příprava, charakterizace a použití nanokompozitních vrstev v elektronice**

Bc. Lukáš Petřkovský

---

Diplomová práce  
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Petřkovský**  
Osobní číslo: **T20788**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Příprava, charakterizace a použití nanokompozitních vrstev v elektronice**

## Zásady pro vypracování

Diplomová práce se v teoretické části zabývá studiem vývoje a organizace struktury v tenkých nanokompozitních vrstvách. V praktické části se diplomová práce zabývá přípravou tenkých nanokompozitních vrstev a studiem jejich fyzikálních vlastností, tj. studiem optických, optoelektronických a elektrických vlastností a jejich využitím v elektronice.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Skoda, D., Urbanek, P., Sevcik, J., Munster, L., Antos, J., & Kuritka, I. (2018). Microwave-assisted synthesis of colloidal ZnO nanocrystals and their utilization in improving polymer light emitting diodes efficiency. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 232-235, 22-32.
2. Jamatia, T., Skoda, D., Urbanek, P., Sevcik, J., Maslik, J., Munster, L., Kalina, L., Kuritka, I.; Microwave-assisted synthesis of Fe<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O nanoparticles for use in MEH-PPV nanocomposites and their application in polymer light-emitting diodes. (2019) *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30 (12), pp. 11269-11281.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Urbánek, Ph.D.**  
Centrum polymerních systémů

Datum zadání diplomové práce: **31. prosince 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

L.S.

---

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

---

**doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 21. února 2022

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům; pokud je výstupem diplomové 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.

### **Prohlašuji,**

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá přípravou a charakteristikou tenkovrstvých polymerních světlo-emitujících diod, ve kterých slouží jako emisní vrstva materiál na bázi polymerního nanokompozitu. Cílem práce je zjistit, zdali lze inkorporací nanočástic do polymerní matrice dosáhnout zlepšení vlastností těchto tenkovrstvých elektronických zařízení. Tenké vrstvy jsou připraveny z roztoku a k přípravě je využito metody rotačního nanášení. K jejich charakterizaci je využito metod profilometrie, UV/VIS spektrofotometrie, fotoluminiscenční spektrofotometrie a elipsometrie. Samotné diody jsou charakterizovány pomocí měření voltampérových charakteristik a elektroluminiscenční spektra jsou měřena na spektrometru s integrační koulí. Výsledkem této diplomové práce jsou poznatky o polymerních materiálech a nanoplňvech pro praktické využití v tenkovrstvých polymerních elektronických zařízeních.

Klíčová slova: polymerní elektronika, nanokompozit, nanočástice, dioda, tenké vrstvy

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the preparation and characterization of thin-film polymer light emitting diodes, in which a material based on a polymer nanocomposite is used as an emission layer. The aim of this work is to determine whether the properties of these thin-film electronic devices can be improved by incorporating nanoparticles into the polymer matrix. Thin films are prepared from solution and spin-coating method is used for their preparation. Profilometry, UV/VIS spectrophotometry, photoluminescence spectrophotometry and ellipsometry methods are used for characterization of thin films. The final diodes are characterized by a volt-ampere characteristic and their spectra are measured by a spectrometer equipped by integrating sphere. The conclusions of this diploma thesis are experience and knowledge about the use of selected materials and nanofillers for the practical use of thin-film electronic devices based on polymers.

Keywords: polymer electronics, nanocomposite, nanoparticles, diode, thin layers

V prvé řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Pavlu Urbánkovi Ph.D. za odborné vedení a skvělý přístup, dále pak za pomoc, trpělivost a rady při zpracování této práce. Také bych chtěl poděkovat doc. Ing. et Ing. Ivu Kuřítkoví Ph.D. et Ph.D. za možnost podílet se na výzkumu ve výzkumné skupině Nanomateriály a pokročilé technologie, celé této výzkumné skupině jsem pak vděčný za vytvoření příjemného prostředí v průběhu zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Davidu Škodovi Ph.D. za pomoc při přípravě a charakterizaci nanočástic oxidu zinečnatého. Velký dík patří také mé rodině, přítelkyni a přátelům za podporu, ohleduplnost a důvěru ve mě vloženou při studiích.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 VODIVÉ POLYMERY</b> .....	<b>12</b>
1.1 MECHANISMUS ELEKTRICKÉ VODIVOSTI U POLYMERŮ .....	13
1.1.1 Molekulární struktura vodivých polymerů.....	14
1.1.2 Dopování .....	15
<b>2 OLED</b> .....	<b>16</b>
2.1 STRUKTURA A PRINCIP FUNKCE OLED .....	17
2.2 PŘÍPRAVA OLED .....	18
2.2.1 Vakuové tepelné napařování (VTE-Vacuum thermal evaporation).....	18
2.2.2 Spin coating (rotační nanášení).....	19
2.2.3 Ink-jetový tisk .....	20
2.2.4 Enkapsulace OLED.....	21
2.3 TYPY OLED.....	22
2.3.1 OLED s pasivní maticí (Passive Matrix - PMOLED) .....	22
2.3.2 OLED s aktivní maticí (Active Matrix OLED - AMOLED).....	23
2.3.3 Transparentní OLED (Transparent OLED - TOLED).....	24
2.3.4 Ohebné OLED (Foldable OLED - FOLED) .....	24
2.3.5 Bílá OLED (White OLED – WOLED).....	24
<b>3 POLYMERNÍ NANOKOMPOZITY</b> .....	<b>26</b>
3.1 POZITIVNÍ VLIV NANOČÁSTIC NA OLED .....	27
3.1.1 Zlepšení prostupu náboje .....	27
3.1.2 Rozptyl světla.....	27
3.1.3 Lokalizovaná povrchová plazmonová rezonance .....	28
3.2 POLYMERNÍ NANOKOMPOZITY S OXIDY KOVŮ.....	28
3.2.1 ZnO polymerní nanokompozity .....	29
3.2.2 SiO <sub>2</sub> polymerní nanokompozity .....	30
<b>4 METODY ANALÝZY</b> .....	<b>31</b>
4.1 UV/VIS SPEKTROSKOPIE.....	31
4.2 FOTOLUMINISCENČNÍ SPEKTROSKOPIE .....	32
4.3 KONTAKTNÍ PROFILOMETRIE .....	33
4.4 ELIPSOMETRIE .....	34
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>36</b>
<b>5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>37</b>
5.1 POUŽITÉ CHEMIKÁLIE A PŘÍSLUŠENSTVÍ .....	37
5.1.1 PTMSDPA .....	37
5.1.2 PF-DMB.....	38

5.1.3	Nanoplnivo .....	39
5.2	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ .....	39
5.3	PŘÍPRAVA POLYMERNÍCH ROZTOKŮ .....	39
5.4	PŘÍPRAVA TENKÝCH VRSTEV .....	40
5.5	CHARAKTERIZACE TENKÝCH VRSTEV .....	41
5.6	PŘÍPRAVA PLED ZAŘÍZENÍ .....	43
5.7	CHARAKTERIZACE PLED ZAŘÍZENÍ .....	44
<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>46</b>
6.1	CHARAKTERIZACE TENKÝCH VRSTEV .....	46
6.1.1	UV/VIS absorpční spektra .....	46
6.1.2	Elipsometrie .....	47
6.1.3	Fotoluminiscenční spektra .....	48
6.1.4	Degradační měření fotoluminiscenčních spekter .....	50
6.1.5	Profilometrie .....	51
6.2	CHARAKTERIZACE PLED ZAŘÍZENÍ .....	52
6.2.1	PLED na bázi PTMSDPA .....	52
6.2.2	PLED na bázi PF-DMB .....	55
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>75</b>



## ÚVOD

Polymerní materiály a technologie jejich zpracování zažily v posledních desetiletích značný rozvoj napříč všemi různými průmyslovými odvětvími. Dlouhou dobu byly polymerní materiály považovány za izolanty, to se však změnilo v roce 1977 přípravou prvního elektricky vodivého polymeru, čehož bylo dosaženo takzvaným dopováním polyacetyleny. [1] Tento objev tak otevřel zcela novou cestu uplatnění polymerních materiálů, tedy v oblasti polymerní elektroniky.

Polymerní elektronika je neustále se rozvíjející technologie, která se věnuje vývoji elektronických zařízení s využitím elektricky vodivých a polovodivých organických materiálů, zejména tedy organických polymerů.

Téma polymerní elektroniky je velice aktuální, jelikož se neustále hledají způsoby, jak vyrábět elektronická zařízení s velice dobrými parametry ale zároveň s ohledem na cenu, jednoduchost výrobního procesu a také životní prostředí. Polymerní materiály mohou sloužit jako aktivní část například v solárních článcích, tranzistorech a polymerních světlo-emitujících diodách. [2], [3]

Polymerní světlo-emitující diody (PLED) jsou tenkovrstvá zařízení, ve kterých se jako emisní vrstva využívají polymerní materiály a nacházejí uplatnění ve výrobě displejů. Oproti široce používaným LED a LCD displejům mohou být PLED displeje tenčí a lehčí. Nabízejí také možnost výroby ohebných displejů, mezi jejich další výhody pak patří větší jas a úhel pozorování. K nevýhodám však patří obecně snížená odolnost polymerních materiálů vůči degradaci vlivem kyslíku a vzdušné vlhkosti. [3]

V dnešní době jsou již displeje na bázi polymerních anebo obecně organických materiálů velmi rozšířené a lze se s nimi setkat v chytrých telefonech, noteboocích, monitorech a také televizorech.

K dosažení požadovaných vlastností PLED zařízení se mimo jiné využívají mnohvrstevnaté struktury, jejichž příprava je mnohdy velice náročná. [4] Jednodušší cestou může být použití emisní vrstvy na bázi polymerního nanokompozitu, kdy vhodně zvolená nanočásticová plniva ve spojení s vhodnou polymerní maticí mohou částečně nahradit funkci jednotlivých vrstev v těchto zařízeních. Cílem této práce je tedy příprava a charakterizace tenkovrstvých PLED zařízení s emisní vrstvou na bázi polymerních materiálů PTMSDPA a PF-DMB, a zjistit, zda inkorporací zvolených nanočástic (ZnO a SiO<sub>2</sub>) do těchto polymerních matic dochází ke zlepšení pozorovaných vlastností. Zajímavý je také fakt, že přípravou

polymerních světlo-emitujících diod ať už čistě na bázi těchto polymerních materiálů, a nebo v kombinaci s vybranými nanoplňivy se ještě nikdo nezabýval. Tato diplomová práce je proto přínosná i v tom ohledu, zdali jsou zvolené materiály použitelné v této oblasti elektroniky.

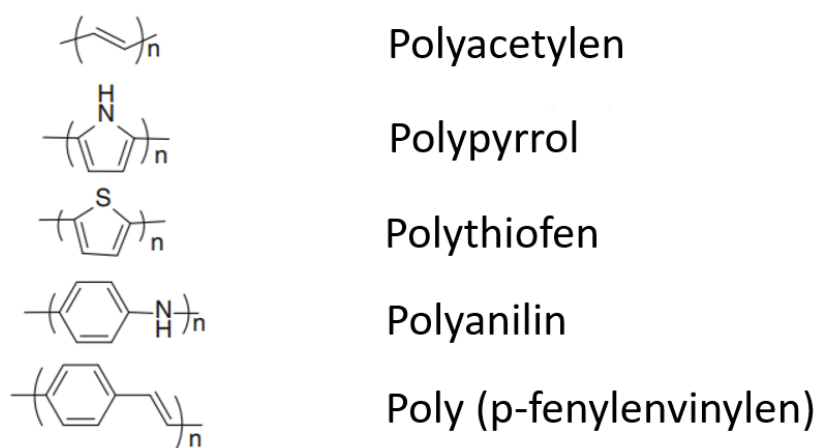
Diplomová práce je členěna na teoretickou část, v jejíž první kapitole je pozornost věnována vodivým polymerům a mechanismu elektrické vodivosti v polymerních materiálech. Následující kapitola se již zabývá popisem a také principem funkce samotného OLED zařízení, přípravou těchto zařízení a také jejich jednotlivým typům. Ve třetí kapitole jsou popsány polymerní nanokompozity a také pozitivní vliv nanočásticových plniv na OLED zařízení. V poslední kapitole teoretické části jsou vysvětleny metody analýzy použité v praktické části diplomové práce. Praktická část popisuje přípravu a charakterizaci jednak tenkých vrstev z vybraných polymerů a nanočásticových plniv a také přípravu PLED zařízení. Dosažené výsledky jsou prezentovány a diskutovány v šesté kapitole. V Závěru práce jsou pak všechny dosažené výsledky strukturovaně sumarizovány.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 VODIVÉ POLYMERY

Polymery jsou obecně materiály, jejichž struktura je složena z velkého počtu malých, opakujících se stavebních jednotek, kterým se říká monomery. [5] Mezi výhody polymerů patří jejich mechanické vlastnosti, nízká cena a jednoduchá zpracovatelnost. Není proto divu, že se s nimi denně můžeme setkat napříč různými průmyslovými odvětvími. Polymerní materiály byly dlouhou dobu považovány za elektrické izolanty, to se ale změnilo v roce 1977, kdy Shirakawa a kolektiv zjistili, že dopováním polyacetyleny dochází ke zvýšení elektrické vodivosti z původní hodnoty  $10^{-6} \text{ S.cm}^{-1}$  až na  $10^5 \text{ S.cm}^{-1}$ . Za tento objev byli v roce 2000 oceněni Nobelovou cenou za chemii. Nedlouho po objevu elektrické vodivosti polyacetyleny byly vyvinuty stabilnější vodivé polymery, mezi které patří např. polypyrol, polyanilin a polythiofen. V roce 1963 byly poprvé, avšak za velmi vysokých napětí, pozorovány elektroluminiscenční vlastnosti u organického materiálu, a byla tím tak otevřena cesta k vývoji zcela nových organických světlo-emitujících diod. Podstatou elektrické vodivosti u polymerů je přítomnost konjugovaného systému vazeb a také přítomnost nosičů náboje, které polymer může získat např. již zmíněným dopováním. [1], [6], [7]

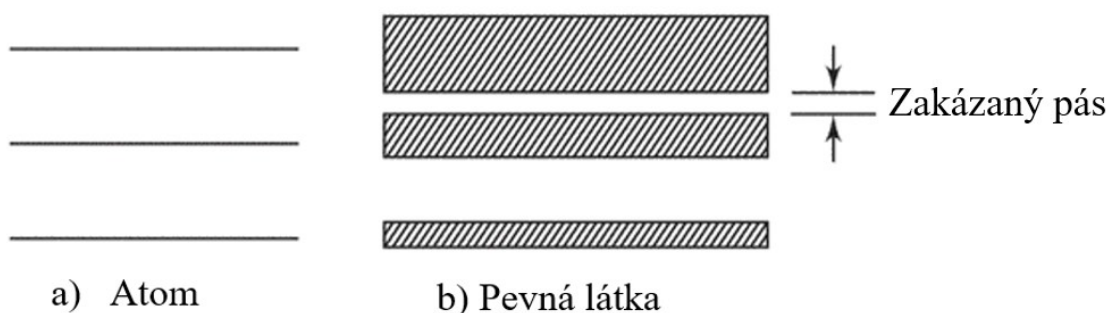
Vodivé polymery jsou díky svým vlastnostem vhodnými kandidáty pro výrobu organických světlo-emitujících diod, solárních článků, senzorů a organických kondenzátorů, protože jejich použití skýtá značné výhody, které tkví zejména v méně nákladné, jednodušší a ekologicky šetrnější výrobě. [8]



Obrázek 1 Příklady vodivých polymerů

## 1.1 Mechanismus elektrické vodivosti u polymerů

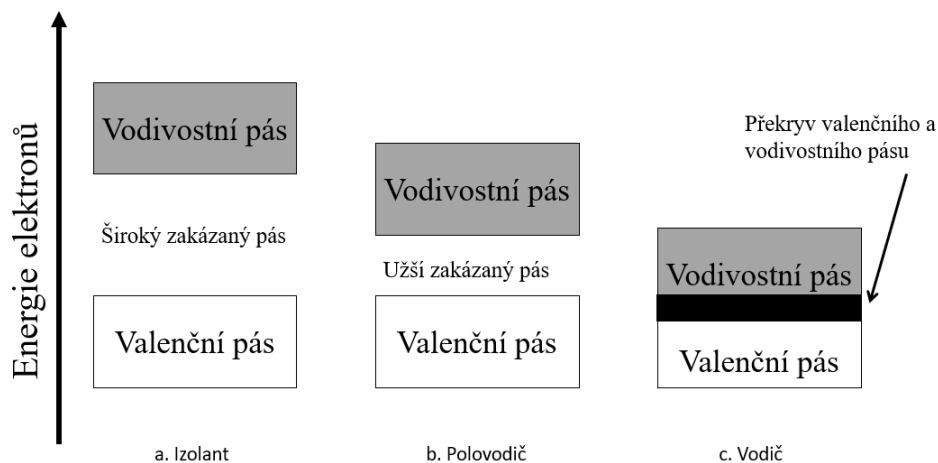
Elektrická vodivost se běžně popisuje pásovou teorií. Valenční elektrony v atomech obsazují jednotlivé energetické hladiny (Obrázek 2a), v krystalické pevné látce se však energetické hladiny kvůli interakcím atomů vlivem překrytí atomových orbitalů spojí v energetické pásy (Obrázek 2b). [9]



Obrázek 2 a) Energetické hladiny v atomu, b) Energetické pásy v molekule; dle [9]

Nejvýše zaplněný pás je nazýván valenční pás, nejnižší nezaplňený pak vodivostní pás. Mezi těmito dvěma pásy se nachází zakázaný pás, který nemůže být obsazen žádným elektronem. Hodnota zakázaného pásu představuje energetickou bariéru, po jejímž překročení se mohou elektrony z valenčního pásu dostat do pásu vodivostního. O tom, zdali je materiál elektricky vodivý rozhoduje právě to, jestli se elektrony vyskytují ve vodivostním pásu. Podle schopnosti vést elektrický proud můžeme pevné látky rozdělit na vodiče, izolanty a polovodiče (Obrázek 3). U vodičů dochází k překryvu valenčního a vodivostního pásu a z toho důvodu mají nulovou hodnotu zakázaného pásu. U izolantů jsou elektrony ve valenčním pásu odděleny od vodivostního širokým zakázaným pásem, kdežto u polovodičů je zakázaný pás užší a dodáním malého množství energie může dojít k přesunu elektronů do vodivostního pásu, čehož se využívá u polovodičových součástek. [10]

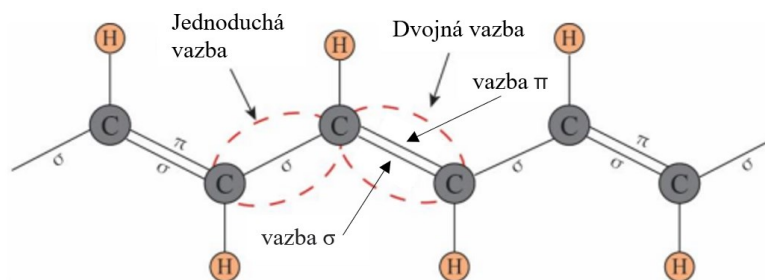
U většiny polymerních materiálů je zcela zaplněný valenční pás a zcela prázdný pás vodivostní a tyto pásy jsou od sebe vzdáleny širokým zakázaným pásmem, patří tedy mezi izolanty. Situace je ovšem odlišná u konjugovaných polymerů, které mají díky své molekulární struktuře užší zakázané pásmo. Dopováním konjugovaných polymerů pak lze změnit jejich pásovou strukturu odebráním elektronů z valenční vrstvy, anebo přidáním elektronů do vodivostního pásu. [11]



Obrázek 3 Pásová struktura - a) vodiče, b) polovodiče, c) izolátoru; překresleno dle [10]

### 1.1.1 Molekulární struktura vodivých polymerů

Pásová teorie však zcela přesně nepopisuje, proč vodivé polymery, jakožto organické látky, vedou elektrický proud. Mnoho studií se zabývalo vodivostí těchto materiálů na molekulární úrovni. Bylo zjištěno, že pro vodivost v polymerních materiálech z hlediska molekulární struktury je zcela zásadní přítomnost konjugovaného systému dvojných vazeb, jež je znázorněn na řetězci polyacetyleny na Obrázku 4. Jak dvojná, tak jednoduchá vazba je tvořena lokalizovanou sigma vazbou, která tvoří silnou chemickou vazbu mezi jednotlivými atomy uhlíku. Každá dvojná vazba je navíc tvořena ještě lokalizovanou pí vazbou, která je oproti vazbě sigma slabší. Díky přítomnosti konjugovaného systému dvojných vazeb se orbitály  $p_z$  v řetězci pí vazeb nepřetržitě po celé délce řetězce překrývají, a proto se po něm elektrony mohou pohybovat a mohou tedy vést elektrický proud. Nelze však říci, že pouze díky přítomnosti konjugovaných dvojných vazeb se polymerní materiály stávají vysoce vodivými. Důležitým krokem k získání vysoce elektricky vodivého polymeru je takzvané dopování, které do struktury vnáší další potenciální nosiče náboje. [12]



Obrázek 4 Molekulární struktura polyacetyleny; dle [12]

### 1.1.2 Dopování

Dopování je proces vytvoření nositele elektrického náboje zavedením nízkomolekulárních látek. Dopování vodivých polymerů je velmi podobné procesu dopování anorganických polovodičů, u kterých se koncentrace dopantů pohybuje v jednotkách částic na milion (ppm), kdežto u vodivých polymerů může dopant tvořit až 50 hmotnostních procent celkového produktu. [13], [14] Při dopování vodivých polymerů jsou elektrony buďto odebrány z nejvyššího obsazeného molekulárního orbitalu valenčního pásu (oxidace neboli p-dopování) anebo přesunuty do nejnižšího neobsazeného molekulárního orbitalu vodivostního pásu (redukce neboli n-dopování). Používanějším způsobem však bývá p-dopování, jelikož n-dopované polymery jsou velmi nestabilní. V důsledku oxidace, potažmo redukce vznikají v polymerním řetězci nosiče náboje ve formě polaronů (radikální ionty), bipolaronů nebo solitonů. Mechanismus přenosu náboje je pravděpodobně více podobný tomu, který se uskutečňuje v amorfních polovodičích, označovaný jako hopping, než tomu který se uskutečňuje v krystalických polovodičích. Vodivé polymery je možné rozdělit na degenerované a nedegenerované v závislosti na jejich vazebných strukturách v základním stavu. Degenerované polymery nabývají dvou identických geometrických struktur v základním stavu, naopak nedegenerované polymery nabývají rozdílných struktur s rozdílnými hodnotami energií v základním stavu. V degenerovaných polymerech, například v polyacetyleny, hrají roli nosičů náboje solitony. Polarony a bipolarony mohou sloužit jako nosiče nábojů v degenerovaných i nedegenerovaných polymerech, například v polypyrrolu a polythiofenu. [14] [15]

## 2 OLED

Organické světlo emitující diody (OLED z anglického organic light emitting diode) jsou tenkovrstvé světlo emitující diody u nichž je elektroluminiscenční vrstva tvořená organickou složkou, jež emituje světlo při aplikaci elektrického proudu. OLED pod sebe zahrnuje i podskupinu zařízení, kde je aktivní vrstva na bázi polymerního materiálu, taková zařízení bývají označována jako PLED (z anglického polymer light emitting diode). Pokud se dále hovoří o OLED, jsou současně myšlena i zařízení PLED. Historie OLED sahá do roku 1987, kdy firma Eastman Kodak představila první zařízení tohoto typu, které fungovalo za poměrně nízkých napětí, a otevřela tím tak zcela novou cestu výzkumu v oblasti displejů a osvětlení. [16]

Díky svým unikátním vlastnostem, mezi které patří úspora energie, vysoká účinnost, široký pozorovací úhel, rychlá odezva, vysoký kontrast a uniformita barev, se momentálně OLED technologie nachází ve fázi, kdy se mohou stát dominantní v oblasti výroby vysoce kvalitních plošných displejů a také v oblasti osvětlení. OLED technologie nabízí také nové možnosti výroby, jelikož mohou být vyráběny na ohebných a roztažitelných substrátech. Tenkost, pružnost a mechanická odolnost při ohýbání a kroucení dovoluje, aby bylo možné tuto technologii použít pro nositelnou elektroniku, biomedicínská zařízení a robotiku. Trh s OLED displeji zažívá rapidní nárůst a to proto, že tato technologie je schopna konkurovat běžně používaným technologiím (zejména LCD displejům) v oblasti chytrých telefonů, tabletů, počítačových monitorů, televizorů, head-up displejů a tak dále. [17] Aktuálně největší vyrobený televizor na bázi OLED displeje s 97 palci, 4K rozlišením a pořizovací cenou okolo 80000 dolarů představila firma LG na začátku roku 2022. [18]

Díky nepřetržitému vývoji se OLED technologie neustále vylepšují zejména z hlediska výkonu a životnosti a není proto divu, že se již s OLED displeji můžeme v některých konkrétních aplikacích setkat. Přes všechnu snahu však OLED technologie trpí stále některými nedostatky, mezi které patří právě kratší životnost, jež je dána citlivostí organických materiálů vůči vzdušnému kyslíku a vlhkosti. Kvůli této citlivosti organických materiálů vůči vzduchu a vzdušné vlhkosti je pro výrobu vyžadováno velmi specifické prostředí, které samozřejmě momentálně zvyšuje cenu těchto zařízení. [17] Mezi další potíží patří zapouzdření diody, o kterém bude uvedena samostatná kapitola.



## 2.1 Struktura a princip funkce OLED

Nejjednodušší architektura organických-světlo emitujících diod spočívá v použití pouze jedné aktivní vrstvy (Obrázek 5a). Jednovrstvé OLED se typicky skládají z kovové katody (Ca, Al, Mg, Ba), organické emitující vrstvy a transparentní anody (většinou ITO).

V tomto jednoduchém uspořádání slouží organický polovodičový materiál jako emititor a zároveň jako nosič nábojů. Po přiložení elektrického napětí jsou elektrony z katody injektovány do nejnižšího neobsazeného molekulového orbitalu organické vrstvy a anoda zároveň dodává do tohoto systému kladné díry. Záporně nabitě elektrony a kladné díry se pohybují aktivní vrstvou a dochází k rekombinaci, čímž vzniká pár elektron-díra nazývaný také jako exciton. Ten je schopen zrelaxovat do základního stavu, a přitom uvolnit energii v podobě fotonu (viditelného světla). Tomuto jevu se říká elektroluminiscence a je základním funkčním principem organických světlo-emitujících diod. [16]

Účinnost OLED zařízení (vnější kvantová účinnost,  $\eta_{EQE}$ ) může být popsána následující rovnicí:

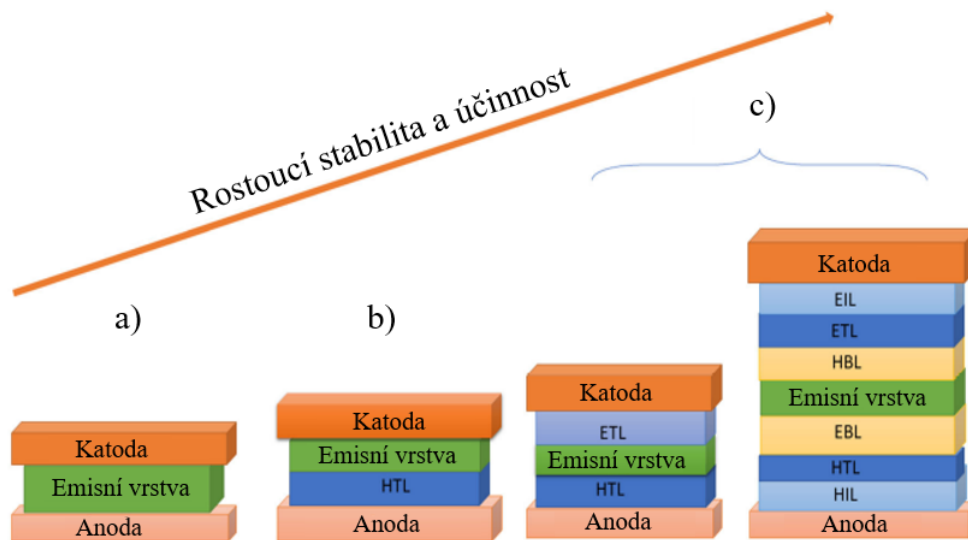
$$\eta_{EQE} = \gamma \cdot \eta_{\frac{S}{T}} \cdot q_{eff} \cdot \eta_{out} \quad (1)$$

kde  $\gamma$  vyjadřuje, zda jsou náboje v rovnováze;  $\eta_{\frac{S}{T}}$  je poměr singletových a tripletových excitačních stavů;  $q_{eff}$  vyjadřuje účinnost excitonů přispívající k radiační rekombinaci;  $\eta_{out}$  udává počet vyzářených fotonů. [19]

Za účelem zvýšení účinnosti a stability jsou vyvíjeny diody buďto s dvouvrstevnatou (Obrázek 5b) anebo mnohovrstevnatou architekturou (Obrázek 5c). Jednotlivé vrstvy a jejich funkce:

- a) ETL – electron transporting layer. Hlavním úkolem ETL vrstvy je usnadnění přenosu elektronů z katody k emitující organické vrstvě. Pro tuto vrstvu jsou vhodné materiály s vysokou elektronovou afinitou a vysokým ionizačním potenciálem.
- b) HTL – hole transporting layer. Úkolem HTL vrstvy je přenos kladných děr z anody k emitující organické vrstvě, přičemž vhodné jsou materiály s nízkými ionizačními potenciály a nízkými elektronovými afinitami.
- c) EIL – electron injection layer a HIL – hole injection layer. Tyto vrstvy jsou přidávány za účelem snížení otevíracího napětí.

- d) HBL – hole block layer a EBL – electron block layer. Brání transportu kladných děr směrem ke katodě potažmo transportu elektronů směrem k anodě. Zvyšují počet vzniklých excitonů a tím pádem zvyšují účinnost. [20] [4]



Obrázek 5 Různé architektury organických světlo-emitujících diod – a) jednovrstvá architektura, b) dvojevrstvá architektura, c) mnohovrstvá architektura; dle [4]

Důležitým parametrem světlo-emitujících diod je takzvané otevírací napětí. Otevírací napětí definuje, jaké množství napětí je zapotřebí k tomu, aby proud snadno protékal skrz diodu. Hodnota otevíracího napětí je dána architekturou a použitými materiály. [16]

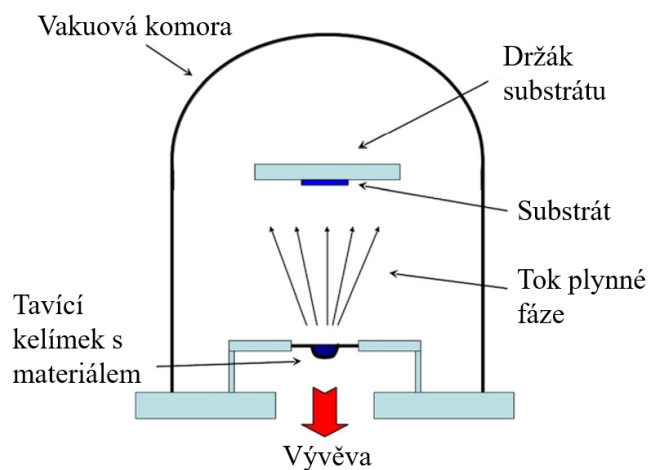
## 2.2 Příprava OLED

Jelikož technologie OLED se řadí mezi tenkovrstvou elektroniku, jsou k přípravě využívány právě procesy nanášení tenkých vrstev, které lze obecně rozdělit na suché a mokré. Přesnost tloušťky jednotlivých vrstev je velice důležitá, jelikož přímo ovlivňuje jas a uniformitu vyzařované barvy. Rozdílné tloušťky vrstev mohou vést k lokálnímu zvýšení či poklesu elektrického proudu, lokálnímu přehřátí a tím pádem k postupné destrukci OLED zařízení. [21]

### 2.2.1 Vakuové tepelné napařování (VTE-Vacuum thermal evaporation)

Technologie vakuového tepelného napařování (Obrázek 6) patří do skupiny technologií nazývaných jako fyzikální depozice z plynné fáze a řadí se mezi suché procesy depozice tenkých vrstev. Organické složky jsou umístěny ve formě pevné látky do tavicího kelímku a substrát je od něj v přesně definované vzdálenosti. Mezi substrátem a tavicím kelímkem

umístěnými ve vakuové komoře ( $10^{-3}$  až  $10^{-5}$  Pa) je udržován teplotní rozdíl, přičemž substrát má vždy nižší teplotu. Zahříváním tavicího kelímku dochází ke změně skupenství napařovaného materiálu z pevného na plynné, a dochází tak k depozici tenké vrstvy na substrát. Tato metoda má řadu výhod – kvůli použití vakuové komory je šance znečištění nebo kontaminace menší než u ostatních technologií, použitím masek lze přesně kontrolovat tloušťku vrstev a tvar napařené vrstvy. Mezi nevýhody patří zejména to, že organické materiály rychle podléhají tepelné degradaci a jsou vysoce tepelně nestabilní. Další nevýhodou je velmi malá materiálová výtěžnost – vstupní materiál, který se přemění do plynné fáze a nedojde k jeho nanesení na substrát se dál nijak nevyužívá.

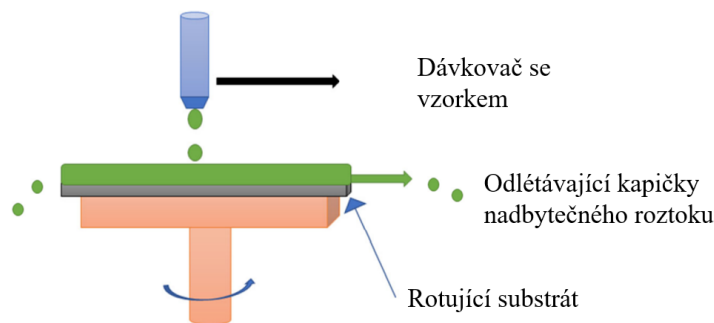


Obrázek 6 Technologie vakuového napařování; dle [4]

### 2.2.2 Spin coating (rotační nanášení)

Na rozdíl od vakuového napařování patří spin coating (Obrázek 7) k mokřým metodám nanášení tenkých vrstev. Jedná se o proceduru depozice uniformních tenkých vrstev na plochý substrát. Na začátku je aplikováno malé množství roztoku rozpouštědla a organické látky ve formě kapiček na střed substrátu. Poté dochází k rotaci substrátu a roztok se vlivem odstředivých sil rozprostře po celé ploše substrátu. Použité rozpouštědlo je většinou velmi těkavé a samovolně se odpařuje, čímž vzniká tenký film organické látky. Tloušťka připravené vrstvy závisí na rychlosti rotace a také na viskozitě a koncentraci použitého roztoku. K výhodám spin coatingu patří uniformita tloušťky připravených vrstev a to, že během celého procesu nedochází k žádným výrazným ztrátám materiálu. Oproti vakuovému napařování je tato metoda rychlejší, jednodušší a levnější. Spin coating má však také řadu omezení – je složité připravit velmi tenké vrstvy ( $<10$  nm), není vhodný pro vícevrstvou

depozici, velká pravděpodobnost kontaminace (oxidace, vlhkost), která lze však eliminovat deponováním v inertní atmosféře. [4], [22]



Obrázek 7 Technologie spin-coatingu (rotační nanášení); dle [4]

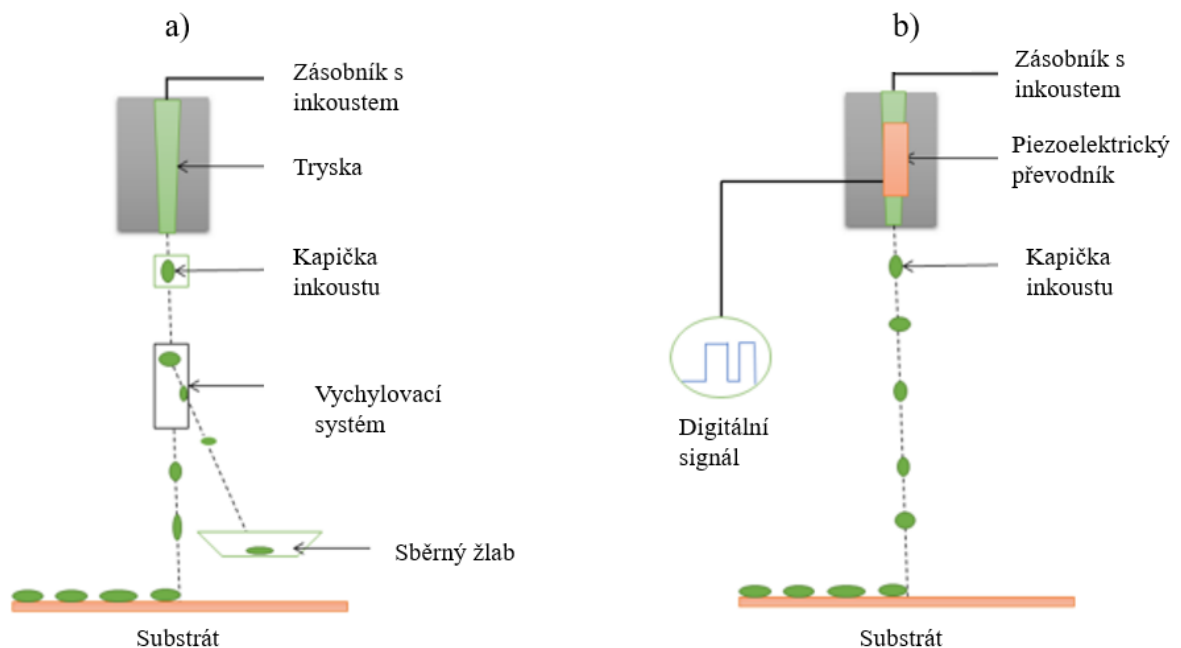
### 2.2.3 Ink-jetový tisk

Ink-jetový tisk je typ počítačem řízeného tisku, který přetváří digitální předlohu vytryskáváním kapiček inkoustu na substrát. Tuto metodu lze na základě toho, jestli je inkoust vytryskáván z tiskové hlavy kontinuálně nebo přerušovaně, rozdělit na tzv. drop-on-demand ink-jetový tisk a kontinuální ink-jetový tisk. Ink-jetový tisk představuje v oblasti optoelektroniky na bázi organických polovodičů velice zajímavou depoziční technologii. Největší výhodou ink-jetového tisku je, že může být deponováno malé množství funkčního materiálu v požadovaném tvaru na vhodný substrát. V porovnání s fotolitografickými metodami ink-jetový tisk eliminuje potřebu drahé masky pro výrobu požadovaného motivu. Všechny tyto faktory minimalizují vznik jakéhokoliv odpadního materiálu. Nevýhodou ink-jetového tisku je ovšem limit minimálního rozlišení, který je závislý od kvality trysky. Záleží na tom, jakou nejmenší možnou kapku je schopná tryska vytvořit. [21]

Při kontinuálním ink-jetovém tisku (Obrázek 8a) dochází k nepřetržitému a vysoce frekvenčnímu vytryskávání inkoustu ve formě kapiček z tiskové hlavy, jež je aktivováno pomocí piezoelektrického ovladače. Dle potřeby digitálního obrazu jsou kapičky inkoustu selektivně vystaveny působení elektrického pole. Proud kapiček inkoustu poté prochází vysokonapěťovou vychylovací deskou a podle toho, jestli jsou kapičky inkoustu nabitě potažmo nenabitě dojde k jejich deponaci na substrát potažmo vychýlení do sběrného žlabu. Inkoust zachycený do sběrného žlabu putuje do zásobníku inkoustu a může být tak znovu použit a nedochází k žádným materiálovým ztrátám. [23], [24]

Podstatou drop-on-demand ink-jetového tisku (Obrázek 8b) je to, že dochází k vytryskávání inkoustu z tiskové hlavy tlakovým pulzem dle požadavků digitálního obrazu, které

zprostředkovává počítačový software. Dle vzniku tlakového pulzu v trysce lze tyto tiskárny dále rozdělit na: piezoelektrické, termické, akustické a elektrostatické. [24]

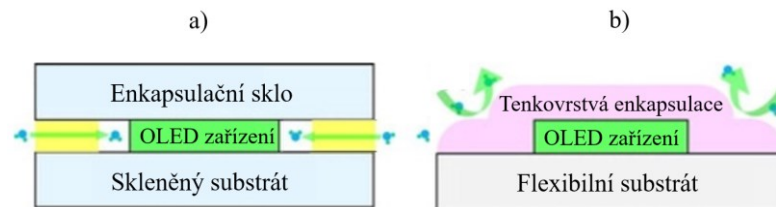


Obrázek 8 Schematický diagram – a) kontinuálního ink-jetového tisku, b) drop-on-demand ink-jetového tisku; dle [4]

#### 2.2.4 Enkapsulace OLED

Organické materiály jsou mnohem více zranitelnější při interakci se vzdušnou vlhkostí a kyslíkem oproti anorganickým materiálům. Při vystavení OLED těmto jevům mohou organické vrstvy jednoduše zoxidovat a zkrystalizovat, čímž vznikají body, ve kterých není emitováno světlo (dark spoty). Právě k zabránění tomuto se využívá enkapsulace (zapouzdření) OLED zařízení, která má za úkol bránit přístupu vlhkosti a vzduchu k organickým vrstvám. Pro charakteristiku enkapsulačních vrstev se používá veličina rychlost prostupu vodních par (z anglického *MVTR* – moisture vapor transmission rate), jež je udávána v jednotkách  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$  a udává tedy kolik gramů vodních par projde jedním metrem čtverečním enkapsulační vrstvy za jeden den. Pro organické světlo emitující diody by měla ideálně tato hodnota nabývat hodnot nižších než  $10^{-6} \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$ . Pro neohebné OLED může jako enkapsulační vrstva dobře posloužit sklo s přísadkou vysoušedel (BaO nebo CaO), přičemž takové enkapsulační vrstvy pak mají hodnotu *MVTR* velmi nízkou (pod  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$ ). Křehkost skla však brání jeho použití u flexibilních OLED zařízení, jako vhodná náhrada se jeví použití tenkovrstvé enkapsulace. U flexibilních displejů je důležité předejít mechanickému poškození tenkovrstvé enkapsulace, jelikož ohybové namáhání

může zrychlovat růst defektů a tím vytvořit cestu pro vzdušnou vlhkost a kyslík. Vývoj tenkovrstvé enkapsulační vrstvy s ideálními mechanickými a bariérovými vlastnostmi je jednou z hlavních výzev v oblasti ohebných OLED zařízení. [25]



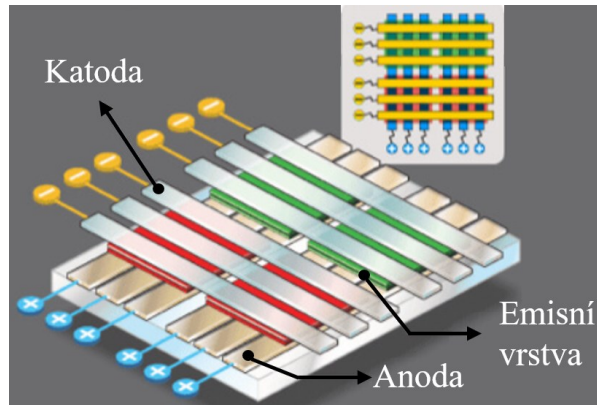
Obrázek 9 Schematické znázornění – a) enkapsulace OLED na skleněném substrátu, b) tenkovrstvá enkapsulace; dle [25]

## 2.3 Typy OLED

Z hlediska řízení emise světla lze OLED dále rozdělit na PMOLED (Passive matrix OLED – OLED s pasivní maticí) a AMOLED (Active matrix OLED – OLED s aktivní maticí). Dále je možno je rozdělit z hlediska konstrukce a funkce na TOLED, FOLED, TEOLED a WOLED. [4]

### 2.3.1 OLED s pasivní maticí (Passive Matrix - PMOLED)

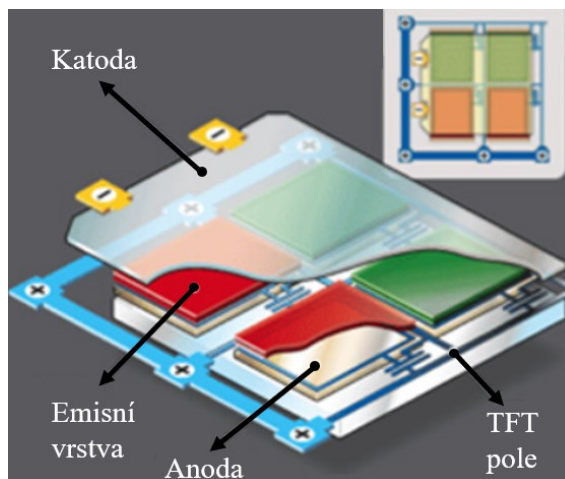
Tento typ OLED se skládá ze tří vrstev – anody a katody, mezi nimiž se nachází organická vrstva emitující světlo. Anoda a katoda je ve formě pásek a tyto pásy jsou na sebe kolmé, přičemž průsečíky elektrod tvoří pixely, ze kterých je emitováno světlo. Schematický diagram OLED s pasivní maticí je znázorněn na Obrázku 10. Na vybrané pixely je přiváděn proud vnějšími elektrickými obvody a tím je určeno, který pixel v dané chvíli svítí. Jas pixelu je úměrný aplikovanému proudu. Je velmi jednoduché je vyrobit, ale oproti OLED s aktivní maticí mají větší spotřebu energie a jsou vhodné pro výrobu menších displejů zobrazujících text a různé tvary. [4], [26]



Obrázek 10 Struktura organické světlo-emitující diody s pasivní maticí; dle [27]

### 2.3.2 OLED s aktivní maticí (Active Matrix OLED - AMOLED)

OLED s aktivní maticí se skládá z celistvých vrstev elektrod a emisního organického materiálu (Obrázek 11). Anoda je však ke všemu ještě překryta polem tenkovrstvých tranzistorů (TFT – thin film transistors), což je obvod určující, které pixely se při aplikaci elektrického proudu rozsvítí. Pole tenkovrstvých tranzistorů spotřebovává mnohem méně energie než vnější elektrické obvody používané u OLED s pasivní maticí. To je jeden z důvodů, proč patří mezi vhodné aplikace AMOLED výroba například počítačových displejů, velkoplošných televizorů a elektronických billboardů. Dalším benefitem je rychlejší obnovovací frekvence, což je velmi důležitý parametr zobrazovacích technologií. [26]

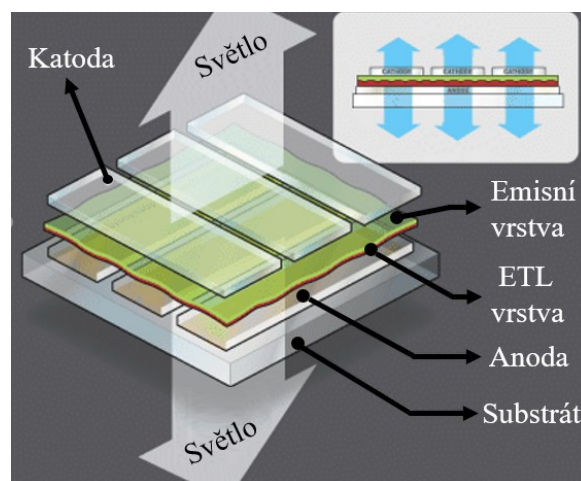


Obrázek 11 Struktura organické světlo-emitující diody s aktivní maticí; dle [27]

### 2.3.3 Transparentní OLED (Transparent OLED - TOLED)

Transparentní OLED se jako ostatní typy diod opět skládá z anody, katody a organické emisní vrstvy (Obrázek 12). Rozdílem je to, že všechny použité komponenty jsou transparentní a dochází tak k vyzařování emitovaného světla v obou směrech. Transparentní OLED displeje mohou nalézt uplatnění v oblasti rozšířené reality, head-up displejů a chytrých oken. [28]

Hlavní výzvu v této technologii představuje volba materiálu pro katodu, u běžných diod se totiž používají vrstvy kovů, jež jsou netransparentní. Je potřeba použít takový materiál, který má dobré optoelektronické vlastnosti a při jehož depozici nedochází k rozkladu organické emisní vrstvy. Za vhodné kandidáty pro přípravu transparentních elektrod byly považovány například vodivé oxidy a nekovové materiály jako grafen a vodivé polymery. Při depozici těchto materiálů však dochází k poškozování organické emisní vrstvy. Jedním ze skutečně vhodných řešení se ukázalo být použití tenké vrstvy stříbra i přesto, že nemá ideální optické vlastnosti. [29]



Obrázek 12 Struktura transparentní organické světlo-emitující diody; dle [27]

### 2.3.4 Ohebné OLED (Foldable OLED - FOLED)

Pro přípravu ohebných OLED se jako substráty používají velmi ohebné kovové anebo polymerní fólie, a z toho důvodu jsou velmi lehké a odolné. Za účelem zvýšení odolnosti proti poškození se používají například pro výrobu displejů mobilních telefonů. [4]

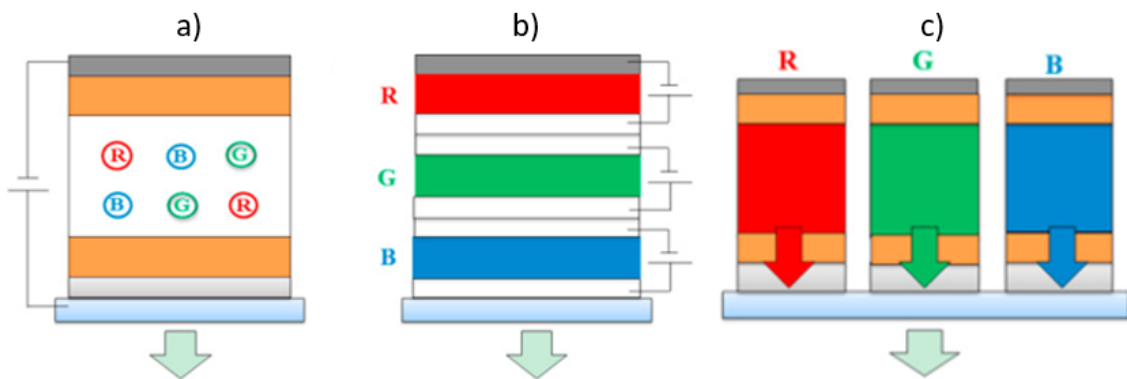
### 2.3.5 Bílá OLED (White OLED – WOLED)

WOLED je organická světlo-emitující dioda, která emituje bílé světlo. Ideálně by WOLED, jakožto zdroj bílého světla, měla vyzařovat spojitě a široké spektrum podobné přirozenému



slunečnímu svítu pokrývající co nejvíce rozsah viditelného světla (380 až 780 nm). Obecně však jednotlivé emitory mohou vyzařovat světlo pouze v určité oblasti viditelného spektra a nemohou tak samostatně generovat bílé světlo. Bílé světlo v těchto diodách proto vzniká kombinací základních (červená, zelená a modrá) anebo doplňkových barev (například modrá a žlutá). [30]

Na Obrázku 13a je znázorněna struktura S-EML (single emissive layer), která je považována za nejvhodnější a nejjednodušší způsob k získání bílého světla, jež vzniká začleněním více druhů emitů do jedné vrstvy. V tomto uspořádání každý luminofor vyzařuje své vlastní spektrum a dohromady emitují široké elektroluminiscenční spektrum. Je zřejmé, že tato metoda nabízí velmi jednoduchý výrobní proces v porovnání s ostatními níže popsanými, koncentrace jednotlivých složek musí být však ale přesně regulovány, aby bylo dosaženo požadovaného elektroluminiscenčního spektra. Další dvě možná uspořádání vedoucí k emisi bílého světla spočívá v použití červeného, zeleného a modrého emitoru, které jsou uspořádány buďto horizontálně (Obrázek 13b) anebo vertikálně (Obrázek 13c). Těmito dvěma uspořádáními lze získat stabilnější elektroluminiscenční spektrum, je však mnohem složitější takové diody potažmo displeje vyrobit. [30], [31]

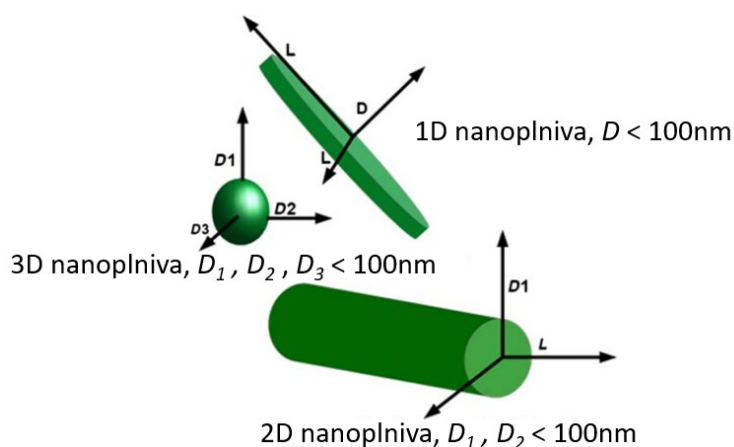


Obrázek 13 Jednotlivé struktury WOLED – a) S-EML (single emissive layer), b) horizontální uspořádání emitů, c) vertikální uspořádání emitů; dle [30]

### 3 POLYMERNÍ NANOKOMPOZITY

Kompozitní materiály lze definovat jako vícesložkové materiály, jež jsou složeny ze dvou či více fází, které se vzájemně liší svými vlastnostmi. Spojitá neboli kontinuální fáze je nazývána jako matrice, dispergované fázi se říká plnivo. V případě polymerních nanokompozitů slouží jako matrice polymerní materiál a dispergovanou fází tvoří nanoplňiva, jež mají alespoň jednu ze svých dimenzí menší než 100 nm. V posledních desetiletích bylo zjištěno, že velmi malý přídavek nanoplňiv do polymerní matrice může vést ke zlepšení mechanických, tepelných, bariérových a elektrických vlastností. Základní rozdíl mezi tradičními polymerními kompozity (například na bázi skelných vláken) a nanokompozity je dán velkým počtem mezifázových oblastí mezi polymerní matricí a plnivem o rozměrech v řádech nanometrů. [32]

Nanoplňiva používaná v polymerních nanokompozitech lze klasifikovat z hlediska jejich dimenzí na jednodimenzioální (1D), dvoudimenzioální (2D) a třidimenzioální (3D). Za 1D nanoplňiva se považují ta, která mají jednu ze svých dimenzí menší než 100 nm. Vyskytují se nejčastěji ve formě destiček o tloušťce několika nanometrů a zbylé dva rozměry se pohybují v řádech stovek až tisíců nanometrů. 2D nanoplňiva mají dvě ze svých dimenzí menší než 100 nm a vyskytují se nejčastěji ve formě nanotrubeček anebo nanovláken. Mezi nejkoumanější 2D nanoplňiva patří uhlíkové nanotrubečky (CNTs – carbon nanotubes), které mohou nalézt uplatnění v oblasti solárních článků, baterií, superkapacitátorů, cíleného doručování léčiv a tkáňového inženýrství. [33] V případě 3D nanoplňiv jsou všechny tři dimenze menší než 100 nm a vyskytují se zejména v kulovitém nebo krychlovém tvaru. [34]



Obrázek 14 Znáznornění nanoplňiv dle dimenzionality; dle [34]

Hlavní výzvou v oblasti polymerních nanokompozitů je dosažení rovnoměrné disperze nanočástic v polymerní matrici, jelikož nanočástice tvoří kvůli svému specifickému povrchu

a objemovým vlastnostem aglomeráty. Tomuto problému lze předejít na příklad povrchovými úpravami nanočástic. [35]

Tenkvrstvé polymerní nanokompozity získávají pozornost také v oblasti organických světlo-emitujících diod. Inkorporací nanočástic do polymerní matrice lze dosáhnout například nižšího otevíracího napětí a zvýšení účinnosti a stability. [36]

### **3.1 Pozitivní vliv nanočástic na OLED**

Polymerní nanokompozity je možné použít pro výrobu tenkovrstvé elektroniky, ku příkladu organických světlo emitujících diod. Inkorporace některých nanočástic do polymerní matrice dokáže zvýšit účinnost takového zařízení. Účinnost se zvyšuje díky zlepšení prostupu náboje, efektu rozptylu světla a díky efektu povrchové plazmonové rezonance. [37]

#### **3.1.1 Zlepšení prostupu náboje**

V OLED zařízeních dochází k injektování kladných děr a záporných elektronů z anody a katody do vodivostních a valenčních pásů světlo emitující vrstvy a tyto nosiče náboje mohou vytvořit pár elektron-díra (exciton). Obecně se předpokládá, že injektování nábojů v organických světlo-emitujících diodách je velmi omezeno bariérami, které vznikají kvůli velkým rozdílům mezi nejvýše obsazeným a nejnižší neobsazeným molekulovým orbitalem na rozhraní elektrod a organických světlo-emitujících vrstev. Ukázalo se, že díky variabilním a unikátním elektronickým vlastnostem nanočástic, lze jejich inkorporací do polymerní matrice zlepšit vstup náboje. [37]

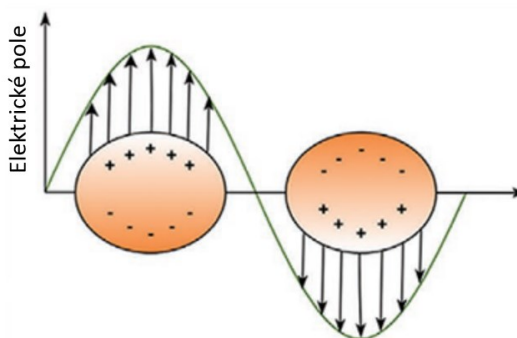
#### **3.1.2 Rozptyl světla**

Rozptyl světla lze popsat jako vychýlení elektromagnetických vln vlivem jejich interakcí s překážkou v dráze šíření světla. Tohoto efektu může být využito ke zvýšení účinnosti organických-světlo emitujících diod přidáním vrstev rozptylující světlo, které obsahují právě různé nanočástice, jelikož vykazují vynikající schopnosti rozptylu světla. K účinnému rozptylu světla je zapotřebí dostatečně vysoký rozdíl v indexech lomu mezi rozptylovými centry a okolním médiem, přičemž tohoto může být dosaženo použitím nanočástic s vysokým indexem lomu a média s nízkým indexem lomu. Nanočástice by také měly mít vhodnou velikost, jež jsou srovnatelné s vlnovou délkou světla, nanočástice mnohem menší, než daná vlnová délka vykazují omezené schopnosti rozptylu světla, lze je však použít ke zvýšení indexu lomu. [37]

Bylo například zjištěno, že použitím vrstvy rozptylující světlo, obsahující stříbrné nanočástice v polymerní matici, se zvýší účinnost OLED zařízení o 24 % [38], v případě nanočástic oxidu zinečnatého v polymerní matici došlo ke zvýšení účinnosti o 31,1 %. [39]

### 3.1.3 Lokalizovaná povrchová plazmonová rezonance

Povrchové plazmony jsou kolektivní oscilace volných elektronů na povrchu kovu nebo dielektrika. Jev povrchové plazmonové interakce je důsledkem vzniku rezonance mezi elektromagnetickým zářením a povrchovými elektrony kovu (Obrázek 15). V OLED zařízeních může hrát tento jev důležitou roli při interakci mezi excitony a lokalizovanými povrchovými plazmony, jelikož může zrychlovat radiální rekombinaci excitonů a tím zvyšovat celkovou účinnost OLED zařízení. [37]



Obrázek 15 Znárodnění plazmonové rezonance; dle [37]

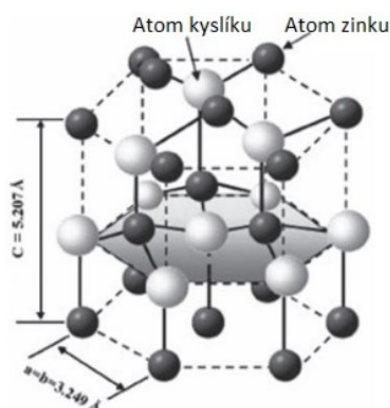
## 3.2 Polymerní nanokompozity s oxidy kovů

Tyto nanokompozity kombinují vlastnosti polymerní matrice jako jsou jednoduchá zpracovatelnost, nízká hmotnost, ohebnost a nízká cena společně se specifickými vlastnostmi jednotlivých nanočástic anorganických oxidů kovů. Díky přítomnosti těchto nanočástic v různých polymerních maticích může dojít ke zlepšení mechanických, optických, elektrických, termálních a magnetických vlastností. K hojně studovaným a využívaným nanočásticím oxidů kovů v polymerních nanokompozitech patří například ZnO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [40]

Hybridní materiály skládající se z polovodivých oxidů kovů a organických materiálů jsou slibnými kandidáty pro aplikace v oblastech zahrnující skladování energie, elektrokatalýzu, elektronické displeje a biomedicínu. [41]

### 3.2.1 ZnO polymerní nanokompozity

Oxid zinečnatý se řadí mezi polovodiče typu n, má široký zakázaný pás energií (přibližně 3,37 eV) a vysokou vazebnou energii excitonů (60 meV) při pokojové teplotě. Vyskytuje se ve stabilní wurtzitové struktuře (Obrázek 16), přičemž nepřítomnost středové symetrie z oxidu zinečnatého dělá piezoelektrikum s potenciálními aplikacemi v senzorech.



Obrázek 16 Wurtzitová krystalová struktura oxidu zinečnatého; dle [42]

Oxid zinečnatý taktéž nabývá vysokých hodnot dielektrické konstanty ( $\epsilon_r \approx 8,5$ ), indexu lomu ( $n \approx 2$  při  $\lambda = 580$  nm) a tepelné vodivosti ( $k \approx 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Díky těmto vlastnostem se nanočástice oxidu zinečnatého staly středem pozornosti výzkumů v oblasti polymerních nanokompozitů, mimo jiné také v oblasti organických světlo-emitujících diod. [43]

Bylo zjištěno, že nanočástice oxidu zinečnatého jsou netoxické vůči lidským buňkám, a naopak jsou toxické vůči bakteriálním buňkám, což otevírá cestu pro řadu aplikací v oblasti biomedicíny. [44] Zajímavou vlastností nanočástic oxidu zinečnatého je také to, že pohlcují UV záření, a proto se využívají v kosmetice jako součást opalovacích krémů. [45]

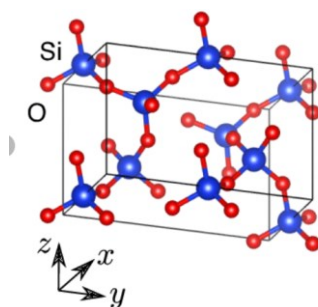
V oblasti organických světlo-emitujících diod byla zkoumána inkorporace nanočástic oxidu zinečnatého do různých polymerních matic k výrobě organických elektroluminiscenčních vrstev. Bylo zjištěno, že inkorporace nanočástic oxidu zinečnatého do různých polymerních matic může vést jednak ke snížení otevíracího napětí a také ke zvýšení intenzity vyzářeného světla. [36], [41], [46], [47] Tento efekt lze vysvětlit následovně – přítomnost nanočástic oxidu zinečnatého zlepšuje transport elektronů z katody směrem k emisní vrstvě a také transport elektronů přímo k řetězci polymeru a částečně také brání v přenosu kladných děr, všechny tyto faktory pozitivně ovlivňují množství vyzářeného světla. [36]

Bylo také zjištěno, že inkorporací nanočástic ZnO do různých polymerních matic lze připravit vrstvu transportující elektrony (ETL – electron transport layer), jejíž úkolem není

emitovat světlo, ale transportovat elektrony směrem k emisní vrstvě. Použití této vrstvy v OLED vede k vyšší účinnosti. [48], [49], [50]

### 3.2.2 SiO<sub>2</sub> polymerní nanokompozity

Oxid křemičitý, taktéž nazývaný jako silika je jedním z nejrozšířenějších oxidů kovů v zemské kůře a vyskytuje se jak v krystalické (křemen, tridymit a kristobalit), tak v amorfnní formě. Existuje několik typů nanočástic oxidu křemičitého – běžné neporézní nanočástice, mezoporézní nanočástice, duté mezoporézní nanočástice a core-shell nanočástice. [51]



Obrázek 17 Krystalová struktura alfa křemene; dle [52]

Díky svým vlastnostem, mezi které patří vysoký specifický povrch, uniformita, variabilní velikost pórů, vysoká hustota pórů a biokompatibilita, získávají mezoporézní nanočástice oxidu křemičitého pozornost hlavně v oblasti biomedicíny. [53]

Inkorporace nanočástic oxidu křemičitého do polymerní matrice byla také zkoumána v oblasti organických světlo-emitujících diod. Přičemž bylo zjištěno, že inkorporace těchto nanočástic do polymerní matrice, sloužící jako světlo-emitující vrstva, snižuje otevírací napětí a zvyšuje účinnost těchto zařízení. [54] Byla také zkoumána inkorporace těchto nanočástic do polymerní matrice za účelem získání vrstvy rozptylující světlo, při jejím použití se účinnost OLED zařízení zvýšila o 56 %. [55]

## 4 METODY ANALÝZY

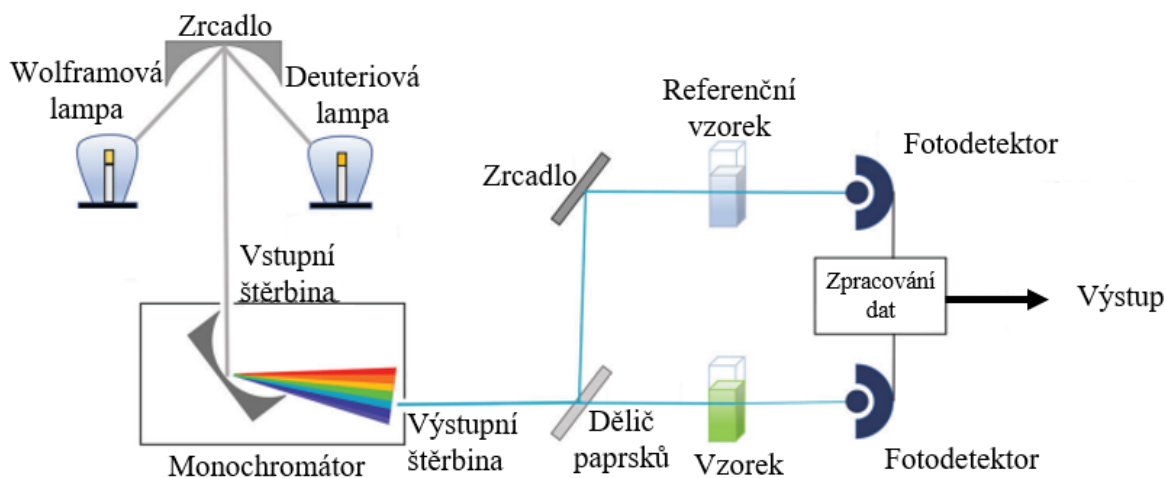
### 4.1 UV/VIS spektroskopie

UV/VIS spektroskopie je levná, jednoduchá a nedestruktivní analytická metoda vhodná širokou škálu organických a anorganických materiálů. Oblast UV záření leží v rozsahu 100 až 380 nm a viditelná oblast dosahuje vlnových délek až okolo 800 nm, většina UV/VIS spektrometrů má však rozsah vlnových délek 200 až 1100 nm, dokážou tedy měřit i v blízké infračervené oblasti. UV/VIS spektrometry (Obrázek 18) měří absorpenci, popřípadě transmitanci světla prošlého skrz vzorek jako funkci vlnové délky. Právě podle množství absorbovaného světla může tato metoda poskytnout kvantitativní a také kvalitativní informace o zkoumaném vzorku. Každá sloučenina potřebuje specifické množství energie (specifickou vlnovou délku světla) k tomu, aby došlo k excitaci elektronů ze základního do vyššího energetického stavu. Tento fakt, že každá látka absorbuje jinou vlnovou délku, je základním principem UV/VIS spektroskopie.

Závislost absorpce elektromagnetického záření na vlastnostech materiálu a jeho množství (koncentraci) vyjadřuje Lambert-Beerův zákon:

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I} = \epsilon \cdot b \cdot C \quad (2)$$

kde  $A$  je absorpce světla,  $b$  vyjadřuje dráhu paprsku uraženou skrz vzorek,  $C$  vyjadřuje koncentraci,  $\epsilon$  vyjadřuje molární absorpční koeficient,  $I_0$  vyjadřuje referenční intenzitu světla, a  $I$  vyjadřuje intenzitu světla naměřenou po průchodu vzorkem. [56]

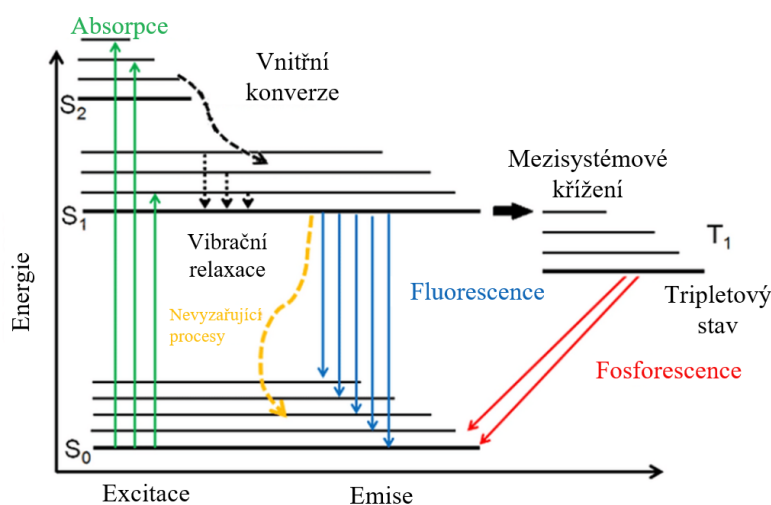


Obrázek 18 Schéma UV-VIS spektrometru; dle [56]

## 4.2 Fotoluminiscenční spektroskopie

Fotoluminiscenční, jinak také fluorescenční spektroskopie je jednoduchá, rychlá, levná, bezkontaktní a nedestruktivní spektroskopická metoda používaná k charakterizaci optoelektronických vlastností různých materiálů. Princip této metody spočívá v použití paprsku světla, většinou světla z UV oblasti, které v molekulách zkoumané látky excituje elektrony do vyšších elektronických stavů a při přechodu do základního stavu emitují světlo. Tomuto jevu se říká fotoluminiscence.

Pro popis fotoluminiscence, potažmo energetických stavů elektronů a jejich přechodů v molekule se používá Perrin-Jabloňského diagram (Obrázek 19). Když molekula absorbuje energii ve formě světla, elektron se ze svého základního stavu ( $S_0$ ) dostane do některé z mnoha vibračních úrovní (např.  $S_1$  nebo  $S_2$ ) v excitovaném stavu. Při relaxaci elektronu z tohoto excitovaného stavu dochází k řadě procesů zahrnujících fluorescenci a fosforescenci. Samotné fluorescenci může předcházet vnitřní konverze, kdy dochází k přechodu v rámci singletových stavů, fosforescenci vždy předchází přechod ze singletového do zakázaného tripletového stavu ( $T_1$ ), tomuto přechodu se říká mezi systémové křížení. Fluorescence odpovídá relaxaci elektronu ze singletového excitovaného stavu ( $S_1$ ) do základního stavu ( $S_0$ ), přičemž se uvolní energie ve formě viditelného světla. U fluorescence dochází bezprostředně po excitaci ( $10^{-9}$  s) k vyzáření energie ve formě světla, naopak fosforescence může probíhat díky poloze elektronu v nízko energetickém metastabilním tripletovém stavu v řádech sekund až hodin. Vlnová délka (energie) emitovaného světla při fluorescenci závisí na energetickém rozdílu mezi základním a excitovaným singletovým stavem. [57] [58]

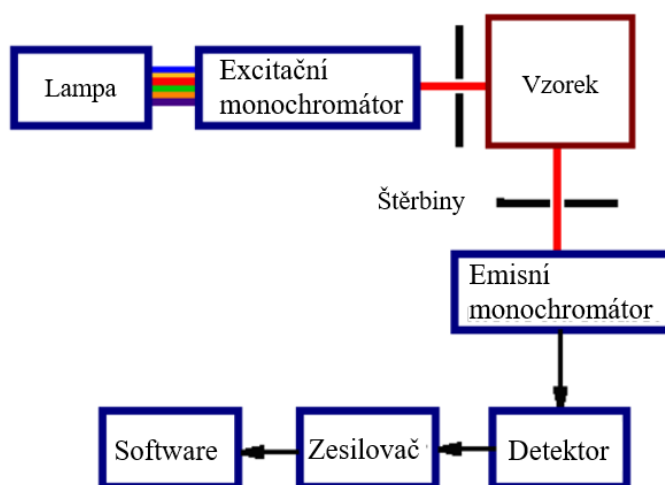


Obrázek 19 Perrin-Jabloňského diagram, dle [59]



Pro měření fotoluminiscence se využívají fluorescenční spektrofotometry (jinak nazývány také jako fluorimetry). Základní fluorimetr se skládá ze zdroje světla (lampa), nastavitelného excitačního a emisního monochromátoru, držáku vzorku a detektoru (Obrázek 20). Přítomnost emisního a excitačního monochromátoru dovoluje uživateli měřit jak emisní, tak excitační spektrum. Při měření excitačního spektra je nastavena na emisním monochromátoru konstantní vlnová délka, o které se ví, že v ní vzorek emituje světlo a získáváme tak informaci o tom, jaká vlnová délka je nejvíc za odpovědná za excitaci elektronů, potažmo za fotoluminiscenci. Výsledné excitační spektrum je tak velmi podobné, ne-li úplně stejné jako absorpční spektrum získaném z UV/VIS spektroskopie. Při měření emisního spektra je naopak nastavena na excitačním monochromátoru konstantní vlnová délka, o které se ví, že u vzorku způsobuje největší fotoluminiscenci a získáváme tak informaci o tom, jakou barvou zkoumaný vzorek svítí.

Emisní spektrum je vlivem energetických ztrát posunuto k vyšším vlnovým délkám (nižší energie) v porovnání s excitačním spektrem, tomuto jevu se říká Stokesův posun a je to tedy energetický rozdíl mezi maximy emisního a excitačního spektra. [57]

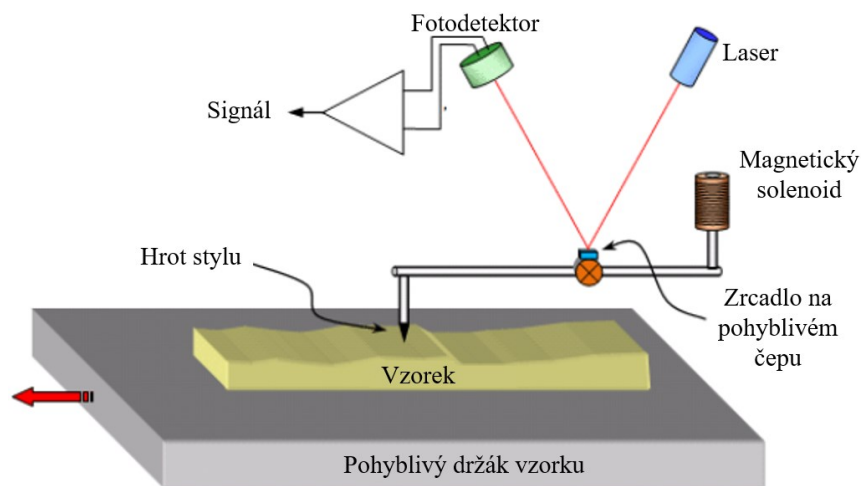


Obrázek 20 Schéma fluorescenčního spektrometru, dle [57]

### 4.3 Kontaktní profilometrie

Profilometr je přístroj využívaný k měření výškového profilu povrchu za účelem určení jeho drsnosti a tvaru, popřípadě k určení tloušťky tenkých vrstev. Rozlišení ve vertikálním směru dosahuje běžně úrovně nanometrů, avšak v laterálním směru je to s rozlišením horší. Profilometry lze rozdělit na dva základní typy – kontaktní profilometr a optický profilometr.

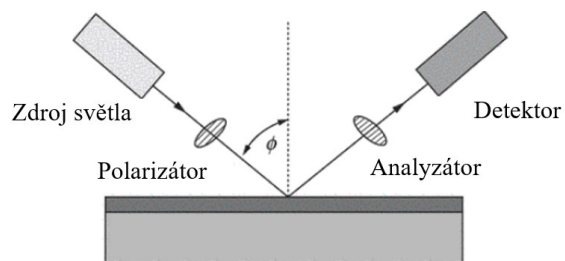
Kontaktní profilometr využívá k měření ostrý stylus, který je ve vertikálním směru kontrolovanou silou přitlačen na povrch a pohybuje se po povrchu vzorku v laterálním směru. Pohyby stylu v obou těchto směrech jsou v průběhu měření zaznamenávány, jejichž výsledkem je graf znázorňující změny na povrchu v závislosti na pozici stylu. Kontaktní profilometry běžně dokážou měřit malé útvary v rozsahu výšky od 10 nm to 65  $\mu\text{m}$ . Horizontální rozlišení je dáno průměrem hrotu stylu, který se běžně pohybuje v rozmezí od 5 do 25  $\mu\text{m}$  a dále také rychlostí a délkou měření. Kvůli tomu, že dochází během měření ke kontaktu stylu a povrchu je možné měřit jen vzorky s odpovídající tvrdostí, aby nedocházelo k jejich poškozování. Kontaktní profilometry patří k základním široce používaným přístrojům v oblasti zkoumání povrchů. Mezi jejich výhody patří jednoduchost použití a dostupnost. Hlavními nevýhodami jsou pak pomalé měření a kontakt stylusu s povrchem, což může vést k poškození anebo znečištění vzorku. [60]



Obrázek 21 Schéma kontaktního profilometru

#### 4.4 Elipsometrie

Elipsometrie je velice citlivá a nedestruktivní metoda měření optické odrazivosti poskytující možnosti pro charakteristiku tenkých vrstev. Jelikož optické vlastnosti tenkých vrstev závisí na složení, tloušťce, elektrické vodivosti a pórovitosti, může elipsometrie poskytnout informace o všech těchto parametrech. Principe této metody je založen na měření změny polarizace světla při odrazu od povrchu vzorku (Obrázek 22). Změřená data mohou být porovnána s různými fyzikálními modely a může tak být určen index lomu, absorpční koeficient a tloušťka vrstvy. Na rozdíl od spektrofotometrických metod elipsometrie nepotřebuje žádné referenční měření. [60]



Obrázek 22 Schéma Elipsometru; dle [60]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

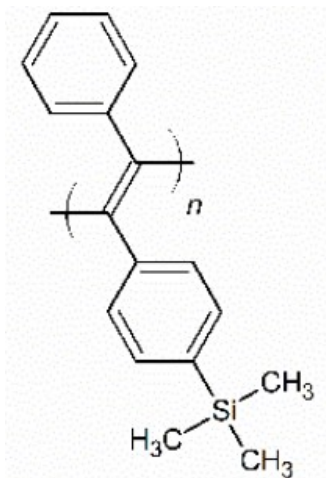
### 5.1 Použité chemikálie a příslušenství

- PTMSDPA - poly[1-fenyl-2-[p-(trimethylsilyl)fenyl]acetylene] – Polymer použitý pro emisní vrstvu polymerní světlo-emitující diody;
- PF-DMB - Poly[(9,9-dihexylfluoren-2,7-diyl)-alt-(2,5-dimethyl-1,4-phenylene)] zakončený dimethylfenylem – Polymer použitý pro emisní vrstvu polymerní světlo-emitující diody. Výrobce Sigma Aldrich;
- Nanočástice SiO<sub>2</sub> – Plnivo pro polymerní světlo-emitující diody. Výrobce Sigma Aldrich;
- Disperze nanočástic ZnO v toluenu – Plnivo pro polymerní světlo-emitující diody;
- PEDOT:PSS - poly(3,4-ethylenedioxythiofén) polystyrén sulfonát – Polymer použitý jako vrstva transportující kladné díry v PLED zařízení. Výrobce Heraeus;
- Triton X 100 – povrchově aktivní látka. Výrobce Sigma Aldrich
- Chloroform – Rozpouštědlo použité pro přípravu roztoků s polymery;
- Křemenné substráty – Pro přípravu tenkých vrstev k následné charakterizaci pomocí UV-Vis spektroskopie, luminiscenční spektroskopie a profilometrie;
- Křemenné substráty potažené ITO (cínem dopovaný oxid inditý) – Pro přípravu organické světlo-emitující diody. 20x15 mm. Výrobce Ossila;
- Pryskyřice – Enkapsulace organické světlo-emitující diody. Výrobce Ossila;
- Enkapsulační sklo - Enkapsulace organické světlo-emitující diody. Výrobce Ossila

#### 5.1.1 PTMSDPA

Poly[1-phenyl-2-[p-(trimethylsilyl)phenyl]acetylene] (dále označován jako PTMSDPA) patří mezi zástupce polymerů s konjugovaným systémem dvojných vazeb a je typickým příkladem disubstituovaného polyacetyleny, jeho strukturní vzorec je zachycen na Obrázku 23. Tento polymer je využíván v řadě fyzikálních a chemických studiích pro jeho dlouhodobou stabilitu, propustnost plynů a pozoruhodnou fotoluminiscenci v oblasti žlutozeleného spektra viditelného světla s vysokým kvantovým výtěžkem ( $\Phi = 0,25$  v toluenu).

Syntéza PTMSDPA probíhala pomocí Schlenkovy metody dle [61], materiál byl připraven na Katedře fyzikální a makromolekulární chemie, PF UK.

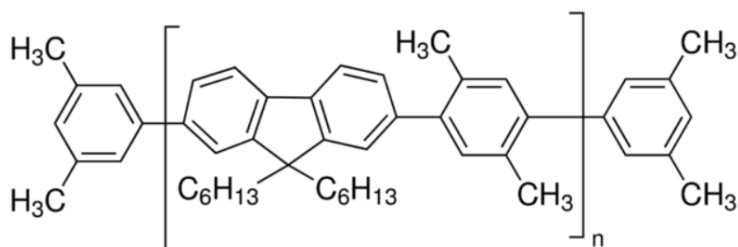


Obrázek 23 Strukturální vzorec PTMSDPA; dle [61]

### 5.1.2 PF-DMB

Poly[(9,9-dihexylfluoren-2,7-diyl)-alt-(2,5-dimethyl-1,4-phenylene)] (dále označován jako PF-DMB) patří taktéž ke konjugovaným polymerům a dále se řadí mezi polyfluoreny, strukturální vzorec je zachycen na Obrázku 24. Daný polymer má vysoký potenciál pro použití v polymerní elektronice díky rozsahu emise, tj. v modré oblasti viditelného světla. Polyfluoreny jsou slibné polovodičové polymerní materiály vhodné pro elektroluminiscenční zařízení, díky jejich velkému kvantovému výtěžku. Aromatická konjugovaná struktura tento polymer předurčuje k možnému použití v senzorických, fotonických a fotovoltaických aplikacích. [62]

Pro experimentální část byl použit PF-DMB od firmy Sigma Aldrich.



Obrázek 24 Strukturální vzorec PF-DMB; dle [63]

### 5.1.3 Nanoplňivo

#### Nanočástice ZnO

Byla použita disperze nanočástic oxidu zinečnatého v toluenu o koncentraci 5 mg/ml. Střední průměr velikosti částic byl roven  $8,5 \pm 1,1$  nm.

Nanočástice oxidu zinečnatého byly syntetizovány v diethylenglykolu (DEG) použitím mikrovlnného reaktoru po dobu 15 minut při teplotě 250 °C. Jako prekurzor byl použit octan zinečnatý a jako uzavírací činidlo kyseliny olejová. [47]

#### Nanočástice SiO<sub>2</sub>

Pro experimentální část byly použity nanočástice oxidu křemičitého s rozsahem velikosti nanočástic 5 až 15 nm od výrobce Sigma Aldrich.

## 5.2 Použité přístroje a zařízení

- UV/VIS spektrometr Lambda 1050 (výrobce Perkin Elmer);
- Luminiscenční spektrometr FLS920 (výrobce Edinburgh Instruments Ltd.) s kryogenní komorou;
- Mechanický profilometr Dektak XT-E (výrobce Bruker);
- Elipsometr Uvisel 2 (výrobce Horiba);
- Spin-coater Laurell model WS-650MZ-23NPP;
- Naprašovačka kovů Quantum Q300T (výrobce Quorumtech);
- Ultrazvuková čistička;
- Ozonová čistička;
- ZIF zkušební deska pro testování PLED zařízení; výrobce Ossila
- Spektrometr Avantes avaspec

## 5.3 Příprava polymerních roztoků

V prvním kroku experimentu bylo připraveno šest polymerních roztoků, které byly následně použity pro přípravu tenkých vrstev na křemenném substrátu a také pro přípravu emisní vrstvy organické světlo-emitující diody. Jako rozpouštědlo pro přípravu těchto polymerních roztoků byl použit chloroform, jež byl skladován společně s molekulovým sítem pro zachování minimálního obsahu vody.

Roztoky byly připraveny tak, aby výsledná koncentrace polymeru ve všech roztocích byla rovna 2 mg/ml a koncentrace nanočástic 2,5 mg/ml. Polymerní materiál a nanočástice jsou v tenkých vrstvách a PLED v poměru 1:1,25. Bylo připraveno šest roztoků o objemu 5 ml, přičemž odpovídající množství polymerních materiálů a také nanočástic SiO<sub>2</sub> bylo naváženo na analytických vahách. Nanočástice ZnO byly použity ve formě disperze o koncentraci 5 mg/ml v toluenu. Odpovídající objem rozpouštědla – chloroformu a roztoku nanočástic ZnO byl odměřen za pomoci mikropipet. Dispergace nanočástic a také rozpuštění polymeru byla zajištěno magnetickými míchačkami.

Roztoky byly po celou dobu experimentu skladovány v inertní atmosféře v laboratorním glove boxu, aby bylo zabráněno degradaci vlivem kyslíku a vzdušné vlhkosti.

#### 5.4 Příprava tenkých vrstev

Metodou spin coatingu neboli rotačního nanášení byly připraveny z polymerních roztoků tenké polymerní vrstvy, pročež byl použit Spin Coater Laurell (Obrázek 25). Pro přípravu tenkých vrstev byly po předchozích zkušenostech se zkoumanými materiály zvoleny otáčky 2000 RPM a bylo použito 50  $\mu$ l daného roztoku.



Obrázek 25 Spin Coater Laurell

Samotné depozici tenkých vrstev předcházelo čtyřkrokové čištění křemenných substrátů – 1. Destilovaná voda s čistícím roztokem (Hellmanex) - 2. Destilovaná voda - 3. Aceton - 4. Isopropylalkohol. Při každém kroku byly substráty na 10 minut umístěny v ultrazvukové čističce v daném roztoku, po vyčištění byly vzorky umístěny do vakuové sušárny a byly sušeny přibližně 60 minut při zvýšené teplotě.



## 5.5 Charakterizace tenkých vrstev

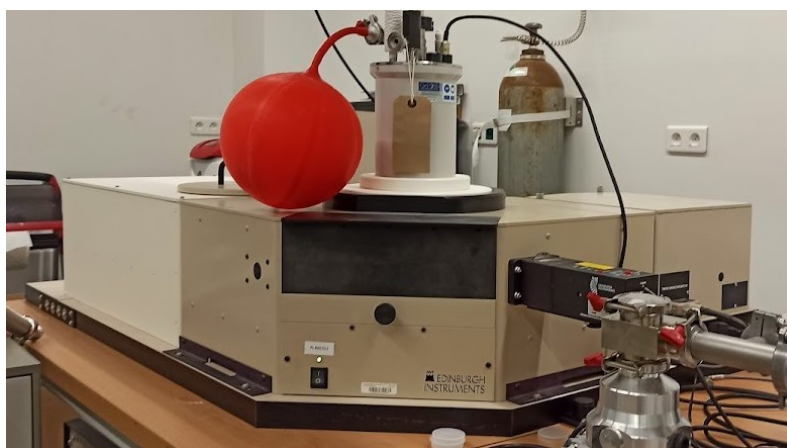
Tenké vrstvy nanesené na křemenných substrátech byly charakterizovány pomocí UV/VIS spektroskopie, fotoluminiscenční spektroskopie, profilometrie a elipsometrie.

Absorpční UV/VIS spektra tenkých vrstev byla změřena na UV/VIS spektrometru Lambda 1050 (Obrázek 26) za laboratorních podmínek. Měření bylo provedeno v rozsahu vlnových délek 200 až 800 nm.



Obrázek 26 UV/VIS spektrometr Lambda 1050 (výrobce Perkin Elmer)

Fotoluminiscenční vlastnosti tenkých vrstev byly charakterizovány na luminiscenčním spektrometru FLS920 (Obrázek 27) s xenonovou lampou Xe900. Emisní a excitační spektra byla měřena za běžných laboratorních podmínek. Poté byla měřena i degradace tenkých vrstev při vystavení konstantní excitační vlnové délce ve vakuu za laboratorní teploty.



Obrázek 27 Luminiscenční spektrometr FLS920 (výrobce Edinburgh Instruments Ltd.)

Pro měření tloušťky tenkých vrstev byl použit mechanický profilometr Dektak XT-E (Obrázek 28) se stylusem o průměru 12,5  $\mu\text{m}$ , přičemž u každého vzorku byla tloušťka měřena vícekrát a byla pak vypočtená průměrná tloušťka. Do tenké vrstvy byl proveden vryp

až po samotný substrát tak, aby byla vytvořena hrana vrstvy a bylo možné z profilu určit tloušťku.



Obrázek 28 Mechanický profilometr Dektak XT-E (výrobce Bruker)

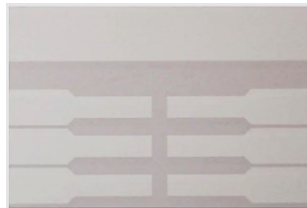
Pro měření optických vlastností tenkých vrstev byl použit elipsometr Uvisel 2 (Obrázek 29). Naměřená data lze porovnat s různými numerickými modely a určit tak kromě indexu lomu také tloušťky vrstvy a další vlastnosti tenké vrstvy. Současně s měřením tloušťky s využitím profilometru, lze bezpečně potvrdit hodnoty tlouštěk získané pomocí elipsometrie.



Obrázek 29 Elipsometr Uvisel 2 (výrobce Horiba)

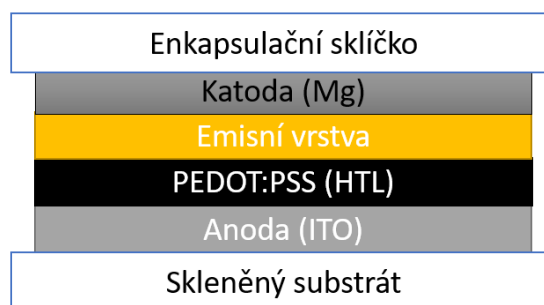
## 5.6 Příprava PLED zařízení

Pro přípravu diod byly použity křemenné substráty s nadeponovanou vrstvou ITO v požadovaném tvaru (Obrázek 30) od výrobce Ossila. Tato vrstva v PLED slouží jako anoda. Tyto substráty byly opět stejně jako křemenné substráty čtyř krokově vyčištěny a vysušeny ve vakuové sušárně. Před samotnou deponací vrstev byly substráty očištěny ozonovým výbojem.



Obrázek 30 Křemenný substrát s nanesenou vrstvou ITO; dle [64]

Architektura připravených diod je znázorněna na Obrázku 31. K deponaci tenkých vrstev bylo opět využito metody spin coatingu, avšak emisní vrstva byla nanášena v inertní atmosféře v laboratorním rukavicovém boxu za účelem zabránění degradace v přítomnosti vzdušného kyslíku a vlhkosti. Jako první byla deponována vrstva PEDOT:PSS (s přidavkem Tritonu X 100, který slouží jako povrchově aktivní látka), která v PLED zařízeních běžně slouží jako vrstva transportující kladné díry (HTL – hole transporting layer), jejím použitím se zvyšuje účinnost těchto zařízení. Po nanesení vrstvy PEDOT:PSS byly substráty umístěny do vakuové sušárny a byly sušeny při teplotě 150 °C po dobu minimálně 30 minut. Poté byla již deponována emisní vrstva v inertní atmosféře buďto samotného polymeru nebo polymerního nanokompozitu s obsahem nanočásticových plniv. Na emisní vrstvu byla naprášena hořčíková katoda pomocí naprašovačky kovů Quantum Q300T (Obrázek 32). Takto připravená polymerní-světlo emitující dioda byla v posledním kroku zaenkapsulována enkapsulačním sklíčkem, jako pojivo byla použita UV vytvrditelná pryskyřice.



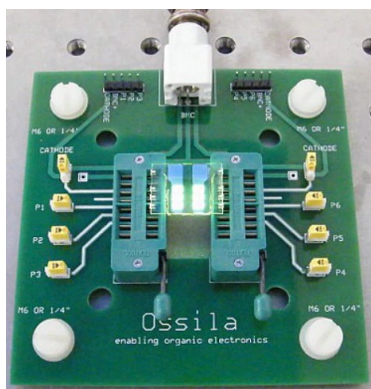
Obrázek 31 Architektura připravených PLED zařízení



Obrázek 32 Naprašovačka kovů Quorum Q300T T

## 5.7 Charakterizace PLED zařízení

Pro charakterizaci různých elektrických prvků se využívá měření Voltampérových charakteristik (VA charakteristika), což je závislost proudu protékajícího tímto prvkem na napětí. V případě diod lze z měření VA charakteristiky zjistit otevírací napětí diody a také lze vyčíst velikost protékajícího proudu při daném napětí, z těchto údajů je následně možné vypočítat výkon. Pro voltampérovou charakteristiku připravených PLED zařízení byl využit zdroj elektrického proudu, vyhodnocovací software a zkušební deska od výrobce Ossila (Obrázek 33). Nejdříve bylo provedeno měření VA charakteristiky automatickým měřícím módem, který postupně zvyšoval napětí až do určité předem nastavené hodnoty (mód pila), tak aby bylo možné následně odečíst otevírací napětí. K měření barevných spekter byl následně využit manuální mód, který po požadovanou dobu udržoval konstantní napětí. Barevná spektra vyzařována diodami byla měřena na optickém spektrometru Avantes Avaspec (Obrázek 34), integrační čas byl nastaven na 1000 ms.



Obrázek 33 Zkušební deska pro PLED zařízení, šest pixelů, převzato z [64]



Obrázek 34 Optický spektrometr Avantes Avaspec

Další metodou pro charakterizaci PLED zařízení bylo měření jasu a určení trichromatických souřadnic pro CIE Lab barevnostní prostor. K měření těchto veličin se využil optický jasoměr Konica Minolta CS 150 (Obrázek 35).



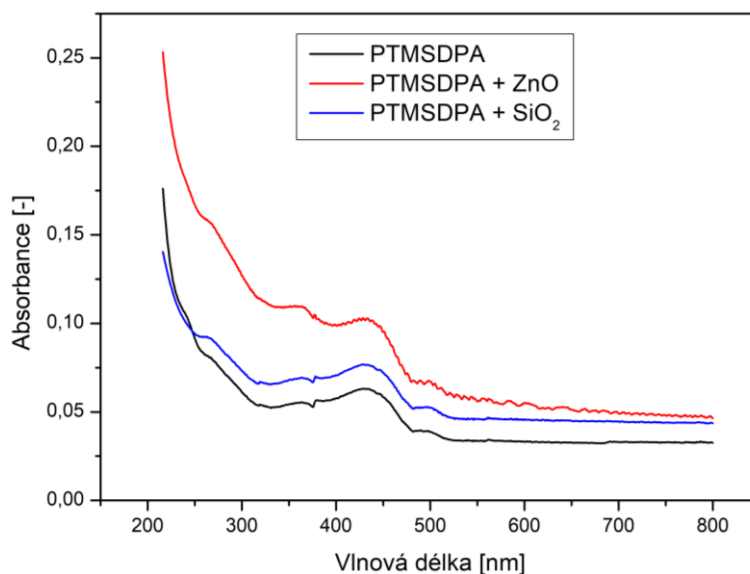
Obrázek 35 Optický jasoměr Konica Minolta CS-150

## 6 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 6.1 Charakterizace tenkých vrstev

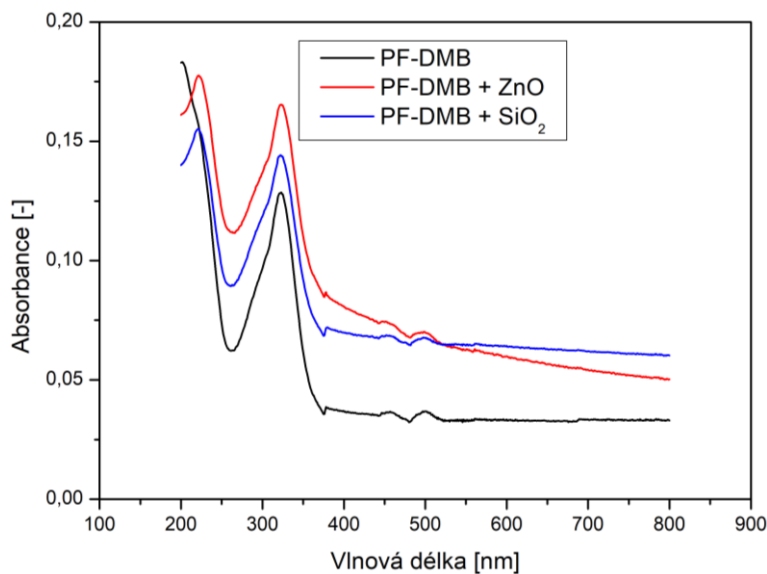
#### 6.1.1 UV/VIS absorpční spektra

Na Obrázku 36 jsou zobrazena absorpční spektra tenkých vrstev na bázi polymeru PTMSDPA.



Obrázek 36 UV-VIS absorpční spektra tenkých vrstev na bázi polymeru PTMSDPA

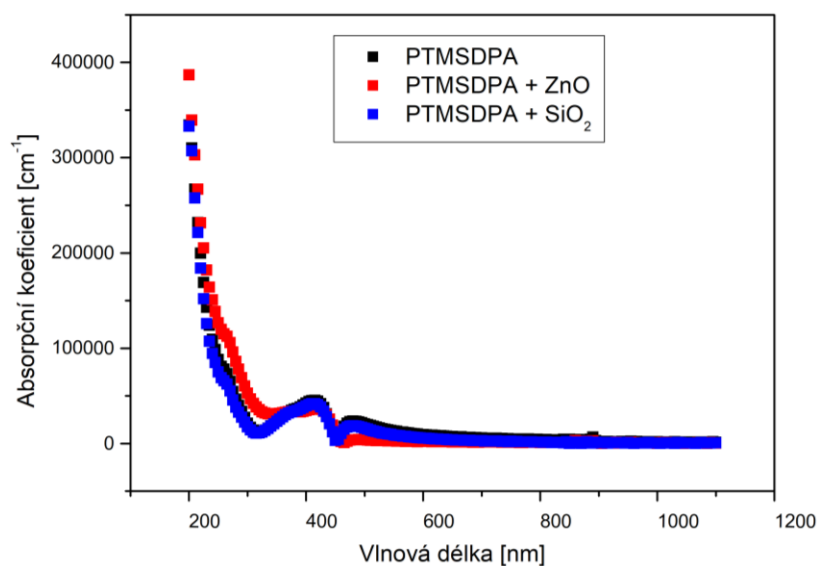
V absorpčních spektrech vrstev z PTMSDPA lze pozorovat, že s přidávkem nanočástic nedochází k posunu maxima hlavního absorpčního pásu polymeru ležícího ve viditelné oblasti na vlnové délce  $\lambda = 429$  nm. Je ovšem patrné, že přidavek ZnO přispívá ke zvýšení absorpce v oblasti okolo 360 až 380 nm, kde má ZnO svůj typický absorpční pás. [65] Přidavek nanočástic ZnO také mění profil hrany hlavního absorpčního pásu polymeru, kde je vidět pozvolně narůstající absorpce již od nějakých 600 nm, přičemž ostatní vzorky vykazovaly nárůst až od 530 nm. U vrstvy plněné SiO<sub>2</sub> je zvýrazněn pás pod 300 nm, což lze přisoudit absorpci samotných nanočástic, pro něž je absorpce v této oblasti typická. [66] Na Obrázku 37 jsou zachycena absorpční spektra tenkých vrstev na bázi polymeru PF-DMB. U absorpčních spekter vzorků s polymerem PF-DMB lze pak pozorovat jedno výrazné absorpční maximum na vlnové délce  $\lambda = 323$  nm, u polymeru plněného nanočásticemi ZnO lze pozorovat narůstající absorpci okolo 400 nm, což může být přisouzeno absorpci ZnO, který v této oblasti má absorpční hranu.



Obrázek 37 UV-VIS absorpční spektra tenkých vrstev na bázi polymeru PF-DMB

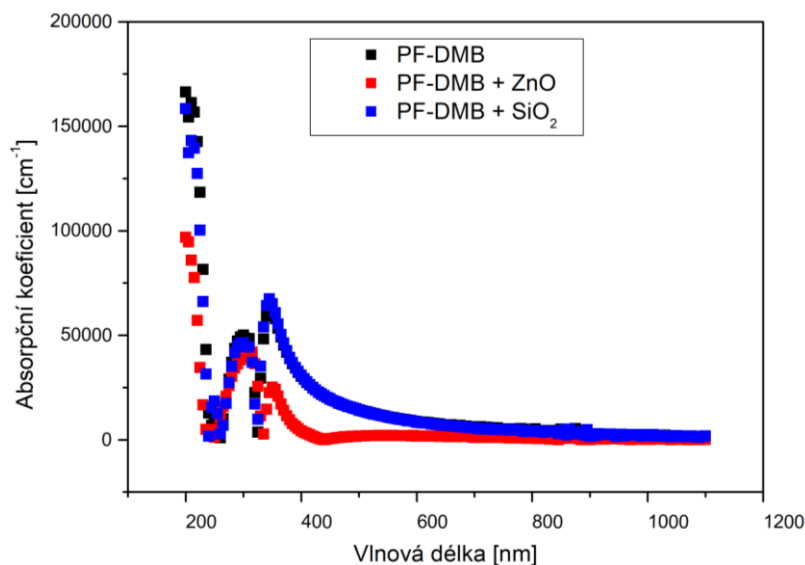
### 6.1.2 Elipsometrie

Na Obrázcích 38 a 39 jsou zobrazeny závislosti absorpčního koeficientu ( $\alpha$ ) na vlnové délce pro studované materiály. Lze vidět, že inkorporace nanočástic oxidu křemičitého do polymerní matrice na bázi PTMSDPA a také PF-DMB nijak výrazně neovlivňuje hodnoty absorpčního koeficientu. Rozdíly jsou však patrné v případě inkorporace nanočástic oxidu zinečnatého, přičemž absorpční koeficient nabývá odlišných hodnot v oblasti vlnových délek, ve kterých ZnO sám aktivně absorbuje. Přídavek nanočástic oxidu zinečnatého se viditelně více projevuje u tenké vrstvy na bázi polymeru PF-DMB.



Obrázek 38 UV-VIS absorpční spektra tenkých vrstev s polymerem PF-DMB





Obrázek 39 UV-VIS absorpční spektra tenkých vrstev s polymerem PF-DMB

Závislosti  $\alpha$  na vlnové délce pro všechny materiály a optický materiálový projev jsou ve shodě s výsledky získanými pomocí absorpčními spektroskopie.

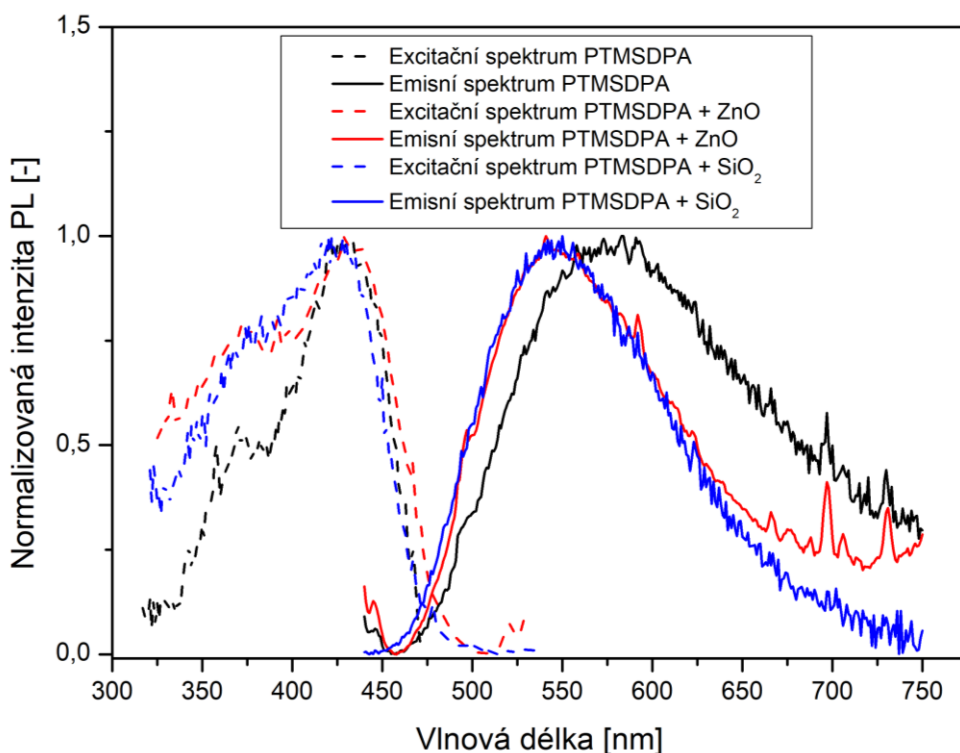
### 6.1.3 Fotoluminiscenční spektra

Na Obrázku 40 jsou zobrazena excitační a emisní fotoluminiscenční (PL) spektra tenkých vrstev samotného a také plněného polymeru PTMSDPA, pro kvalitativní srovnání byla data znormailizována. U emisního spektra čistého polymeru PTMSDPA lze pozorovat široký pás s jedním dominantním maximem na vlnové délce  $\lambda = 580$  nm. Situace je však odlišná u systémů plněných nanočásticemi oxidu zinečnatého a oxidu křemičitého, přičemž inkorporace nanočástic způsobila v obou případech posun emisního maxima na vlnovou délku  $\lambda = 540$  nm, tedy směrem k zelené oblasti viditelného spektra a současně zúžení emisního pásu. Tento posuv k nižším vlnovým délkám lze vysvětlit následovně – inkorporace nanočástic zpříčiňuje oproti vrstvám čistého polymeru rozuspořádání makromolekulárních řetězců, čímž se zvyšuje energetická „neuspořádanost“ systému a jsou generovány nové energetické hladiny s vyšší hodnotou energie, ze kterých pak dochází k zářivé relaxaci. [67] Taková interpretace je nanejvýš pravděpodobná díky pozorování na jiných polymerních materiálech, kdy v méně uspořádaných polymerních vrstvách dochází v PL spektrech k hypsochromnímu posunu. [68], [69]

U excitačních spekter lze pozorovat u nanokompozitních vrstev výraznější intenzitu v oblasti od 350 do 400 nm, což je dáno rozšířením souboru chromoforů, především

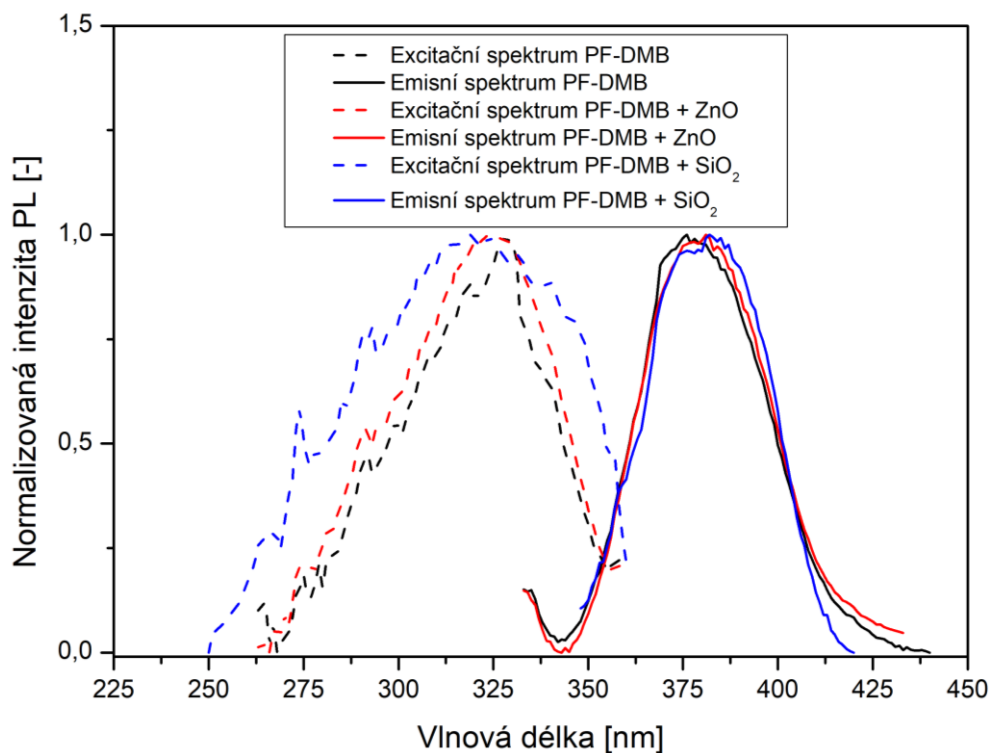


postranních substituentů, které se aktivizují po rozuspořádání makromolekulárních řetězců a zeslabení mezimolekulárních sil na ně působících.



Obrázek 40 Emisní a excitační fotoluminiscenční spektra tenkých vrstev s polymerem PTMSDPA

Na Obrázku 41 jsou zobrazena normalizovaná excitační a emisní fotoluminiscenční spektra tenkých vrstev čistého a také plněného polymeru PF-DMB. Je patrné, že ve všech emisních spektrech se vyskytuje pouze jedno dominantní maximum, a to na vlnové délce  $\lambda = 380$  nm, což odpovídá výsledkům dostupným v literatuře. [62] Z grafu plyne, že s přidáním nanočástic oxidu zinečnatého a oxidu křemičitého nedochází k žádnému výraznějšímu posunu emisního maxima nebo změně tvaru pásu. Inkorporace těchto nanočástic do polymerní matrice PF-DMB nemá tedy žádný výrazný vliv na emisní spektra. Ovšem, stejně tak jako u materiálu PTMSDPA, lze pozorovat s inkorporací nanočástic změnu v excitačních spektrech. S přidáním nanočástic dochází k jejich rozšíření, kdy šířka píku v polovině výšky naroste o 10 nm po přidání ZnO a o 30 nm v případě přidání  $\text{SiO}_2$  oproti čistému PF-DMB. Tento jev lze interpretovat obdobně jako u PTMSDPA, tedy že dojde k narušení uspořádanosti uložení polymerních řetězců a dojde k aktivaci dalších fluoroforů na řetězci.

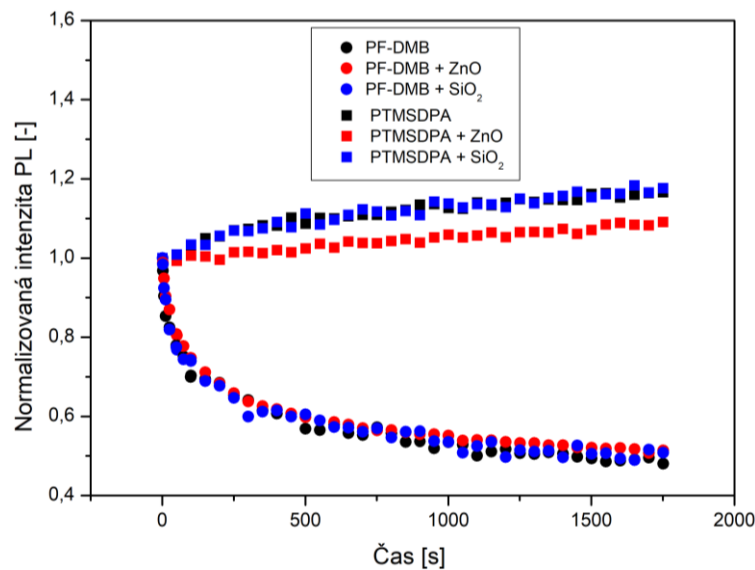


Obrázek 41 Emisní a excitační fotoluminiscenční spektrum tenkých vrstev s polymerem PF-DMB

#### 6.1.4 Degradací měření fotoluminiscenčních spekter

Na Obrázku 42 je zachycen vývoj fotoluminiscence v závislosti na čase při konstantní emisní ( $\lambda_{\text{PTMSDPA}} = 580 \text{ nm}$ ;  $\lambda_{\text{PF-DMB}} = 380 \text{ nm}$ ) a excitační ( $\lambda_{\text{PTMSDPA}} = 430 \text{ nm}$ ;  $\lambda_{\text{PF-DMB}} = 323 \text{ nm}$ ) vlnové délce. Co se týče fotostability v závislosti na čase, lze pozorovat velký rozdíl mezi oběma zkoumanými polymerními materiály. U tenké vrstvy PF-DMB dochází ihned na začátku k fotodegradaci, degradace pokračuje v průběhu celého měření (1800 s), až se intenzita PL ustaví na přibližně 50 % původní hodnoty. Naopak u tenké vrstvy PTMSDPA dochází v čase dokonce k mírnému nárůstu fotoluminiscence, a to asi 15 % oproti počáteční hodnotě intenzity PL. To by mohlo odhalovat zajímavou vlastnost substituovaného polyacetyleny, a to vlastnost tzv. self-healingu, nebo také „fotocuringu“. Obdobné vlastnosti byly pozorovány u sigma konjugovaných polysilanů, kde při působení elektromagnetického záření docházelo k tvorbě makroradikálů, které potom společně interagovaly za vzniku energeticky výhodnějších struktur a došlo ke zlepšení optoelektrických vlastností. [70]

Přídavek nanoplňiva do polymerů nemá na jejich fotodegradaci vliv. Lze pouze pozorovat nižší nárůst PL intenzity u systému PTMSDPA/ZnO.



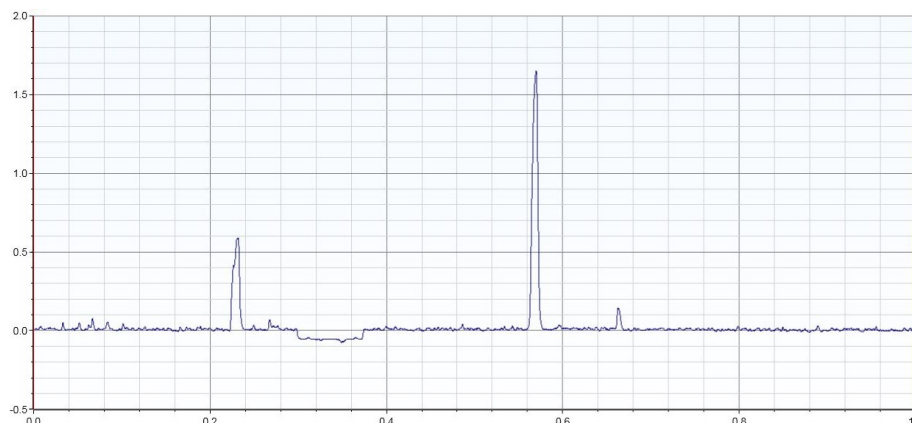
Obrázek 42 Závislost poklesu intenzity fotoluminiscence na čase

### 6.1.5 Profilometrie

Na Obrázku 43 je uveden příklad profilu povrchu vzorku získaného z měření na kontaktním profilometru, v Tabulce 1 jsou pak uvedeny výsledné hodnoty tloušťky vrstev nanesených metodou spin coatingu při otáčkách 2000 RPM. Tloušťka emisní vrstvy je velmi důležitý parametr ovlivňující výkon a také životnost PLED zařízení. Ideální hodnota tloušťky emisní vrstvy se však liší s ohledem na použitý materiál. Limit je dán maximální a minimální tloušťkou emisní vrstvy. Maximální přípustná tloušťka je taková, kdy je emitovaný foton schopen opustit aktivní vrstvu tak, aby nedošlo k jeho samoabsorpci. Minimální tloušťka je taková, kdy právě dochází k vyvážené rekombinaci nosičů náboje. [71] Tloušťka výsledných vrstev byla odladěna tak, aby se pohybovala okolo 50 nm.

Tabulka 1 Výsledky měření tloušťky tenkých vrstev

Systém	Tloušťka vrstvy [nm]	Systém	Tloušťka vrstvy [nm]
PTMSDPA	45 ± 2	PF-DMB	52 ± 3
PTMSDPA + ZnO	59 ± 2	PF-DMB + ZnO	55 ± 2
PTMSDPA + SiO <sub>2</sub>	35 ± 3	PF-DMB + SiO <sub>2</sub>	70 ± 2



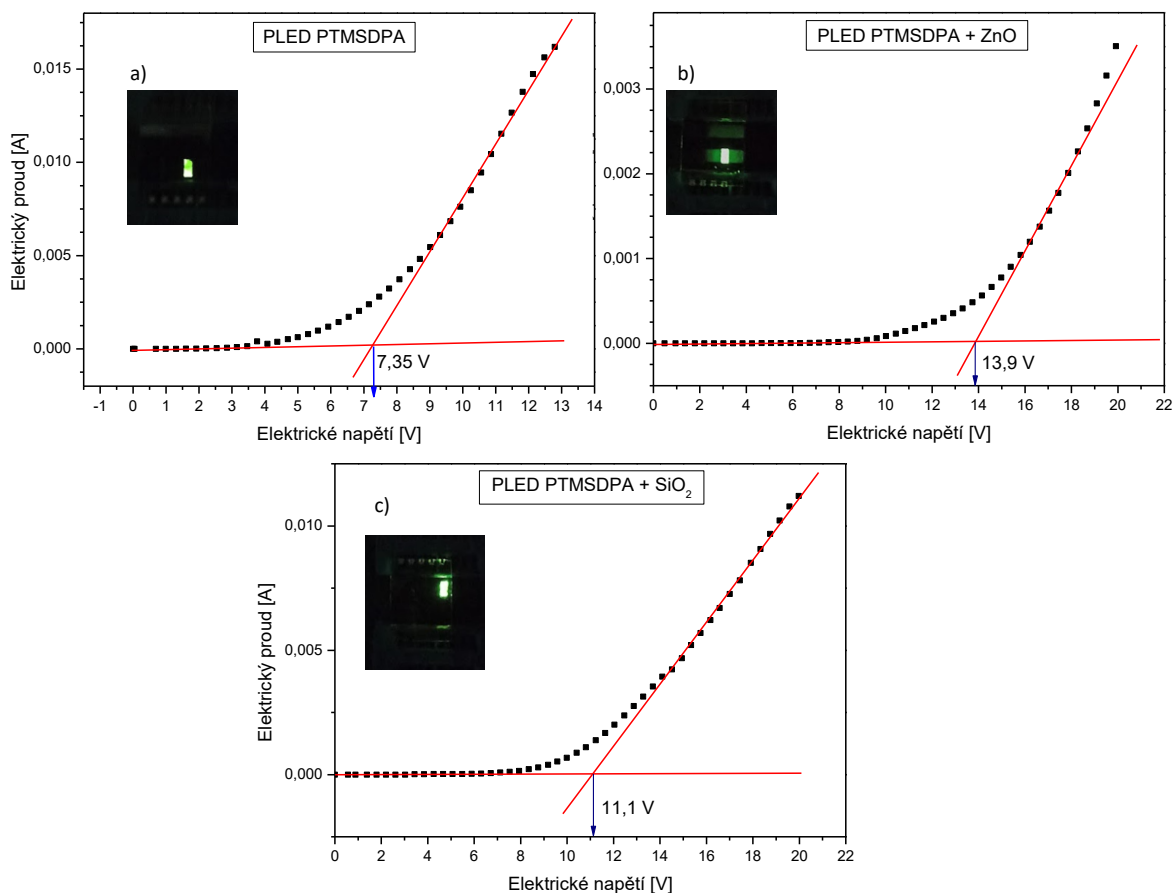
Obrázek 43 Záznam měření získaný na mechanickém profilometru pro PF-DMB.

## 6.2 Charakterizace PLED zařízení

### 6.2.1 PLED na bázi PTMSDPA

Na Obrázku 44 jsou zobrazeny voltampérové charakteristiky jednotlivých diod s emisní vrstvou na bázi PTMSDPA. V případě diod lze z VA charakteristiky odečíst otevírací napětí, tedy napětí potřebné k tomu, aby skrz diodu snadno protékal proud. Dostupné studie věnující se inkorporaci nanočástic do emisní vrstvy PLED zařízení dospěly k tomu, že tímto způsobem lze snížit hodnoty otevíracího napětí. [36], [47] Navzdory tomu v případě polymerních nanokompozitů na bázi PTMSDPA nedošlo inkorporací použitých nanočástic ke snížení otevíracího napětí, ba naopak hodnoty otevíracího napětí se po přidavku nanočástic zvýšily. U plniva  $\text{SiO}_2$ , by se to nemuselo zdát až tak překvapivé, neboť se jedná o dielektrikum. Nicméně, pokud bychom očekávali „hoppingový“ transport náboje u PTMSDPA a současně bychom očekávali narušení struktury uspořádání řetězců PTMSDPA, pak by i tak mohlo dojít k lepšímu transportu nosičů do aktivní vrstvy, [72] a pak by nemuselo nastat zvýšení otevíracího napětí. Hodnoty otevíracích napětí jsou uvedeny v Tabulce 2.

Z voltampérových charakteristik lze pak dále vyčíst, že PLED zařízení s aktivní vrstvou plněnou nanočásticemi operují při nižším elektrickém výkonu. Injekce elektronů musí být podporována vyšším napětím, nicméně operační proud je relativně nízký. To může být výhodné z hlediska životnosti emisní vrstvy, jelikož při průchodu vysokých proudů se emisní vrstva zahřívá a může tak snadněji degradovat.



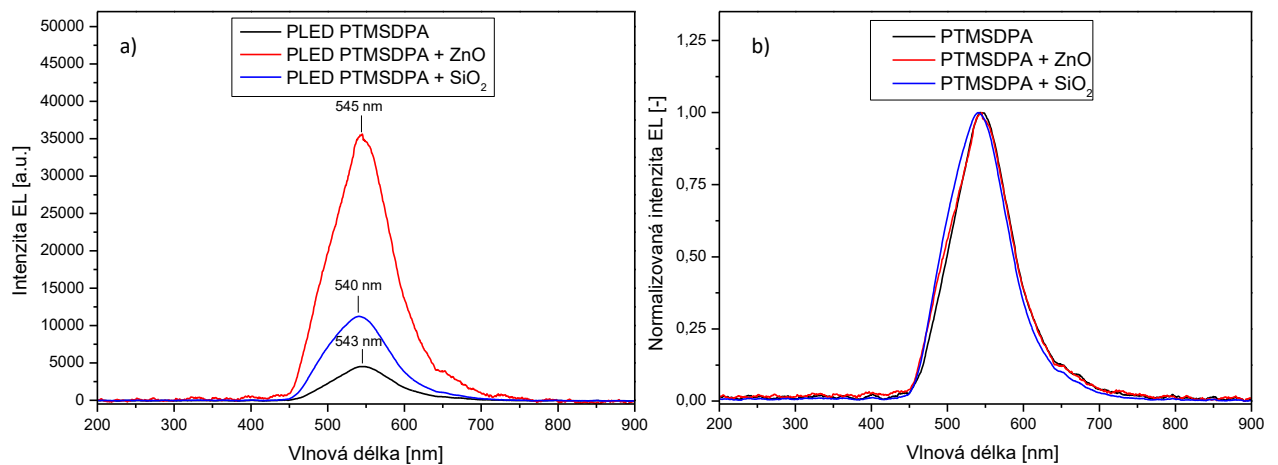
Obrázek 44 Voltampérová charakteristika společně s fotografií polymerních světlo-emitujících diod s emisní vrstvou – a) PTMSDPA, b) PTMSDPA plněný nanočásticemi  $\text{SiO}_2$ , c) PTMSDPA plněný nanočásticemi ZnO

Tabulka 2 Otevírací napětí připravených PLED na bázi PTMSDPA

Polymer/Plnivo	Čistý	ZnO	$\text{SiO}_2$
PTMSDPA	7,35 V	13,9 V	11,1 V

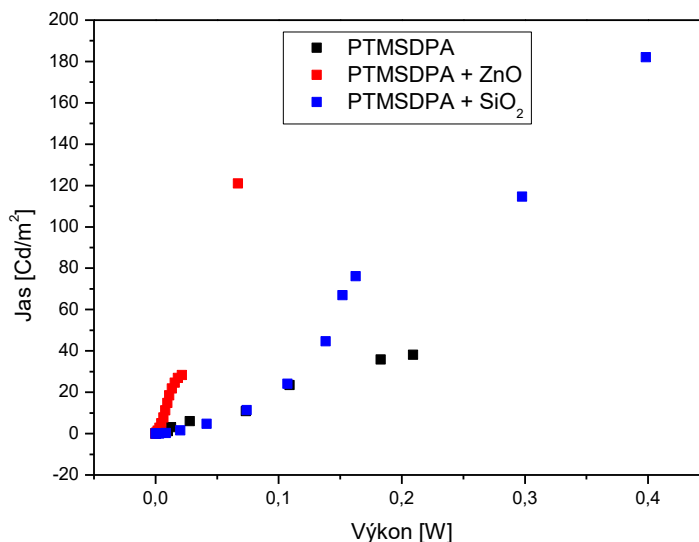
Na Obrázku 45 jsou zobrazena elektroluminiscenční spektra polymerních světlo-emitujících diod na bázi polymeru PTMSDPA. Lze vidět, že přítomnost nanočástic v emisní polymerní vrstvě nijak výrazně neovlivňuje tvar elektroluminiscenčního spektra, přičemž všechny tři diody emitují světlo v zeleno-žluté oblasti viditelného spektra – maximum intenzity elektroluminiscence se nachází přibližně na vlnové délce  $\lambda = 540 \text{ nm}$ . Je však patrné, že přítomnost nanočástic v emisní polymerní vrstvě zapříčiňuje zvýšení intenzity elektroluminiscence při stejném operačním napětí. Přídavkem nanočástic oxidu křemičitého došlo k třináásobnému zvětšení, v případě nanočástic oxidu zinečnatého došlo dokonce k sedminásobnému navýšení intenzity elektroluminiscence (EL). Nárůst intenzity

elektroluminiscence po inkorporaci nanočástic lze vysvětlit tak, že nanočástice fungují jako rekombinační centra a vytvářejí nové stavy vhodné pro rekombinaci excitonů. Dále by se mohlo uvažovat, že nanočástice podporují transport elektronů injektovaných na katodě směrem k aktivní vrstvě. Toto je ovšem v kontradikci s daty získanými při měření voltampérových charakteristik, neboť zlepšený transport nábojů by se měl projevit snížením otevíracího napětí. Proto lze usoudit, že v případě systému PTMSDPA/nanočástice se nanočástice u nárůstu EL intenzity projevují spíše jako pasti excitonů, na nichž dochází k zářivé rekombinaci.



Obrázek 45 a) Elektroluminiscenční spektra PLED diod s emisními vrstvami na bázi PTMSDPA při napětí 20 V, b) Normalizovaná elektroluminiscenční spektra vyzařovaná PLED s emisními vrstvami na bázi PTMSDPA při napětí 20 V

Na Obrázku 46 jsou vyneseny závislosti jasů na výkonu pro PLED na bázi polymeru PTMSDPA. Maximální dosažený jas pro diodu s aktivní vrstvou z čistého polymeru byla pouze přibližně  $40 \text{ cd/m}^2$ , a to při elektrickém výkonu  $0,21 \text{ W}$ . V případě PLED na bázi PTMSDPA plněného nanočásticemi oxidu zinečnatého bylo dosaženo jasů až  $120 \text{ cd/m}^2$  při zhruba třetinovém výkonu ( $0,065 \text{ W}$ ), plněním nanočásticemi oxidu křemičitého pak bylo dosaženo jasů až  $180 \text{ cd/m}^2$ , avšak při poněkud vyšším výkonu ( $0,41 \text{ W}$ ). Je dobré srovnávat jasů jednotlivých diod při stejném elektrickém výkonu, neboť se tím získá srovnání jejich účinností. Lze tedy jasně prohlásit, že přídavek ZnO nanočástic vede k vyšší efektivitě zařízení, neboť při menší spotřebě elektrické energie se získá větší množství světla. V oblasti, kde je možné toto srovnání udělat, tzn. při jasů okolo  $35 \text{ cd/m}^2$ , pro diodu z čistého PTMSDPA je nutno dodat  $0,18 \text{ W}$ , pro diodu PTMSDPA/SiO<sub>2</sub>  $0,13 \text{ W}$  a pro diodu z PTMSDPA/ZnO pouhých  $0,03 \text{ W}$ . Z toho jasně vyplývá, že přídavek nanočástic přispívá k vyšší proudové účinnosti v diodě, v případě ZnO až více než čtyřikrát. Hodnoty proudové účinnosti při nejvyšší hodnotě jasů jsou uvedeny v Tabulce 3.



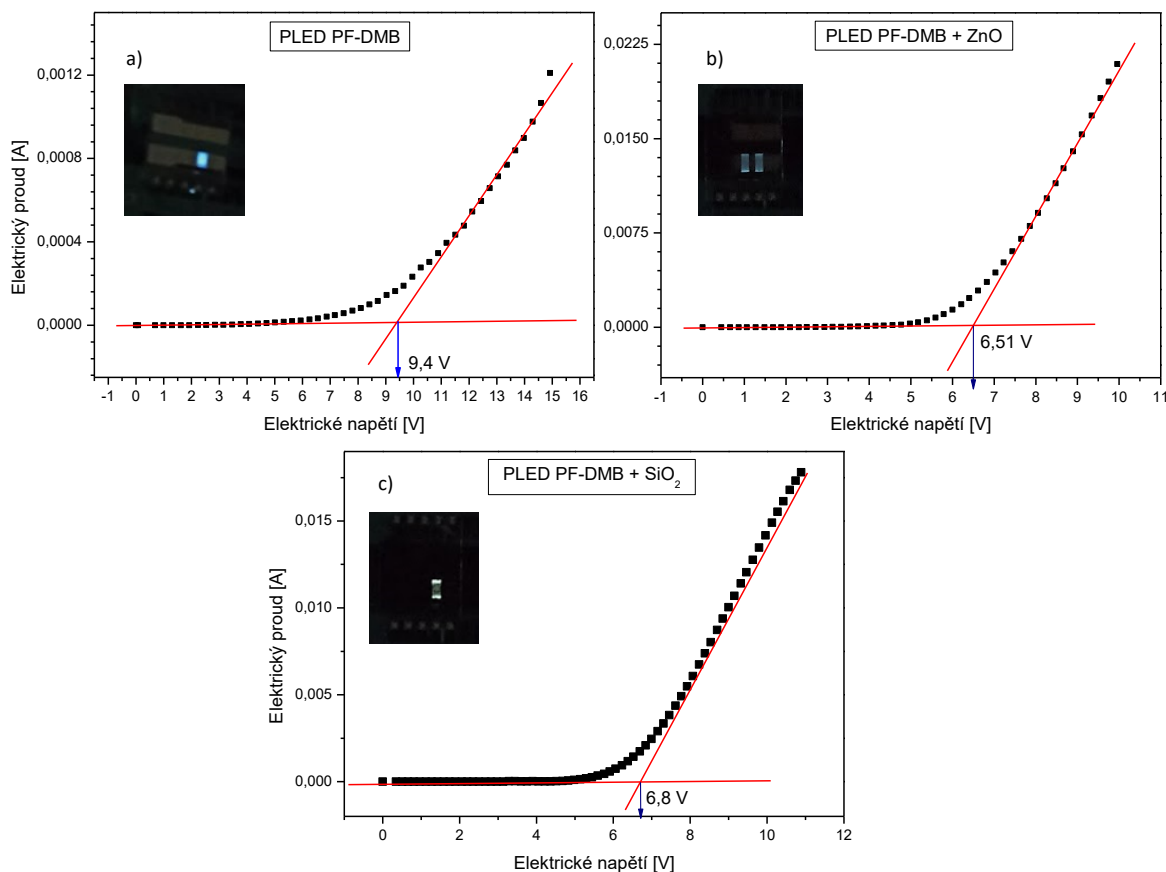
Obrázek 46 Závislost jasu na výkonu pro PLED na bázi PTMSDPA

Tabulka 3 Hodnoty maximálního dosaženého jasu, protékajícího elektrického proudu a proudové účinnosti pro PLED zařízení na bázi PTMSDPA

PLED	Jas [cd/m <sup>2</sup> ]	Elektrický proud [mA]	Proudová účinnost [mcd/A]
PTMSDPA	38	4,19	70
PTMSDPA + ZnO	121	2,89	323
PTMSDPA + SiO <sub>2</sub>	182	12,3	114

### 6.2.2 PLED na bázi PF-DMB

Na Obrázku 47 jsou zobrazeny voltampérové charakteristiky jednotlivých diod s emisní vrstvou na bázi PF-DMB s fotografií dané diody. Ze získaných dat lze vidět, že na rozdíl od PLED na bázi PTMSDPA došlo u diod na bázi PF-DMB inkorporací nanočástic ke snížení otevíracího napětí. Inkorporací však také došlo ke zvýšení elektrického proudu, při kterém PLED operují, což by mohl být problém z hlediska stability polymerní matrice, která by pak při zvýšeném průtoku elektrického proudu a následné disipaci tepla mohla degradovat. Navíc, PF-DMB má tendenci podléhat i fotodegradaci (kapitola 6.1.4), čili lze usuzovat obecně náchylnost tohoto materiálu k degradaci.



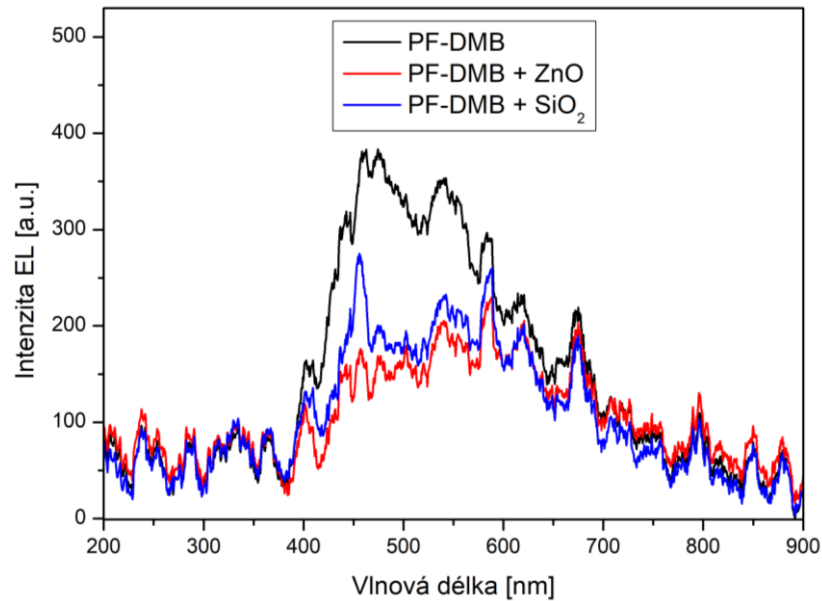
Obrázek 47 Voltampérová charakteristika společně s fotografií polymerních světlo-emitujících diod s emisní vrstvou – a) PF-DMB, b) PF-DMB plněný nanočásticemi ZnO, c) PF-DMB plněný nanočásticemi SiO<sub>2</sub>

Na Obrázku 48 jsou zobrazena spektra polymerních světlo-emitujících diod na bázi polymeru PF-DMB. Je možné pozorovat, že PLED na bázi polymeru PF-DMB jakožto emisní vrstvou emituje v modré oblasti viditelného spektra. Přestože plněné PLED na bázi PF-DMB operují za vyšších elektrických proudů a mají nižší otevírací napětí (hodnoty otevíracích napětí jsou uvedeny v Tabulce 4, neprojevovalo se to bohužel pozitivně na elektroluminiscenci, např. zvýšením její intenzity. Naopak, u plněných aktivních vrstev došlo k částečnému vymizení luminiscence v modré oblasti v intervalu 400–500 nm.

Tabulka 4 Otevírací napětí připravených PLED na bázi PF-DMB

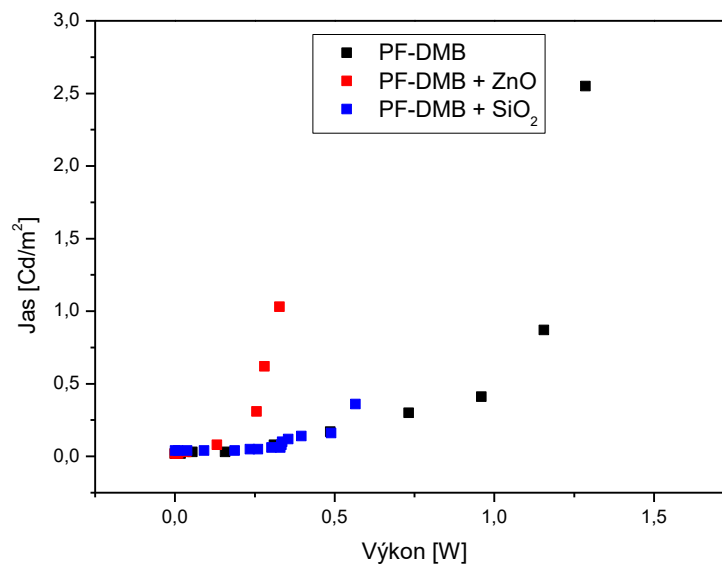
Polymer/Plnivo	Čistý	ZnO	SiO <sub>2</sub>
PF-DMB	9,4 V	6,5 V	6,8 V





Obrázek 48 Elektroluminiscenční spektra PLED diod s emisními vrstvami na bázi PF-DMB při 15 V

Na Obrázku 49 jsou pak zobrazeny závislosti jasu na výkonu pro PLED na bázi polymeru PF-DMB. Oproti čistému polymeru PTMSDPA ( $2,55 \text{ cd/m}^2$ ) bylo dosaženo u nanokompozitních vrstev maximálního jasu okolo pouhé  $1 \text{ cd/m}^2$ . U PLED na bázi PF-DMB a nanočástic oxidu zinečnatého lze však pozorovat stejný trend jako u PTMSDPA – tato PLED dosahuje stejně jako PLED na bázi čistého PF-DMB nízkého jasu, avšak za přibližně třetinového výkonu.



Obrázek 49 Závislost jasu na výkonu pro PLED na bázi PF-DMB

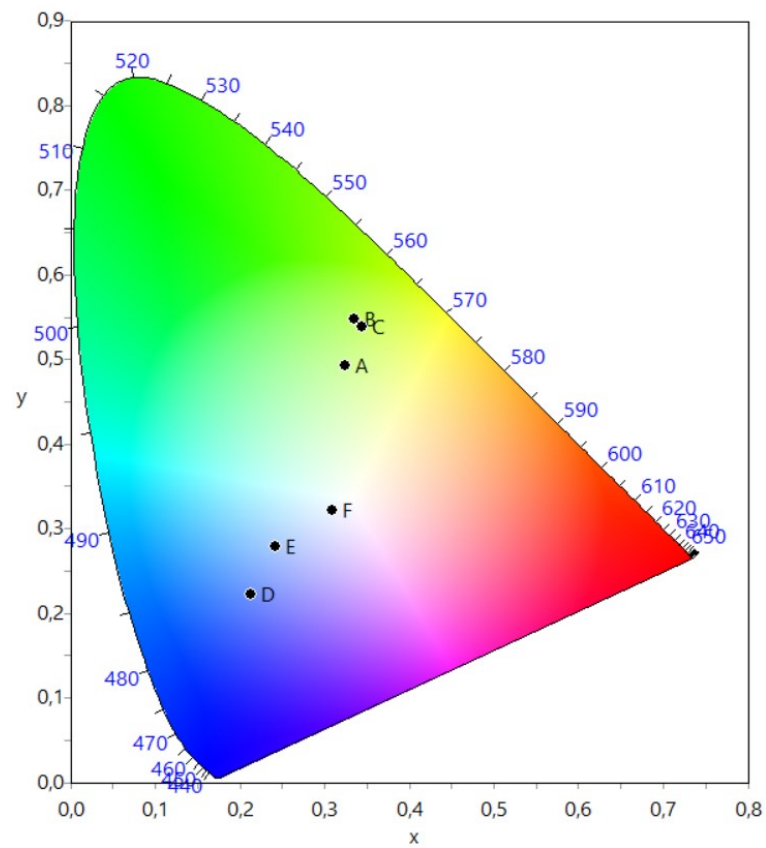
Pokud se podíváme do Tabulky 5, lze z ní vyčíst, že s přidavkem nanočástic ZnO se zvýší proudová účinnost asi dvakrát. Nicméně, pro SiO<sub>2</sub> se proudová účinnost snižuje, a to i ve srovnání s čistým polymerem.

Tabulka 5 Hodnoty maximálního dosaženého jasu, protékajícího elektrického proudu a proudové účinnosti pro PLED zařízení na bázi PF-DMB

PLED	Jas [cd/m <sup>2</sup> ]	Elektrický proud [mA]	Proudová účinnost [mcd/A]
PF-DMB	2,55	84,75	0,23
PF-DMB + ZnO	1,03	21,07	0,37
PF-DMB + SiO <sub>2</sub>	0,36	19,42	0,14

### 6.2.3 Barevnost připravených diod

Na Obrázku 50 je znázorněn chromatický diagram CIE Lab 1931 společně s vynesnými body odpovídajícími barvám připravených PLED zařízení. PLED zařízení na bázi polymeru PTMSDPA leží se svou emisí na pomezí zelené a žluté barvy, což i odpovídá naměřeným spektrům. Inkorporace nanočástic do této polymerní matrice zapříčinila mírný posun do zelené oblasti. U PF-DMB lze pozorovat, že diody vyzařovaly barvu na pomezí modré a fialové oblasti. Přídavek nanočástic do vrstvy z PF-DMB měl pak efekt snížení modré složky emise, což se projevilo posunem trichromatických souřadnic tak, že body se blížily více do středu CIE prostoru, tedy k bílé emisí.



Obrázek 50 Barvy vyzařované polymerními světlo-emitujícími diodami zanesené v chromatickém diagramu (CIE Lab 1931) – A) PTMSDPA, B) PTMSDPA + SiO<sub>2</sub>, C) PTMSDPA + ZnO, D) PF-DMB, E) PF-DMB + ZnO, F) PF-DMB + SiO<sub>2</sub>

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit teoretickou rešerši zaměřenou na tenké nanokompozitní vrstvy a jejich uplatnění v elektronice. Dále pak připravit a charakterizovat tenké nanokompozitní vrstvy a polymerní světlo-semitující diody na bázi polymerní matrice a nanočásticového plniva a studovat jejich vlastnosti.

V teoretické části byla vypracována literární rešerše zabývající se problematikou přípravy a charakterizace polymerních nanokompozitních tenkých vrstev pro použití v elektronice, studiem vývoje a organizace struktury v tenkých nanokompozitních vrstvách. Byly popsány elektricky vodivé polymery a také mechanismus jejich elektrické vodivosti. Následně byla pozornost věnována popisu polymerních světlo-emitujících diod a polymerních nanokompozitů. V praktické části pak byly připraveny nanokompozitní vrstvy vhodné pro použití v elektronice. Tyto vrstvy pak byly pomocí dostupných metod charakterizovány. Lze tedy konstatovat, že cíle práce byly beze zbytku naplněny.

Nutno zdůraznit, že práce také významnou měrou přispívá k rozšíření poznání v oblasti uplatnění polymerů a nanokompozitních materiálů z nich připravených v elektronice, neboť byly dosaženy nové a jedinečné výsledky.

Bylo pracováno s novými a doposud ve světlo emitujících diodách nepoužitými polymery. Byla provedena prvotní charakterizace těchto materiálů, byly získány údaje o optických a optoelektronických vlastnostech a o chování těchto materiálů v tenkých vrstvách. Lze vyzdvihnout fakt, že polymer PTMSDPA je velmi stabilní materiál, dobře filmtvorný, jenom je nutno pracovat s nižšími koncentracemi roztoků, neboť jeho vysoká molekulová hmotnost způsobuje vysokou viskozitu roztoků s vyššími koncentracemi. Naproti tomu, polymer PF-DMB měl nižší molární hmotnost, filmtvornost tohoto materiálu byla také dobrá. Ovšem tento polymer je světlo citlivý a podléhá fotodegradaci a to až o téměř 50 % oproti původním hodnotám luminiscence.

Dalším významným dosaženým výsledkem je fakt, že z obou použitých polymerů je možné připravit funkční světlo emitující diodu. Tento významný výsledek je pak dále rozšířen o poznání, jak nanočástice přidané do aktivní vrstvy ovlivňují chování polymerní matrice. V případě PTMSDPA je vliv nanočástic pozitivní a je dosahováno zvýšení proudové účinnosti 4krát oproti čisté matrici, a to jak pro ZnO, tak i pro dielektrické nanočástice SiO<sub>2</sub>, dále pak zvýšení jasů a svítivosti 3–5krát. U polymeru PF-DMB lze pozorovat opět zvýšení

proudové účinnosti po přidavku ZnO, nicméně nebylo dosaženo zvýšení jasů, což zřejmě zapříčiňuje menší stabilita polymeru a při průtoku větších proudů jeho degradace.

Bylo také zjištěno, že přidavek nanočástic do matrice PTMSDPA způsobuje změny optoelektronických vlastností. Dochází k posunu emisního fluorescenčního maxima k nižším vlnovým délkám. To může být způsobeno narušením struktury uspořádání řetězců a změny agregace segmentů. U PF-DMB nebyl takový jev pozorován.

Předložená práce otevírá možnosti využití zkoumaných polymerních materiálů v elektronice, nicméně je nutné věnovat se dalšímu studiu těchto polymerů se zřetelem na popis jejich pásové struktury, umístění HOMO a LUMO pásů na energetické ose, aby bylo možné lépe směřovat úsilí v optimalizaci výkonu diod z těchto materiálů. U polymeru PF-DMB pak bude nutné, aby byl vytvořen systém, ve kterém by byla jeho nižší stabilita potlačena. Otázkou pro další výzkum je i míra samotného plnění nanočástic a optimalizace koncentrace pro zlepšení výkonu diod.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] SHIRAKAWA, Hideki *et al.* Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)<sub>x</sub>. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*. 1977, (16). ISSN 0022-4936. doi:10.1039/c39770000578
- [2] LI, Gang, ZHU Rui a YANG Yang. Polymer solar cells. *Nature Photonics*. 2012, 6(3), s. 153-161. ISSN 1749-4885. doi:10.1038/nphoton.2012.11
- [3] BLOM, Paul. Polymer Electronics: To Be or Not to Be?. *Advanced Materials Technologies*. 2020, 5(6). ISSN 2365-709X. doi:10.1002/admt.202000144
- [4] BAURI, Jayanta, CHOUDHARY Ram a MANDAL Gobind. Recent advances in efficient emissive materials-based OLED applications: a review. *Journal of Materials Science*. 2021, 56(34), s. 18837-18866. ISSN 0022-2461. doi:10.1007/s10853-021-06503-y
- [5] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-859-2072-7.
- [6] YONGFANG, Li. Conducting Polymers. *Organic Optoelectronic Materials*. 1. Cham: Springer, 2015, s. 23-50. ISBN 978-3-319-16861-6.
- [7] POPE, M., KALLMANN H. P. a MAGNANTE P.. Electroluminescence in Organic Crystals. *The Journal of Chemical Physics*. 1963, 38(8), s. 2042-2043. ISSN 0021-9606. doi:10.1063/1.1733929
- [8] NAMSHEER K., a ROUT Chandra. Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *RSC Advances*. 2021, 11(10), s. 5659-5697. ISSN 2046-2069. doi:10.1039/D0RA07800J
- [9] TABATABAIAN Mehrzad. Solar Cells, *Direct Energy Conversion Technologies*. 2. Duxbury: Mercury Learning and Information, 2020, s. 14-46. ISBN 978-1-68392-453-1.
- [10] BASAK, T.K. Semiconductors. *Electrical Engineering Materials*. 1. Londýn: New Academic Science, 2012, s. 46-84. ISBN 978-1-906574-43-7.
- [11] LIMING, Dai. Conducting Polymers. *Intelligent Macromolecules for Smart Devices: From Materials Synthesis to Device Applications*. 1. Londýn: Springer, 2004, s. 41-80. ISBN 978-1-85233-510-6.

- [12] LE, Thanh-Hai, Yukyung KIM a Hyeonseok YOON. Electrical and Electrochemical Properties of Conducting Polymers. *Polymers*. 2017, 9(12). ISSN 2073-4360. doi:10.3390/polym9040150
- [13] MACDIARMID, Alan Graham et al. The concept of 'doping' of conducting polymers: the role of reduction potentials. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1985, 314(1528), s. 3-15. ISSN 0080-4614. doi:10.1098/rsta.1985.0004
- [14] MAJEED, Kareema. Conducting Polymers Application. *New Polymers for Special Applications*. InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0744-6. doi:10.5772/48316
- [15] MATINEH, Ghomi a NAZARZADEH Ehsan. Properties of Conducting Polymers. AMIRI, Amirhassan a Chaudhery HUSSAIN. *Conductive Polymers in Analytical Chemistry*. 1. Washington, D.C.: ACS Publications, 2022, s. 39-65. ISBN 9780841297869.
- [16] GEFFROY, Bernard, LE ROY Philippe a PRAT Christophe. Organic light-emitting diode (OLED) technology: materials, devices and display technologies. *Polymer International*. 2006, 55(6), s. 572-582. ISSN 0959-8103. doi:10.1002/pi.1974
- [17] SUDHEENDRAN, Sujith, DUBEY Deepak a SHAHNAWAZ Kumar et al. Approaches for Long Lifetime Organic Light Emitting Diodes. *Advanced Science*. 2021, 8(1). ISSN 2198-3844. doi:10.1002/advs.202002254
- [18] LG's New 97-Incher Is The Largest OLED TV Screen Ever Made. In: *Bosshunting* [online]. Sydney: Bosshunting, 2022 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.bosshunting.com.au/lifestyle/technology/lg-97-inch-oled/>
- [19] GIOVANELLA, Umberto, PASINI Mariacecilia a BOTTA Chiara. Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs): Working Principles and Device Technology. *Applied Photochemistry*. Cham: Springer International Publishing, 2016, 145-196. Lecture Notes in Chemistry. ISBN 978-3-319-31669-7. doi:10.1007/978-3-319-31671-0\_3
- [20] SUN, Nan, Chengming JIANG a Jinhui SONG et al. Performance of OLED under mechanical strain: a review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020, 31(23), 20688-20729. ISSN 0957-4522. doi:10.1007/s10854-020-04652-5

- [21] VILLANI, Fulvia, VACCA Paolo a Giuseppe NENNA *et al.* Inkjet Printed Polymer Layer on Flexible Substrate for OLED Applications. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2009, 113(30), 13398-13402. ISSN 1932-7447. doi:10.1021/jp8095538
- [22] SCRIVEN, L. E. Physics and Applications of DIP Coating and Spin Coating. *MRS Proceedings*. 1988, 121, s. 717-729. ISSN 0272-9172. doi:10.1557/PROC-121-717
- [23] SINGH, Madhusudan, HAVERINEN Hanna M., DHAGAT Parul *et al.* Inkjet Printing-Process and Its Applications. *Advanced Materials*. 2010, 22(6), s. 673-685. ISSN 09359648. doi:10.1002/adma.200901141
- [24] SHLOMO, Magdassi. Inkjet Printing Technologies. *Chemistry Of Inkjet Inks*. 1. Singapur: World Scientific, 2010, s. 1-17. ISBN 978-981-281-821-8.
- [25] JEONG, Eun Gyo, Jeong Hyun KWON a Ki Suk KANG *et al.* A review of highly reliable flexible encapsulation technologies towards rollable and foldable OLEDs. *Journal of Information Display*. 2020, 21(1), s. 19-32. ISSN 1598-0316. doi:10.1080/15980316.2019.1688694
- [26] NAYAK, Debashish a CHOUDHARY Ram. Conducting Polymer-Based Emissive Layer on Efficiency of OLEDs. *Light-Emitting Diodes and Photodetectors - Advances and Future Directions [Working Title]*. IntechOpen, 2021. doi:10.5772/intechopen.98652
- [27] FREUDENRICH, Craig. How OLED works. In: *How Stuff Works* [online]. Atlanta: System1 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://electronics.howstuffworks.com/oled1.htm>
- [28] HUSEYNOVA, Gunel, LEE Jae-Hyun, KIM Yong Hyun *et al.* Transparent Organic Light-Emitting Diodes: Advances, Prospects, and Challenges. *Advanced Optical Materials*. 2021, 9(14). ISSN 2195-1071. doi:10.1002/adom.202002040
- [29] PARK, Sunghee, LIM Jong Tae a JIN Won-Yong. Efficient Large-Area Transparent OLEDs Based on a Laminated Top Electrode with an Embedded Auxiliary Mesh. *ACS Photonics*. 2017, 4(5), s. 1114-1122. ISSN 2330-4022. doi:10.1021/acsp Photonics.6b00942
- [30] WU, Zhongbin a MA Dongge. Recent advances in white organic light-emitting diodes. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2016, 107, s. 1-42. ISSN 0927796X. doi:10.1016/j.mser.2016.06.001



- [31] ZHOU, Guijiang, WONG Wai-Yeung a SUO Si. Recent progress and current challenges in phosphorescent white organic light-emitting diodes (WOLEDs). *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 2010, 11(4), s. 133-156. ISSN 13895567. doi:10.1016/j.jphotochemrev.2011.01.001
- [32] DANTAS DE OLIVEIRA, Amanda a BEATRICE Cesar. Polymer Nanocomposites with Different Types of Nanofiller. SIVASANKARAN, Subbarayan. *Nanocomposites: Recent evolutions*. 1. Londýn: IntechOpen, 2019, s. 103-128. ISBN 978-1-78985-012-3.
- [33] MITTAL, Garima, DHAND Vivek a RHEE Kyong Yop. A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015, 21, s. 11-25. ISSN 1226086X. doi:10.1016/j.jiec.2014.03.022
- [34] AKPAN, Elan a SHEN Xi. Design and Synthesis of Polymer Nanocomposites. PIELICHOWSKI, Krzysztof. *Polymer Composites with Functionalized Nanoparticles: Synthesis, Properties, and Applications*. 1. Amsterdam: Elsevier, 2019, s. 47-84. ISBN 978-0-12-814064-2.
- [35] KANGO, Sarita, KALIA Susheel a CELLI Annamaria *et al.* Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic–inorganic nanocomposites—A review. *Progress in Polymer Science*. 2013, 38(8), 1232-1261. ISSN 00796700. doi:10.1016/j.progpolymsci.2013.02.003
- [36] SEVCIK, Jakub, URBANEK Pavel a SKODA David *et al.* Energy resolved-electrochemical impedance spectroscopy investigation of the role of Al-doped ZnO nanoparticles in electronic structure modification of polymer nanocomposite LEDs. 2021, 205. ISSN 02641275. doi:10.1016/j.matdes.2021.109738
- [37] ZHANG, Dan-Dan, XU Jian-Long a SUN Hong-Bo. Toward High Efficiency Organic Light-Emitting Diodes: Role of Nanoparticles. *Advanced Optical Materials*. 2021, 9(6). ISSN 2195-1071. doi:10.1002/adom.202001710
- [38] CHOI, Junhee, KIM Seonju, PARK Cheol Hwee *et al.* Light Extraction Enhancement in Flexible Organic Light-Emitting Diodes by a Light-Scattering Layer of Dewetted Ag Nanoparticles at Low Temperatures. 2018, 10(38), s. 32373-32379. ISSN 1944-8244. doi:10.1021/acsami.8b07026

- [39] PARK, Cheol Hwee, KIM Jae Geun a JUNG Sun-Gyu *et al.* Optical characteristics of refractive-index-matching diffusion layer in organic light-emitting diodes. *Scientific Reports*. 2019, **9**(1). ISSN 2045-2322. doi:10.1038/s41598-019-45000-w
- [40] SOYTAZ, Serap Hayat a OGUZ Oguzhan. Polymer Nanocomposites With Decorated Metal Oxides. PIELICHOWSKI, Krzysztof a Tomasz MAJKA. *Polymer Composites with Functionalized Nanoparticles: Synthesis, Properties, and Applications*. 1. Amsterdam: Elsevier, 2019, s. 287-323. ISBN 978-0-12-814064-2.
- [41] PERIYAYYA, Uthirakumar, KANG Ji Hye a RYU Jae Hyoung *et al.* Synthesis and improved luminescence properties of OLED/ZnO hybrid materials. *Vacuum*. 2011, **86**(3), 254-260. ISSN 0042207X. doi:10.1016/j.vacuum.2011.06.016
- [42] VASEEM, Mohammed *et al.* ZnO Nanoparticles: Growth, Properties, and Application. *Metal Oxide Nanostructures and Their Applications* [online]. 1st ed. Kalifornie: American Scientific Publishers, 2009, s. 1-36 [cit. 2020-03-31]. ISBN 1-58883-170-1. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/225076578\\_ZnO\\_Nanoparticles\\_Growth\\_Properties\\_and\\_Applications/download](https://www.researchgate.net/publication/225076578_ZnO_Nanoparticles_Growth_Properties_and_Applications/download)
- [43] WANG, Zongyu, BOCKSTALLER Michael R. a MATYJASZEWSKI Krzysztof. Synthesis and Applications of ZnO/Polymer Nanohybrids. *ACS Materials Letters*. 2021, **3**(5), 599-621. ISSN 2639-4979. doi:10.1021/acsmaterialslett.1c00145
- [44] MAHAMUNI, Pranjali P., . PATIL Pooja M a J. DHANAVADE Maruti. Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles by using polyol chemistry for their antimicrobial and antibiofilm activity. *Biochemistry and Biophysics Reports*. 2019, **17**, 71-80. ISSN 24055808. doi:10.1016/j.bbrep.2018.11.007
- [45] KHABIR, Zahra, HOLMES Amy M. a LAI Yi-Jen. Human Epidermal Zinc Concentrations after Topical Application of ZnO Nanoparticles in Sunscreens. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021, **22**(22). ISSN 1422-0067. doi:10.3390/ijms222212372
- [46] BELHAJ, M., C. DRIDI a H. ELHOUCHE. PFE: ZnO hybrid nanocomposites for OLED applications. *Journal of Luminescence*. 2015, **157**, s. 53-57. ISSN 00222313. doi:10.1016/j.jlumin.2014.08.005

- [47] SKODA, David, URBANEK Pavel a SEVCIK Jakub *et al.* Microwave-assisted synthesis of colloidal ZnO nanocrystals and their utilization in improving polymer light emitting diodes efficiency. *Materials Science and Engineering: B*. 2018, 232-235, s. 22-32. ISSN 09215107. doi:10.1016/j.mseb.2018.10.013
- [48] KANDULNA, R. a CHOUDHARY R. B.. Concentration-dependent behaviors of ZnO-reinforced PVA–ZnO nanocomposites as electron transport materials for OLED application. *Polymer Bulletin*. 2018, 75(7), s. 3089-3107. ISSN 0170-0839. doi:10.1007/s00289-017-2186-9
- [49] KANDULNA, R., CHOUDHARY R. B. a MAJI P.. Ag-doped ZnO Reinforced Polymeric Ag: ZnO/PMMA Nanocomposites as Electron Transporting Layer for OLED Application. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2017, 27(6), s. 1760-1769. ISSN 1574-1443. doi:10.1007/s10904-017-0639-0
- [50] KANDULNA, R. a CHOUDHARY R.B.. Robust electron transport properties of PANI/PPY/ZnO polymeric nanocomposites for OLED applications. *Optik*. 2017, 144, s. 40-48. ISSN 00304026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2017.06.094
- [51] MALLAKPOUR, Shadpour a NAGHDI Mina. Polymer/SiO<sub>2</sub> nanocomposites: Production and applications. *Progress in Materials Science*. 2018, 97, 409-447. ISSN 00796425. doi:10.1016/j.pmatsci.2018.04.002
- [52] UEMOTO, Mitsuharu a KUWABARA Yuki. SATO ET AL. Nonlinear polarization evolution using time-dependent density functional theory. *The Journal of Chemical Physics*. 2019, 150(9). ISSN 0021-9606. doi:10.1063/1.5068711
- [53] NICULESCU, Violeta-Carolina. Mesoporous Silica Nanoparticles for Bio-Applications. *Frontiers in Materials*. 2020, 7. ISSN 2296-8016. doi:10.3389/fmats.2020.00036
- [54] AZIZ, Tengku Hasnan Tengku, SALLEH Muhamad Mat a UMAR Mursyidah . Reduction of Turn-On Voltage in a Single Layer Structured Organic Light-Emitting Diode using Nanocomposites SiO<sub>2</sub>: PHF. *2006 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics*. IEEE, 2006, s. 89-92. ISBN 0-7803-9730-4. doi:10.1109/SMELEC.2006.381025

- [55] SONG, Jinouk, KIM Kwon-Hyeon a KIM Eunhye *et al.* Lensfree OLEDs with over 50% external quantum efficiency via external scattering and horizontally oriented emitters. *Nature Communications*. 2018, **9**(1). ISSN 2041-1723. doi:10.1038/s41467-018-05671-x
- [56] ROCHA, Fellipy S., GOMES Anderson J. a LUNARDI Claire N. *et al.* Experimental methods in chemical engineering: Ultraviolet visible spectroscopy-UV-Vis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2018, **96**(12), s. 2512-2517. ISSN 00084034. doi:10.1002/cjce.23344
- [57] GOMES, Anderson J., LUNARDI Claire N. a ROCHA Fellipy S. Experimental methods in chemical engineering: Fluorescence emission spectroscopy. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2019, **97**(8), s. 2168-2175. ISSN 0008-4034. doi:10.1002/cjce.23506
- [58] BERNATH, Peter. Electronic Spectroscopy of Polyatomics. *Spectra of atoms and molecules*. Fourth edition. New York: Oxford University Press, 2020, s. 392-332. ISBN 978-0-19-009540-6.
- [59] SCHWEIZER, Thorsten, KUBACH Heiko a KOCH Thomas. Investigations to characterize the interactions of light radiation, engine operating media and fluorescence tracers for the use of qualitative light-induced fluorescence in engine systems. *Automotive and Engine Technology*. 2021, **6**(3-4), s. 275-287. ISSN 2365-5127. doi:10.1007/s41104-021-00092-3
- [60] AIRAKSINEN, Veli-Matti. Silicon wafer and thin-film measurements. TILLI, Markku a PAULASTO-KROCKEL Mervi. *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*. 3rd Edition. Amsterdam: Elsevier, 2020, s. 765-776. ISBN 978-0-12-817786-0.
- [61] KUŘITKA, Ivo, SEDLAŘÍK Vladimír a HAREA Diana *et al.* Polymer Labelling with a Conjugated Polymer-Based Luminescence Probe for Recycling in the Circular Economy. *Polymers*. 2020, **12**(6). ISSN 2073-4360. doi:10.3390/polym12061226
- [62] BINETTI, E, C INGROSSO a STRICCOLI M *et al.* Nanocomposites based on highly luminescent nanocrystals and semiconducting conjugated polymer for inkjet printing. *Nanotechnology*. 2012, **23**(7). ISSN 0957-4484. doi:10.1088/0957-4484/23/7/075701

- [63] Poly[(9,9-dihexylfluoren-2,7-diyl)-alt-(2,5-dimethyl-1,4-phenylene)]. In: *Sigma Aldrich* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/en/product/aldrich/685690>
- [64] Ossila: enabling materials science. In: *Ossila* [online]. Sheffield: Ossila Ltd, 2022 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/>
- [65] SINGH, D K, PANDEY D K a YADAV R R. A study of nanosized zinc oxide and its nanofluid. *Pramana*. 2012, 78(5), s. 759-766. ISSN 0304-4289. doi:10.1007/s12043-012-0275-8
- [66] WANG, Jun, RAN Qianwen a XU Xunhu. Preparation and Optical Properties of TiO<sub>2</sub> - SiO<sub>2</sub> thin films by Sol-gel Dipping Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, 310(4). ISSN 1755-1307. doi:10.1088/1755-1315/310/4/042029
- [67] NORIEGA, Rodrigo, RIVNAY Jonathan a VANDEWAL Koen *et al.* A general relationship between disorder, aggregation and charge transport in conjugated polymers. *Nature Materials*. 2013, 12(11), 1038-1044. ISSN 1476-1122. doi:10.1038/nmat3722
- [68] URBÁNEK, Pavel, KUŘITKA Ivo a DANÍŠ Stanislav *et al.* Thickness threshold of structural ordering in thin MEH-PPV films. *Polymer*. 2014, 55(16), 4050-4056. ISSN 00323861. doi:10.1016/j.polymer.2014.05.054
- [69] GHASEMI, Bitá, ŠEVČÍK Jakub a NÁDAŽDY Vojtěch *et al.* Thickness Dependence of Electronic Structure and Optical Properties of F8BT Thin Films. *Polymers*. 2022, 14(3). ISSN 2073-4360. doi:10.3390/polym14030641
- [70] URBÁNEK, Pavel a KUŘITKA Ivo. Thickness dependent structural ordering, degradation and metastability in polysilane thin films: A photoluminescence study on representative  $\sigma$ -conjugated polymers. *Journal of Luminescence*. 2015, 168, s. 261-268. ISSN 00222313. doi:10.1016/j.jlumin.2015.08.022
- [71] FRIEND, R. H., GYMER R. W. a HOLMES A. B.. Electroluminescence in conjugated polymers. *Nature*. 1999, 397(6715), s. 121-128. ISSN 0028-0836: doi:10.1038/16393
- [72] DONLEY, Carrie L., ZAUMSEIL Jana a ANDREASEN Jens W. *et al.* Effects of Packing Structure on the Optoelectronic and Charge Transport Properties in Poly(9,9-di- n -

octylfluorene- alt -benzothiadiazole). *Journal of the American Chemical Society*. 2005, 127(37), s. 12890-12899. ISSN 0002-7863. doi:10.1021/ja051891j

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

S	Sievert
ppm	parts per milion (počet částic na milion částic)
OLED	Organic light emitting diode (organická světlo emitující dioda)
PLED	Polymer light emitting diode (polymerní světlo emitující dioda)
LCD	Liquid crystal display (Displej z kapalných krystalů)
ITO	indium tin oxide (cínem dopovaný oxid inditý)
$\eta_{EQE}$	vnější kvantová účinnost
$\gamma$	rovnováha nábojů
$\frac{\eta_S}{T}$	poměr excitačních stavů
$q_{eff}$	účinnost excitonů
$\eta_{out}$	počet vyzářených fotonů
ETL	vrstva transportující elektrony
HTL	vrstva transportující kladné díry
EIL	vrstva usnadňující transport elektronů
HIL	vrstva usnadňující transport kladných děr
HBL	vrstva bránící v průniku kladných děr
EBL	vrstva bránící v průniku elektronů
VTE	vakuové tepelné napařování
<i>MVTR</i>	rychlost prostupu vodních par
PMOLED	OLED s pasivní maticí
AMOLED	OLED s aktivní maticí
TOLED	transparentní OLED
FOLED	ohybná OLED
TEOLED	OLED emitující jednou stranou
WOLED	bílá OLED
TFT	tenkovrstvé tranzistory
S-EML	jedna emisní vrstva
CNTs	uhlíkové nanotrubky
UV	ultrafialové
UV/VIS	ultrafialová/viditelná oblast spektra

---

$S_n$	singletový stav
$T_n$	tripletový stav
PL	fotoluminiscence
EL	elektroluminiscence
a.u.	arbitrary unit (smluvená jednotka)
$\text{cd/m}^2$	kandela na metr čtvereční



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Příklady vodivých polymerů .....	12
Obrázek 2 a) Energetické hladiny v atomu, b) Energetické pásy v molekule; dle [9] .....	13
Obrázek 3 Pásová struktura - a) vodiče, b) polovodiče, c) izolátoru; překresleno dle [10]	14
Obrázek 4 Molekulární struktura polyacetyleny; dle [12].....	14
Obrázek 5 Různé architektury organických světlo-emitujících diod – a) jednovrstvá architektura, b) dvojevrstvá architektura, c) mnohovrstvá architektura; dle [4] .....	18
Obrázek 6 Technologie vakuového napařování; dle [4].....	19
Obrázek 7 Technologie spin-coatingu (rotační nanášení); dle [4].....	20
Obrázek 8 Schematický diagram – a) kontinuálního ink-jetového tisku, b) drop-on-demand ink-jetového tisku; dle [4].....	21
Obrázek 9 Schematické znázornění – a) enkapsulace OLED na skleněném substrátu, b) tenkovrstvá enkapsulace; dle [25].....	22
Obrázek 10 Struktura organické světlo-emitující diody s pasivní maticí; dle [27].....	23
Obrázek 11 Struktura organické světlo-emitující diody s aktivní maticí; dle [27] .....	23
Obrázek 12 Struktura transparentní organické světlo-emitující diody; dle [27] .....	24
Obrázek 13 Jednotlivé struktury WOLED – a) S-EML (single emissive layer), b) horizontální uspořádání emitorů, c) vertikální uspořádání emitorů; dle [30].....	25
Obrázek 14 Znázornění nanoplňiv dle dimenzionality; dle [34] .....	26
Obrázek 15 Znázornění plazmonové rezonance; dle [37] .....	28
Obrázek 16 Wurtzitová krystalová struktura oxidu zinečnatého; dle [42] .....	29
Obrázek 17 Krystalová struktura alfa křemene; dle [52].....	30
Obrázek 18 Schéma UV-VIS spektrometru; dle [56].....	31
Obrázek 19 Perrin-Jabloňského diagram, dle [59] .....	32
Obrázek 20 Schéma fluorescenčního spektrometru, dle [57] .....	33
Obrázek 21 Schéma kontaktního profilometru .....	34
Obrázek 22 Schéma Elipsometru; dle [60] .....	35
Obrázek 23 Strukturální vzorec PTMSDPA; dle [61].....	38
Obrázek 24 Strukturální vzorec PF-DMB; dle [63] .....	38
Obrázek 25 Spin Coater Laurell .....	40
Obrázek 26 UV/VIS spektrometr Lambda 1050 (výrobce Perkin Elmer).....	41
Obrázek 27 Luminiscenční spektrometr FLS920 (výrobce Edinburgh Instruments Ltd.) ..	41
Obrázek 28 Mechanický profilometr Dektak XT-E (výrobce Bruker).....	42
Obrázek 29 Elipsometr Uvisel 2 (výrobce Horiba) .....	42
Obrázek 30 Křemenný substrát s nanosenou vrstvou ITO; dle [64].....	43
Obrázek 31 Architektura připravených PLED zařízení .....	43

Obrázek 32 Naprašovačka kovů Quorum Q300T T .....	44
Obrázek 33 Zkušební deska pro PLED zařízení, šest pixelů, převzato z [64].....	45
Obrázek 34 Optický spektrometr Avantes Avaspec .....	45
Obrázek 35 Optický jasoměr Konica Minolta CS-150.....	45
Obrázek 36 UV-VIS absorpční spektra tenkých vrstev na bázi polymeru PTMSDPA.....	46
Obrázek 37 UV-VIS absorpční spektra tenkých vrstev na bázi polymeru PF-DMB .....	47
Obrázek 38 UV-VIS absorpční spektra tenkých vrstev s polymerem PF-DMB .....	47
Obrázek 39 UV-VIS absorpční spektra tenkých vrstev s polymerem PF-DMB .....	48
Obrázek 40 Emisní a excitační fotoluminiscenční spektra tenkých vrstev s polymerem PTMSDPA.....	49
Obrázek 41 Emisní a excitační fotoluminiscenční spektrum tenkých vrstev s polymerem PF-DMB .....	50
Obrázek 42 Závislost poklesu intenzity fotoluminiscence na čase.....	51
Obrázek 43 Záznam měření získaný na mechanickém profilometru pro PF-DMB. ....	52
Obrázek 44 Voltampérová charakteristika společně s fotografií polymerních světlo-emitujících diod s emisní vrstvou – a) PTMSDPA, b) PTMSDPA plněný nanočásticemi SiO <sub>2</sub> , c) PTMSDPA plněný nanočásticemi ZnO .....	53
Obrázek 45 a) Elektroluminiscenční spektra PLED diod s emisními vrstvami na bázi PTMSDPA při napětí 20 V, b) Normalizovaná elektroluminiscenční spektra vyzařovaná PLED s emisními vrstvami na bázi PTMSDPA při napětí 20 V .....	54
Obrázek 46 Závislost jasu na výkonu pro PLED na bázi PTMSDPA.....	55
Obrázek 47 Voltampérová charakteristika společně s fotografií polymerních světlo-emitujících diod s emisní vrstvou – a) PF-DMB, b) PF-DMB plněný nanočásticemi ZnO, c) PF-DMB plněný nanočásticemi SiO <sub>2</sub> .....	56
Obrázek 48 Elektroluminiscenční spektra PLED diod s emisními vrstvami na bázi PF-DMB při 15 V .....	57
Obrázek 49 Závislost jasu na výkonu pro PLED na bázi PF-DMB .....	57
Obrázek 50 Barvy vyzařované polymerními světlo-emitujícími diodami zanesené v chromatickém diagramu (CIE Lab 1931) – A) PTMSDPA, B) PTMSDPA + SiO <sub>2</sub> , C) PTMSDPA + ZnO, D) PF-DMB, E) PF-DMB + ZnO, F) PF-DMB + SiO <sub>2</sub> .....	59

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Výsledky měření tloušťky tenkých vrstev .....	51
Tabulka 2 Otevírací napětí připravených PLED na bázi PTMSDPA.....	53
Tabulka 3 Hodnoty maximálního dosaženého jasu, protékajícího elektrického proudu a proudové účinnosti pro PLED zařízení na bázi PTMSDPA.....	55
Tabulka 4 Otevírací napětí připravených PLED na bázi PF-DMB .....	56
Tabulka 5 Hodnoty maximálního dosaženého jasu, protékajícího elektrického proudu a proudové účinnosti pro PLED zařízení na bázi PF-DMB .....	58