

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

LUMINESCENCE ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ PRO POKROČILÉ
APLIKACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

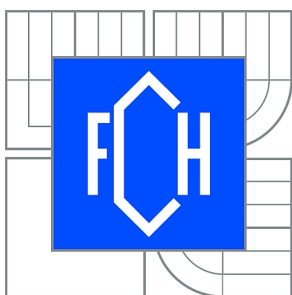
JAROSLAV DOZBABA

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

FACULTY OF CHEMISTRY

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

LUMINESCENCE ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ PRO POKROČILÉ APLIKACE

LUMINESCENCE OF ORGANIC MATERIALS FOR ADVANCED APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAROSLAV DOZBABA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. MARTIN VALA, Ph.D.

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce: **FCH-BAK0509/2010** Akademický rok: **2010/2011**
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Student(ka): **Jaroslav Dozbaba**
Studijní program: Chemie a chemické technologie (B2801)
Studijní obor: Spotřební chemie (2806R002)
Vedoucí práce: **Mgr. Martin Vala, Ph.D.**
Konzultanti:

Název bakalářské práce:

Luminiscence organických materiálů pro pokročilé aplikace

Zadání bakalářské práce:

Práce bude zaměřena na studium zářivé rekombinace excitovaných stavů v organických materiálech. Bude využito jak ustálené optické spektroskopie (absorpce, fluorescence, kvantové výtěžky fluorescence apod.), tak unikátní laserové časově rozlišené optické aparatury (doba života fluorescence, transientní absorpce, atd.). Dále bude studována přeměna elektricky excitovaných stavů na elektromagnetické záření, tzv. elektroluminiscence.

Termín odevzdání bakalářské práce: 6.5.2011

Bakalářská práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

Jaroslav Dozbaba
Student(ka)

Mgr. Martin Vala, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2011

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá studiem zářivé rekombinace excitovaných stavů v organických materiálech vyvolaných optickou a elektrickou excitací. Tyto procesy jsou studovány pomocí optických spektroskopických metod a charakterizací elektroluminiscence. V teoretické části je provedena rešerše a jsou shrnuty základní poznatky nutné pro interpretaci dat se zaměřením na fluorescenci organických látek. Dále jsou diskutovány procesy přeměny elektrické energie na elektromagnetické záření v organických elektroluminiscenčních diodách. Praktická část zahrnuje přípravu modelových diod, studium jejich optických vlastností a charakterizaci jejich elektroluminiscence.

ABSTRACT

The thesis deals with study of the radiation recombination of excited states in organic materials, induced by optical and electrical excitation. These processes are studied by optical spectroscopic methods and characterization of electroluminescence. The theoretical part contains search and summary of basic knowledge necessary for interpretation of data focusing on the fluorescence of organic substances. The conversion processes of electric energy to an electromagnetic radiation in organic electroluminescence diodes were also discussed in the thesis. The practical part describes preparation of model diodes, the study of their optical properties and characterization of their electroluminescence.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fluorescence, elektroluminiscence, organické elektroluminiscenční diody, OLED.

KEY WORDS

Fluorescence, electroluminescence, organic light emitting diodes, OLED.

DOZBABA, J. *Luminiscence organických materiálů pro pokročilé aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2011. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Mgr. Martin Vala, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Tímto způsobem bych chtěl poděkovat vedoucímu své práce Mgr. Martinu Valovi, PhD. za vstřícnost, ochotu, pomoc a rady při tvorbě práce. Dále chci poděkovat Ing. Patricii Heinrichové a D.E.A. Imadu Ouzzanovi za cenné rady, pomoc a vedení při praktické části.

OBSAH

1. Úvod.....	7
2. Cíl práce	8
3. Luminiscence.....	9
3.1. Definice	9
3.2. Rozdělení	9
3.3. Absorpce.....	9
3.4. Fluorescence	10
3.4.1. Princip.....	10
3.4.2. Emisní spektrum.....	11
3.4.3. Stokesův zákon.....	12
3.4.4. Kashovo pravidlo	12
3.4.5. Zákon zrcadlové symetrie.....	13
3.4.6. Vavilovův zákon.....	13
3.4.6. Intenzita	13
3.4.7. Užití - fluorimetrie.....	14
3.5. Fosforescence.....	15
3.5.1. Princip.....	15
3.6. Zpožděná fluorescence	15
3.6.1. Princip.....	15
4. Elektroluminiscence.....	17
4.1. Současný stav – shrnutí, problémy, situace.....	17
4.2. Princip.....	17
4.2.1. Injekce náboje a transport.....	18
4.2.2. Zachycení a zářivá rekombinace	19
4.3. Užití.....	19
4.3.1. OLED.....	19
5. Experimentální část.....	21
5.1. Materiály.....	21
5.1.1. ITO.....	21
5.1.2. PEDOT PSS	21
5.1.3. Alq3	21
5.1.4. MDMO-PPV	22
5.2. Příprava vzorků.....	22
5.2.1. Nanesení vrstvy ITO.....	22
5.2.2. Rotační nanášení (Spin coating).....	22
5.2.3. Vakuové napařování	23
5.2.4. Kontaktování	23
5.2.5. Připravené vzorky.....	23
5.3. Metody.....	25
5.3.1. UV VIS spektroskopie.....	25
5.3.2. Fluorescenční spektroskopie.....	25
5.3.3. Měření kapacity elektrod připravených diod	25
5.4.4. Měření VA charakteristik a elektroluminiscence.....	25
6. Výsledky, vyhodnocení.....	26
6.1. Měření kapacity elektrod.....	26

6.2. Optická měření.....	26
6.2.1. MDMO-PPV	26
6.2.2. Alq3	27
6.2.3. Srovnání materiálů.....	28
6.3. Voltampérové charakteristiky.....	28
6.3.1. Dioda č. 426 (Alq3).....	28
6.3.2. Dioda č. 428 (MDMO-PPV).....	29
6.4. Měření elektroluminiscence.....	30
6.4.1. Dioda č. 426 (Alq3).....	30
6.4.2. Dioda č. 428 (MDMO-PPV).....	31
6.5. Srovnání VA charakteristik a elektroluminiscence.....	32
6.5.1. Dioda č. 426 (Alq3).....	32
6.5.2. Dioda č. 428 (MDMO-PPV).....	33
6.2.3. Srovnání vzorků	33
7. Závěr	34
8. Seznam literatury	35
9. Seznam zkratk a symbolů	37

1. ÚVOD

Organické polovodiče nacházejí v dnešní době díky svým elektroluminiscenčním vlastnostem stále širší využití v elektrotechnice, kde doplňují dříve používané tradiční anorganické materiály. Na rozdíl od klasických světelných zdrojů jsou energeticky nenáročné, což je výhodou jak z ekonomického hlediska, tak i z dnes stále silnějšího důrazu na ochranu životního prostředí a šetření energiemi – zde má velký význam jejich využití ve fotovoltice. Nelze nezmínit využití displejů na bázi OLED – charakterizuje je relativně levná výroba, energetická nenáročnost, vysoký jas a široký pozorovací úhel. Důležitá je také jejich vhodnost pro velkokapacitní výrobu. Přináší také principiálně nové typy elektroluminiscenčních displejů, například displeje ohebné, transparentní, nanesené na nerovný povrch atd. Za poměrně krátkou dobu učinilo toto odvětví obrovský pokrok, stále je však nutné hledat nové látky a metody, zkoumat jejich vlastnosti a možnost využití - množství potenciálně využitelných látek je obrovské.

2. CÍL PRÁCE

Cíl práce je zpracovat rešerši na téma luminiscence, jejích principů a mechanismů. Na základě těchto poznatků pak podrobněji rozebrat problém elektroluminiscence organických polovodičů, popsat historii jejího výzkumu a využití a perspektivu do budoucna. Experimentální část je zaměřena na konstrukci modelových OLED s využitím nízkomolekulárních i polymerních materiálů, popis jejich výroby, stavby a charakterizaci materiálů při výrobě využitých. Připravené prototypy diod byly zkoumány pomocí optické spektroskopie, elektrickými a optoelektrickými metodami.

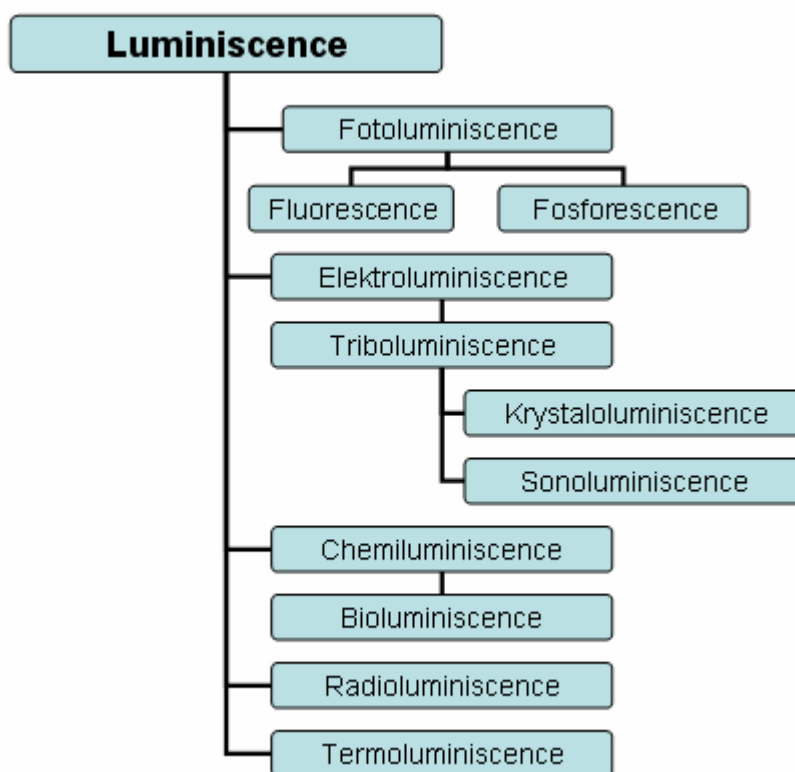
3. LUMINISCENCE

3.1. Definice

Luminiscence je jev, při kterém dochází k vyzařování světla o určité vlnové délce danou látkou. Dá se se definovat jako děj, kdy je zářením o kratší vlnové délce v určité látce vyvoláno záření o delší vlnové délce – Stokesův zákon. Vyzáření světla je způsobeno definovat jako děj, kdy je zářením o kratší vlnové délce v určité látce vyvoláno záření excitací a následnou deexcitací valenčního elektronu o energii $E = h \cdot \nu$, kde h je Planckova konstanta a ν je frekvence záření [1].

3.2. Rozdělení

Excitace elektronu může mít několik příčin, dle kterých se luminiscence dělí – fotoluminiscence, u které je excitace elektronu způsobena absorpcí světla látkou, elektroluminiscence, kde je excitace vyvolána procházejícím elektrickým proudem, chemiluminiscence, kde je důvodem vyvolání chemická reakce, katodoluminiscence vyvolaná dopadajícími elektrony, radioluminiscence způsobená ionizujícím zářením, termoluminiscence způsobená působením tepla, triboluminiscence vyvolaná působením tlaku a další, viz obr. 3.1.

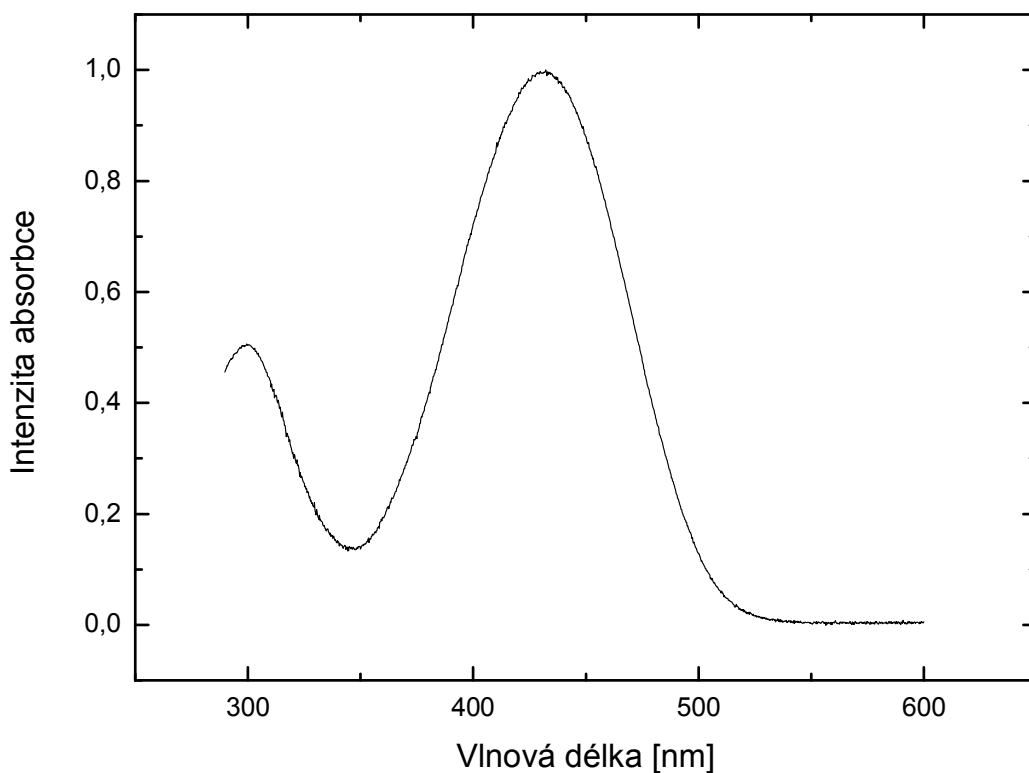


Obr. 3.1 Druhy luminiscence

3.3. Absorpce

Aby látka mohla emitovat záření, je nejprve nutné excitovat elektrony do vyšších energetických hladin. Toho lze dosáhnout např. excitací valenčního elektronu absorpcí elektromagnetického záření. Množství absorbovaného záření je závislé na vlnové délce

přijímaného záření a je pro každou látku specifická. Tuto závislost, tzv. absorpční spektrum, ukazuje obr. 3.2.

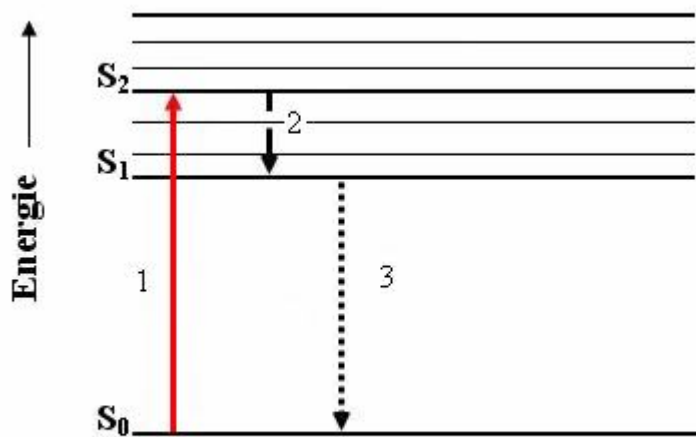


Obr. 3.2 Absorpční spektrum roztoku DMANS v benzenu. Velikost intenzity je normovaná na hodnotu 1.

3.4. Fluorescence

3.4. 1. Princip

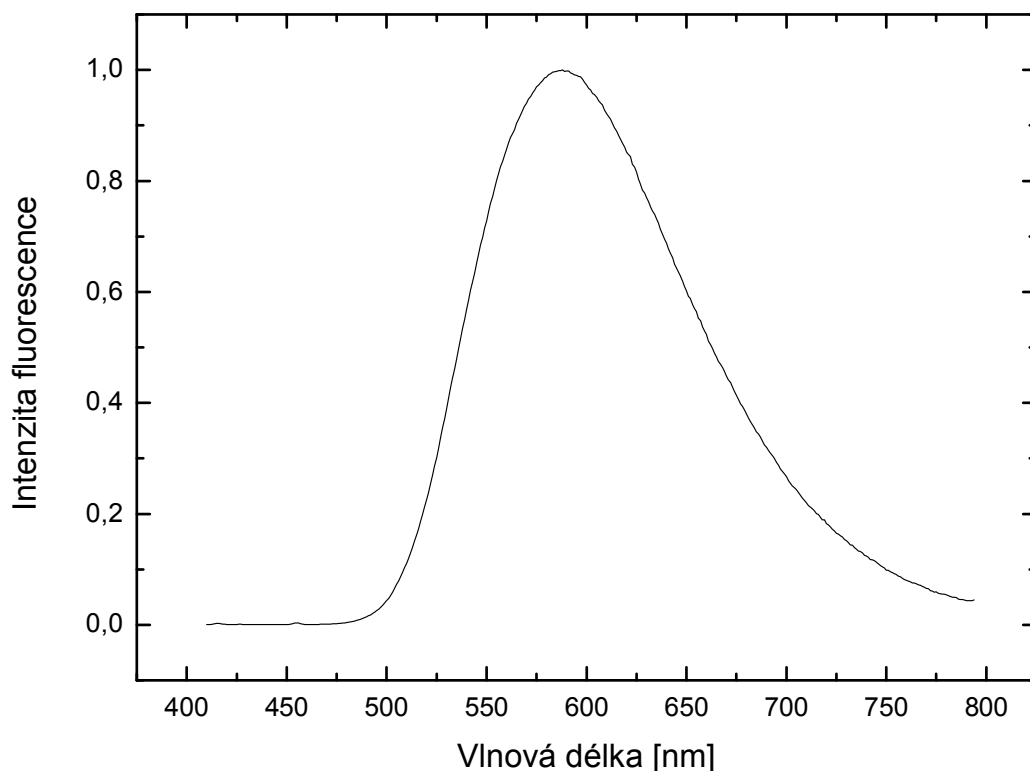
Pokud dojde k zářivé rekombinaci excitovaného stavu a je záření uvolněno ze singletního excitovaného stavu, tzv. povolený přechod, jedná se o fluorescenci. Doba návratu z takto excitovaného do základního – relaxačního stavu trvá asi 10^{-9} až 10^{-5} s. Přechody elektronu z vyšších hladin na nižší (např. $S_2 - S_1$) jsou zpravidla nezářivé, energie je uvolněna změnou rotačních a vibračních stavů. Látky vykazující intenzivní fluorescenci jsou uhlovodíky s nízko ležícími S hladinami $\pi \rightarrow \pi^*$. Fluorescence znázorněna pomocí Jablonského diagramu je na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Jablonského diagram – fluorescence. Šipka č. 1 znázorňuje excitaci elektronu z nižší energetické hladiny (S_0), na vyšší (S_2). Vnitřní konverze – ztráta energie změnou rotačních a vibračních stavu elektronu (nezářivý přechod) je znázorněna šipkou č. 2 (elektron klesá z energetické hladiny S_2 na hladinu S_1). Vyzáření zbylé energie v podobě světla a návrat na základní energetickou hladinu symbolizuje šipka č. 3.

3.4.2. Emisní spektrum

Vyzáření světla látkou je nazýváno emise. Každá látka má specifické emisní spektrum – světlo o různé vlnové délce je vyzařováno s různou intenzitou. Příklad emisního spektra je na obr. č. 3.4.



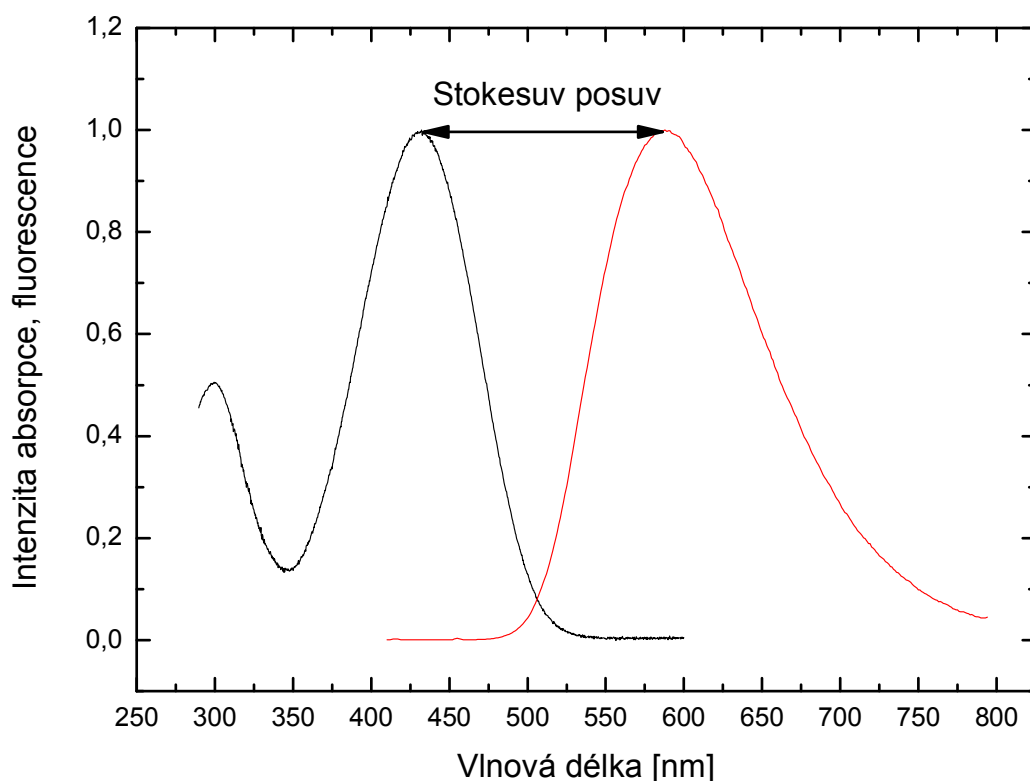
Obr. 3.4 Emisní spektrum roztoku DMANS v benzenu. Intenzita emise je normovaná nahodnotu 1.

3.4.3. Stokesův zákon

Vztah mezi absorpcí a emisí definuje Stokesův zákon - Vlnová délka emisního záření je větší nebo rovna vlnové délce excitačního světla. Toto je způsobeno tím, že emisní záření má nižší energii než záření excitační – ke ztrátě energie totiž nedochází pouze zářivým přechodem, ještě před tím je uvolněna změnou vibračních a rotačních stavů. Nižší energie je pak kompenzována vyšší vlnovou délkou ($E = h \cdot \nu$). Důsledkem toho to je tzv. Stokesův posuv, což je rozdíl mezi vlnovými délkami absorpčního a emisního maxima. Stokesův posuv je znázorněn na obr. č. 3.5. [2]

3.4.4. Kashovo pravidlo

Dle Kashova pravidla dochází před emisí k relaxaci vibrační energie a vnitřní konverzi, zářivý přechod tedy nastává z nejnižší vibrační hladiny excitovaného stavu S_1 . [2]



Obr. 3.5 Znáznornění Stokesova posuvu – rozdílu maxim absorpčního a emisního spektra, intenzita je normovaná na hodnotu 1. Černě je znázorněno absorpční spektrum, červeně spektrum emisní.

3.4.5. Zákon zrcadlové symetrie

Dle zákona zrcadlové symetrie je emisní spektrum zrcadlově obráceným obrazem spektra absorpčního. Zákon zrcadlové symetrie platí pro mnoho organických molekul. Tato symetrie je důsledkem toho, že absorpce i emise z odpovídajících si vibračních hladin mají stejnou pravděpodobnost. Absorbující i emitující molekuly jsou většinou v rovnovážném vibračním stavu, u kterého je vibrační struktura základního i excitovaného stavu stejná. Výjimky z tohoto pravidla jsou např. způsobeny rozdílným geometrickým uspořádáním atomových jader v základním a excitovaném stavu. [2]

3.4.6. Vavilovův zákon

Kvantový výtěžek fluorescence je nezávislý na vlnové délce budícího záření. [2]

3.4.6. Intenzita

Intenzita luminiscence je vyjádřena jako počet fotonů procházejících v daném směru jednotkovou plochou za jednotku času. Je závislá na koncentraci excitované látky a charakterizovaná vztahem

$$I_f = I_{abs} \cdot \Phi_f \quad (1)$$

Kde I_{abs} je intenzita absorbovaného světla a Φ_f kvantový výtěžek fluorescence, který lze vyjádřit jako

$$\Phi_f = \frac{N_F}{N} \quad (2)$$

Kdy N_F je počet zářivých kvant látkou absorbovaných a N počet kvant látkou vyzářených. Důležitá je souvislost s dobou života fluorescence – průměrným časem, který elektron stráví ve stavu excitovaném před návratem na základní energetickou hladinu. Tento čas lze definovat jako

$$\tau = \frac{1}{\Gamma + k_{nr}} \quad (3)$$

Kdy Γ značí počet zářivých přechodů za jednotku času a k_{nr} počet přechodů nezářivých. Pokud kvantový výtěžek vyjádříme pomocí konstant Γ a k_{nr} , dostaneme

$$\Phi_f = \frac{\Gamma}{\Gamma + k_{nr}} \quad (4)$$

Při jednoduchém exponenciálním zhasínání se 63% molekul vrátí do základního energetického stavu za čas $t = \tau$ a 37% v čase $t > \tau$, stav, kdy $t = \tau$ je velice řídký. Za nepřítomnosti nezářivých procesů se doba života fluorescence nazývá vnitřní nebo také přirozená doba života fluorescence a lze ji vyjádřit jako

$$\tau_n = \frac{1}{\Gamma} \quad (5)$$

Lze ji také vypočítat z absorpčního spektra, extinkčního koeficientu a emisního spektra, případně jako poměr změřené doby života a kvantového výtěžku. [1]

$$\tau_n = \frac{\tau}{\Phi_f} \quad (6)$$

3.4.7. Užití - fluorimetrie

Fluorimetrie je jednou z významných analytických metod současnosti. Absorpční a emisní spektrum je do jisté míry charakteristické pro každou látku, což umožňuje kvalitativní analýzu. Vztah mezi intenzitou fluorescence a koncentrací látky vychází z Lambert-Beerova zákona, který definuje absorbanci:

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot c = \log \frac{I_0}{I} \quad (7)$$

Kdy A značí absorbanci, ε molární absorpční koeficient, l optickou dráhu, tedy tloušťku kyvety, c koncentraci, I_0 záření dopadající na vzorek a I záření vzorkem prošlé. Úpravami se dostaneme ke vztahu

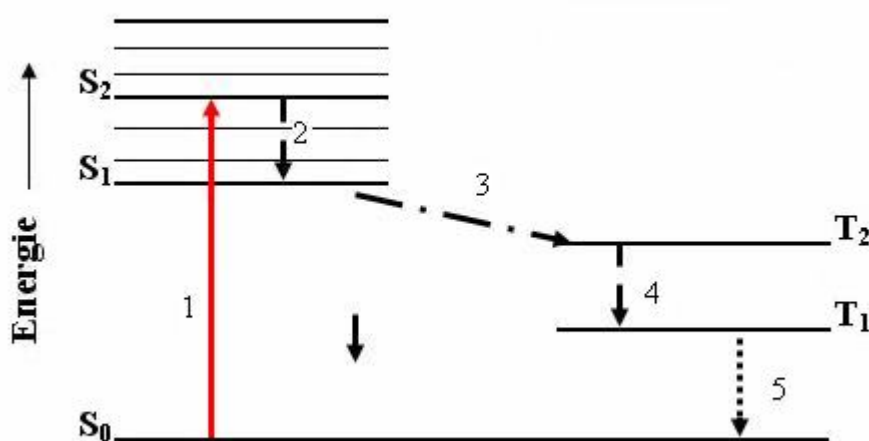
$$F = k \cdot \Phi_f \cdot I_0 \cdot (1 - 10^{-\varepsilon \cdot c \cdot l}) \quad (8)$$

kde F je intenzita signálu ve fotonech za sekundu, k je podíl podíl emitovaných elektronů, které dopadnou na detektor a Φ_f kvantový výtěžek luminescence. Fluorimetrie je tedy využitelná i pro analýzu kvantitativní.

3.5. Fosforescence

3.5.1. Princip

Přechod elektronu z tripletního excitovaného stavu do stavu relaxačního za současného vyzáření světla, kvantově-mechanicky zakázaný přechod, se nazývá fosforescence – k tomuto jevu dochází, pokud excitovaný elektron změní přechodem na vyšší hladinu spin a má tedy stejný spin jako jeho párový elektron v základním stavu. Elektron pak přechází z hladiny S na hladinu T – tento jev se nazývá mezisystémová konverze (intersystem crossing). Vlastní vyzářování světla je opět způsobeno návratem elektronu na základní hladinu, obvykle bývá méně intenzivní než u fluorescence. Častá je u organických sloučenin s C=O vazbou nebo heteroatomy. Znázornění fosforescence pomocí Jablonského diagramu je na obr. 3.6. [2]

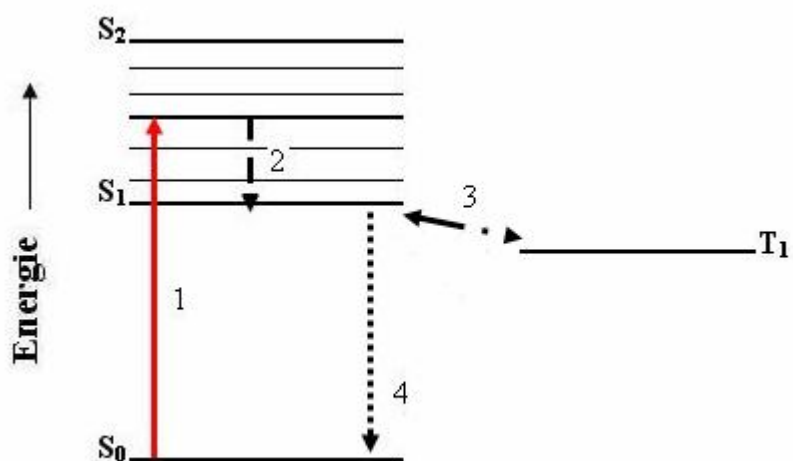


Obr. 3.6 Jablonského diagram – fosforescence. Šipka č. 1 znázorňuje excitaci elektronu ze základní energetické hladiny na hladinu S₂. Poté následuje nezářivý přechod na hladinu S₁ (změna vibračních a rotačních stavů, šipka č. 2). Následuje přechod na zakázanou hladinu T₂ (3), vnitřní konverze na hladinu T₁ (4) a vyzáření energie ve formě světla spojené s přechodem elektronu zpět na základní energetickou hladinu S₀.

3.6. Zpožděná fluorescence

3.6.1. Princip

Jedná se o obdobný jev jako fosforescence – na rozdíl od ní však dochází k opakované mezisystémové konverzi – „reverse intersystem crossing“ mezi hladinami S a T, který způsobuje „zpoždění“ emise. Světlo je pak vyzářeno přechodem z hladiny S₁ na základní energetickou hladinu. Doba života je srovnatelná s fosforescencí. Zpožděnou fluorescenci vykazuje například barvivo eosin nebo pyren. Zpožděná fluorescence v Jablonského diagramu je na obr. 3.7. [2]



Obr. 3.7 Zpožděná fluorescence v Jablonského diagramu. Šipka č. jedna ukazuje excitaci elektronu z klidové hladiny, šipka č. 2 relaxaci, šipka č. 3 pak přechod mezi hladinami S_1 a T_1 a šipka č. 4 zářivý přechod.

4. ELEKTROLUMINISCENCE

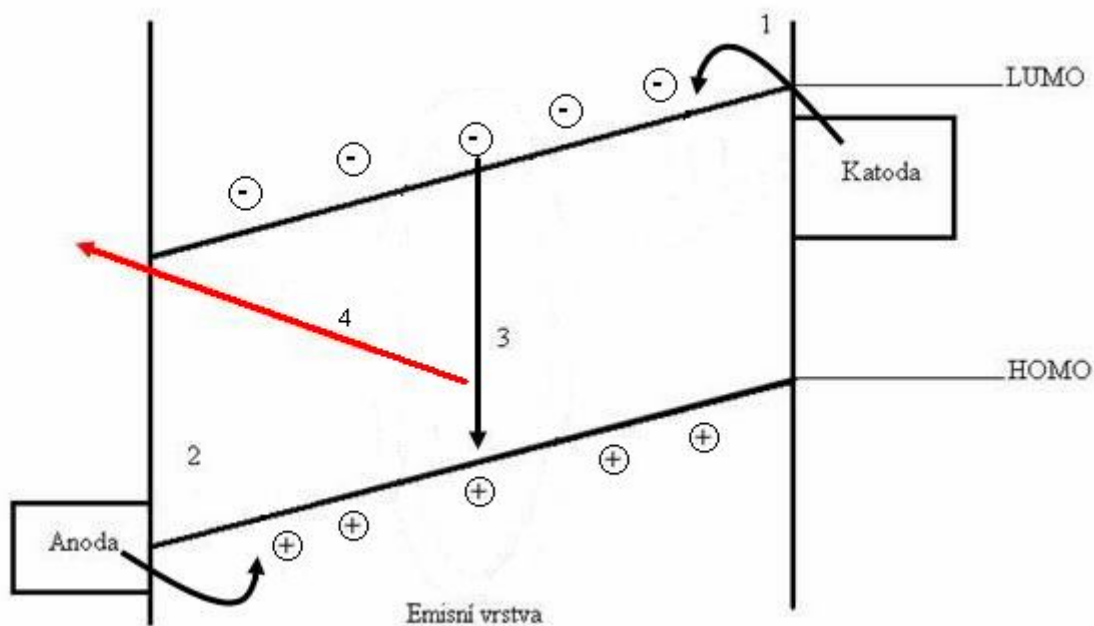
4.1. Současný stav – shrnutí, problémy, situace

Fenomén elektroluminiscence se objevuje u široké řady polovodičů. U polovodičů organických byla první studie zveřejněna roku 1960 a týkala se krystalů anthracenu, kdy součástka vykazovala fluorescenci v modré oblasti viditelného spektra při přiloženém napětí 400 V. Na základě této práce byla poprvé udělena patentová ochrana na elektroluminiscenční organickou součástku. [7]

Vývoj polovodičových organických tenkých vrstev byl zrychlen v osmdesátých letech, kdy se pro přípravu vrstev začala používat vakuová depozice malých molekul, tak bylo dosaženo žádoucí čistoty a homogenity tenkých vrstev. První zařízení připravené tímto způsobem, obsahující Alq₃ (8-Hydroxyquinoline aluminum salt) jako elektrontransportní a emitující vrstvu, ITO (indium tin oxide) jako elektrodu pro injekci děr a hořčikovou elektrodu pro injekci elektronů. Toto zařízení vykazovalo fluorescence při přiloženém napětí menším než 10 V. Vývoj pokračoval výzkumem mnoha dalších materiálů a jejich vhodnosti, účinnosti elektroluminiscence, ekonomických aspektů výroby, stability a odolnosti vůči degradaci, což je prioritou i současných prací zabývajících se touto problematikou. [2, 3]

4.2. Princip

Elektroluminiscence je děj, při kterém dochází k excitaci molekul pomocí elektrického proudu a následnému zářivému přechodu. K elektrolumiscenci dochází při injekci kladného a záporného náboje – elektronů a děr – do polovodiče z anorganické nebo organické látky. Elektrony a díry putují vodičem, kde dochází k jejich interakci a vzniku tzv. excitonu. Po jeho rozpadu dochází k uvolnění energie emisí světla. Injekce nábojů je zajištěna pomocí vhodných elektrod. Schématicky je celý proces znázorněn na obr. 4.1.



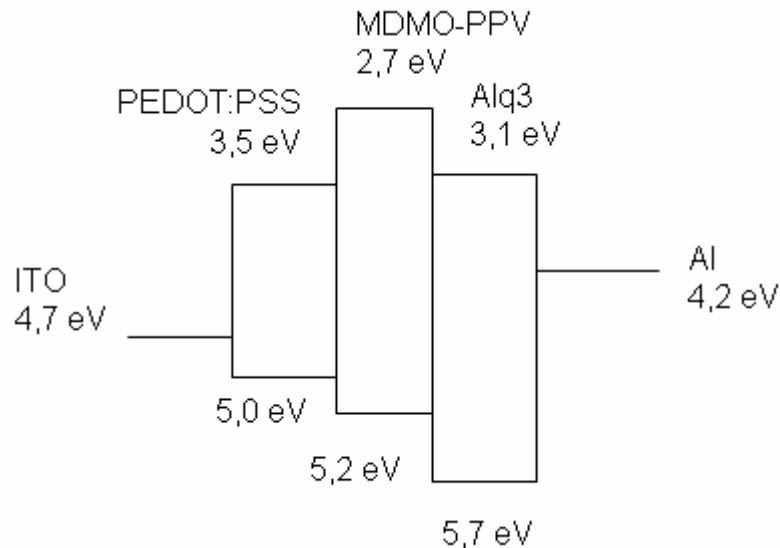
Obr. 4.1 Schéma elektroluminiscence v organickém polovodiči – číslo 1 – injekce elektronů, číslo 2 injekce děr, číslo 3 – rekombinace elektronu a díry, číslo 4 – vyzáření světla, HOMO – nejvyšší obsazený molekulový orbital (Highest occupied molecular

orbital), LUMO – nejnižší neobsazený molekulový orbital lowest unoccupied molecular orbital). Energetický rozdíl mezi HOMO a LUMO vyjadřuje schopnost molekuly excitovat elektron.

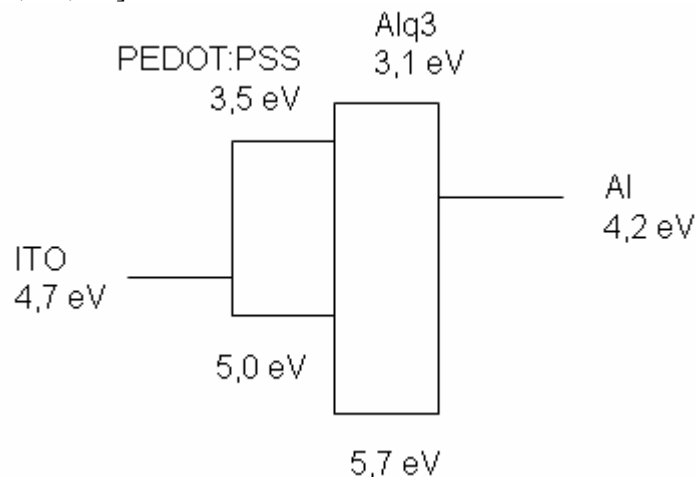
Polovodičové chování organických polymerů zajišťují konjugované π molekulové orbitály delokalizované podél polymerního řetězce. Jejich hlavní výhodou oproti nepolymerním organickým polovodičům je pevnější struktura. Odezva systému k excitaci elektrickým proudem není lineární – injekce elektronu a díry do konjugovaného řetězce může vést ke vzniku excitovaného stavu, jehož energie může být vyzářena jako světlo. Toto pak umožňuje funkci elektroluminiscenčních zařízení. [4]

4.2.1. Injekce náboje a transport

Na rozhraní elektroda-organická vrstva existuje energetická bariéra, která ztěžuje injekci náboje. Pro snadnější injekci nábojů a vyšší účinnost zařízení je proto třeba tuto bariéru snížit. Toho lze docílit užitím více organických vrstev, které mají odlišné vlastnosti – zejména různě velkou výstupní práci.



Obr. 4.2 Schematické zobrazení energetické pásové struktury OLED s polymerní emisní vrstvou [11, 12, 13]



Obr. 4.3 Schematické zobrazení energetické pásové struktury OLED s emisní vrstvou Alq3 [11, 12, 13]

Po polymerním řetězci se náboje pohybují tzv. přeskokovým mechanismem. Mezi sousedními energetickými hladinami je energetická bariéra, kterou musí náboj překonat. K tomu je zapotřebí dodat mu energii. Pohyblivost nosiče náboje v případě přeskokového mechanismu je dána jako

$$\mu = \left(\frac{e \cdot d^2}{k \cdot T} \right) \cdot H \quad (9)$$

kde d je šířka bariéry a H tzv. Boltzmannův faktor, jenž je definován vztahem

$$H = \exp\left(\frac{-E_B^m}{k \cdot T}\right) \quad (10)$$

kdy E_B^m značí výšku bariéry.

Pokud je energie nosiče náboje menší, než je energetická bariéra, náboj bariéru překoná mechanismem tunelování, který je však podmíněn malou šířkou bariéry. Pohyblivost nosiče náboje při tunelování je pak definována jako

$$\mu \approx T^{-m} \cdot \exp\left(\frac{E_E}{k \cdot T}\right) \quad (11)$$

Kdy m značí konstantu, a E_E energetickou hladinu, na které dochází k tunelování. [3]

4.2.2. Zachycení a zářivá rekombinace

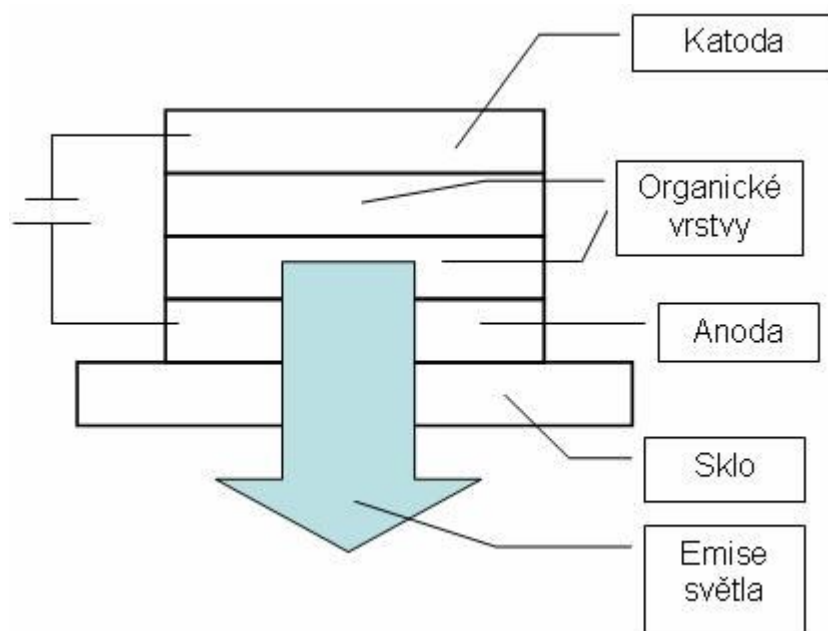
Rekombinace elektronu a díry je nejdůležitějším dějem při elektroluminiscenci, při kterém dochází k emisi světla. Pro zajištění dostatečné účinnosti ve velmi tenkých vrstvách polymerů užívaných v elektroluminiscenčních zařízeních je důležité, aby jeden z nosičů náboje měl velmi nízkou pohyblivost. Tím je dosažena potřebná lokální hustota náboje k tomu, aby druhý náboj neprošel bez kolize, vzniku excitonu a jeho následného zářivého rozpadu. Tohoto lze lépe dosáhnout u zařízení s více organickými vrstvami, kde přechod přes více rozhraní způsobuje nárůst nábojové hustoty.

Za předpokladu, že proces zachycení elektronu a díry je spinově nezávislý, probíhá excitace v poměru 3:1 ve prospěch tripletů, to znamená, že 75% elektronů je „ztraceno“, jejich energie je uvolněna nezářivými přechody, tudíž je intenzita emise příliš malá. Probíhají proto výzkumy látek, u kterých by mohla být využita i tato triplexní excitace – jejich fosforescence je dostatečně intenzivní. Takovou látkou je například porfyrin platiny. Problémem je, že při fosforescenci je emise výrazně posunutá do červené části spektra a je tedy obtížné připravit materiály s krátkovlnější emisí.

4.3. Užití

4.3.1. OLED

Zařízením využívající elektroluminiscenci jsou tzv. OLED (Organic Light Emitting Diodes). Jedná se o zařízení tvořené tenkou vrstvou nebo vrstvami organického polovodiče mezi dvěma elektrodami, přičemž katoda bývá zpravidla kovová, užívá se např. hliník nebo hořčík, anoda je pak tvořena anorganickým (např. ITO) nebo organickým (vodivé polymery) materiálem. Jako nosný materiál, podložka, se používá sklo, plasty, tenká kovová fólie a další.



Obr. 4.4 Rozložení vrstev OLED diody [7, 13]

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

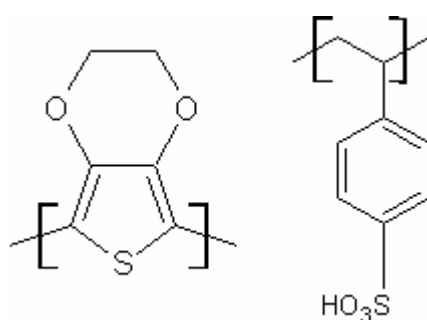
5.1. Materiály

5.1.1. ITO

ITO je směsným oxidem india a cínu (Indium-tin-oxide). Jeho výhodami jsou transparentnost, chemická stabilita a mechanická odolnost. Je využíván zejména jako materiál pro transparentní vodivé povrchy displejů, u OLED jako anoda. [3]

5.1.2. PEDOT PSS

Jedná se o směsný polymer s dobrou vodivostí a nízkým redukčním potenciálem. Jeho výhodou je optická transparentnost a vysoká stabilita. Nevýhodou je nízká rozpustnost.



Obr. 5.1 Strukturní vzorec PEDOT PSS

5.1.3. Alq3

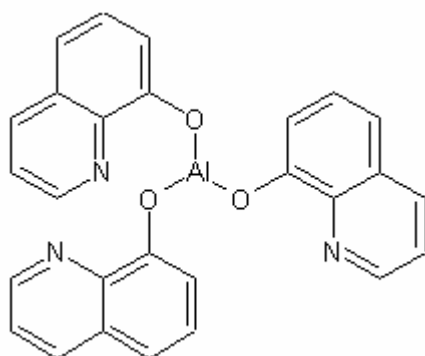
Alq3 je komplex, ve kterém je hliník koordinačně vázán na 8 hydrochinolinových ligandů. Je nerozpustný ve vodě. Využíván je zejména jako vrstva OLED ke snížení energetické bariéry na katodě nebo jako samotná emisní vrstva. [8]

Sumární vzorec: $\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{NO})_3$

CAS: 2085-33-8

Molární hmotnost: $459,43 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Bod tání: $413\text{-}415 \text{ }^\circ\text{C}$

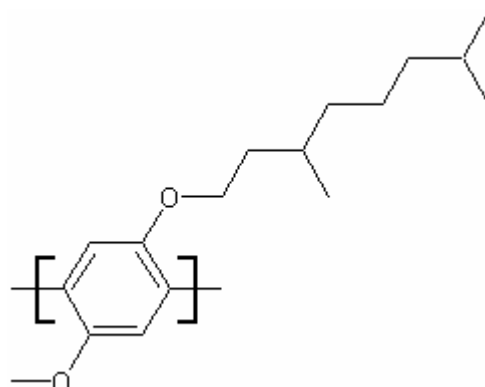


Obr. 5.2 Strukturní vzorec Alq3

5.1.4. MDMO-PPV

MDMO-PPV je polovodičový organický polymer. Deriváty PPV jsou užívány ve formě tenkých vrstev – například u elektroluminiscenčních či fotovoltaických aplikací. [8]

CAS: 177716-59-5



Obr. 5.3 Strukturální vzorec MDMO-PPV

5.2. Příprava vzorků

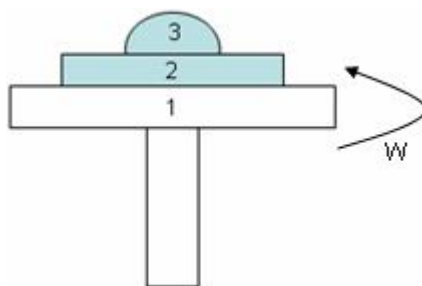
5.2.1. Nanesení vrstvy ITO

Při úpravě ITO skel se postupuje následujícím způsobem: sklo s nanesenou ITO vrstvou se umístí na papírovou podložku a pomocí Metexu zjištěno, na které straně skel se ITO vrstva nachází. Na stůl se nalepí izolepa, ze které je pomocí pravítka a skalpelu odříznut proužek o rozměrech 9 mm šířky a minimálně 25 mm délky. Proužek se poté nalepí na ITO sklo, doprostřed strany s ITO vrstvou, páska se podélně přehne přes okraje. Sklo se poté umístí do Petriho misky, zalije 18% HCl a přidají se dvě lžičky práškového Zn. Sklo se nechá přibližně 30 s lepat, poté se celá směs zředí a součástka omyje destilovanou vodou. Izolepa se odlepí a lepidlo odstraní pomocí buničiny a acetonu. Poté je sklo důkladně očištěno pomocí detergentu STAR 50 P. Po opláchnutí destilovanou vodou se součástka umístí do stojánku, ten do směsi destilované vody a detergentu STAR 50 P a vloží do ultrazvukové lázně, kde je ponechána 30 min. Po oplachu destilovanou vodou je sklo máčeno ve směsi Mili Q a vody po dobu 30 minut, poté je směs vyměněna a po dobu 30 minut je součástka opět umístěna do ultrazvukové lázně. Následuje opláchnutí acetonem a 15 minut v acetonu v ultrazvukové lázni. Následně je součástka osušena a po dalších 30 minut umístěna do ultrazvukové lázně v chloroformu. Nakonec se sklo umístí ITO vrstvou nahoru do uzavřeného prostoru, kde se deponuje izopropanolem.

5.2.2. Rotační nanášení (Spin coating)

Rotační nanášení je nedestruktivní metodou užívanou pro nanášení tenkých anorganických i organických vrstev na substráty. Roztok je umístěn na podložku, která se nachází na rotačním disku. Roztok se vlivem odstředivé síly roztahuje po podložce, rotace je ukončena, až je dosaženo potřebné tloušťky vrstvy. Na dosaženou tloušťku má minimální vliv počáteční množství roztoku, důležitá je naopak jeho viskozita a úhlová rychlost otáčení disku.

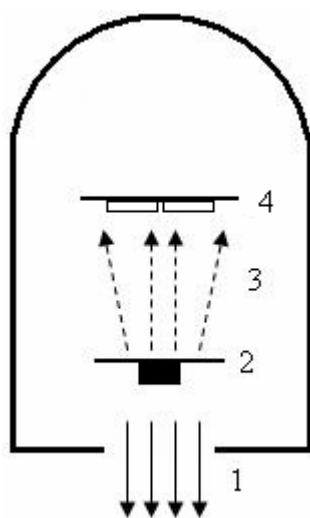
Metoda má široké využití, z hlediska této práce je důležité zejména nanášení tenkých vrstev a pigmentů pro elektroluminiscenční displeje. [3, 5]



Obr. 5.4 Rotační nanášení – číslem 1 je označen rotační válec, číslem 2 skleněná podložka a nanášená látka je označena jako 3.

5.2.3. Vakuové napařování

Vakuové napařování je metoda využívající vznik par při zahřívání nanášené látky a jejich následnou kondenzaci na chladnější podložce – substrátu, který může být temperován. Pro zajištění rovnoměrného pokrytí substrátu látkou a zajištění její homogenity může držák substrátu rotovat, množství nanášené látky je možné regulovat systémem dálkově ovládaných clon, které se nacházejí mezi vypařovacím zdrojem a substrátem. Pro snížení teploty odpařování a vyloučení možnosti srážek částic deponované látky s částicemi plynu je systém napojen na vakuum. Ohřev nanášené látky byl zajištěn odporovým ohřevem. Pro napaření hliníkových elektrod byla použita maska, zajišťující nanesení materiálu pouze do oblasti elektrod. [6, 9]



Obr. 5.5 Zjednodušené schéma vakuového napařování. Připojení vakua je označeno jako 1, číslo 2 je výparník, 3 jsou páry deponované látky a jako 4 je označen substrát, na který je látka nanášena.

3.2.4. Kontaktování

Z měděných drátků vhodné délky byla asi 1 cm od konců nad kahanem opálena izolace, poté byly očištěny v 18% HCl. Takto připravené drátky byly přilepeny na hliníkové elektrody pastou s obsahem koloidního stříbra.

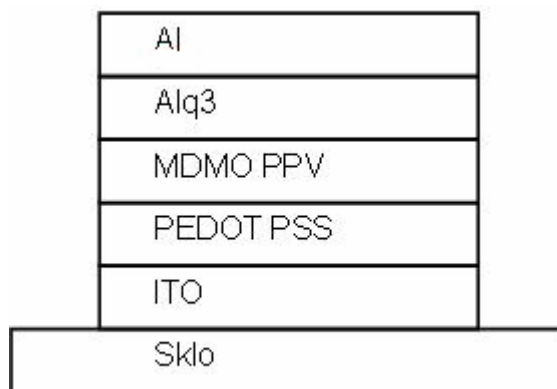
3.2.5. Připravené vzorky

Byly připraveny vzorky dvou typů, prvním typem byla elektroluminiscenční dioda, kde je emisní vrstva z nízkomolekulárního Alq3 označená jako č. 426. Druhým typem byla dioda s emisní vrstvou z polymerního MDMO-PPV označená jako č. 428. Postup nanášení vrstev a

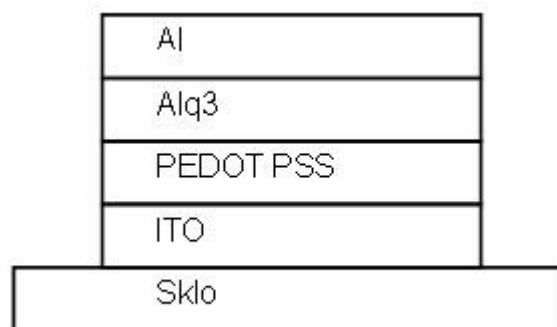
specifikace užitých látek jsou uvedeny v tabulce č. Pro optická měření byly připraveny také dva vzorky – křemenné destičky, jedna s vrstvou MDMO-PPV a druhá s vrstvou Alq3.

Tab. 1: Tabulka shrnující vlastnosti jednotlivých vrstev připravených vzorků

ITO	Sigma Aldrich, 636916-25PAK Upraveno postupem uvedeným v
PEDOT PSS	Sigma Aldrich, 560596 Filtrováno na 45 mikronovém filtru Nanášeno rotačním nanášečem, 3000 ot./min. Sušeno 20 min. při 110 °C
MDMO PPV	Sigma Aldrich, 546461-16 Koncentrace 15 mg na 1 ml chlorbenzenu Nanášeno rotačním nanášečem, 1000 ot./min. Tloušťka vrstvy 30 nm
Alq3	Vakuově napařeno Tloušťka vrstvy u diody č. 426 - 30 nm Tloušťka vrstvy u diody č. 428 - 60 nm
Al elektrody	Vakuově napařené



Obr. 5.6 Schéma vrstev diody č. 428



Obr. 5.7 Schéma vrstev diody č. 426

5.3. Metody

5.3.1. UV VIS spektroskopie

Pro zjištění absorpčních spekter byly vzorky změřeny na přístroji Varion Cary 50 Probe. Jako blank (slepý vzorek) pro určení základní čáry (baseline) byla použita křemenná destička bez jakýchkoli nanesených vrstev. Absorbance obou látek byla změřena ve spektru od 200 do 800 nm.

5.3.2. Fluorescenční spektroskopie

Na přístroji Aminco Bowman Series 2 byla proměřena emisní spektra vzorků určených pro optická měření. U vzorku obsahujícího vrstvu MDMO-PPV bylo nastavení měření následující – proměřováno bylo spektrum od 500 do 800 nm, excitace byla očekávána při 590 nm. Rychlost měření byla $2 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$, citlivost detektoru 820 V. Pro odstranění šumů a nepřesností bylo měření provedeno třikrát, výsledné spektrum bylo matematicky korigováno.

Pro vzorek s vrstvou Alq3 bylo emisní spektrum zjišťováno v rozsahu 430 - 700 nm, s maximem očekávaným při 535 nm, citlivostí detektoru 1275 V a rychlost měření $0,5 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$. Měření bylo opakováno třikrát, poté byla provedena matematická korekce výsledného spektra.

5.3.3. Měření kapacity elektrod připravených diod

Pro zjištění funkčnosti elektrod (kontrola přítomnosti zkratu) byly elektrody proměřeny přístrojem Metex M4660M – kladný kontakt byl přiložen na ITO vrstvu, záporný na proměřovanou elektrodu. Na základě tohoto měření byly vybrány vhodné elektrody pro další měření.

5.4.4. Měření VA charakteristik a elektroluminiscence

Pro zajištění stálých podmínek a jako ochrana před degradací byly vzorky umístěny do kryostatu firmy Janis research, model VDF 476, který byl následně připojen na turbomolekulární vakuovou pumpu Pfeiffer Vacuum, model TSH 071E, tlak činil $2,43 \cdot 10^{-3} \text{ mBarr}$. Pomocí přístroje Keithley 6517A pak bylo na diody přikládáno stejnosměrné napětí a proud procházející vzorkem byl zaznamenávám pomocí počítače s programem Analyser v. 4.6, na který byl přístroj Keithley připojen. Takto byla získána voltampérová charakteristika daného vzorku. Současně byla měřena intenzita elektroluminiscenčního záření pomocí fotonásobiče HAMAMATSU 69525, jehož proudová odezva byla zaznamenána přístrojem Keithley 6487 a druhým počítačem pomocí programu National Instruments LabView 8.6.

6. VÝSLEDKY, VYHODNOCENÍ

6.1. Měření kapacity elektrod

Tab. 2: Měření kapacity elektrod diody č. 426 (Alq3)

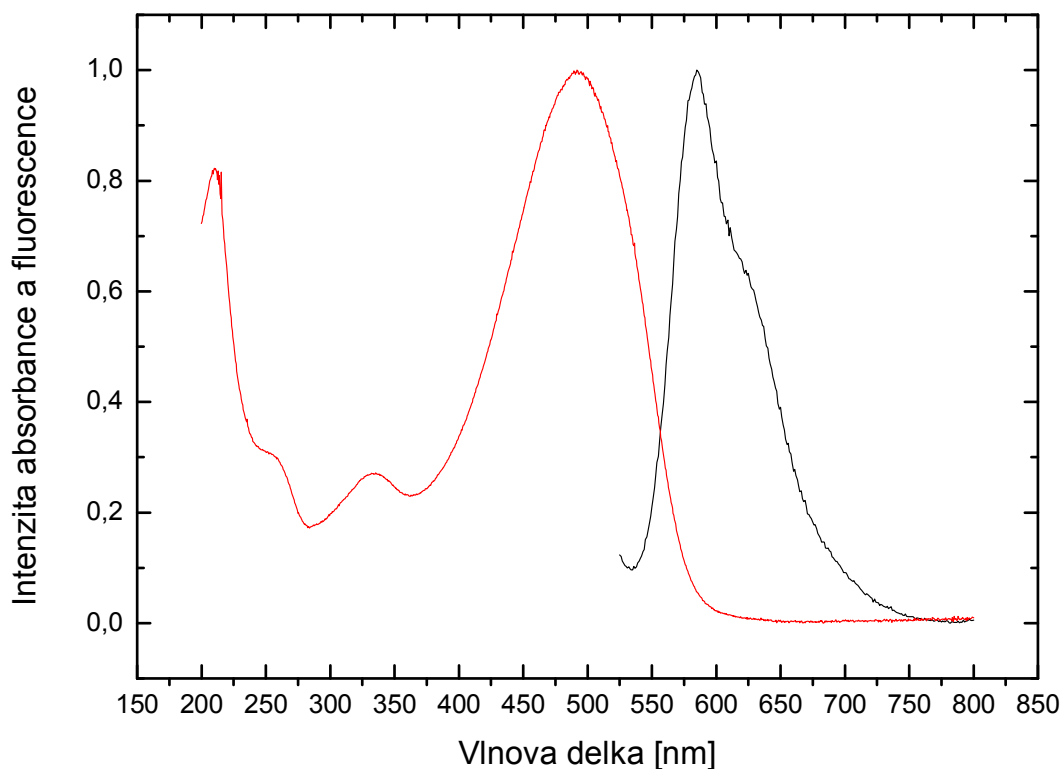
Dioda č. 426	
Elektroda	Kapacita [nF]
C	1,5
D	1,7

Tab. 3: Měření kapacity elektrod diody č. 428 (MDMO-PPV)

Dioda č. 428	
Elektroda	Kapacita [nF]
A	4,5
B	4,4

6.2. Optická měření

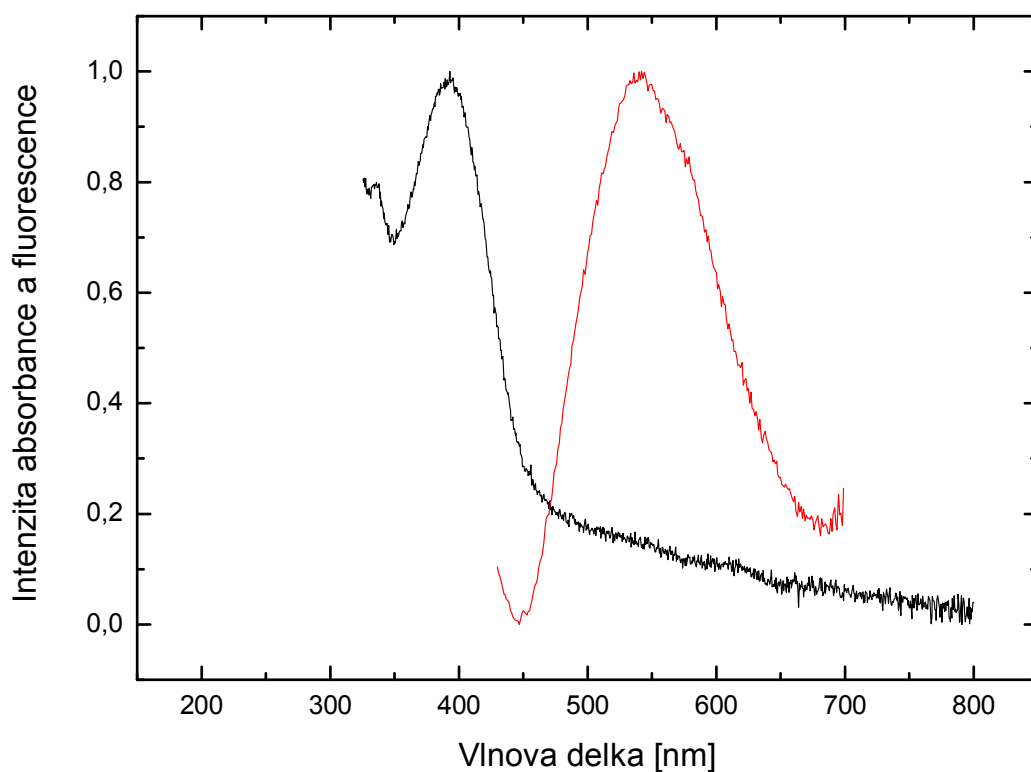
6.2.1. MDMO-PPV



Obr. 6.1 Optické charakteristiky materiálu MDMO-PPV. Červeně je vyznačena absorpance, černě emise látky. Intenzita je normovaná na hodnotu 1.

Na obrázku 6.1 je vyneseno absorpční a emisní spektrum tenké vrstvy MDMO-PPV získané optickými měřeními. Maximum absorpce je v 493 nm, její rozmezí přibližně 400 – 575 nm. Emise je pozorována v oblasti 550 – 700 nm s maximem v 585 nm.

6.2.2. Alq3



Obr. 6.2 Optické charakteristiky materiálu Alq3. Černě je vyznačena absorpce, červeně emise látky. Intenzita je normovaná na hodnotu 1.

Na obrázku 6.2 je absorpční a emisní spektrum tenké vrstvy Alq3. Materiál vykazoval absorpci v intervalu 350 – 450 nm, maximální při vlnové délce 395 nm, emise byla pozorována mezi 450 a 650 nm, nejvyšší byla při 542 nm.

6.2.3. Srovnání materiálů

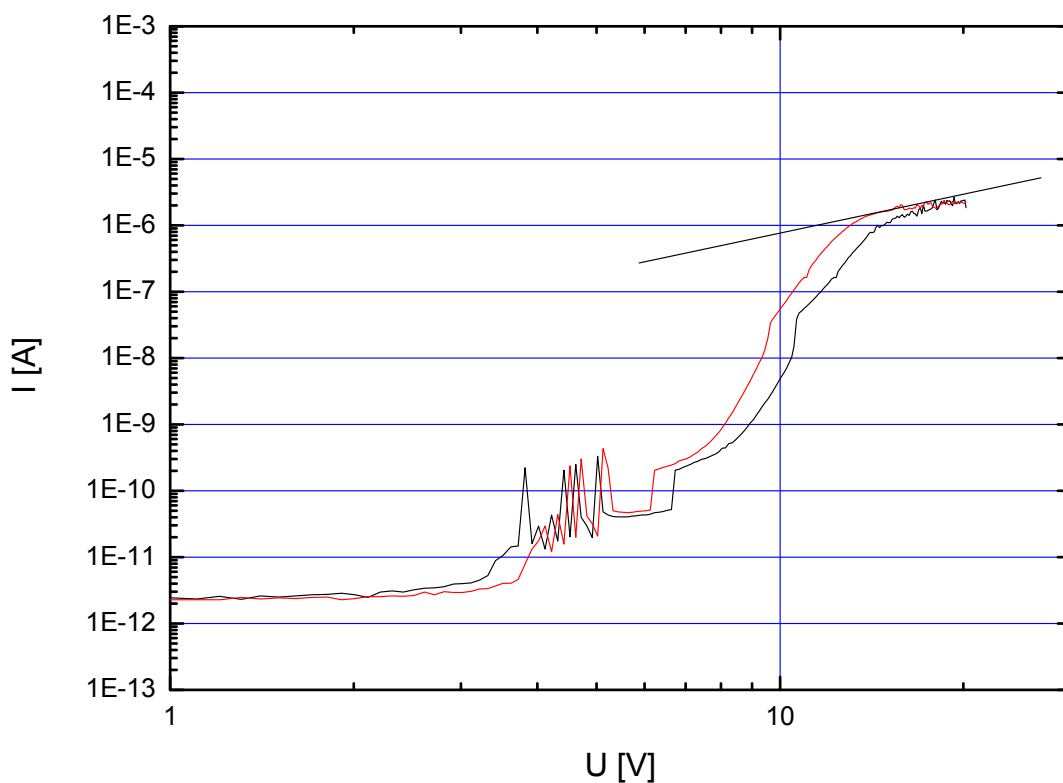
Tab. 4: Srovnání optických vlastností obou materiálů

Materiál	Alq3	MDMO-PPV
Rozmezí absorpce	350 – 450 nm	400 – 575 nm
Maximum absorpce	395 nm	493 nm
Rozmezí emise	450 – 600 nm	550 – 700 nm
Maximum emise	542 nm	585 nm

Z tabulky a grafů je patrné, že Alq3 absorbuje asi o 100 nm dříve než MDMO-PPV, maximum emise se však liší méně. Z absorpčních křivek je tedy patrné, že zakázaný pás u Alq3 je výrazně širší než u MDMO-PPV.

6.3. Voltampérové charakteristiky

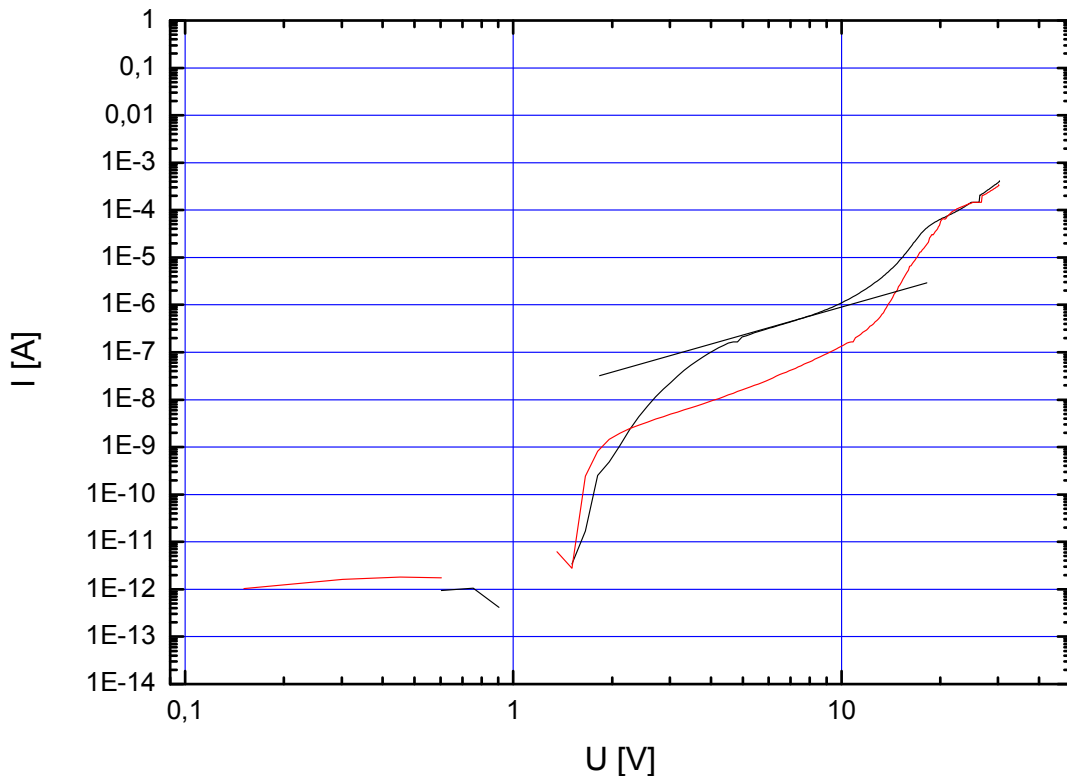
6.3.1. Dioda č. 426 (Alq3)



Obr. 6.3 Voltampérová charakteristika diody č. 426 (Alq3). Černě je v grafu znázorněna elektroda C, červeně elektroda D. Osy jsou v logaritmickém měřítku, černě je znázorněna směrnice.

Z grafu č. vidíme skoky spojené se změnou rozsahu měřícího přístroje, od 8 V se přibližně lineární nárůst proudu začíná prudce zvyšovat až do přibližně 13 V, kdy se opět strmost křivky snižuje, pozorovaná směrnicí od tohoto napětí je úměrná U^2 (V grafu vyznačeno černou čarou). Tento prudký nárůst je způsoben překonáním přikontaktní bariéry. U obou elektrod měřené diody je průběh závislosti podobný.

6.3.2. Dioda č. 428 (MDMO-PPV)

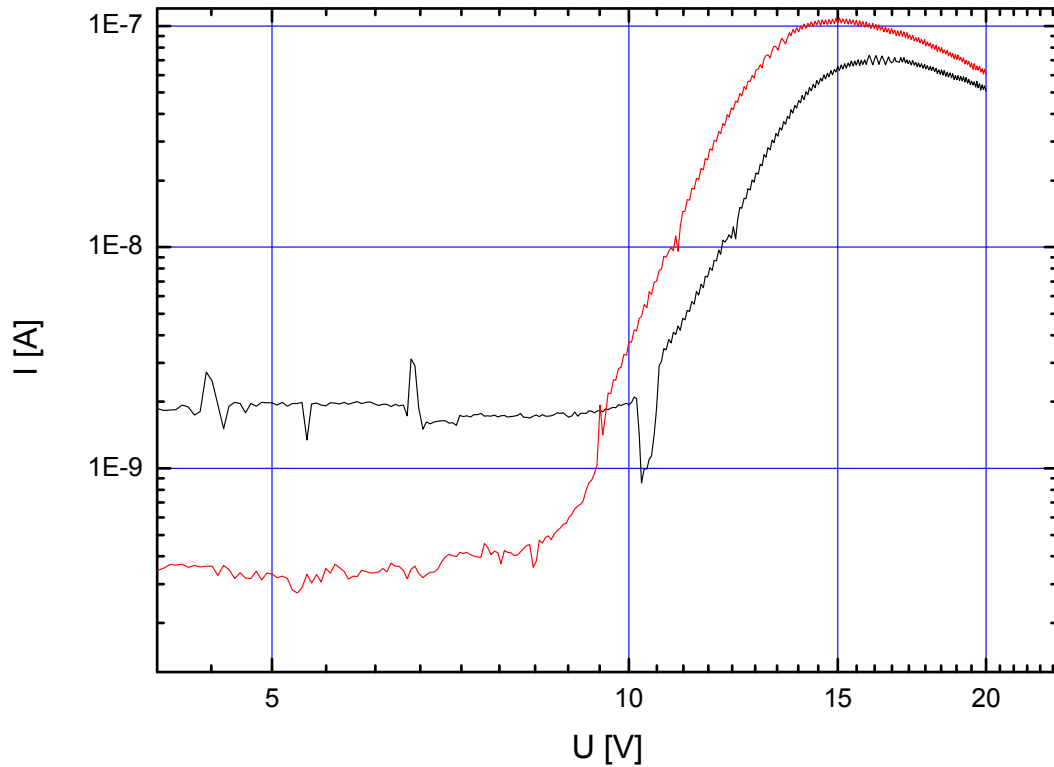


Obr. 6.4 Voltampérová charakteristika diody č. 428 (MDMO-PPV). Černě je v grafu znázorněna elektroda A, červeně elektroda B. Měřítko obou os je logaritmické, odlehlé hodnoty byly vynechány, směrnicí křivky je vyznačena černou čarou.

V grafu vidíme, že přibližně do 1,6 V je nárůst procházejícího proudu v závislosti na napětí menší než 1. Poté proud prudce stoupá, až do překonání bariéry v okolí 3 V. Následuje prudký nárůst, strmost zhruba kolem 2 (růst úměrný U^2), což odpovídá proudům omezeným prostorovým nábojem. Toto trvá přibližně do 10 V, od kdy se strmost, zvyšuje, aby se kolem 20 V opět snížila. Okolo 1 V se nacházely hodnoty zatížené hrubou chybou, proto nejsou v grafu uvedeny. Průběh závislosti je přibližně identický u obou měřených elektrod.

6.4. Měření elektroluminiscence

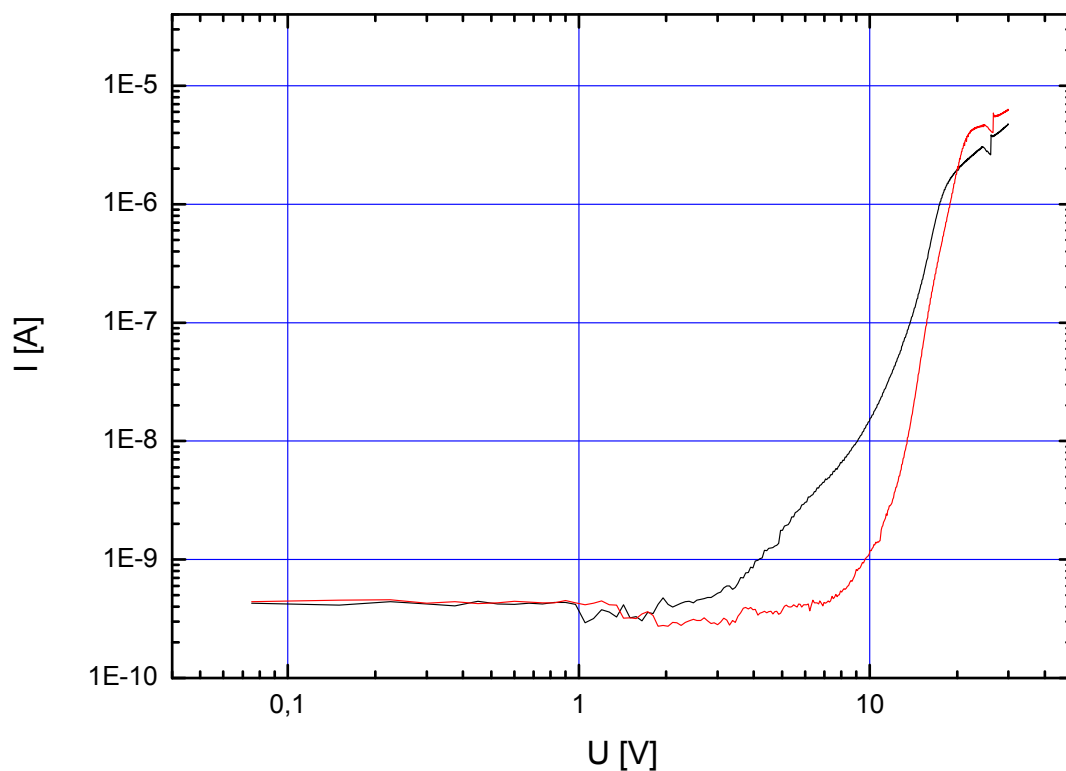
6.4.1. Dioda č. 426 (Alq3)



Obr. 6.5 Elektroluminiscence diody č. 426 (Alq3). Černě je v grafu znázorněna elektroda C, červeně elektroda D, měřítko je logaritmické.

Až do napětí přibližně 8 V jsou hodnoty procházejícího proudu zanedbatelné. Poté zaznamenáváme prudký nárůst až do oblasti okolo 13 V, kde křivka saturuje. Následný pokles velikosti procházejícího proudu je zřejmě způsoben degradací emisní vrstvy.

6.4.2. Dioda č. 428 (MDMO-PPV)

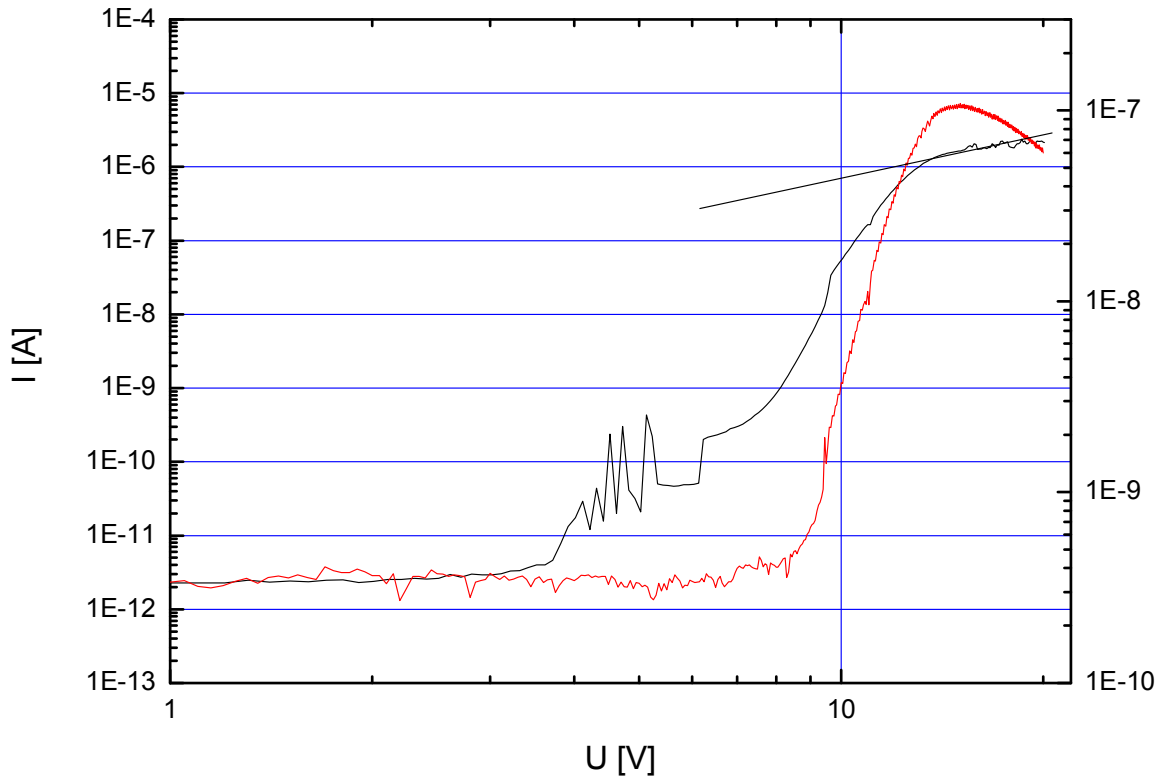


Obr. 6.6 Elektroluminiscence diody č. 428 (MDMO-PPV). Černě je v grafu znázorněna elektroda A, červeně elektroda B. Nesrovnalosti v oblasti okolo 26 V jsou způsobeny změnou rozsahu měření přístroje Keithley. Měřítka obou os je logaritmické.

Na obrázku č. 6.6, je v případě elektrody A elektrody až do asi 2 V procházející proud minimální. Poté pozorujeme nárůst procházejícího a změnu směrnice až do přibližně 18 V, kdy zaznamenáváme saturaci křivky. U elektrody B je nárůst pozorovatelný až od asi 8 V.

6.5. Srovnání VA charakteristik a elektroluminiscence

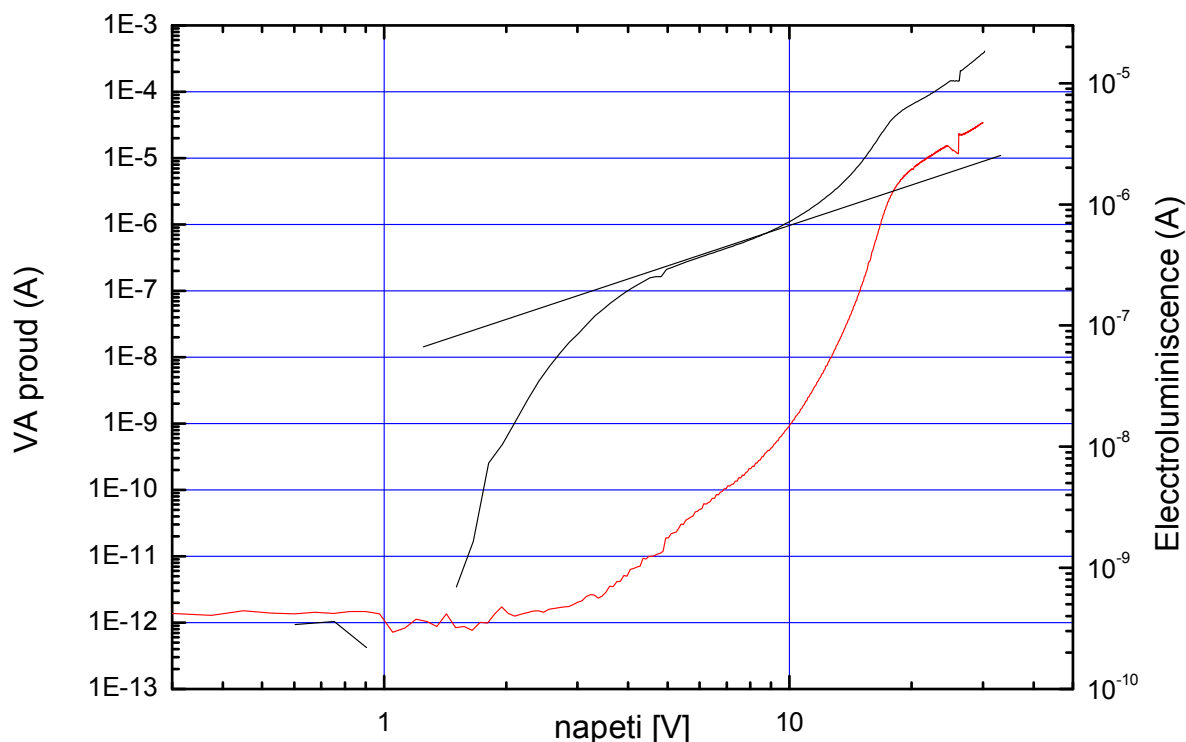
6.5.1. Dioda č. 426 (Alq3)



Obr. 6.7 Srovnání voltampérové charakteristiky a elektroluminiscence u diody č. 426 (Alq3), elektrody D. VA charakteristika je znázorněna černou čarou, elektroluminiscence červenou. Hodnoty na obou osách jsou vyneseny v logaritmickém měřítku, rovná černá čára je směrnice křivky.

Až do asi 8 V prochází vzorkem velmi malý proud. Od tohoto napětí je překonávána příkontaktní bariéra a proud se prudce zvyšuje, což se odráží i v narůstající intenzitě elektroluminiscence. V oblasti okolo 13 V, kdy už je vytvořen prostorový náboj (nárůst proudu odpovídá U^2) je namísto očekávaného lineárního nárůstu elektroluminiscence pozorován její pokles, který je pravděpodobně způsoben degradací vzorku.

6.5.2. Dioda č. 428 (MDMO-PPV)



Obr. 6.8 Voltampérová charakteristika diody č. 428 (MDMO-PPV), elektrody A ve srovnání s elektroluminiscencí téhož vzorku. VA charakteristika je v grafu znázorněna černě, elektroluminiscence červeně, černou čarou je naznačena směrnice křivky.

Napětí od kterého lze pozorovat elektroluminiscenci odpovídá hodnotě při které je překonána příkontaktní bariéra a proud procházející vzorkem je úměrný U^2 (cca 3 V). Poté intenzita elektroluminiscence roste lineárně, až do zhruba 10 V, kdy zaznamenáváme zvýšení strmosti, které pokračuje až do napětí 20 V, po kterém se strmost opět snižuje. Průběh elektroluminiscence je tedy odpovídající voltampérové charakteristice.

6.2.3. Srovnání vzorků

Tab. 5: Tabulka uvádí napětí a intenzitu elektrického pole, od kterých bylo možné pozorovat elektroluminiscenci pro oba zkoumané systémy.

Vzorek	Napětí [V]	Proud [A]	Intenzita EP [V/m]
426 (Alq3)	8	$5 \cdot 10^{-8}$	$13,3 \cdot 10^{-7}$
428 (MDMO-PPV)	4	10^{-7}	$6,66 \cdot 10^{-7}$

Z uvedených hodnot je patrné, že v případě vzorku č. 426 (Alq3) je energetická bariéra vyšší než u vzorku č. 428 (MDMO-PPV), je tedy nutné přiložit vyšší napětí pro stejnou intenzitu elektroluminiscence.

7. ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na studium látek užívaných pro konstrukci OLED, výrobu modelových vzorků dvou typů těchto diod, studium jejich vlastností a porovnání. V teoretické části byla provedena rešerše zaměřená na popis jevů, které v těchto látkách a zařízeních probíhají, popis jejich funkce a základní vztahy nutné pro jejich pochopení. Shrnutá byla historie jejich používání a současná situace v tomto odvětví.

V experimentální části byly popsány konkrétní materiály užití při výrobě vzorků, jejich základní vlastnosti a složení. Pomocí UV-VIS spektrofotometrie a fluorescenční spektrofotometrie byly studovány materiály Alq₃ a MDMO-PPV, nanosené v tenkých vrstvách na křemenném skle a zjištěna jejich absorpční a fluorescenční spektra.

Dále je popsáno složení modelových vzorků, konkrétně modelové diody o složení ITO/PEDOT:PSS/Alq₃/Al a modelové diody o složení ITO/PEDOT:PSS/MDMO-PPV/Alq₃/Al, jejich výroba a metody při ní použité. U hotových vzorků byla provedena měření kapacity jednotlivých elektrod, na základě kterých pak byly vybrány elektrody vhodné pro další práci – u vzorku č. 426 (emisní vrstva Alq₃) to byly elektrody C a D, u vzorku č. 428 (emisní vrstva MDMO-PPV) elektrody A a B. U těchto elektrod byla změřena jejich voltampérová charakteristika a intenzita elektroluminiscence v závislosti na napětí na tyto součástky přiloženém. Díky získaným závislostem bylo možné provést porovnání voltampérových charakteristik a intenzity elektroluminiscence. Ze závislostí bylo zjištěno napětí nutné pro sepnutí OLED, které se shodovalo s napětím nutným pro překonání příkontaktní energetické bariéry a vytvoření prostorového náboje. Vlastnosti obou vzorků pak byly porovnány. Bylo zjištěno, že vrstva polymeru MDMO-PPV ve vzorku výrazně napomáhá snížení energetické bariéry nutné pro injekci a transport náboje do emisní vrstvy, oproti vzorku, kde bylo emisní vrstvou samotné Alq₃. Vzorek kde bylo Alq₃ emisní vrstvou navíc vykazoval silnou degradaci při přiloženém napětí vyšším než 13 V, spojenou se snížením intenzity elektroluminiscence. Ta byla zřejmě způsobena vlivem změny struktury materiálu způsobené procházejícím proudem. Obecně u obou typů vzorků nebyly charakteristiky elektrod zcela identické, vždy vykazovaly mírnou odlišnost. Odlišnost byla způsobena nedokonalým nanesením vrstev, jejichž tloušťka se mohla mírně lišit. Vliv zřejmě měly i nečistoty obsažené ve vrstvách, kterým by bylo možné zabránit výrobou vzorku v čistých prostorách. Závěry vyvozené z optických měření, měření intenzity elektroluminiscence a voltampérových charakteristik potvrzují teoretické poznatky, které jsou shrnuty v teoretické části.

8. SEZNAM LITERATURY

- [1] Lakowicz, J. R.: *Principles of Fluorescence Spectroscopy*. 3rd edition. Singapore : Springer Science+Business Media, LLC, 2006. 954 s. ISBN 0-387-31278-1, ISBN 978-0387-31278-1.
- [2] Fišar, Z., *Karlova univerzita* [online]. 2003, poslední revize 2003 [cit. 3.5.2011]. Dostupné z <<http://psych.lfl.cuni.cz/fluorescence/soubory/principy.htm>>
- [3] Kovář, J.: *Studium optoelektrických vlastností tenkých vrstev organických polovodičů*. Brno 2008. 47 s. Diplomová práce na Fakultě chemické, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
- [4] Burroughes, J. H., Bradley D. D. C., Brown A. C., Marks R. N., Mackay K., Friend, R.H., Burns, P. L., Holmes, A. B.: Light-emitting diodes based on conjugated polymers. *Nature*, 1990, vol. 347, no. 6293, pp. 539-541. ISSN 0028-0836.
- [5] Petty, M. C. *Langmuir-Blodgett films: an introduction*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1996. 234 p. ISBN 0521413966.
- [6] Hegerová, L.: *Studium tloušťky tenkých vrstev organických materiálů*. Brno 2008. 46 s. Diplomová práce na Fakultě chemické, Vysoké učení technického v Brně, Ústav Fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
- [7] Friend, R. H., Gymer, R. W., Holmes, A. B., Burroughes, J. H., Marks, R. N., Taliani, C., Bradley, D. D. C., Dos Santos, D. A., Brédas, J. L., Loglund, M., Salaneck, W. R.: Electroluminescence in conjugated polymers. *Nature*, 1999, vol. 397, no. 6715, pp. 121-128. ISSN 0028-0836.
- [8] *Eurochem* [online]. 2002, poslední revize 2010 [cit. 3.5.2011]. Dostupné z: <www.eurochem.cz>.
- [9] Oficiální stránky Ústavu mikroelektroniky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně.
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2009-BMTS-5-tenke-vrstvy.pdf>
- [10] Tebich, I. *Organické polovodiče*. Brno 2010. 45 s. Bakalářská práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

- [11] Hancock, J. M., Gifford, A. P., Tonzola Ch. J., Jenekhe, S. A.: High-Efficiency Electroluminescence from New Blue-Emitting Oligoquinolines Bearing Pyrenyl or Triphenyl Endgroups. *The Journal of Physical Chemistry*, 2007, vol. 111, no 18, pp. 6875-6882.
- [12] Ronghua, L., Yingquan, P., Chaluhu, M., Runsheng, W., Ying, W., Hongwei X., Ting, Y., Jipeng, X., Shenggang, Y., Jiawang, Z.: Effect of mixture ratio on the performance of MDMO-PPV:PCBM bulk heterojunction solar cells: A numerical study . *Materials Science and Engineering*. 2010, vol. 172, no 3, pp. 305-310.
- [13] Hwaejong, K., Minjung, S., Youngkyoo, K. Influence of thermal annealing on the deformation of a lithium fluoride nanolayer in polymer : fullerene solar cells. *Europhysics letters*. 2008, vol. 84, no 5, pp.. 58002.

9. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

DMANS	4-Dimethylamino-4-nitrostilbene
ITO	Indium-tin-oxide
MDMO-PPV	Poly(2-methoxy-5-(3-7-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylenevinylene)
Alq3	8-Hydroxyquinoline aluminum salt
VA	Voltampérová charakteristika
EL	Elektroluminiscence
OLED	Organic Light Emitting Diode
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital
LUMO	Lowest Unoccupied Molecular Orbital
PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrenesulfonate)
I_f	Intenzita fluorescence
I_{abs}	Intenzita absorbance
Φ_f	Výtěžek fluorescence
E	Energie
h	Planckova konstanta
ν	Frekvence
N_F	Počet vyzářených kvant
N	Počet absorbovaných kvant
τ	Doba života fluorescence
Γ	Počet zářivých přechodů za jednotku času
k_{nr}	Počet nezářivých přechodů za jednotku času
τ_n	Vnitřní doba života fluorescence
A	Absorbance
ε	Extinkční koeficient
l	Optická dráha
c	Koncentrace
I_0	Záření dopadající na vzorek
I	Záření vzorkem prošlé
F	Intenzita signálu
k	Podíl emitovaných elektronů dopadajících na detektor
d	Šířka bariéry
H	Boltzmannův faktor
E_B^m	Výška bariéry
μ	Pohyblivost nosiče náboje