

**ZÁPADO ČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Organické materiály v elektronice**

**vedoucí práce: Ing. Michael Kroupa  
autor: Ondřej Kozák**

**2012**



## **Anotace**

Bakalářská práce je zaměřena na organické materiály používané v elektronice a na polovodičové součástky z nich vyrobené. Pro uvedení do problematiky je v úvodu popsán princip a vznik polovodivosti v organických materiálech a dále historie organických polovodičů. V další kapitole jsou popsány konkrétní typy materiálů. Kapitola číslo tři se zabývá polovodičivými součástkami vyráběnými z materiálů uvedených v předchozí kapitole, jejich strukturou a vlastnostmi. Na závěr je srovnání organických a anorganických součástek z hlediska jejich nejdůležitějších parametrů.

## **Klíčová slova**

Organické materiály, OFET, OLED, OPVC, polyanilin, polypyrrol, polyacetylen, polythiofen, pentacen, rubren, PPV.

**Abstract**

The bachelor thesis is focused on organic materials which are used in electronics and semiconductor components produced from them. As an introduction there is a description of principles and origin of semiconductivity in organic materials and the history of organic semiconductors at the beginning. In the second chapter there are named and described specific types of materials. The third chapter deals with semiconductive components manufactured from materials specified in the previous chapter, their structure and their qualities. At last there is a comparison of organic and inorganic components in terms of their most important parameters.

**Key words**

Organic materials, OFET, OLED, OPVC, polyaniline, polypyrrole, polyacetylene, polythiophene, pentacene, rubrene, PPV.

## Prohlášení

Prohlašuji tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 17.6.2012

Jméno a příjmení

.....

## **Podkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Michaelu Kroupovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>1 POLOVODIČE</b> .....	<b>9</b>
1.1 PRINCIP POLOVODIVOSTI.....	9
1.2 ORGANICKÉ POLOVODIČE .....	10
1.3 ORGANICKÉ MATERIÁLY .....	11
<b>2 VODIVÉ POLYMERY</b> .....	<b>13</b>
2.1 VODIVOST MOLEKUL .....	13
2.2 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY .....	15
2.2.1 <i>Polyanilin (PANI)</i> .....	15
2.2.2 <i>Polypyrrol (PPy)</i> .....	17
2.2.3 <i>Polyacetylen (PA)</i> .....	19
2.2.4 <i>Polythiofen (PTh)</i> .....	19
2.2.5 <i>Pentacen</i> .....	21
2.2.6 <i>Rubren</i> .....	22
2.2.7 <i>Poly(p-fenylen vinylen) (PPV)</i> .....	22
<b>3 SOUŠTĚVKY Z ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>23</b>
3.1 ORGANICKÝ POLEMIČENÝ TRANZISTOR (OFET) .....	23
3.2 ORGANICKÉ SVĚTLÉ EMITUJÍCÍ DIODY (OLED) .....	25
3.3 ORGANICKÉ FOTOVOLTAICKÉ BŮJNICE (OPVC) .....	26
<b>4 POROVNÁNÍ ORGANICKÝCH A ANORGANICKÝCH SOUŠTĚVEK</b> .....	<b>28</b>
4.1 OFET – FET .....	28
4.2 OLED – LED .....	28
4.3 OPVC – PVC .....	29
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>30</b>
<b>REJSTŘÍK POJMŮ</b> .....	<b>31</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>32</b>

## Úvod

Organické materiály v elektronice se využívají v n kolika podobách již mnoho let, ale až nyní, díky výzkumu, je lze využívat jako polovodiče. Je snaha o nahrazení anorganických polovodičů těmi organickými hlavními kvády jejich předností, jako je výrobní cena, snadné zpracování, mechanické vlastnosti a v neposlední řadě nízká hmotnost. Ale i přes tyto výhody jim nejsou schopny plně konkurovat. Zejména díky nižší teplotní stabilitě a odolnosti vůči únikům chemikálií a vnějšímu prostředí.

V mé práci se zaměřím na organické materiály a popíši jejich strukturu, postup výroby, druhy použitelných materiálů a využití jednotlivých druhů součástí v různých aplikacích. Dále se zaměřím na polovodičové organické součástky - OLED, OFET a OPVC a jejich srovnání s anorganickými ekvivalenty.



# 1 Polovodiče

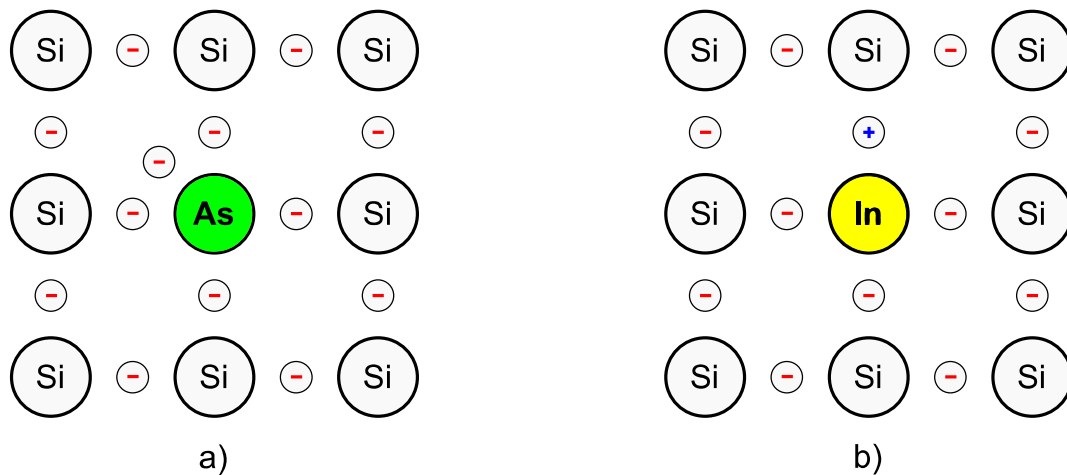
Polovodiče jsou látky, které mají šířku zakázaného pásma okolo 1 eV a mají mnohem vyšší elektrický odpor než vodiče a menší než izolanty. Tzn., že jejich mnohem nižší elektrická vodivost je v mezích od  $10^3$  do  $10^{-8}$  S·cm<sup>-1</sup>. Jejich vodivost je značně ovlivňována teplem i světlem. Oproti vodičům, kde nosičem náboje je elektron, v polovodičích zastávají tuto funkci jak elektrony tak „díry“ (absence elektronu v elektronovém obalu atomu). Nejbělejší polovodiče jsou krystalické pevné látky, ale jsou známé i amorfní i tekuté. [1]

Polovodiče mohou být tvořeny dvěma druhy látek - buď organickými molekulami (založené na uhlíku) anebo anorganickými sloučeninami. Oba druhy mají samozřejmě své výhody i nevýhody. Mnoho výzkumů bylo zaměřeno na zkombinování obou druhů do hybridních součástí a využití pouze jejich výhod. Anorganické materiály mají výbornou stabilitu a odolnost vůči vnějším vlivům a součástky z nich vyrobené dosahují vysokých výkonů (vysoká mobilita nosičů náboje). Organické materiály mají na druhou stranu mnohem lepší a levnější zpracovatelnost a fyzikální vlastnosti, které se dají snadno chemicky upravovat. U polovodičových materiálů je důležitá jejich vysoká čistota. Nečistoty mohou zadržovat nosiče náboje nebo narušovat jednotlivé polovodičové vrstvy, čímž limitují mobilitu náboje. Mimo to by tyto materiály měly být stabilní i při působení vnějšího prostředí, aby materiály nedegradovaly vlivem různých záření i tepla, a nebyly náchylné na oxidaci vlivem vlhkého vzduchu. [1], [2]

## 1.1 Princip polovodivosti

Polovodivost může být vlastní i nevlastní. Pokud jde o materiál čistý a na vodivosti se podílí elektrony i díry jedná se o vlastní polovodivost. Při přivedení napětí na elektrody jsou záporné elektrony přitahovány ke kladnému pólu a kladné díry naopak k zápornému pólu. Proud je tedy způsoben pohybem dír i elektronů na rozdíl od vodivosti v kovech, u kterých je proud způsoben pouze pohybem elektronů. Mnohem častěji využívané jsou nevlastní polovodiče. Jedná se o materiály, které jsou dotované malým množstvím příměsí a podle druhu základního materiálu a příměsí se na vodivosti budou podílet pouze elektrony i díry. Pokud se na vodivosti podílí elektrony hovoříme o vodivosti typu n. Například pokud do tyčiny mocný prvek dotujeme přímocným (donor – dárce elektronu) jeden elektron přímocného prvku se neúspěšně váže krystalové mřížky a stává se tak volný. Proto se také tato vodivost nazývá elektronová i negativní. Naopak pokud se na vodivosti podílí pouze díry, jedná se o vodivost typu p. Zde se do tyčiny mocný prvek přímocným

(akceptor – přijímá elektrony). Dochází k tomu, že v krystalové mřížce všechny tři elektrony trojmocného prvku vytvoří páry elektron-díra a zůstává neobsazený protonový mocného prvku – díra. Jedná se o absenci elektronu ve vazbě. Další názvy této vodivosti jsou dírková a pozitivní. [5]



Obr. 1.1 a) Polovodivost typu N – krystal křemíku dotovaný arsenem  
b) Polovodivost typu P – krystal křemíku dotovaný indiem [5]

## 1.2 Organické polovodiče

Polymery v elektrotechnice byly známy hlavně pro jejich použití jako izolant. Objev v 60. letech Heegera, MacDiarmida a Shirakawy, v sedmdesátých letech, týkající se přenosu náboje v organických molekulách, změnil směr výzkumu k vývoji konjugovaných polymerů. Většina organických polovodičů byla vhodná spíše pro p-typ (dírková vodivost); polovodiče typu n měly tendenci rychle degradovat vlivem okolních podmínek. Nicméně jejich stabilita byla později vylepšena chemickou modifikací nejvýznamnějších molekul založených na perylenu. V posledních letech výrazně vzrostla aktivita ve výzkumu organických polovodičů typu N a ambipolárních organických polovodičů. [2], [3]

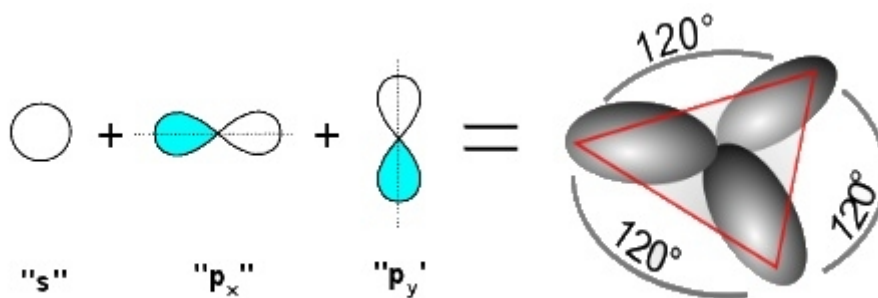
Materiály s vodivostí typu p vhodné pro tiskovou elektroniku se dělí na dvě hlavní třídy: Polymery (poly(3-hexylthiofen), poly(p-fenylen vinylen), polyacetylen a jeho deriváty) a malé molekuly (pentacen, anthracen a rubren). Každá z těchto tří má rozdílné fyzikální vlastnosti, což vede k rozdílnému použití a výslednému výkonu součástek. FETy vyrobené z materiálů z malých molekul mají v tenké vrstvě výkon než polymerové, díky tomu, že jsou krystalické – výsledkem jsou vysoce uspořádané vrstvy. Mobilita nosičů náboje je omezena hlavně hranicemi krystalů (s vynecháním injection bariér na elektrodách). V tenčině jsou tyto

polovodiče semikrystalické a jejich mobilita náboje je limitována amorfními oblastmi. [2], [3]

V současnosti se konjugované organické molekuly používají primárně v organických světlo emitujících diodách (OLED), v solárních článcích a v organických polem řízených tranzistorech (OFET). Každá součástka vyžaduje jiné fyzikální vlastnosti – pro OFET je klíčová mobilita nosiče náboje. Aby mohl konkurovat FETům na bázi amorfního křemíku, je třeba, aby byla alespoň  $0,5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ale jsou aplikace, jako například elektroforetické disплеje, kde je mobilita postačující v řádech  $10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . [2], [3]

### 1.3 Organické materiály

Oba druhy organických polovodivých materiálů obsahují konjugovaný  $\pi$ -elektronový systém. Ten je tvořen hybridizovanými orbitaly  $sp^2$  atomu uhlíku. Orbitály  $sp^2$  vznikají kombinací jednoho orbitalu  $s$  a dvou orbitalů  $p$  – vzniknou 3  $sp^2$  orbitály, které leží v jedné rovině a svírají úhel  $120^\circ$ . Na vytvoření dvojných vazeb mohou přispět orbitaly  $p$ , který zůstal nezapojen. Viz Obr. 1.2. [4]

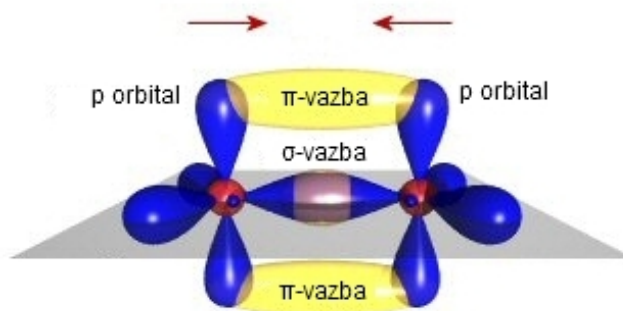


Obr. 1.2 Vznik  $sp^2$  orbitalu [6]

Jsou dva základní způsoby, jak může dojít k překryvu atomových orbitalů :

- vazba - vzniká na spojnici jader
- vazba – vzniká v prostoru pomocí překryvem

Dvojně vazby mezi atomy uhlíku jsou tedy tvořeny vazbou překryvem  $sp^2$  hybridizovaných orbitalů a vazbami překryvem dvou rovnoběžných nehybridizovaných  $p$ -orbitalů, jak je ukázáno na Obr. 1.3.  $\pi$ -vazba je mnohem reaktivnější než  $\sigma$ -vazba díky tomu, že atomy v ní jsou od sebe více vzdálené a jsou „delokalizované“ tzn., že pro jejich polohu neplatí žádné omezení. [4]



Obr. 1.3  $\sigma$ -vazba a  $\pi$ -vazba p i p ekryvu atomových orbital [25]

$\pi$ -vazby, které vznikají mezi hybridizovanými atomy uhlíku jsou velmi slabé, a to je příčina silné absorpce fotonů světla ve viditelném spektru (a v jeho okolí), anebo naopak jeho excitace. Díky chemickým úpravám je možné pozměnit optické vlastnosti daných látek. Na Obr. 1.4 je uvedeno pár vybraných materiálů a jejich vlnové délky, kde se nacházejí jejich absorpční maxima. [4]

Molekula	Struktura	Absorpční maximum
Benzen		255nm
Naftalen		315nm
Anthracen		380nm
Tetracen		480nm
Pentacen		580nm

Obr. 1.4 Organické materiály a jejich absorpční maxima [12]

## 2 Vodivé polymery

Díky svým vodivým vlastnostem jsou vodivé polymery schopny u jednoduchých aplikací nahradit kompozity s vodivými plnivými (saze, grafit nebo uhlíková vlákna) a konkurovat jim i z ekonomické stránky. Jedná se například o odporová topná tělesa, antistatické podlahové krytiny nebo obaly. Dále je o těchto materiálech zmínka v souvislosti s vývojem solárních panelů, kde najdou uplatnění jako elektrody. Další uplatnění nacházejí jako elektronické „nosy“ (pokud jde o plynné látky) i „jazyky“ (jde-li o analýzu kapalin). Skládají se ze souboru řádků vyráběných z polymerů i kopolymerů a využívají jejich rozdílných reakcí na přítomnost různých chemických látek změnou odporu. Tato skutečnost umožňuje identifikaci různých chemikálií. [8]

„Plastová“ elektronika může být vyráběna tiskovou technologií, která je ekonomicky nenáročná ve srovnání s výrobou křemíkových polovodičových součástek. V roce 1994 Garnier a spol. popsali konstrukci prvního polymerního tranzistoru, který byl včetně elektrod zhotoven z organického materiálu. Bylo možné ho ohnout do pravého úhlu, aniž by ztratil svou funkci. V jiném příkladu je možné srolovat například ovou klávesnici do ruličky. Na tom lze demonstrovat zásadní aplikační odlišnost mezi klasickými a organickými polovodiči. V roce 1998 pracovníci výzkumných laboratoří firmy Philips předvedli funkci plastový integrovaný obvod obsahující 326 polymerních tranzistorů. Firma Lucent dosáhla integrace 864 organických tranzistorů, aby za cenu propojení organických elementů pomocí niklu a zlata. Vývoj neustále pokračuje, objevují se nové způsoby využití. Díky přemyslovému utajení člověk mnohdy ani netuší, jakou roli vodivé polymery v konkrétních případech hrají. Ještě jednou je třeba zdůraznit, že vize klasické a plastové mikroelektroniky se spíše navzájem doplňují, než aby spolu soupeřily. [8]

### 2.1 Vodivost molekul

Po celou dobu výzkumu vodivých polymerů, se studia ubírala k vysvětlení principu přenosu náboje. Tento druh materiálu je natolik odlišný, že není možno použít známé teorie popisující vlastnosti kovů a izolantů, a tak je třeba popsat procesy uvnitř materiálu zcela jiným způsobem. V roce 1931 Kohn popisuje ve své publikaci fyziku kondenzované fáze ve dvacátém století. Zabývá se rozdílnou „tvrdostí“ dvou druhů výše zmíněných materiálů. „Tvrdé“ materiály, jako jsou kovy a izolanty, mají hustou krystalovou mřížku tvořenou ionty s valenčními elektrony popsanými teorií pásové struktury. Jelikož jsou hustě uspořádány a

periodické, vyznačují se odolností proti neuspořádanosti (mírné chyby v krystalové mřížce) a stabilitou. „Měkčí“ materiály, jako jsou polymery, mají oproti plynům a kapalinám určitý stabilní tvar a oproti látkám „tvrdým“ jsou poddajné na reakci vlivem vnějších vlivů. [7]

V osmdesátých letech dvacátého století byly získány navzájem si odporující hodnoty rychlosti transportu náboje ve vodivých polymerech. Snahou fyziků bylo vysvětlit tyto odlišnosti. Dospěli k tomu, že teorie přenosu u amorfních polovodičů bude neoptimálnější směrem pro unifikaci popisu transportu náboje u vodivých polymerů. V ideálním případě je vodivý polymer tvořen z identických jednorozměrných řetězců, avšak i zde na schopnost transportu má zásadní vliv neuspořádanost, která vytváří lokalizaci náboje. „V polymerech dochází k delokalizaci elektronů po celé délce řetězce a tyto elektrony pak vytvářejí pásy analogické pásmům v polovodičích. V ideálním případě je valenční pás (zvaný HOMO – highest occupied molecular orbital) zcela zaplněn a anti-valenční pás (zvaný LUMO – lowest unoccupied molecular orbital) zcela prázdný a materiál je nevodivý.“ [7] Stejně jako u anorganických polovodivých materiálů je vodivost uměle zvyšována přidáváním malých množství příměsí (dotování). Naopak u reálných vodivých polymerů dosahuje míra neuspořádanosti vysokého stupně. „Polymerní řetězce mají statické rozložení délek, obsahují řadu poruch, rotační volnost jednotlivých řetězců je omezená díky přítomnosti sousedních řetězců. Z uvedených důvodů je potenciální energie systému neperiodická, což představuje komplikaci při výpočtech.“ [7]

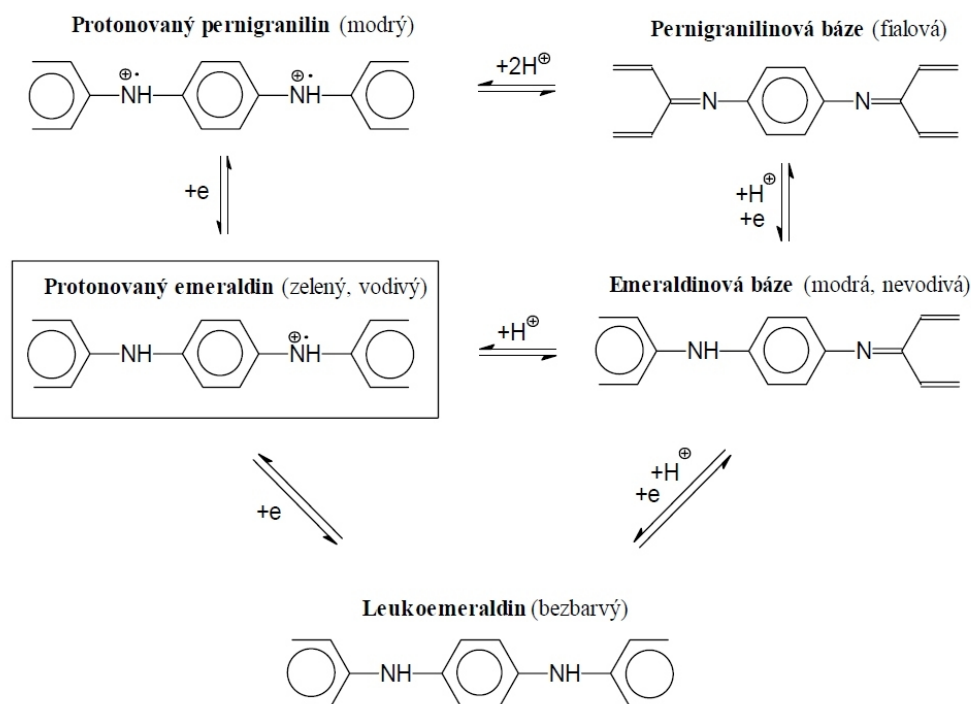
Pokud má materiál periodický potenciál, lze vlnovou funkci nositele náboje dobře popsat pomocí Blochovy funkce. Ohmický odpor materiálu je způsoben poruchami mřížky a nečistotami – dochází k rozptylu nositele náboje a k poruše periodicity potenciálu. Pod pojmem lokalizace náboje se rozumí, že při určitém počtu defektů vzniká rozptyl a ten uzavře nositele náboje v určitém pásmu. „Bez podrobnějšího odvozování uvádíme, že mobilita nositele náboje v materiálu se silně narušenou periodicitou, tj. s vysokou koncentrací poruch již nelze popsat pomocí Blochova teorému.“ [7] V této situaci jsou pro nositele náboje příznačné přeskoky do jiných energetických stavů a nespojitý pohyb. „Tento mechanismus, označovaný jako přeskoková vodivost s proměnlivou délkou skoku podle anglického termínu „variable range hopping“ (VRH).“ [7]

## 2.2 Používané materiály

Roku 1977 japonský vědec Hideki Shirakawa se svými studenty objevil proces, kterým dokázali zvýšit vodivost transpolyacetylenů až o několik řádů. Chemicky upravené polyacetylenové filmy se svými hodnotami vodivosti mohou být zařazeny do kategorie vodičů ( $38 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) a dále i orientované polymerní filmy ( $10^3\text{-}10^5 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). I když bylo uvažováno o tom, že by tyto materiály mohly nahradit dražší kovy, jejich chemická nestabilita bohužel tuto myšlenku vyvrátila. Ale právě díky jejich reaktivitě na vlivy z okolí, se výzkum zaměřil na vývoj tímto směrem. [7], [8]

### 2.2.1 Polyanilin (PANI)

Základní prvek je anilin a jeho oxidací vzniká polyanilin. Anilin byl poprvé vyroben roku 1826 německým chemikem Unverdorbenem jako produkt pyrolytické destilace indiga. Potom došlo k objasnění chemické struktury indiga a o jeho syntézu. Již v roce 1840 byly popsány zelené oxidační produkty, které by dnes bylo možné popsat jako polyanilin. Díky tomu je možné označit polyanilin jako nejstarší syntetický polymer. Roku 1862 při toxikologické identifikaci anilinu, prováděnou britským profesorem chemie Letheym, proběhla elektrochemická oxidace, za které proběhla alkalizace a výsledkem byla typicky modrá polyanilinová báze. Až o téměř padesát let později, roku 1910, byli britskými chemiky Greenem a Woodheadem navržena struktura oktameru pro oxidační produkty anilinu – polymery dosud ještě nebyly známy. Názvy leukoemeraldin, emeraldin a pernigranilin (*Obr. 2.1*) pro jednotlivé oxidační formy anilinu jsou používány v souvislosti pro odpovídající polymery. Trvalo několik desítek let, než byla prokázána polymerní struktura oxidačních forem polyanilinu. To že jde o plnohodnotný polymer, dokazuje to, že jsou složeny ze stovek anilinových konstitučních jednotek. V Československu byly syntetické postupy vedoucí k polyanilinu popsány až v roce 1968 Honzlem a spol.. Poté co laureáti Nobelovy ceny (Ziegler a Natta) za chemii publikovali práce o polyacetylenu se naplno projevil rostoucí zájem o vodivé polymery. [8]

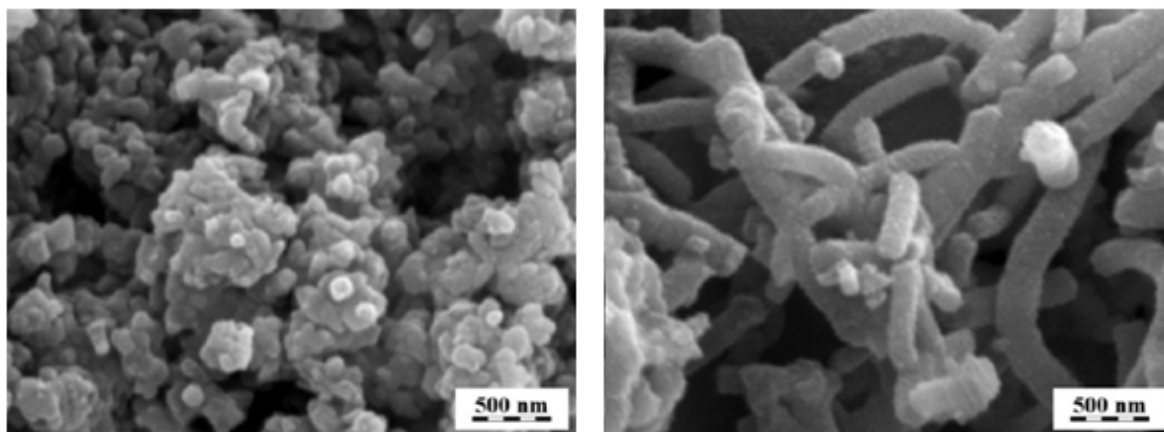


Obr. 2.1 Formy Polyanilinu [8]

Pro oxidaci polyanilinu se nejčastěji používá peroxydvojsíran amonný – běžně dostupná a levná chemikálie. Tento proces přípravy trvá pouze několik minut a je velice nenáročný. Smícháním vodných roztoků anilin chloridu a peroxydvojsíranu amonného směsí za normální teploty do modra a po skončení polymerace vzniká tmavozelený emeraldin (viz. Obr. 2.1). Celá reakce probíhá při laboratorní teplotě, na vzduchu v otevřené nádobě, bez nutnosti zahívání a míchání směsí a navíc s téměř stoprocentním výtěžkem. Dále se roztok vyfiltruje a promyje nejprve zředěnou kyselinou chlorovodíkovou a následně etanolem a acetone. Jelikož je tato reakce exotermní zvyšuje se teplota směsí při polymeraci. Při vysokých koncentracích reaktantů složek může dojít až k výbuchu. [8]

Polyanilin existuje v řadě forem, které se navzájem liší stupněm oxidace a protonace. Odebíráním nebo dodáváním elektronů chemickou a elektrochemickou oxidací a redukcí lze získat formy s různou chemickou strukturou, stabilitou, zbarvením a elektrickými vlastnostmi. Nejcharakterističtější je však přechod mezi vodivou zelenou formou a nevodivou modrou formou, ke kterému dochází při pH 5–6. Pokud tedy polyanilin po přípravě vystavíme působení alkálií, například hydroxidu amonného, změní se vodivost polyanilinu z jednotek  $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  na  $\sim 10^{-9} \text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , tj. o devět řádů. Tento proces je vratný a bývá využíván při konstrukci aciditních senzorů. [8]





Obr. 2.2 Granulární forma polyanilinu (vlevo) a polyanilinové nanotrubky (napravo) [8]

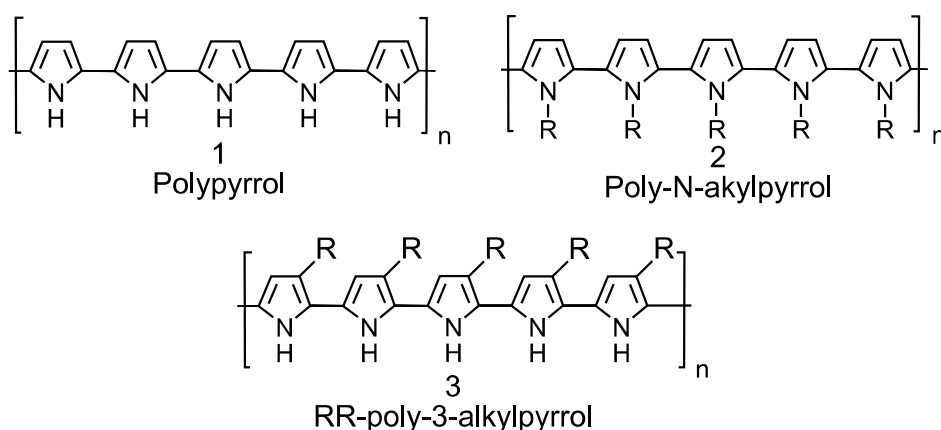
Další výhodou polyanilinu je možnost úpravy v tšiny b žných povrch (d ležitá je stálost v kyselém prostředí). Pokud p i procesu oxidace vložíme do sm si libovolný p edm t, bude jeho celý povrch pokryt filmem polyanilinu o tlouš ce kolem 100 nm a s vodivostí  $4,5 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Pokud místo p edm tu p idáme polymer rozpustný ve vod , vznikne koloidní polyanilinová disperze (emulze), která je editelná a p i b žném pohledu p ipomíná roztok. [8]

Polyanilin je velmi perspektivní materiál. Jeho využitelnost je díky jeho chemickým vlastnostem, nízké váze, zna né vodivosti a mechanické flexibilit vysoká. Do p edních pozic ho dále adí jeho nízká cena a t i oxida ní stavy, z nichž každý má jinou barvu (v závislosti na dotování kyselinou i zásadou) viz *Obr 2.1*. Rozdílné vlastnosti forem polyanilinu z n j d lají velice nad jný materiál pro použití v senzorech chemických par, aktuátorech, superkapacitorech a v aplikacích, které v závislosti na náboji m ní barvu (elektrochromické systémy). [9]

## 2.2.2 Polypyrrol (PPy)

Po publikaci elektrochemického zp sobu p ípravy polypyrrolu Diazem a spol. nastalo další významné období v oblasti vodivých polymer . Tato metoda umož ovala výrobu i dalších vodivých polymer , v etn polyanilinu, a to již na po átku osmdesátých let. Z roztoku monomeru v acetonitrilu nebo propylenkarbonátu s malým obsahem vody za p ítomnosti dopantu, nap . tetramethylamonium tetrafluoroborátu byl elektrochemickou cestou vyráb n polypyrrol. Na platinové elektrod vznikl film, jehož m rná elektrická vodivost dosahovala  $100 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Struktura tohoto filmu obsahovala pyrrolová jádra, která byla spojena v a ‘ pozicích do polymerního et zce. [6]

Již od roku 1982 jsou známy publikace popisující elektrochemickou syntézu polypyrrolu ve vodných roztocích. Dosud však není znám mechanismus elektrochemické polymerizace pyrrolu. Dle předpokladu nejprve vzniká kation radikál pyrrolu, který dále reaguje s dalším kation radikálem za vzniku dimeru a následně eliminací dvou protonů. „Propagace tedy probíhá jako rekombinace radikálového dimeru s dalšími kation radikály a následně deprotonací.“ [7] Polární molekuly vody a anionty dopantu ulehčí dimerizaci tím, že snižují elektrostatické odpuzivé síly. Každý konjugovaný tedy obsahuje průměrně na každé tři pyrrolové jednotky jeden kladný náboj, který je kompenzován aniontem dopující soli. Chemická polymerizace je oproti polymerizaci elektrochemické výhodnější hlavně u výroby velkého množství polypyrrolu. Je totiž možné použít širokou škálu oxidantů – peroxodvojsíran amonný, peroxid vodíku a různé druhy solí obsahující kovy přechodových iontů. Díky vyšší průměrné vodivosti výsledného polypyrrolu je nejčastěji používán chlorid železitý. [7]

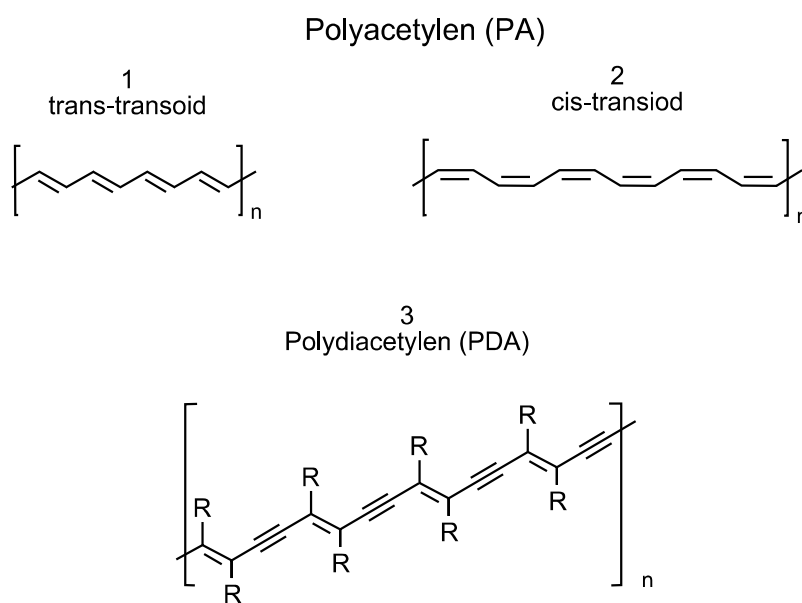


Obr. 2.3 Polypyrrol a jeho deriváty [10]

Jednoduchý polypyrrol Obr. 2.3 (1) je nerozpustný a netavitelný a disponuje v dotovaném stavu podobnou vodivostí, jako se vyskytuje u kovů. Tato vlastnost polypyrrolu ve formě vysoce vodivého prášku se využívá v různých aplikacích. Je těžké získat lineární tedy polypyrrolu, protože v důsledku jeho vysoké reaktivity a nízké selektivity pyrrolových radikálů vznikají kruhová spojení. Výroba rozpustného 3-alkylpyrrolu Obr. 2.3 (3) je velice nákladná, tudíž stále nemá komerční využití, zatímco poly-N-alkylpyrrol Obr. 2.3 (2) je testován pro použití v biologických a chemických senzorech, umělých svalech a v dalších perspektivních uplatněních. [10]

### 2.2.3 Polyacetylen (PA)

Polyacetylen je typický příklad konjugovaného polymeru a má mezi nimi jednu z nejjednodušších struktur. Zasloužil se o to německý chemik Karel Ziegler objevem nového katalyzátoru pro polymerizaci. S katalyzátorem bylo možné snížit energetickou náročnost polymerizace a provádět ji za běžného tlaku. Pozdější objev vodivosti dotované formy polyacetyleny, podobné vodivosti u kovů, vyvolal obrovský nárost zájmu o vodivé polymery. Struktura tohoto polymeru se skládá z dlouhého řetězce atomů uhlíku, které jsou na sebe vázány dvojnou vazbou. Zároveň každý atom uhlíku na sebe váže atom vodíku jednoduchou vazbou. Polyacetylen se vyskytuje ve formách *trans-transoid* Obr. 2.4 (1) a *cis-transoid* Obr. 2.4 (2) a jeho šířka zakázaného pásma je přibližně 1,6 eV. Dále jeho derivát polydiacetylen Obr. 2.4 (3) vykazuje vysokou vodivost a má potenciální využití jako „molekulární nanodráť“. [10], [11], [12]



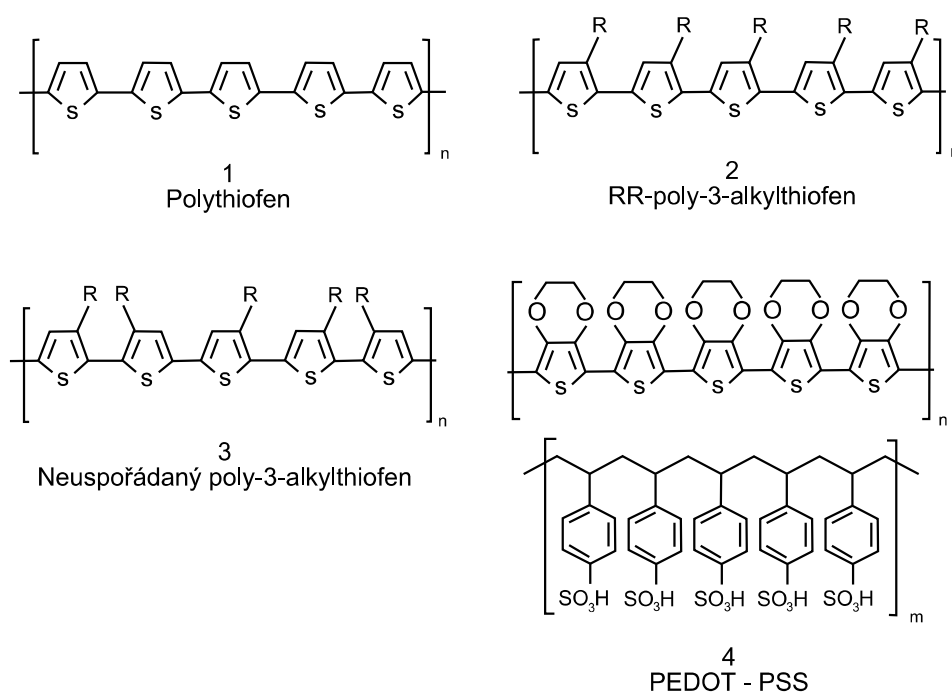
Obr. 2.4 Polyacetylen a jeho formy [10]

Vlivem vzduchu, vlhkosti a světla tento materiál degraduje a jeho vodivost může v závislosti na tom rychle klesnout. Navíc je netavitelný a nerozpustný a v důsledku těchto negativních vlastností polyacetylen našel jen omezené využití ve formě vodivých prášků nebo aditiv. Avšak není vhodným materiálem pro polovodiče i optoelektroniku. [10]

### 2.2.4 Polythiofen (PTh)

Polythiofen patří mezi nejlepší vodivé polymery. Jeho elektrické a fyzikální vlastnosti,

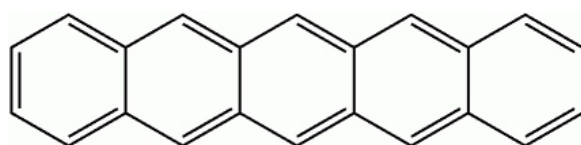
jako například rozpustnost, elektrická vodivost a mobilita náboje, se dají snadno měnit modifikací celého polymeru. Thiofen byl objeven při katalytické reformaci koksu jako doprovodný prvek. Deriváty polythiofenu vykazují vysokou vodivost, ale nižší stabilitu. Naopak mírně dotovaný thiofen vykazuje vysokou stabilitu a nízkou vodivost. Polythiofen i jeho deriváty ani v dotované formě nedisponují elektronovou vodivostí a mají mnohem lepší využití jako polovodiče. Většina z nich má dobré luminescenční schopnosti a navíc mají nelineární optické vlastnosti, a proto jsou využívány i v optoelektronice. Polythiofen *Obr. 2.5 (1)* může být rozpuštěn pouze ve směsi arsen trifluoridu a arsen pentafluoridu. I přes to, že je velice levný nemá příliš široké využití, což je způsobeno obtížnou tavitelností (náročná zpracovatelnost). RR-poly-3-alkylthiofenu *Obr. 2.5 (2)* je stejně dobře zpracovatelný jako polythiofen a našel široké využití. Jeho dobrá vodivost, absorpce i emise světla se zasloužila o to, že se nachází téměř ve všech organických elektronických zařízeních (OLED, OTFT a fotovoltaické články). Další modifikované deriváty PEDOT (celým názvem Poly(3,4-ethylendioxythiofen)) *Obr. 2.5 (4 horní část)* a PEDOT-PSS (celým názvem Poly(3,4-ethylendioxythiofen) vázaný kyselinou polystyrénsulfonátovou) *Obr. 2.5 (4 spodní část)* mají podobné vlastnosti jako RR-poly-3-alkylthiofenu. Liší se optickou transparentností. PEDOT-PSS je rozpustný ve vodě – díky tomu se dá zpracovávat jako vodný roztok. Tyto dva deriváty mají široké spektrum použitelnosti od antistatických úprav povrchů až po OLED. [10], [12]



Obr. 2.5 Polythiopen a jeho deriváty [10]

## 2.2.5 Pentacen

Pentacen je polycyklický aromatický uhlovodík skládající se z pěti lineárně spojených benzenových jader. Tato vysoce konjugovaná sloučenina vykazuje polovodivé vlastnosti typu p (bylo dosaženo maximální vodivosti  $150 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , zatímco u polovodiče typu n pouze  $2,8 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Při absorpci viditelné i ultrafialové části spektra svítla se vytváří exciton (vázaný stav elektronu a kladně nabitá díra). Jeho citlivost na svítlo zároveň zapíí uje jeho vysokou oxidaci. Z tohoto důvodu se materiál, vlivem působení vzduchu a svítla, pomalu rozkládá. Největší využití má pentacen u tenkovrstvých tranzistorů, polemízených tranzistorů, svítlo emitujících diod a fotovoltaických panelů díky jeho vysoké mobilitě náboje, která dosahuje hodnot více než  $5,5 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  a tím převyšuje i amorfní křemík. Jeho vysoká náchylnost na oxidaci znemožňuje komerční využití pentacenu jako vodiče. [13], [14], [16]



Obr. 2.6 Struktura pentacenu [13]

### 2.2.6 Rubren

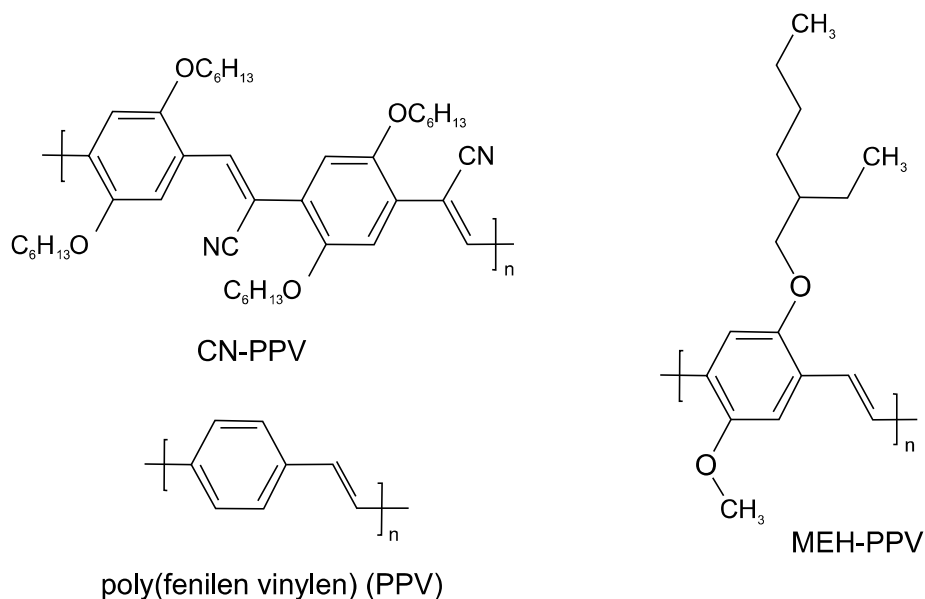
Rubren je červen zbarvený polycyklický uhlovodík. Rubren s vodivostí typu p dosahuje hodnot mobility náboje  $40 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  což je nejvyšší dosažená hodnota u organických materiálů. Tato hodnota byla naměřena u OFET vytvořeného nanášením tenkých jedнокrystalových vrstev rubrenu na substrát z Si/SiO<sub>2</sub>. Krystalický rubren, který se používá v „single-crystal“ tranzistorech (tranzistory tvořené jediným krystalem), vzniká ve speciálních zónách pecí vlivem změny teploty. Tato technologie se nazývá „Physical vapor transport“ (fyzické nanášení vrstev) a je známa od roku 1998. Hlavní využití má v organických světlo emitujících diodách a v organických polemizovaných tranzistorech, které tvoří jádro ohebných displejů. [22]



Obr. 2.7 Struktura rubrenu [22]

### 2.2.7 Poly(*p*-fenylen vinylen) (PPV)

PPV je jediný polymer tohoto typu, který může být zpracován do vysoce uspořádaných krystalických tenkých vrstev. Není rozpustný ve vodě a je velice snadno zpracovatelný ve vysoké čistotě a vysoké molekulární hmotnosti. Díky jeho úzkému optickému spektru a jeho jasné žluté fluorescenci je využitelný v mnoha aplikacích jako světlo emitující diody i fotovoltaické články. Fyzické a elektrické vlastnosti PPV mohou být snadno modifikovány vedlejšími skupinami.

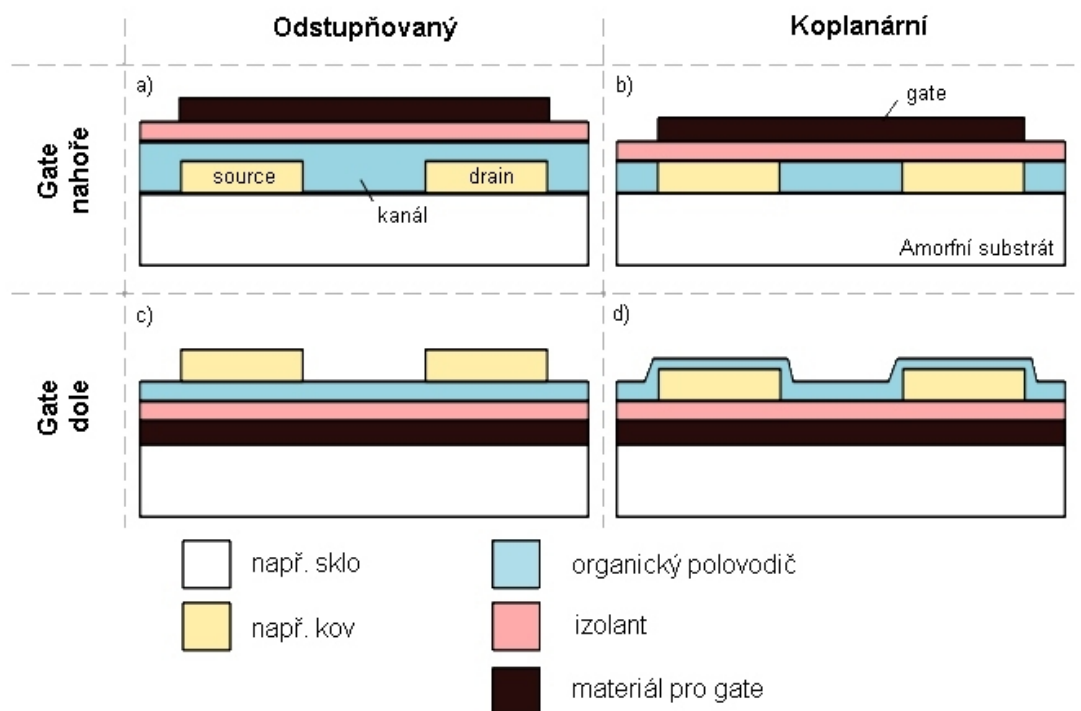
Obr. 2.8 poly(*p*-fenylen vinylen) a jeho modifikace [29]

### 3 Součástky z organických materiálů

Akoliv organické polovodiče mají značně nižší mobilitu nosičů náboje než anorganické, jejich vlastnosti jako je nízká cena, možnost velkoplošného využití, nízká váha, flexibilita, transparentnost a šetrnost k životnímu prostředí přetvářejí jejich negativa. Vodivost organických polymerů se využívá především u polovodičů typu *p*, poněvadž u typu *n* nebylo dosaženo dostatečně velké mobility náboje. [3], [15]

#### 3.1 Organický polem řízený tranzistor (OFET)

Organické polem řízené tranzistory využívají jako vodivý kanál organické polovodiče. Jsou tvořeny (stejně jako anorganické FET) řídicí elektrodou GATE a elektrodami SOURCE (emitor) a DRAIN (kolektor). Na elektrodu GATE je nanášena nevodivá vrstva a na ní jsou umístěna hradla SOURCE a DRAIN, která jsou od sebe oddělena vhodným organickým polovodičem, viz *Obr. 3.1*. Mohou být vyráběny vakuovým napařováním malých molekul, odléváním rozpuštěných polymerů i malých molekul nebo mechanickým přenosem jednotlivých monokrystalických vrstev na substrát. OFETy jsou vyráběny v různých modifikacích. Nejběžnější je „bottom gate with top drain and source“ (GATE dole, DRAIN a SOURCE nahoře viz *Obr. 3.1 c*) - struktura velice podobná jako u TFT s využitím tepelného růstu oxidu křemíku jako izolátoru hradla GATE. [2], [17], [19], [20], [21]



Obr. 3.1 Struktury OFET – a) a b) top gate with bottom source and drain  
c) a d) bottom gate with top source and drain [18]

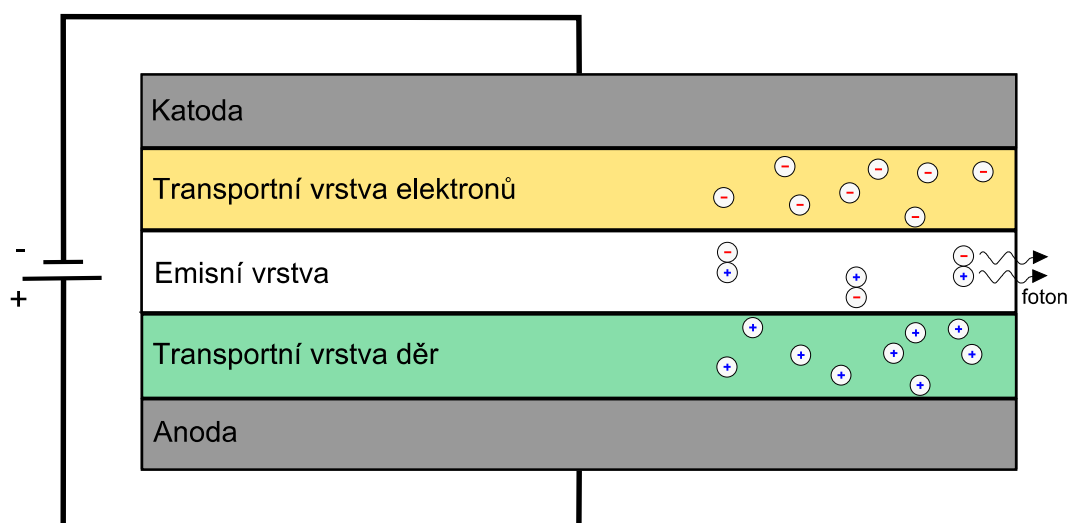
Jako aktivní polovodičová vrstva v OFETech se využívá mnoho aromatických a konjugovaných materiálů včetně malých molekul jako je rubren, tetracen, pentacen a dále polymery jako polythiofen (obzvláště poly 3-hexylthiofen (P3HT)), polyfluoren, polydiacetylen, poly p-fenylen vinylen (PPV). OFETy založené na rubrenu vykazují nejvyšší mobilitu nositele náboje  $20\text{-}40\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ . Další hojně využívaný materiál je pentacen používaný od osmdesátých let dvacátého století, ale jeho mobilita nositele náboje je asi desetkrát nižší než u rubrenu. Hlavním problémem pentacenu, stejně tak jako u ostatních organických vodičů, je rychlá oxidace za vzniku pentacen-chinonu. Pokud je však pentacen přetoxidován, dá se využít pentacen-chinon jako izolátor hradla GATE a jeho mobilita náboje dosahuje hodnot srovnatelných s rubrenem. Tento proces je podobný jako u oxidace k emíku používaného v k emíkové elektronice. [2], [17], [19], [20], [21]

Bohužel nízká mobilita náboje nedovoluje použít OFET v aplikacích s vyššími kmitočetmi (horní hranice je okolo  $10^3\text{ Hz}$ ), tudíž dnes používanými materiály není možné nahradit klasické k emíkové tranzistory. [18]



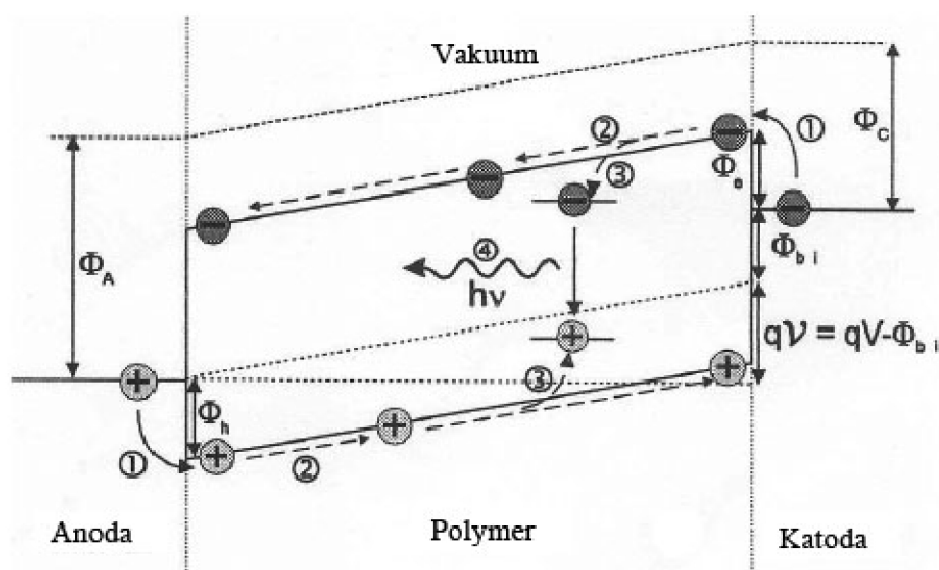
### 3.2 Organické světlo emitující diody (OLED)

Nejjednodušší a zároveň nejčastěji používaná jednovrstvá organická LED je tvořena polymerním filmem, transparentní anodou s vysokou výstupní prací tvořenou oxidy india a cínu (ITO), katodou s malou výstupní prací – například vápník nebo barium a substrátem ze skla či plastu (podle požadované flexibility). Pro správnou funkci součástky musí být zajištěn transport díry, transport elektronů a emise fotonů. Pokud je použita pouze jedna vrstva, musí zastávat všechny tyto funkce, u vícevrstevných musí každá vrstva zastávat pouze jednu. [12], [19], [23]



Obr. 3.2 Struktura čtyřvrstvé OLED [12]

Po přiložení napětí na diodu v propustném směru vystupují díry z anody a elektrony z katody Obr. 3.3 (1). Následně probíhá transport nosičů náboje Obr. 3.3 (2) a začínají se tvořit páry elektron-díra (exciton) Obr. 3.3 (3), které při rozpadu uvolní energii ve formě fotonu Obr. 3.3 (4), která prochází transparentní elektrodou do okolí. Barva (vlnová délka) emitovaného záření lze ovlivnit použitým polymerem. Používané materiály jsou rubren, PEDOT-PPS a poly-p-fenylen vinylen (PPV) [12]

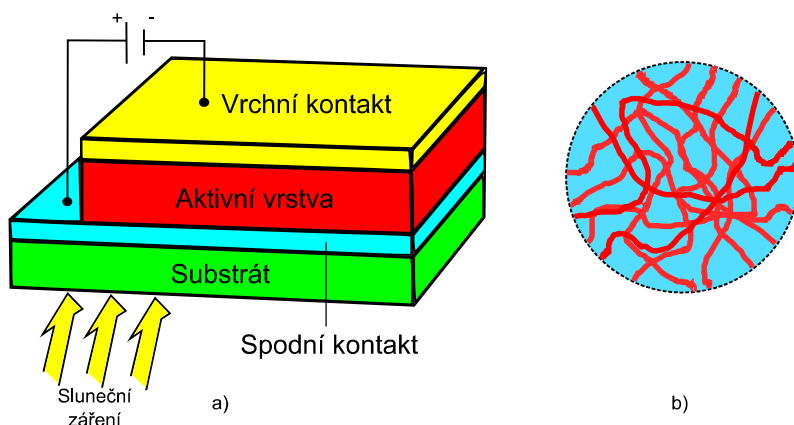


Obr. 3.3 Průběh emitace elektronu v OLED [19]

### 3.3 Organické fotovoltaické články (OPVC)

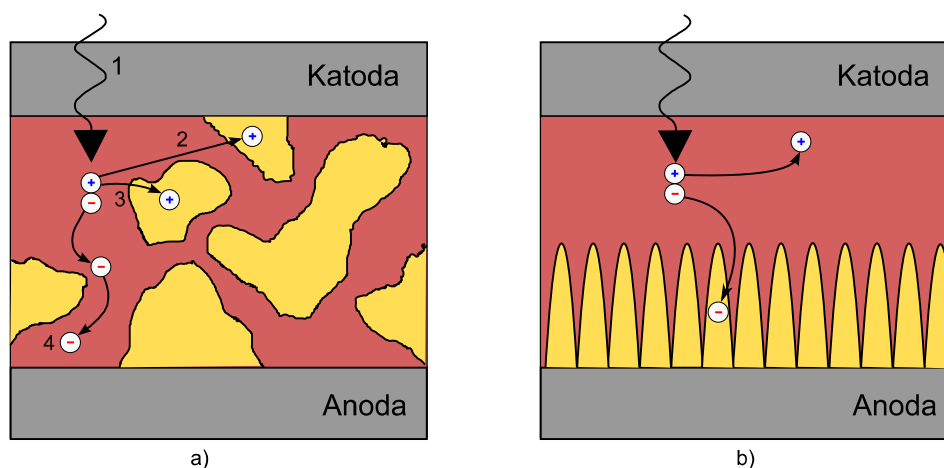
Organické fotovoltaické články jsou složeny z vhodně konstruovaných a uskupených fotodiód. Ty převádí světelnou energii na energii elektrickou (podle použitého materiálu mohou převádět IR a UV záření). Dojde-li k absorpci fotonu, změní se v materiálu na exciton a je rozštěpen na elektrony a díry. Hlavní výhodou organických článků nad anorganickými je nízká výrobní cena a vyšší mechanická odolnost. Bohužel stále nejsou dost perspektivní k použití ve větším měřítku a to proto, že mají velice nízkou účinnost přeměny slunečního světla na elektrickou energii. Od roku 2005, kdy byla u OPVC nejvyšší dosažená hodnota účinnosti kolem 3 %, vzrostla na 8,3 %, avšak už v říjnu 2010 byl v laboratorních podmínkách sestaven typický anorganický článek s účinností 42,3 %. [12], [26], [27], [28]

Konstrukce nejjednodušší a zároveň nejméně účinné OPVC jsou jednovrstvé. Skládají se ze dvou elektrod a aktivní vrstvy z organického materiálu. Typickými materiály pro výrobu OPVC jsou polyacetylen, PPV a jeho modifikace. Konstrukce a materiál elektrod jsou totožné s jednovrstvou OLED – viz kapitola 3.2 a Obr. 3.2. Po dopadu fotonu a jeho přeměně, napomáhají rozpadu excitonů potenciály elektrod, vytvořené rozdílnou výstupní prací materiálů. Roztrhávání excitonů za pomoci elektrického pole není příliš efektivní – pouze zlomek nosičů náboje dokáže být přitaheno k elektrodám a zbytek rekombinuje s částicemi opačného náboje. Proto je kvantová účinnost menší než 1 % a výkonová efektivita menší než 0,1 %. [29]



Obr. 3. 4 a) Jednovrstvá fotodioda b) Detail heteropřechodu[30]

Kvůli vylepšení účinnosti se začaly konstruovat OPVC za použití fotodiód na bázi heteropřechodu. Zde jsou mezi elektrodami dvě vrstvy s rozdílnou elektronovou afinitou a ionizační energií, což má za následek vznik elektrostatických sil na rozhraní vrstev. Materiály musejí být voleny tak, aby rozdíly byly dostatečně velké. Tato lokální elektrická pole jsou dostatečně silná na to, aby roztrhávala excitony mnohem efektivněji než jednovrstvé OPVC. Vrstva s vyšší elektronovou afinitou a ionizačním potenciálem se nazývá elektronový akceptor a vrstva s nižšími hodnotami elektronový donor. Tato struktura se nazývá planární donor-akceptorový heteropřechod. Tato struktura má kvantovou účinnost 6 % a výkonovou efektivitu menší 1 %. Rozptylová vzdálenost excitonů u organických polovodičů je okolo 10 nm. Aby se excitony mohly rozptýlit a dále rozdělit na nosiče náboje, měla by být tloušťka vrstev ve stejném rozsahu jako rozptylová vzdálenost. Avšak polymerní vrstva musí být alespoň 100 nm pro absorpci dostatečného množství světla. Díky velké tloušťce vrstvy dosáhne heteropřechodu pouze malá část pohlcených excitonů. Tento problém řeší další modifikace fotovoltaických článků typu Bulk a Graded. V tomto případě jsou elektronové donory i akceptory smíchány dohromady. Vrstvy se tedy chovají jako by jejich tloušťka byla v rozsahu rozptylové vzdálenosti generovaných excitonů. To umožňuje v tloušťce excitonů dosáhnout přechodu, kde se dělí nejefektivněji, viz Obr. 3.5. U heteropřechodu typu Bulk je kvantová účinnost 29 % a výkonová efektivita 2,9 %. Heteropřechod typu Graded dosahuje hodnot kvantové účinnosti 50 % a výkonové efektivity 2,1 %. Kvantová účinnost se počítá jako poměr generovaných elektronů a přijatých fotonů za sekundu, tedy:  $QE = \frac{\text{elektrony za s}}{\text{fotony za s}}$ . Výkonová efektivita je poměr výstupního k vstupnímu výkonu:  $PE = P_{out}/P_{in}$ . [29], [31]



Obr. 3.5 a) Fotovoltaický láněk typu Bulk b) Fotovoltaický láněk typu Graded  
 1) Absorpce fotonu za vzniku excitonu 2) Dírka je přitáhnutá ke katodě  
 3) Dírka je uvznána na izolovaném ostrůvku 4) Elektron je přitážen k anodě [29]

## 4 Porovnání organických a anorganických součástek

### 4.1 OFET – FET

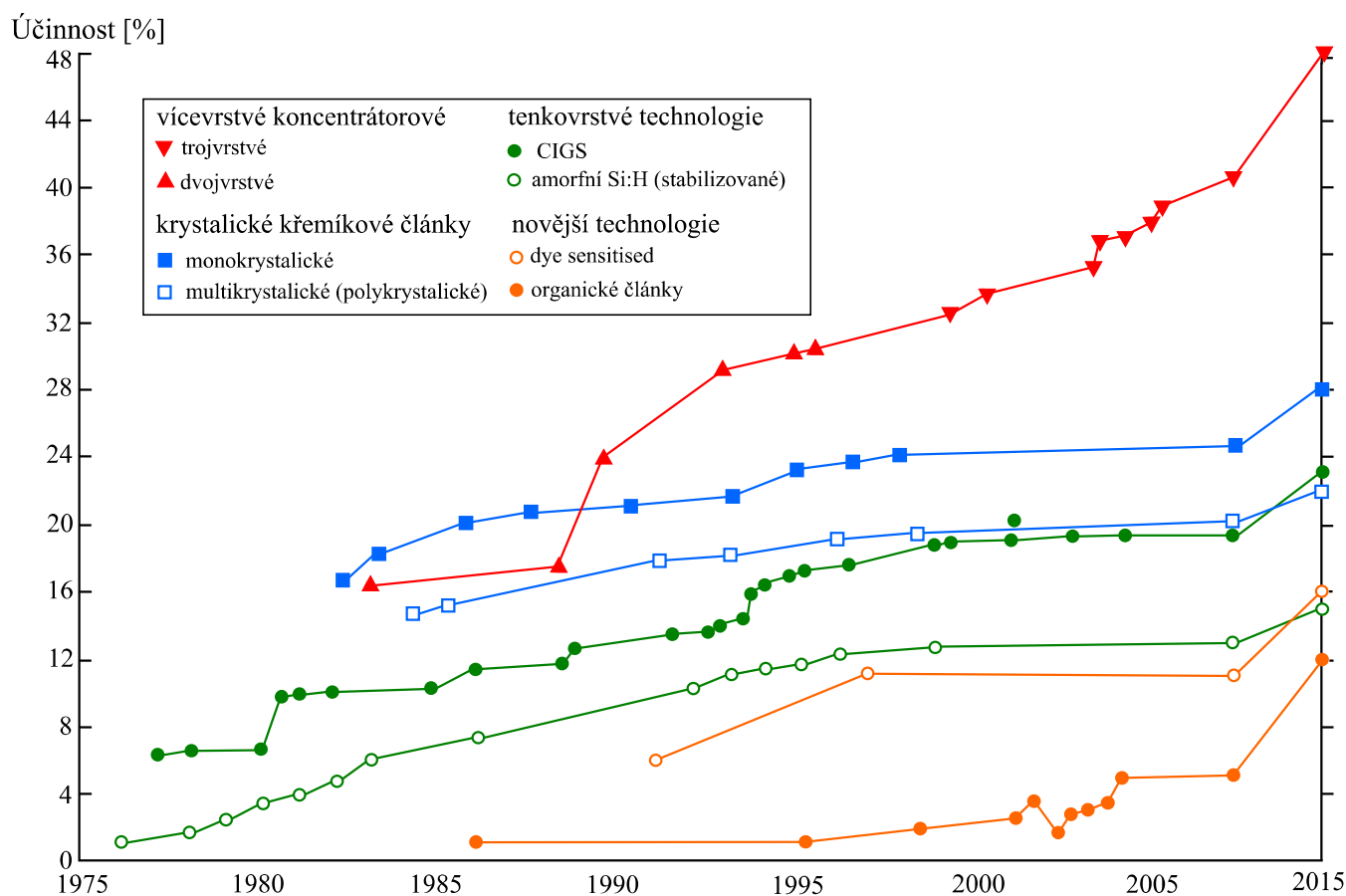
Rychlost spínání u všech druhů polem řízených tranzistorů je limitována dobou přechodu nosiče od elektrody DRAIN k elektrodě SOURCE. Čím bude kratší délka kanálu a vyšší mobilita náboje, tím bude tranzistor rychleji spínat. Délka kanálu lze ovlivnit metodou výroby, zatímco mobilita náboje je stanovena materiálem a lze ji do určité míry ovlivnit uspořádáním polovodivé vrstvy. U organických materiálů typu p byla dosažena nejvyšší mobilita náboje u rubrenu a to  $20\text{--}40\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  a u typu n  $1,83\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  u materiálu na bázi thiofenu. Zatímco u anorganických polovodičů typu p byla dosažena hodnota mobility  $4400\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  u materiálu ze smíšeného germania a křemíku. U typu n u tranzistorů tvořených indium-arsenovými nanodrátky bylo dosaženo mobility nosiče náboje  $6580\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ . [2], [17], [32], [33], [34]

### 4.2 OLED – LED

U obou druhů LED je efektivita přeměny elektrické energie na světlo téměř totožná. Vrstvy OLED jsou mnohem tenčí než vrstvy LED, mohou mít více vrstev na sobě a tudíž emitované světlo je jasnější. Dalším důvodem je i možná absence skla, které absorbuje část záření. Nevýhodou OLED je kratší životnost – zatímco červená a zelená OLED mají životnost od 46 do 230 tisíc hodin, modrá má životnost jen okolo 14 tisíc hodin. Bohužel výroba velkých OLED panelů je stále dost nákladná.

### 4.3 OPVC – PVC

Hlavními parametry u fotovoltaických článků je efektivita a cena. Efektivita vyjadřuje kolik procent dopadajícího slunečního záření je přeměněno na elektrickou energii. Čím jsou větší nároky na efektivitu, tím je i náročnější výroba a zároveň vyšší cena. Anorganické solární panely dosahují mnohem vyšší efektivity než organické - rekord v laboratorních podmínkách je 42,3 %, avšak nejefektivnější komerčně vyráběné články dosahují hodnot 19,4 %. První organický fotovoltaický článek, který překročil hranici 10 %, vyrobili v laboratořích Solamer Energy. Pokud by byly tyto články vhodně složené, každý s jiným absorpčním spektrem, teoreticky by mohly dosáhnout účinnosti 12-15 %. Jedná se o metodu tisku, tudíž zde jsou náklady na výrobu nesrovnatelně nižší. Firma HyperSolar působila s inovací, kterou dokážou rychle snížit cenu anorganických fotovoltaických panelů. Jedná se o speciální krycí vrstvu, která koncentruje světlo do jednoho bodu, a tudíž se počet solárních článků na panelu sníží až o 75 %. [28], [35], [36], [37]



Obr. 4.1 Vývoj účinnosti fotovoltaických panelů, dále pak předpokládaný postup [37]

## Závěr

Hlavní výhodou anorganických polovodičů oproti organickým je jejich stabilita, vyšší mobilita nosičů náboje (hlavně u polovodičů typu n), avšak jejich obtížná zpracovatelnost omezuje jejich využití v tiskové elektronice. Ačkoli anorganické materiály jsou nerozpustné, pomocí správných aditiv mohou být rozptýleny v rozpouštědle. Díky tomu mohou být tištěny v tenkých vrstvách stejně jako organické materiály. Nosiče náboje tak ale musejí překonávat z částice na částici a překonávat velký počet rozhraní, což výrazně snižuje vodivost materiálu. Odstranit tento jev vyžaduje další úpravy a zpracování. Tudíž organické i anorganické materiály jsou použitelné pro hromadnou výrobu, ale je zde stále dost prostoru pro inovace a výzkum v oblastech stálosti, zpracovatelnosti a optimalizace výroby a výrobní ceny. Z hlediska frekvence nemohou organické polovodiče konkurovat anorganickým. Dále je na straně anorganických materiálů životnost a stálost. Výhody organických materiálů jsou mechanické a optické vlastnosti, zpracovatelnost a cena výroby. V současné době si organické materiály vydobývají své místo na trhu. Avšak ještě dlouhá cesta než se stanou plnohodnotnými polovodiči.

## Rejstřík Pojm

**Malé molekuly**- Organická sloučenina o nízké molekulární hmotnosti, která neodpovídá definici polymeru. [39]

**OTFT** - „Organic Thin Film Transistor“ - Druh FET vyrobený z tenkých organických vrstev. [17]

**Polymer** - látka tvořená mnohonásobným pravidelným opakováním sledu atomů. [8]

**Kopolymer** - Makromolekula tvořená nejméně ze dvou monomery. [40]

**Monomer** - Výchozí látka pro výrobu polymeru například etylen, ze kterého se vyrábí polyetylen. [41]

**Dimer** – molekula složená ze dvou monomery. [42]

**Injection bariéry** - Mezivrstvy usnadňující přechod mezi polymerem a elektrodou. [43]

**Konjugovaná vazba** - Vazba, kde dvojná vazba je vždy oddělena vazbou jednoduchou. [8]

**Heteropřechod** – spoj mezi krystalickým a amorfním materiálem. [26]

**Kvantová účinnost** - Poměr počet fotonů za jednu sekundu a počet elektronů. [31]

**Elektronová afinita** – Energie, která se uvolní při připojení jednoho elektronu k atomu. [44]

**Ionizační energie** – Energie, kterou je třeba dodat pro odtržení jednoho elektronu z atomu. [44]

## Použitá literatura

[1] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Semiconductor. [online]. [cit. 2012-03-10].

Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor>

[2] CHRISTOF WÖLL. *Physical and chemical aspects of organic electronics*. 2009. vyd.

ISBN 978-3-527-40810-8

[3] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Organic semiconductor. [online].

[cit. 2012-03-10]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_semiconductor](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_semiconductor)

[4] Úvod do studia organické chemie. [online]. [cit. 2012-03-14]. Dostupné z:

<http://uoch.vscht.cz/cz/studium/bakalar/organika/Velebudice/Velebudice1.pdf>

[5] Polovodiče: fyzikální základy. [online]. [cit. 2012-05-18].

Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm>

[6] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Orbital hybridization. [online]. [cit. 2012-03-12].

Dostupné z: [http://en.wikibooks.org/wiki/Inorganic\\_Chemistry/Chemical\\_Bonding/Orbital\\_hybridization](http://en.wikibooks.org/wiki/Inorganic_Chemistry/Chemical_Bonding/Orbital_hybridization)

[7] Polyanilin a polypyrrol - dva představitelé vodivých polymerů. *Chemické listy*

[online]. 2001, [cit. 2012-03-28]. Dostupné z: [http://www.chemicke-](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/archiv/2001/08-PDF/484-492.pdf)

[listy.cz/docs/full/archiv/2001/08-PDF/484-492.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/archiv/2001/08-PDF/484-492.pdf)

[8] Polyanilin: Vodivý polymer. [online]. [cit. 2012-03-28]. Dostupné z:

<http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/NH2006pdf/16.pdf>

[9] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Polyaniline. [online]. [cit. 2012-04-01].

Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyaniline>

[10] Dictionary of Terms in organic electronics. In: [online]. [cit. 2012-03-29].

Dostupné z: <http://www.oe-chemicals.com/dictionaryM-Z.html>



[11] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Polyacetylene. [online]. [cit. 2012-03-31].

Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyacetylene>

[12] KOŘEŘ, Martin. *Organické polovodiče a součástky* [online]. Brno, 2011

[cit. 2012-03-31]. Dostupné z:

[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=42606](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42606).

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Špinka.

[13] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Pentacene. [online]. [cit. 2012-03-31].

Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Pentacene>

[14] Pentacene. [online]. [cit. 2012-4-28].

Dostupné z: <http://www.chm.bris.ac.uk/motm/pentacene/pentacene.htm>

[15] Field effect transistors. [online]. [cit. 2012-4-28].

Dostupné z: <http://www.ipc.uni-linz.ac.at/os/Organic-Field-effect-transistors-intro.pdf>

[16] KOLB, Dan. *Pentacene-based organic transistors*. 2005. [cit. 2012-04-29].

Dostupné z: <http://www.eco.li/writings-talks/PhD/yr1-PentaceneTransistors.pdf>.

School of Engineering, University of Durham.

[17] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Organic field effect transistor. [online].

[cit. 2012-04-29]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_field-effect\\_transistor](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_field-effect_transistor)

[18] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Thin film transistor. [online]. [cit. 2012-04-29].

Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Thin\\_film\\_transistor](http://en.wikipedia.org/wiki/Thin_film_transistor)

[19] ING. NAVRÁTIL, Martin. *Optoelektronické vlastnosti organických materiálů*

[online]. Brno, 2010 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z:

[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=25432](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=25432).

Dizertace práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Martin Weiter, Ph.D.

[20] PERKINSON, Joy C. Organic Field-Effect Transistors. [online]. [cit. 2012-05-10].

Dostupné z: <http://web.mit.edu/joy/Public/OFET%20Term%20Paper.pdf>

[21] Organic Field-Effect Transistors. [online]. [cit. 2012-05-10].

Dostupné z: <http://www.ipc.uni-linz.ac.at/os/Organic-Field-effect-transistors-intro.pdf>

[22] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Rubren. [online]. [cit. 2012-05-03].

Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Rubrene>

[23] OLED diody: Technologie budoucnosti nebo už dneška?. [online]. [cit. 2012-05-16].

Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/oled-diody-technologie-budoucnosti-nebo-uz-dneska>

[24] Polovodiče: fyzikální základy. [online]. [cit. 2012-05-18].

Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm>

[25] Organic semiconductor world. [online]. [cit. 2012-05-18].

Dostupné z: <http://www.iapp.de/orgworld/?Home>

[26] HAVRÁNEK, Miroslav. Organické polymery jako zdroj energie. [online]. [cit. 2012-05-21].

Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2007\\_30\\_org.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2007_30_org.php)

[27] IAPP Set OPV Efficiency Record. [online]. [cit. 2012-05-21].

Dostupné z: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=44505>

[28] Spire pushes solar cell record to 42.3%. [online]. [cit. 2012-05-21].

Dostupné z: <http://optics.org/news/1/5/5>

[29] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Organic solar cell. [online]. [cit. 2012-05-21].

Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_solar\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_solar_cell)

[30] Organic photovoltaics: Typical solar cells. [online]. [cit. 2012-05-22].

Dostupné z:

[http://www.nature.com/nphoton/journal/v3/n8/fig\\_tab/nphoton.2009.130\\_F2.html](http://www.nature.com/nphoton/journal/v3/n8/fig_tab/nphoton.2009.130_F2.html)

[31] Quantum efficiency. [online]. [cit. 2012-05-22].

Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_efficiency](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_efficiency)

[32] N-Type Organic Field-Effect Transistors with Very High Electron Mobility Based on Thiazole Oligomers with Trifluoromethylphenyl Groups. [online]. 2005 [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja055686f>

[33] High Electron Mobility InAs Nanowire Field-Effect Transistors. [online]. [cit. 2012-06-06]. DOI: 10.1002/sml.200600379. Dostupné z: <http://nano3.ucsd.edu/publications/small06.pdf>

[34] High hole mobility in Si<sub>0.17</sub>Ge<sub>0.83</sub> channel metal–oxide–semiconductor field-effect transistors grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition. [online]. [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: [http://apl.aip.org/resource/1/applab/v76/i26/p3920\\_s1](http://apl.aip.org/resource/1/applab/v76/i26/p3920_s1)

[35] Zvýšení výkonu solárních článků o 400 % [online]. [cit. 2012-06-06].

Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/solarni-energie/zvyseni-vykonu-solarnich-clanku-o-400>

[36] Solarmer's Organic Solar Cells Getting Real Hopes to Enter Mainstream Market. [online]. [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: [www.greenoptimistic.com/2010/03/21/solarmer-organic-solar-cell](http://www.greenoptimistic.com/2010/03/21/solarmer-organic-solar-cell)

[37] Vývoj účinnosti fotovoltaických panelů. [online]. [cit. 2012-06-06].

Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/34295-vyvoj-ucinnosti-fotovoltaickych-panelu.html>

[38] How OLEDs Work: OLED Advantages and Disadvantages. [online]. [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: <http://electronics.howstuffworks.com/oled5.htm>

[39] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Small molecule. [online]. [cit. 2012-06-06].

Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Small\\_molecule](http://en.wikipedia.org/wiki/Small_molecule)

[40] Kopolymer. [online]. [cit. 2012-06-06]. Dostupné z:

[http://www.cojeco.cz/index.php?id\\_desc=47672&slang=2&detail=1&title=kopolymer](http://www.cojeco.cz/index.php?id_desc=47672&slang=2&detail=1&title=kopolymer)

[41] Monomer. [online]. [cit. 2012-06-06]. Dostupné z:  
[http://www.cojeco.cz/index.php?s\\_term=&s\\_lang=2&detail=1&id\\_desc=61360](http://www.cojeco.cz/index.php?s_term=&s_lang=2&detail=1&id_desc=61360)

[42] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Dimer. [online]. [cit. 2012-06-06].  
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Dimer>

[43] Konzultace s Ing. Kroupou. [cit. 2012-04-09].

[44] Elektronová afinita. [online]. [cit. 2012-06-7].  
Dostupné z: [www.sgvrbo.cz/vecerni/afinita.doc](http://www.sgvrbo.cz/vecerni/afinita.doc)