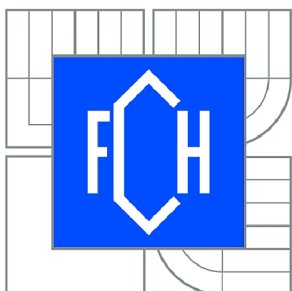




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

FACULTY OF CHEMISTRY

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

STUDIUM OPTOELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV ORGANICKÝCH POLOVODIČŮ

STUDY OF OPTOELECTRICAL PROPERTIES OF ORGANIC SEMICONDUCTOR THIN FILM
LAYERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN POSPÍŠIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. OLDŘICH ZMEŠKAL, CSc.

BRNO 2012



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

Zadání diplomové práce

Číslo diplomové práce:	FCH-DIP0623/2011	Akademický rok: 2011/2012
Ústav:	Ústav fyzikální a spotřební chemie	
Student(ka):	Bc. Jan Pospíšil	
Studijní program:	Spotřební chemie (N2806)	
Studijní obor:	Spotřební chemie (2806T002)	
Vedoucí práce	prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.	
Konzultanti:		

Název diplomové práce:

Studium optoelektrických vlastností tenkých vrstev organických polovodičů

Zadání diplomové práce:

1. Rešerše na téma použití organických materiálů v optoelektronických a elektroluminiscenčních prvcích
2. Studium optoelektrických vlastností připravených organických materiálů
3. Interpretace naměřených výsledků volt-ampérových a impedančních charakteristik
4. Zpracování výsledků do diplomové práce.

Termín odevzdání diplomové práce: 11.5.2012

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

Bc. Jan Pospíšil
Student(ka)

prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
Vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 15.1.2012

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na studium elektrických a dielektrických vlastností tenkovrstvých organických materiálů, které mohou být využity jako aktivní vrstva fotovoltaických článků. Studovány byly zejména vlastnosti vrstev na podložkách ze skla, které jsou tvořeny tenkou aktivní vrstvou ftalocyaninů. Na vzorcích byly nejprve měřeny volt-ampérové charakteristiky (za tmy a za světla) a stanoveny základní parametry fotovoltaické přeměny. Nakonec byly proměřeny frekvenční závislosti (impedanční spektra, za tmy a za světla) a stanoveny parametry modelu struktury s organickým polovodičem. Získané výsledky budou využity k optimalizaci vlastností fotovoltaických článků.

ABSTRACT

The thesis is focused on the study of electric and dielectric properties of thin film organic materials that can be used as an active layer of photovoltaic cells. Primarily were studied the properties of the layers on the glass substrates, which consist of a thin active layer of phthalocyanines. On the samples were first measured current-voltage characteristics (in the dark and during the exposure) and the basic parameters of the photovoltaic conversion were determined. Finally were measured frequency dependencies (impedance spectra, in the dark and during the exposure) and the parameters of a model of the structure with organic semiconductor were determined. The obtained results will be used to optimize the properties of photovoltaic cells.

KLÍČOVÁ SLOVA

Organické diody emitující světlo (OLED), polymerní diody emitující světlo (PLED), polem řízené organické tranzistory (OFET), organické fotovoltaické (OPV) články, volt-ampérové charakteristiky, impedanční spektroskopie, Cole-Cole diagramy

KEYWORDS

Organic light emitting diodes (OLED), polymer light emitting diodes (PLED), organic field effect transistors (OFET), organic photovoltaic (OPV) cells, current-voltage characteristics, impedance spectroscopy, Cole-Cole diagrams

POSPÍŠIL, J. *Studium optoelektrických vlastností tenkých vrstev organických polovodičů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 40 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Oldřichu Zmeškalovi, CSc. za vedení, odborné rady, čas a vstřícný přístup při sestavování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří se mnou sdíleli své zkušenosti a bez jejichž účasti by tato práce nemohla vzniknout.

OBSAH

1	ÚVOD	6
2	TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1	Využití organických materiálů v optoelektronice a elektroluminiscenčních prvcích.....	8
2.1.1	Technologie LED	8
2.1.2	Polem řízené organické tranzistory	9
2.1.3	Organické fotovoltaické články	13
2.2	Měření elektrických a dielektrických veličin	14
2.2.1	Měření V-A charakteristik (stejnoseměrná měření).....	14
2.2.2	Impedanční spektroskopie (frekvenční měření).....	18
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	22
3.1	Základní charakteristika ftalocyaninů	22
3.2	Popis vzorku	23
3.3	Stejnoseměrná měření	26
3.4	Střídavá měření, frekvenční závislosti	28
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	31
4.1	Elektrická a optoelektrická měření	31
4.2	Dielektrická a optodielektrická měření (frekvenční měření).....	32
4.2.1	Vyhodnocení C-G charakteristik (asymptotické).....	32
4.2.2	Vyhodnocení z Cole-Cole diagramů	33
5	ZÁVĚR	37
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	38
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	39

1 ÚVOD

Výzkum se v poslední době soustřeďuje stále více na molekulární, většinou organické, materiály, jejichž vlastnosti v pevné fázi vyplývají z vlastností jednotlivých molekul. Tento trend vyplývá z toho, že tyto látky jsou funkční na molekulární úrovni a mohou mít vlastnosti, které nepozorujeme u klasických anorganických látek. Celá řada nových oborů, jako je např. molekulární biologie, molekulární elektronika a molekulární mechanika, dokumentuje význam této oblasti pro praxi. Tyto materiály jsou dnes často označovány jako pokročilé funkční materiály.

Pokročilé funkční materiály:

- díky své struktuře vykazují vlastnosti využitelné v mnoha oborech (optika, fotonika, molekulární elektronika atd.),
- uplatňují se jako náhrada jiných (často dražších) materiálů, např. náhrada drahých anorganických polovodičů levnějšími organickými,
- nebo se používají ke konstrukci principiálně nových zařízení (např. inteligentní e-papír).

Výhody těchto materiálů:

- levná velkoobjemová výroba (produkce) materiálů i finálních zařízení,
- mechanická flexibilita,
- nekonečná různorodost, je k dispozici nekonečné množství různých struktur (cílená produkce materiálů),
- příznivé k životnímu prostředí,
- „low temperature solution processing“ (rotační nanášení, inkjetový tisk atd.),
- umožňují vytvářet finální produkty různých rozměrů.

Velká pozornost je dnes ubírána na výrobu solárních článků z organických materiálů. Dnešní solární články a panely se potýkají stále se stejnými problémy, jako je hmotnost, účinnost konverze světelné energie na elektrickou a cena. Polovodičové anorganické (nejčastěji křemíkové) solární články jsou totiž dost náročné na výrobu a tedy i drahé. Např. největší účinnost dnes mají monokrystalické křemíkové články (20–30 %), zároveň jsou ale nejtěžší a nelze je vyrábět jako ohebné (na základě jejich struktury). Proto jsou méně praktické a omezuje se tím jejich aplikace.

V důsledku toho se dnes vyvíjí články na bázi organických sloučenin (organické fotovoltaické materiály), které jsou levné (jsou rozpustné a mohou tak být tisknuty nebo dokonce nastříkány, i na pružný plastický substrát) a lehké. Techniky jejich výroby lze tedy uskutečnit i při nízkých teplotách.

Tyto organické články sebou přinášejí nesporně celou řadu výhod. Tou největší je bez pochyby využití nízkonákladových výrobních technologií (jednoduchá výroba, nízké výrobní náklady), což se projeví i nízkou cenou finálního výrobku. Kromě snadné výroby je to také možnost vytváření pružných solárních panelů, flexibilita struktur, aj. Mezi nevýhody patří např. nízká účinnost (tyto organické solární články mají v porovnání se současnými anorganickými články konverzní účinnost kolem 6–8 %) a také malá životnost, která je způsobena degradací organického materiálu vlivem absorpce světelného záření.

Hledáním nových materiálů, zkoumáním jejich vlastností a optimalizováním výrobních technologií se neustále snažíme dosáhnout vyšší účinnosti a delší životnosti (perspektiva do budoucnosti).

Právě výzkum a rozvoj těchto materiálů má za následek rozsáhlé studium jejich elektrických, optoelektrických, dielektrických a optodielektrických vlastností.

Cílem práce je zpracování rešerše o možnosti využití organických (polymerních) materiálů v optoelektronických a elektroluminiscenčních prvcích a dále analýza elektrických signálů získaných ze stejnosměrných a střídavých měření vzorků ftalocyaninů – tedy vyhodnocení měřených volt-ampérových charakteristik a impedančních spekter.

Studovanými materiály byly ftalocyaniny zinku (ZnPc) a směsi těchto ftalocyaninů s PCBM na skleněné podložce. U všech připravených vzorků byly postupně proměřeny volt-ampérové charakteristiky a impedanční spektra (za tmy a za světla).

2 TEORETICKÁ ČÁST

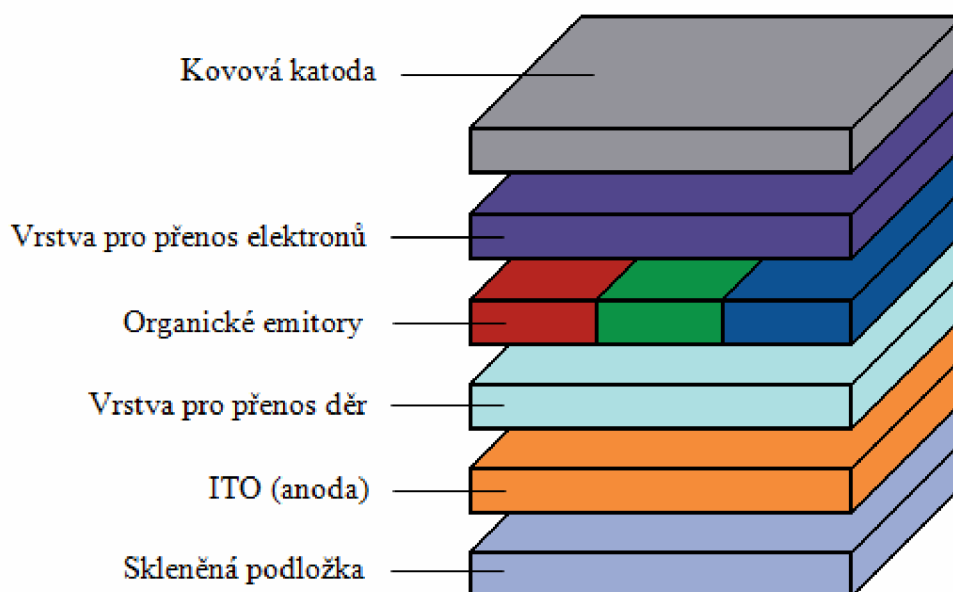
2.1 Využití organických materiálů v optoelektronice a elektroluminiscenčních prvcích

Oblast organické elektroniky se výrazně rozvíjí od 80. a 90. let 20. století. Rozvoj v tomto oboru byl způsoben především syntézou nových sloučenin, které umožnily výrobu lepších a někdy dokonce nových zařízení. Po dlouhou dobu se využívaly nejprve malé organické molekuly (pro jejich schopnost tvořit organizované struktury), situace se ale v posledních letech změnila a tyto sloučeniny začaly být nahrazovány polymerními materiály (konjugovanými polymery). Ty našly své uplatnění především v oblasti světlo emitujících polymerních diod (polymer OLED) a polem řízených polymerních tranzistorů (polymer FET) [1].

2.1.1 Technologie LED

Rozlišujeme dvě hlavní skupiny světlo emitujících organických diod (OLED) [1], [2], [3]

- a) SMOLED (Small Molecule Light Emitting Diodes or Displays),
- b) PLED, polymer OLED (Polymer Light Emitting Diodes or Displays).



Obr. 1 Struktura SMOLED

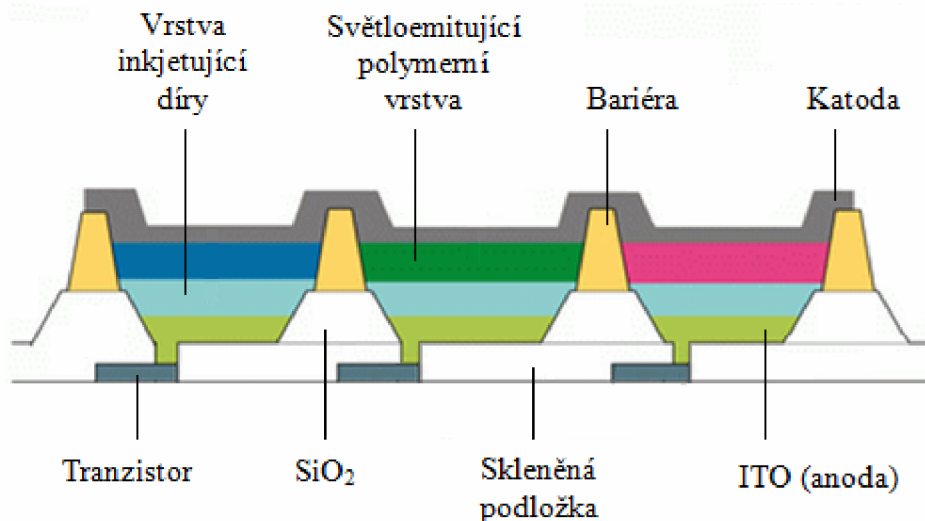
SMOLED (Small Molecule Light Emitting Diodes or Displays), tj. světlo emitující diody nebo displeje z malých organických molekul. Skládají se vždy ze tří organických vrstev (v současné době se velmi často přidávají ještě dvě organické vrstvy – vrstva blokující díry před vrstvou pro přenos elektronů a vrstva blokující elektrony před vrstvou pro přenos děr, zabrání se tak rekombinaci mimo emitující vrstvu) sevřených mezi elektrodami. Organické vrstvy sousedící s katodou a anodou jsou elektronová a děrová transportní vrstva a mezi nimi emisní vrstva. Přivedením napětí jsou díry i elektrony dopovány do organického emitoru. Rekombinací díry a elektronu dochází k poklesu elektronu na nižší hladinu a tedy k vyzáření fotonu. Vlnová

délka světla je ovlivněna energetickými hladinami organického materiálu (1,5–3,5 eV), tedy strukturou organické molekuly.

Uspořádání SMOLED je následující (viz *Obr. 1*)

1. skleněná nebo plastová podložka (substrát),
2. anoda: ITO (p-tyt),
3. vrstva pro přenos děr: N,N'-difenyl-N,N'-bis(3-methylfenyl)-1,1'-bifenyl-4,4'-diamin (TPD) nebo n-propyl bromid (NPB),
4. vrstva organických emitorů: tris(8-hydroxyquinolin)aluminium (Alq3), fulleren C540 nebo jiné organické elektroluminiscenční látky,
5. vrstva pro přenos elektronů: Alq3,
6. katoda: MgAg (n-tyt).

PLED (Polymer Light Emitting Diodes or Displays), tj. světlo emitující polymerní diody nebo displeje (viz *Obr. 2*). Mají jednodušší konstrukci. V případě ideálních elektrod totiž jejich výstupní práce přímo odpovídá HOMO a LUMO hladinám polymeru, takže je jednoduché injektovat nosiče náboje z konstantního zdroje. Pro anody se typicky využívá tenké vrstvy transparentního ITO vodiče deponované na skleněném nebo plastovém substrátu. Následující vrstva je neemisní vodivý polymer polystyrensulfonát (PSS) nebo poly(3,4-ethylendioxythiofen) neboli PEDOT, která pracuje jako vrstva injektující díry a má větší výstupní práci než ITO (5,2 eV). Další deponovaná vrstva je již emisní polymer, např. polyfenylenvinylem (PPV). Tenký polymer ve vrstvě 50 až 150 nm je deponován z roztoku pomocí naprašování nebo tiskem. Nakonec se na vrch napaří odrazná kovová katoda s nízkou výstupní prací, která odpovídá LUMO hladině polymeru, např. vápník s 2,8 eV.



Obr. 2 Celková struktura PLED displeje [3]

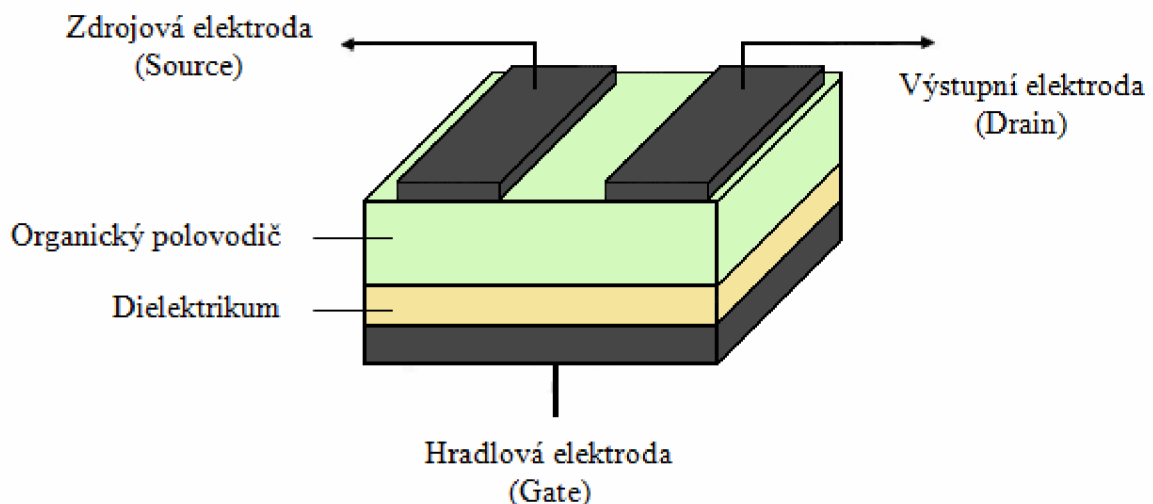
2.1.2 Polem řízené organické tranzistory

Další možnou aplikací organických materiálů (např. v oblasti tištěné organické elektroniky) jsou polem řízené organické tranzistory (organic field effect transistors, OFET) a elektrické obvody. Tyto zařízení se zatím komerčně moc nerozšířily, ale předpokládá se, že jejich zavádění a rozšíření bude souviset s rozvojem a rostoucí poptávkou po technologii organických displejů (nové moderní obrazovky s technologií OLED) [1].

Tranzistory tvoří základ všech dnešních integrovaných obvodů (např. mikroprocesorů, procesorů, paměti). Základní vlastností tranzistoru je transformace odporu. Podle principu činnosti se tranzistory dělí na bipolární a unipolární. Činnost bipolárního tranzistoru je řízena připojením elektrického proudu na bázi. Proud je zde zprostředkován nosiči náboje obojí polarity (vedení proudu se účastní jak elektrony, tak díry). Z tohoto důvodu se používá název bipolární. Základní vlastností tohoto tranzistoru je schopnost řídicí elektrody (báze) malým proudem měnit odpor řízeného obvodu mezi kolektorem a emitorem (proud protékající kolektorem může být až tisíckrát větší než řídicí proud tekoucí bázi). Tranzistor tedy pracuje jako zesilovač proudu (malé změny proudu na vstupu mohou vyvolat velké změny proudu na výstupu). Unipolární tranzistory jsou řízené příčným elektrickým polem – FET (Field Effect Transistor). Na proud nosičů náboje (volné nosiče se vytváří aplikováním napětí na hradlovou elektrodu) působí příčné elektrické pole řídicí (hradlové) elektrody, které způsobí zúžení vodivého kanálu v polovodiči (ten se vytváří v důsledku elektrostatických sil mezi zdrojovou a výstupní elektrodou, jejichž napětí zajišťuje pohyb nosičů) a tím reguluje výstupní proud. Název unipolární plyne z toho, že tento typ tranzistoru využívá při své činnosti pouze většinové nosiče jednoho druhu (elektrony nebo díry) [4].

Ze struktury OFET ovšem není jasné, zda tranzistor bude využívat ke své činnosti právě elektrony nebo díry (elektronové nebo děrové kanálové zařízení, nejjednodušší bude mít zařízení založené na nosičích s větší pohyblivostí). O tom, jestli budou preferovány elektrony nebo díry, výrazně rozhodne aplikované napětí na hradlovou elektrodu. I výběr materiálu elektrod může ovlivnit, který nosič bude upřednostňovaný (nejčastěji se u těchto struktur využívá stříbrných nebo zlatých kontaktů) [1].

Jednoduchá struktura polem řízeného organického tranzistoru v uspořádání s horními kontakty (top contact OFET) je znázorněna na obrázku (Obr. 3). Je zřejmé, že tranzistor je vícevrstvá polovodičová součástka, kterou tvoří substrát, dielektrikum (kondenzátor, izolant), organický polovodič a tři elektrody (zdrojová – source, výstupní – drain a hradlová – gate) [1].



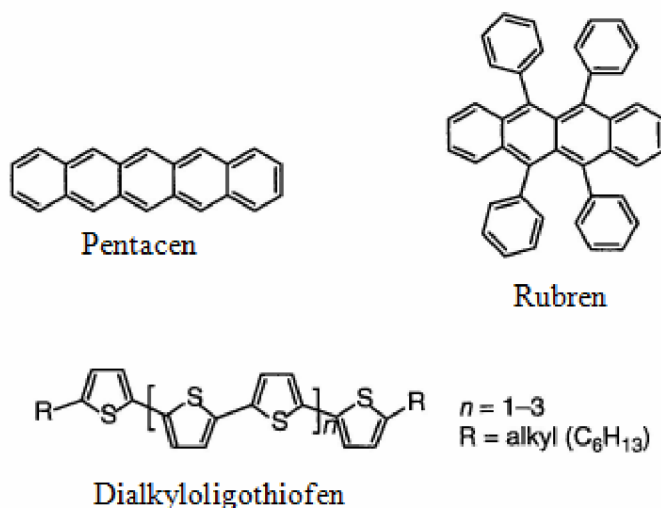
Obr. 3 Jednoduchá struktura OFET

Mezi dvě nejdůležitější kritéria, která se musí vzít v úvahu u organických polem řízených tranzistorů, patří prahové napětí a pohyblivost nosičů náboje (rozhodující faktor určující taktovací frekvenci tranzistorů a tím i jejich aplikace). Studium materiálů z hlediska pohyblivosti nosičů náboje u polem řízených organických tranzistorů se stalo záminkou ke studiu transportu

náboje v organických materiálech všeobecně. Je však nutné poznamenat, že organické materiály zatím nedosahují tak vysoké pohyblivosti nosičů, jak tomu je u křemíku (současné křemíkové elektroniky) [1].

Z toho vyplývá že, snahou při přípravě OFET struktur je, abychom co nejdříve dosáhli stejných pohyblivostí, jako tomu je v případě amorfního křemíku, a to nanášením z roztoku (rotační nanášení, namáčení, tisk atd.). Vysokých pohyblivostí okolo $1\text{--}5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ bylo dosaženo u malých organických molekul (jako je např. pentacen), ale pouze pokud byly připravovány napařováním. A právě stejných nebo dokonce lepších výsledků bychom chtěli dosáhnout u rozpustných polymerních polovodičů (přípravou z roztoku). Nedávno sice některé polymery dosáhly pohyblivosti $0,6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, ale bohužel tyto materiály byly měřeny v inertní atmosféře (pod dusíkovou atmosférou), aby se zamezilo degradaci těchto materiálů. Degradace (náchylnost k životnímu prostředí – oxidace, znečištění atd.) se jeví jako velký problém těchto materiálů, a tak velkou neznámou stále zůstává otázka jejich stability – měla by být dosažena bez potřeby „zapouzdření“, v opačném případě dramaticky roste cena zařízení a hlavně výrobní náklady. Rozhodujícími faktory při přípravě OFET struktur jsou dále způsob a podmínky přípravy, použitá rozpouštědla, životnost materiálů, nečistoty v polymerech atd. Dosažení naprosté čistoty polymerů (v příslušném rozpouštědle) a její kontrola je mnohem obtížnější, než tomu je např. u monokrystalických organických materiálů – pravděpodobně nikdy nebude možné zajistit stejnou čistotu polymerních polovodičů, která je běžná u křemíku. Výzvou tak zůstává převést výsledky dosažené v laboratořích do praxe (reálného výrobního procesu).

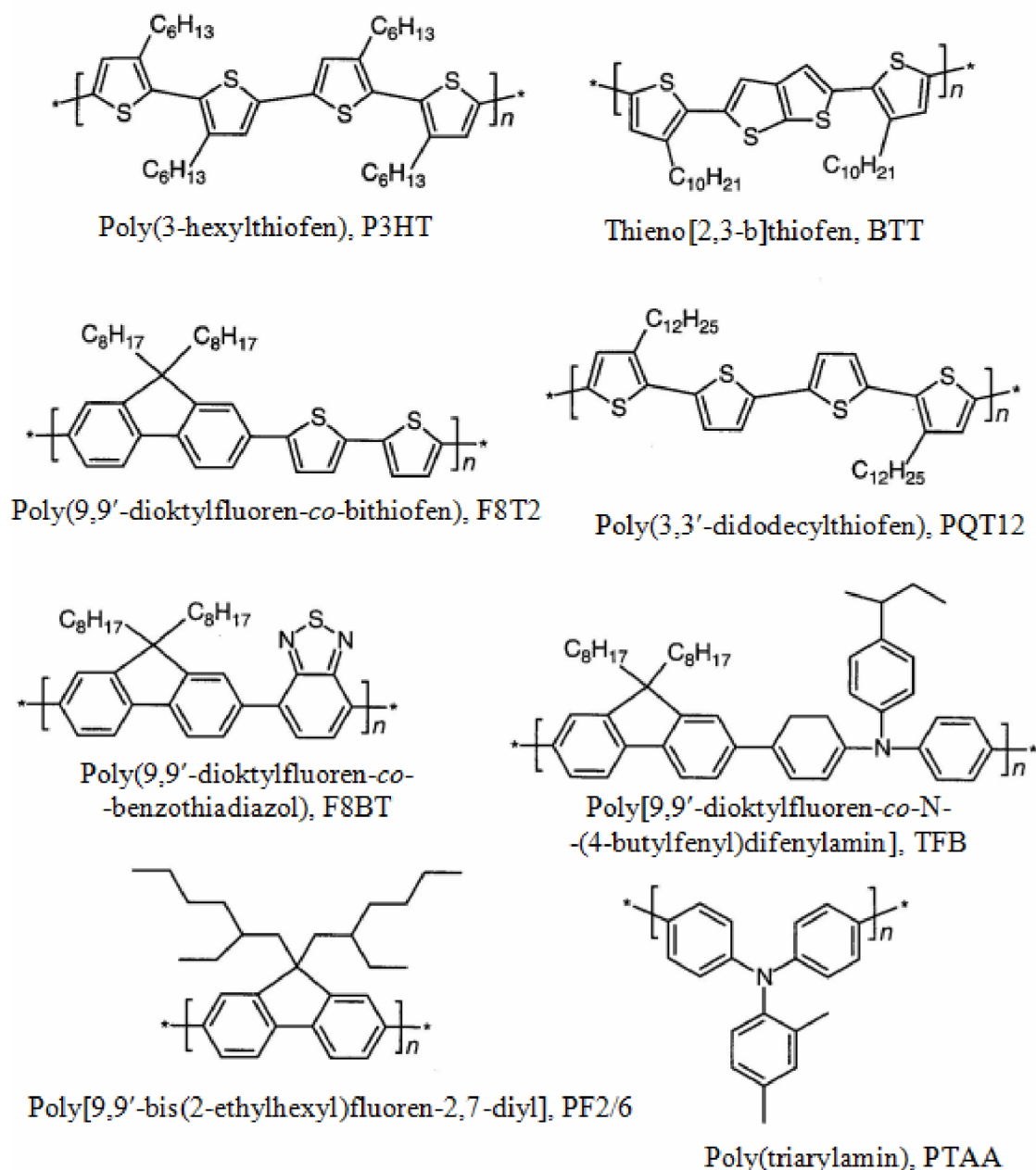
Je dobře známo, že pohyblivost nosičů náboje u organických materiálů je limitována kolem $1\text{--}10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, nicméně byly již připraveny struktury OFET z monokrystalického rubrenu, u kterých byla zjištěna pohyblivost $15 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Všechny organické materiály s pohyblivostí nosičů náboje nad $1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ by mohly sloužit jako možná náhrada v aplikacích, kde se dosud využíval pouze amorfní křemík (mají srovnatelné vlastnosti). Příklady takovýchto molekulárních polovodičů jsou uvedeny na obrázku níže (viz Obr. 4).



Obr. 4 Příklady molekulárních polovodičů [1]

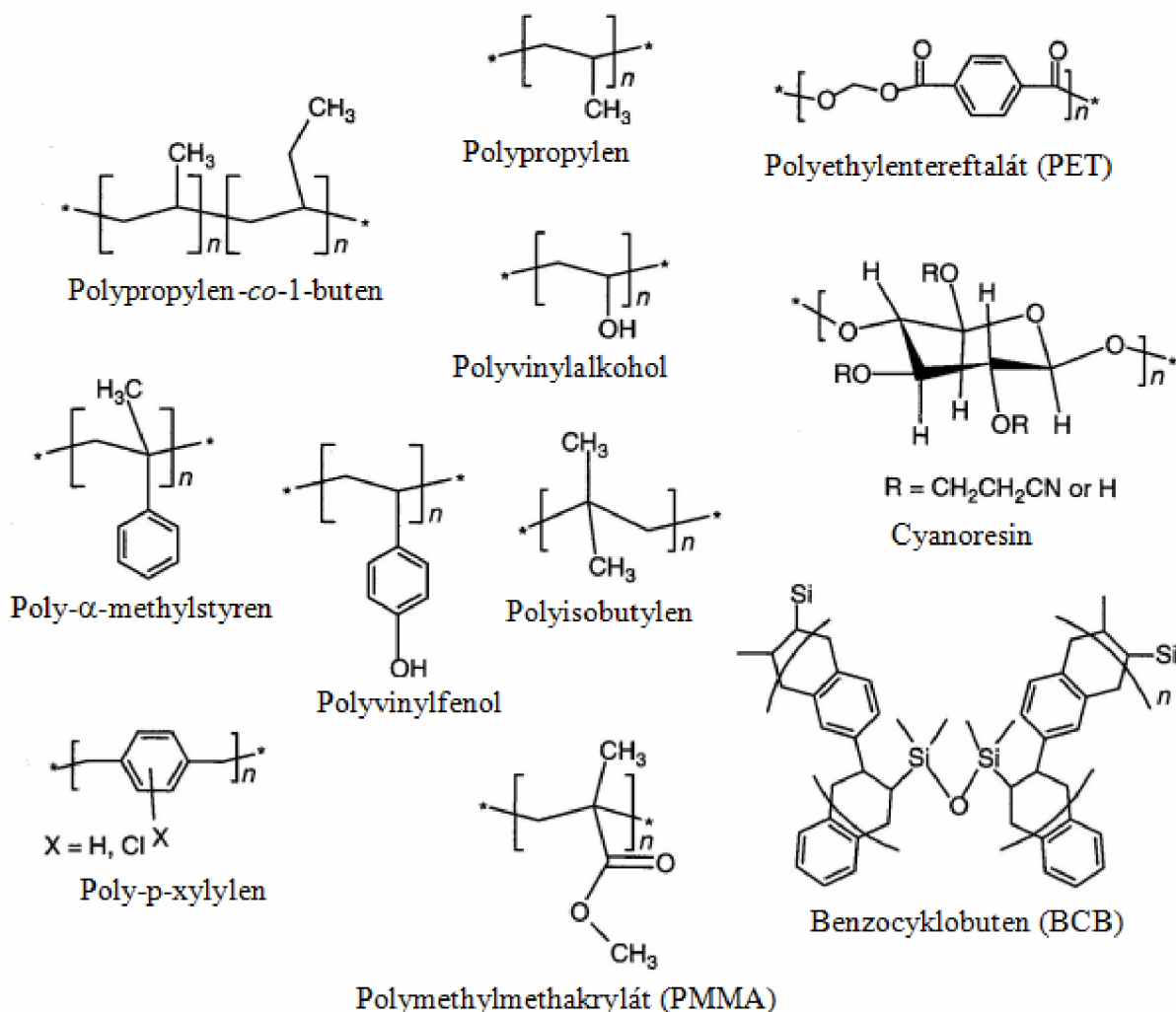
Další široce studovanou malou molekulou s využitím v organických FET byl polykrystalický pentacen (nanášený napařováním) pro jeho pohyblivost $5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Velmi zajímavé experimenty v oblasti oligothiofenů a jejich derivátů (substituce pomocí alkylů zvyšuje krystalinitu) prokázaly, že délka konjugovaného řetězce pozitivně ovlivňuje pohyblivost nosičů

náboje ($0,1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). Pokud byly ovšem pentacen a oligothiofeny nanášeny z roztoku, pohyblivost klesla na nižší hodnoty (např. u oligothiofenů na $0,01\text{--}0,1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), navíc velkou roli zde hrají podmínky při depozici vrstev. Proto se výzkum v poslední době zaměřuje stále častěji na polymerní polovodiče, které je možné nanašet z roztoku (většinou tiskem) – výhodou je dobrá tvořivost a jednodušnost filmu na substrátu. Přehled využívaných polymerních polovodičů pro OFET struktury lze najít na obrázku (Obr. 5).



Obr. 5 Polymerní polovodiče [1]

Celkové chování (výkon, účinnost, pohyblivost nosičů náboje) polovodičových polymerů používaných v OFET závisí také na dalších vrstvách, které se nacházejí v těchto zařízeních. Zejména se jedná o rozhraní mezi dielektrikem a polovodičem (ve spoustě případů je tato oblast velmi kritickou). Různé dielektrické organické materiály, které nachází uplatnění především v organických tenkovrstvých tranzistorech (OTFT), jsou znázorněny na obrázku (Obr. 6).

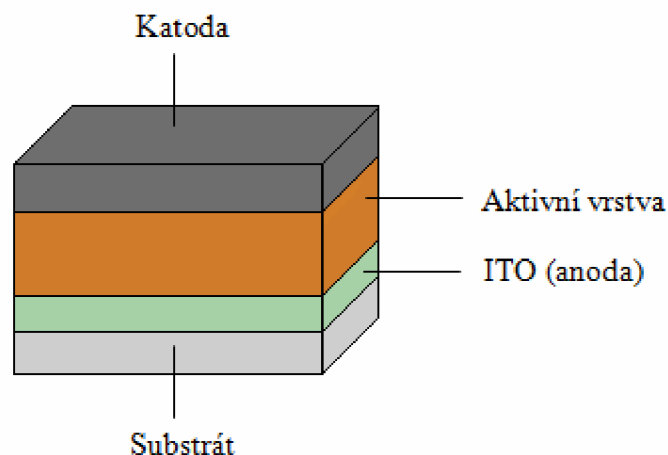


Obr. 6 Příklady organických dielektrik [1]

2.1.3 Organické fotovoltaické články

Fotovoltaické články jsou materiály fungující na principu fotovoltaického jevu, který patří spolu s fotovodivostí mezi vnitřní fotoelektrické jevy. Nejpoužívanějšími fotovoltaickými články jsou dnes stále články na bázi křemíku, nicméně snaha o jejich nahrazení za levnější organické materiály je opravdu veliká. Působením světelného záření na příslušný materiál vzniká fotoelektrický jev, díky němuž je v obvodu produkován elektrický proud (dochází ke generaci nosičů náboje) – absorpcí fotonu vzniká pár elektron-díra (exciton), který následně disociuje v elektrickém poli článku. Tento elektrický proud je přímo úměrný intenzitě dopadajícího slunečního záření a ploše solárního článku. Velkou roli zde hraje také tloušťka vrstvy – větší tloušťka zvyšuje účinnost absorbce záření (alespoň 100 nm), naopak difúzní rozsah excitonů (u polymerních materiálů se pohybuje většinou kolem 10 nm) vyžaduje menší tloušťku vrstvy [4], [5], [6].

Organické fotovoltaické (OPV) články jsou většinou tvořeny podložkou, substrátem (sklo, plast, atd.), transparentní ITO vrstvou (anoda), jednou či více vrstvami organického polovodiče (často i jejich směsi) a kovovou katodou (hliník, zlato). Jednoduchá struktura organického solárního článku je znázorněna na obrázku (Obr. 7).



Obr. 7 Struktura organického solárního článku

Změnu elektrické vodivosti $\Delta\sigma$ fotovoltaického článku v důsledku osvětlení popisuje vztah

$$\Delta\sigma = \sigma_L - \sigma_D, \quad (1)$$

kde σ_L je vodivost materiálu při osvětlení, σ_D je vodivost bez osvětlení a kde pro elektrickou vodivost σ platí

$$\sigma = qF(n_e\mu_e + n_h\mu_h), \quad (2)$$

kde q je elementární náboj, F je intenzita elektrického pole, n_e je hustota elektronů, n_h je hustota děr, μ_e je pohyblivost elektronů a μ_h je pohyblivost děr.

Důvodů, proč se i nadále zabývat výzkumem a výrobou těchto organických solárních článků, je beze sporu celá řada. Pro jejich rozpustnost je lze nanášet přímo z roztoku, a tak produkovat zařízení i na ohebných substrátech (anorganické solární články jsou náročné na výrobu, drahé a nelze je vyrábět jako ohebné). To vede k využití nízkonákladových výrobních technologií (snadná výroba, nízká cena finálního výrobku), vytváření pružných solárních panelů a flexibility struktur.

2.2 Měření elektrických a dielektrických veličin

Jedná se o měření

- a) stejnosměrná (měření V-A charakteristik),
- b) frekvenční (impedanční spektroskopie).

2.2.1 Měření V-A charakteristik (stejnosměrná měření)

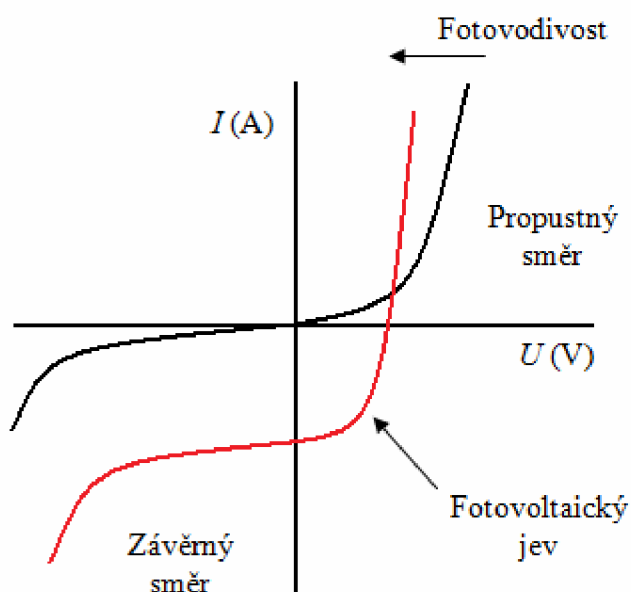
Závislost elektrického proudu I procházejícího prvkem elektrického obvodu (např. rezistorem nebo diodou) na přiloženém napětí U se nazývá volt-ampérová (V-A) charakteristika, $I = f(U)$. Elektrickým obvodem se většinou rozumí vodivé propojení elektronických prvků (lineárních nebo nelineárních) [7].

U lineárních prvků je procházející proud přímo úměrný napětí [5], [7]. Poměr mezi napětím a proudem (což je vlastně odpor) je konstantní a volt-ampérová charakteristika takových prvků je přímka. U prvků nelineárních závislost elektrického proudu na přiloženém napětí lineární není. To znamená, že jejich odpor se mění s přiloženým napětím, potažmo s procházejícím

proudem. Platí, že čím více je charakteristika příkloněna k ose proudu, tím větší má součástka vodivost. Čím více se charakteristika přibližuje ose napětí, tím větší je odpor prvku.

Volt-ampérová charakteristika některých součástek bývá výrazně ovlivněna vnějšími vlivy, jakými jsou např. světlo, vlhkost a plyny. Na bázi těchto vlastností pracují detektory světelného záření (přeměňují optické záření na odpovídající elektrický signál), vlhkostní senzory a senzory plynové.

Změna tvaru V-A charakteristiky za tmy a při osvětlení je typická pro fotovoltaické články či fotodiody. Charakteristika neosvětlené fotodiody je podobná charakteristice usměrňovací diody. Při osvětlení se v závislosti na intenzitě tohoto osvětlení charakteristika posune směrem k záporným hodnotám proudu. Od charakteristiky neosvětlené diody se liší tím, že neprochází počátkem a vykazuje proud v závěrném směru. V-A charakteristika fotodiody je znázorněna na obrázku (Obr. 8).



Obr. 8 Volt-ampérová charakteristika fotodiody za tmy (černá) a za světla (červená)

V-A charakteristika ideálního solárního článku [8] za tmy může být definována následujícím vztahem

$$I = I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{qU}{k_B T}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

kde I_D je diodový proud (tedy proud za tmy), U je napětí na výstupu článku, I_S je saturační proud, q je elementární náboj, k_B je Boltzmanova konstanta a T je absolutní teplota solárního článku v jednotkách K.

Ve skutečnosti se však V-A charakteristika za tmy od této ideální charakteristiky liší (např. důsledkem generace a rekombinace nosičů náboje v oblasti prostorového náboje) a lze jí popsat následovně pro jednodiodový model

$$I = I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{qU}{nk_B T}\right) - 1 \right], \quad (4)$$

kde n je faktor ideality diody, který nabývá hodnot $n > 1$.

Dvoudiodový model lze potom definovat pomocí upraveného vztahu

$$I = I_D = I_{INJ} + I_R = I_{S1} \left[\exp\left(\frac{qU}{n_1 k_B T}\right) - 1 \right] + I_{S2} \left[\exp\left(\frac{qU}{n_2 k_B T}\right) - 1 \right], \quad (5)$$

kde I_{INJ} je proud injektovaných elektronů z N do P typu polovodiče a děr z P do N typu polovodiče (difúzní proud v oblasti emitoru a báze), I_R je rekombinační proud v ochuzené oblasti, I_{S1} (resp. I_{S2}) je saturační proud difúzního procesu (resp. procesu rekombinace v oblasti OPN), n_1 (resp. n_2) je faktor ideality diody charakterizující proces injekce s ideální hodnotou $n_1 = 1$ (resp. proces rekombinace nosičů náboje v oblasti OPN s ideální hodnotou $n_2 = 2$).

V-A charakteristika za tmy je důležitá zejména pro výpočet elektrického výkonu článku na jeho výstupu.

V-A charakteristiku solárního článku při osvětlení lze také popsat jednodiodovým, resp. dvoudiodovým modelem

$$I = I_{PH} - I_D = I_{PH} - I_S \left[\exp\left(\frac{qU}{n k_B T}\right) - 1 \right], \text{ resp.} \quad (6)$$

$$I = I_{PH} - I_D = I_{PH} - I_{S1} \left[\exp\left(\frac{qU}{n_1 k_B T}\right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp\left(\frac{qU}{n_2 k_B T}\right) - 1 \right], \quad (7)$$

kde I_{PH} je fotoindukovaný proud.

Reálná V-A charakteristika solárního článku bývá ovšem negativně ovlivněna dalšími parametry, mezi které patří především parazitní odpory R_S a R_{SH} (ale také např. teplota, intenzita osvětlení). Pro reálné V-A charakteristiky za tmy jednodiodového, resp. dvoudiodového modelu můžeme potom psát

$$I = I_D + I_{SH} = I_S \left[\exp\left(\frac{q(U - IR_S)}{n k_B T}\right) - 1 \right] + \frac{U - IR_S}{R_{SH}}, \text{ resp.} \quad (8)$$

$$I = I_{S1} \left[\exp\left(\frac{q(U - IR_S)}{n_1 k_B T}\right) - 1 \right] + I_{S2} \left[\exp\left(\frac{q(U - IR_S)}{n_2 k_B T}\right) - 1 \right] + \frac{U - IR_S}{R_{SH}} \quad (9)$$

a při osvětlení

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} = I_{PH} - I_S \left[\exp\left(\frac{q(U - IR_S)}{n k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{U - IR_S}{R_{SH}}, \text{ resp.} \quad (10)$$

$$I = I_{PH} - I_{S1} \left[\exp\left(\frac{q(U - IR_S)}{n_1 k_B T}\right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp\left(\frac{q(U - IR_S)}{n_2 k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{U - IR_S}{R_{SH}}, \quad (11)$$

kde I_{SH} je svodový proud, R_S reprezentuje příspěvky sériového odporu solárního článku a R_{SH} je paralelní odpor tohoto článku.

Vykreslení V-A charakteristiky článku neosvětleného a pod osvětlením dovoluje vyhodnocení většiny z technických fotoelektrických parametrů článku. Pokud článek osvítime, vzniká navíc fotogenerovaný proud, který posune V-A charakteristiku do IV. kvadrantu. V tomto kvadrantu článek dodává výkon do vnějšího obvodu (je funkční) – součástka se chová jako zdroj elektrické energie. Na základě této skutečnosti se hodnotí kvalita přeměny energie solárních článků (graficky je to ze IV. kvadrantu V-A charakteristiky).

Účinnost přeměny energie záření solárního článku na energii elektrickou se v ideálním případě definuje vztahem

$$\eta = \frac{P_{\text{MAX}}}{P} = \frac{|U_{\text{MAX}} I_{\text{MAX}}|}{P_0} = \frac{I_{\text{SC}} U_{\text{OC}} FF}{S \int_0^{\infty} M(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda}, \quad (12)$$

kde P_0 je výkon záření dopadajícího na článek o ploše S , P_{MAX} je maximální výkon získávaný z článku (odpovídá mu absolutní hodnota největšího součinu hodnot napětí U_{MAX} a proudu I_{MAX}), I_{SC} (Short Circuit) je elektrický proud nakrátko při nulovém napětí, U_{OC} (Open Circuit) je napětí naprázdno při nulovém proudu a FF je faktor plnění (Fill Factor). Integrál ve vztahu (12) představuje celkový výkon dopadajícího záření na jednotku plochy, $M(\lambda)$ je spektrální hustota dopadajícího elektromagnetického záření a člen hc/λ představuje energii jednoho fotonu o vlnové délce λ .

Dobrá účinnost solárního článku tedy vyžaduje především vysoké hodnoty proudu nakrátko I_{SC} , napětí naprázdno U_{OC} a faktoru plnění FF .

Faktor plnění (Fill Factor) FF je potom definován vztahem (v ideálním případě)

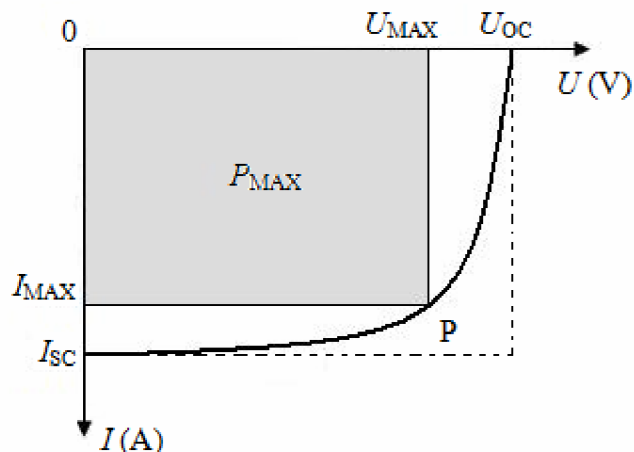
$$FF = \frac{P_{\text{MAX}}}{I_{\text{SC}} U_{\text{OC}}} = \frac{|U_{\text{MAX}} I_{\text{MAX}}|}{I_{\text{SC}} U_{\text{OC}}}. \quad (13)$$

Hodnota faktoru plnění však bývá negativně ovlivněna dalšími parametry, mezi které patří především již zmíněné parazitní odpory R_{S} a R_{SH} . Rovnice pro výpočet faktoru plnění se změní na tvar

$$FF = \frac{\left(\frac{I_{\text{SC}}}{U_{\text{OC}}} - G_{\text{SH}} \right) \left(\frac{U_{\text{OC}}}{I_{\text{SC}}} - R_{\text{S}} \right)}{(1 - R_{\text{S}} G_{\text{SH}})^2}, \quad (14)$$

kde G_{SH} je paralelní vodivost, $G_{\text{SH}} = 1/R_{\text{SH}}$.

Graficky lze faktor plnění znázornit jako podíl plochy obdélníku o stranách U_{MAX} a I_{MAX} a obdélníku o stranách U_{OC} a I_{SC} . Příklad IV. kvadrantu V-A charakteristiky solárního článku s vyznačením důležitých parametrů je znázorněn na obrázku (Obr. 9). Napětí U_{MAX} a proud I_{MAX} odpovídají maximálnímu výkonu P_{MAX} získávaného z článku a tedy maximální ploše obdélníku pod příslušnou křivkou, jehož průsečík P s volt-ampérovou charakteristikou je pracovním bodem fotovoltaiického článku.

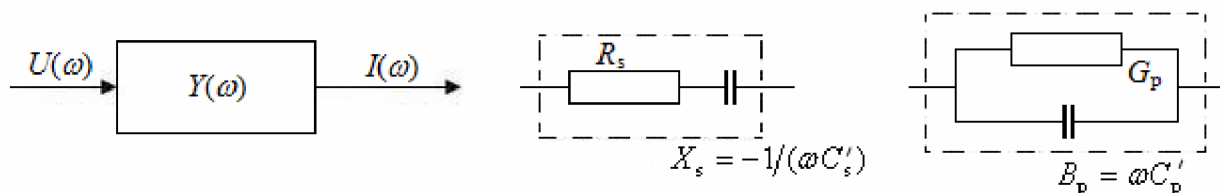


Obr. 9 Grafické znázornění důležitých parametrů k vyhodnocení FF

2.2.2 Impedanční spektroskopie (frekvenční měření)

Impedanční spektroskopie je založena na interakci vnějšího pole s elektrickými dipólovými momenty vzorku, které se velice často vyjadřují pomocí permitivity. Zabývá se studiem frekvenčních odezev střídavých elektrických proudů a slouží ke studiu dielektrických vlastností prostředí jako funkce frekvence. Metoda se hojně využívá k charakterizaci elektrického chování systémů, ve kterých je chování celku ovlivněno množstvím úzce svázaných procesů [9]. Impedanční spektroskopie bývá často charakterizována jako měření a analýza jedné nebo více ze čtyř impedančních funkcí (impedance Z , admittance Y , modulární funkce M , dielektrická permitivita ε) a umístění těchto funkcí do komplexní roviny. Obecně tyto impedanci příbuzné funkce nazýváme imittance. Velmi důležitým mezníkem pro analýzy reálných systémů se stalo Cole-Coleovo vyjádření reálné a imaginární permitivity (ε' a ε'') pro dielektrický systém v komplexní rovině, které dnes známe pod názvem Cole-Cole diagram.

Frekvenční měření (*Obr. 10*), tedy přímé měření impedance v oblasti frekvencí, spočívá v aplikaci jednofrekvenčního napětí (harmonického zdroje napětí o frekvenci ω a amplitudě U_0) na rozhraní a měření amplitudy I_0 a fázového posuvu proudu φ (nebo reálné a imaginární části výsledného proudu dané frekvence). Měřicí přístroje jsou komerčně dobře dostupné a měří impedanci jako funkci frekvence automaticky v rozsahu frekvencí od 1 mHz do 10 MHz (frekvenční rozsah lze libovolně měnit a lze tak proměřit oblast, která nás nejvíce zajímá).



Obr. 10 Frekvenční měření, sériové a paralelní zapojení RC obvodu

Mezi základní veličiny patří impedance Z a admitance Y , které spolu souvisí podle vztahu $Z(\omega) = 1/Y(\omega)$. V komplexní rovině lze psát

$$Z(\omega) = U(\omega)/I(\omega) = |Z(\omega)| [\cos(\varphi) - i \sin(\varphi)], \quad (15)$$

$$Y(\omega) = I(\omega)/U(\omega) = |Y(\omega)| [\cos(\varphi) + i \sin(\varphi)]. \quad (16)$$

Dále můžeme vyjádřit impedanci Z a admitanci Y pomocí odporové a kapacitní komponenty jako

$$Z(\omega) = R_s(\omega) + iX_s(\omega), \quad Y(\omega) = G_p(\omega) + iB_p(\omega), \quad (17)$$

kde R_s je rezistance (odpor), X_s je reaktance, G_p je konduktance (vodivost), B_p je susceptance a kde dolní index určuje sériové (s), resp. paralelní (p) zapojení (viz Obr. 10).

Pro reaktanci X_s a susceptanci B_p dále platí

$$X_s(\omega) = -\frac{1}{\omega C'_s(\omega)}, \quad B_p(\omega) = \omega C'_p(\omega), \quad (18)$$

kde C'_s , resp. C'_p je reálná část komplexní kapacity $C(\omega) = \varepsilon(\omega)S/l = C'(\omega) + iC''(\omega)$.

Dalšími důležitými veličinami jsou komplexní permitivita ε a modulární funkce M , které spolu souvisí podle vztahu $\varepsilon(\omega) = 1/M(\omega)$, kde

$$\varepsilon(\omega) = \frac{Y(\omega)}{\omega C_c} = \frac{G_p(\omega) + iB_p(\omega)}{\omega C_c} = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega), \quad (19)$$

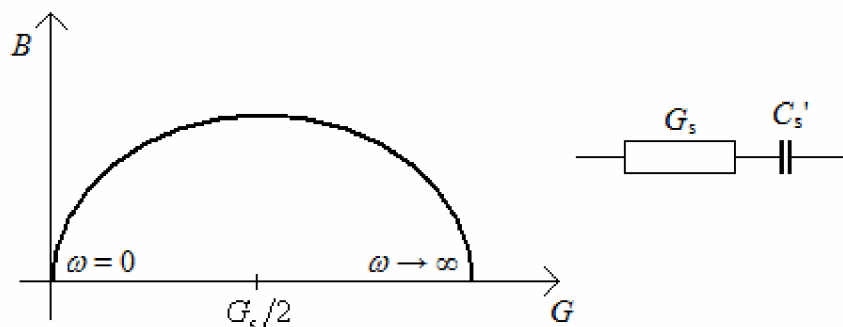
$$M(\omega) = \omega C_c Z(\omega) = \omega C_c [R_s(\omega) + iX_s(\omega)] = M'(\omega) + iM''(\omega) \quad (20)$$

a kde $C_c = \varepsilon_0 S/l$ je geometrická kapacita pro plochu S a vzdálenost elektrod l , ε_0 je permitivita vakua.

Vztahy mezi jednotlivými impedančními veličinami můžeme nalézt v tabulce (Tabulka I).

Tabulka I Vzájemné vztahy mezi základními impedančními veličinami

	Impedance $Z (\Omega)$	Admitance $Y (\Omega^{-1})$	Modulární funkce $M (\text{F}^{-1} \cdot \text{m})$	Permitivita $\varepsilon (\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$
Impedance $Z (\Omega)$	Z	$Z = 1/Y$	$Z = M/(\omega C_c)$	$Z = 1/(\omega C_c \varepsilon)$
Admitance $Y (\Omega^{-1})$	$Y = 1/Z$	Y	$Y = \omega C_c/M$	$Y = \omega C_c \varepsilon$
Modulární funkce $M (\text{F}^{-1} \cdot \text{m})$	$M = \omega C_c Z$	$M = \omega C_c/Y$	M	$M = 1/\varepsilon$
Permitivita $\varepsilon (\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	$\varepsilon = 1/(\omega C_c Z)$	$\varepsilon = Y/(\omega C_c)$	$\varepsilon = 1/M$	ε



Obr. 11 Závislost susceptance na konduktanci v sériovém modelu

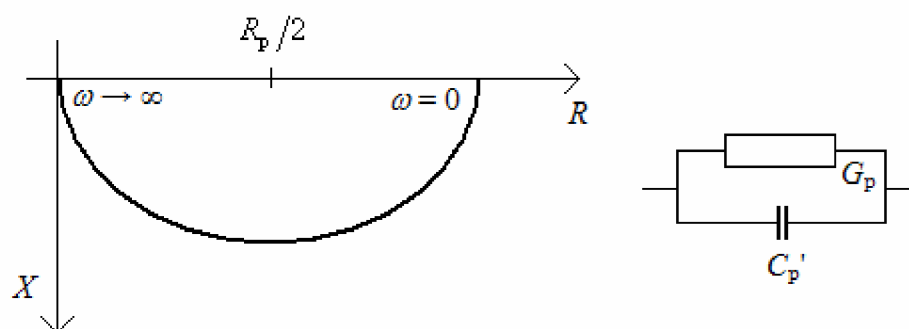
Cole-Cole diagram je závislost susceptance B na konduktanci G (pro paralelní veličiny) v sériovém modelu (viz *Obr. 11*)

$$B^2 + (G - G_s/2)^2 = (G_s/2)^2, \text{ resp. } B = \sqrt{G(G_s - G)}, \quad (21)$$

kde $G_s = 1/R_s$ je sériová vodivost, nebo závislost reaktance X na rezistanci R (pro sériové veličiny) při měření paralelního modelu (viz *Obr. 12*)

$$X^2 + (R - R_p/2)^2 = (R_p/2)^2, \text{ resp. } X = \sqrt{R(R_p - R)}, \quad (22)$$

kde $R_p = 1/G_p$ je paralelní odpor (rezistance).



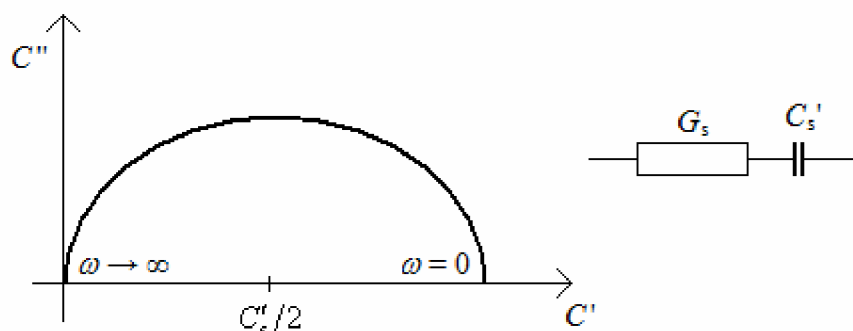
Obr. 12 Závislost reaktance na rezistanci v paralelním modelu

Cole-Cole diagram lze také znázornit v sériovém modelu jako závislost imaginární složky kapacity C'' na její reálné složce C' (pro paralelní kapacitu, viz *Obr. 13*)

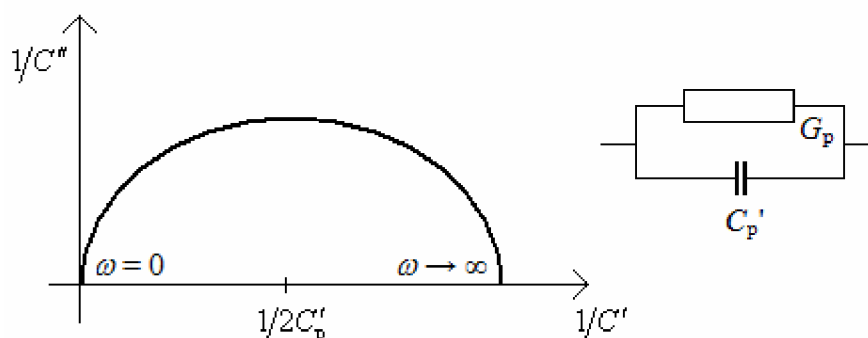
$$(C'')^2 + (C'' - C'_s/2)^2 = (C'_s/2)^2, \text{ resp. } C'' = \sqrt{C''(C'_s - C'')} \quad (23)$$

nebo jako závislost převrácené hodnoty imaginární složky kapacity $1/C''$ na převrácené hodnotě její reálné složky $1/C'$ (pro sériovou kapacitu) v paralelním modelu (viz *Obr. 14*)

$$(1/C'')^2 + (1/C'' - 1/2C'_p)^2 = (1/2C'_p)^2, \text{ resp. } 1/C'' = \sqrt{1/C''(1/C'_p - 1/C'')} . \quad (24)$$



Obr. 13 Závislost imaginární složky kapacity na její reálné složce v sériovém modelu

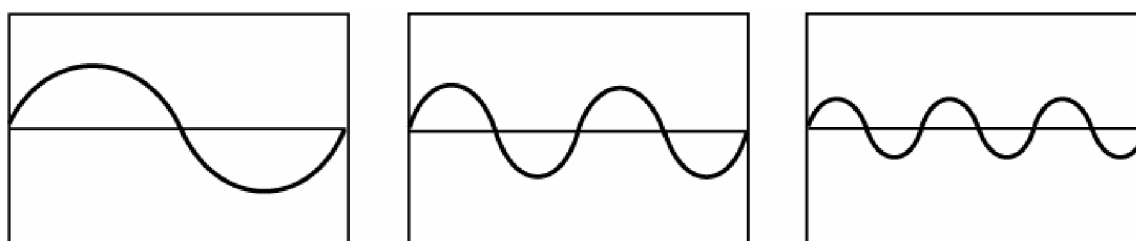


Obr. 14 Závislost převrácené hodnoty imaginární složky kapacity na převrácené hodnotě její reálné složky v paralelním modelu

Impedanční spektroskopii lze měřit i v časové oblasti a při transformaci signálů mezi časovou a frekvenční oblastí se poté uplatní Fourierova transformace (viz *Obr. 15*). Ta využívá k analýze harmonických signálů kosinové a sinové funkce různých kmitočtů (resp. exponenciální funkce s komplexním argumentem) a je nejlepší pro popis periodických signálů. Kmitočty těchto funkcí budou potom rovny celistvým násobkům základního kmitočtu periodického signálu (říkáme jim harmonické složky) a jejich amplitudy jsou dány koeficienty Fourierova rozvoje. Jakýkoliv analyzovaný signál lze tak vyjádřit jako součet sinusových vln s různou frekvencí. Podmínkou Fourierovy transformace je integrovatelnost dané (transformované) funkce. Tato transformace je definována integrálním vztahem

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) [\cos(\omega t) - i \sin(\omega t)] dt, \quad (25)$$

kde $F(\omega)$ je frekvenční spektrum signálu (tedy obraz Fourierovy transformace signálu), $i = \sqrt{-1}$ je imaginární jednotka, ω je úhlový kmitočet a $f(t)$ je transformovaný (vstupní) spojitý signál.



Obr. 15 Fourierova transformace (změna měřítka a opakování, báze funkce sin)

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

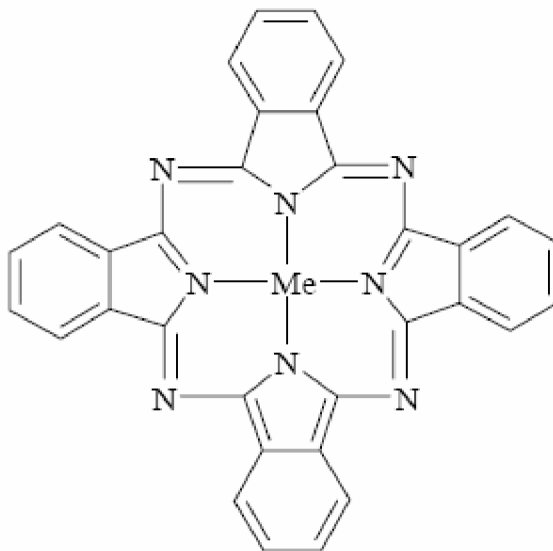
Hlavní náplní této části diplomové práce byla analýza signálů získaných ze stejnosměrných a střídavých (impedančních) měření vzorků ftalocyaninů.

3.1 Základní charakteristika ftalocyaninů

Ftalocyaniny jsou skupinou polymerních materiálů. Rozsáhlý delokalizovaný π -konjugovaný systém umožňuje ftalocyaninům absorpci viditelného světla a díky této skutečnosti pak mohou být ftalocyaniny využity jako ambipolární vodivé materiály. Uplatnění nacházejí v organických solárních člancích a to především díky fotoelektrochemickým vlastnostem, dále je rozhodující teplotní a chemická stabilita [10].

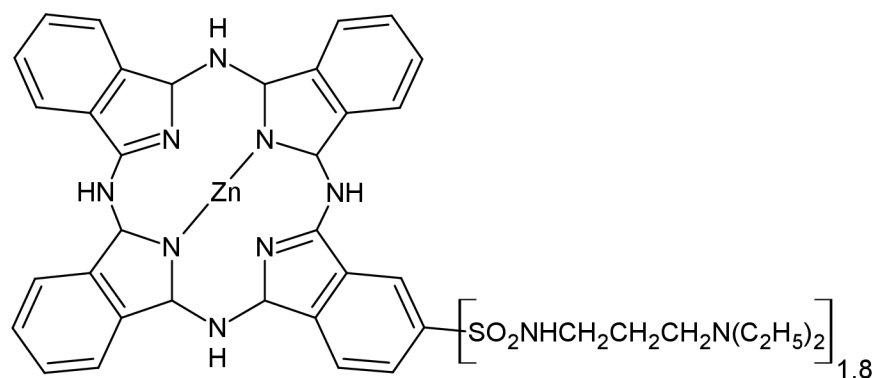
Ftalocyanin je tmavě modrý pigment, který byl poprvé objeven v roce 1907 Braunem a Tcherniacem jako vedlejší produkt při preparaci z ftalimidu a acethydridu. Struktura ftalocyaninu byla poprvé určena v roce 1933 Linsteadem, který nazval tento pigment ftalocyaninem a popsal struktury několika dalších kovových komplexů. Struktura ftalocyaninu je odvozena od molekuly tetraazaporfyrinu, který je rozšířen o čtyři benzenová jádra [11].

V případě kovových komplexů ftalocyaninů jsou (dva) vodíkové atomy v centru molekuly nahrazeny určitým kovem (viz *Obr. 16*). Dosud bylo připraveno více jak 70 ftalocyaninů různých kovů. Mezi těmito kovovými ftalocyaniny zaujímá významné postavení především ftalocyanin mědi (je vyráběn ve značných tonážích a je komerčně používán ve formě pigmentů nebo barviv). Využití ftalocyaninů se v poslední době přesouvá i do dalších aplikačních oblastí, jako je např. medicína, biologie, chemická katalýza a elektronika [11].

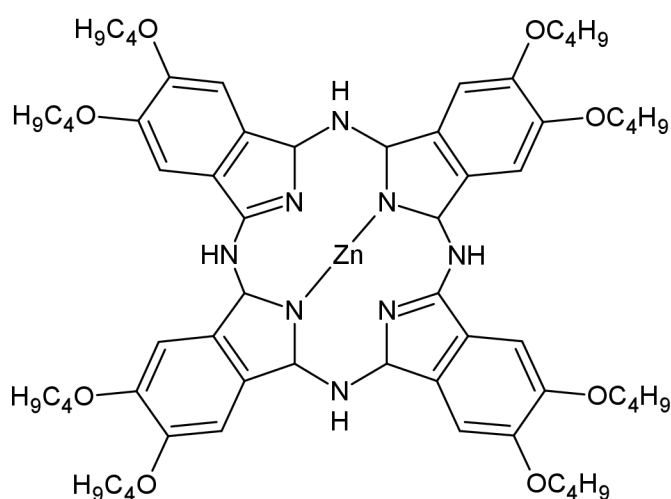


Obr. 16 Základní struktura ftalocyaninu s kovovým centrálním atomem, substituenty bývají navázány v různých pozicích na benzenových jádrech [11]

Strukturní vzorce námi nejpoužívanějších ftalocyaninů jsou zobrazeny na obrázku (*Obr. 17* a *Obr. 18*). Jedná se o struktury ftalocyaninů rozpustných v organických rozpouštědlech.



Obr. 17 Strukturní vzorec ftalocyaninu ZnOHFTC(SO₂DEAPA)

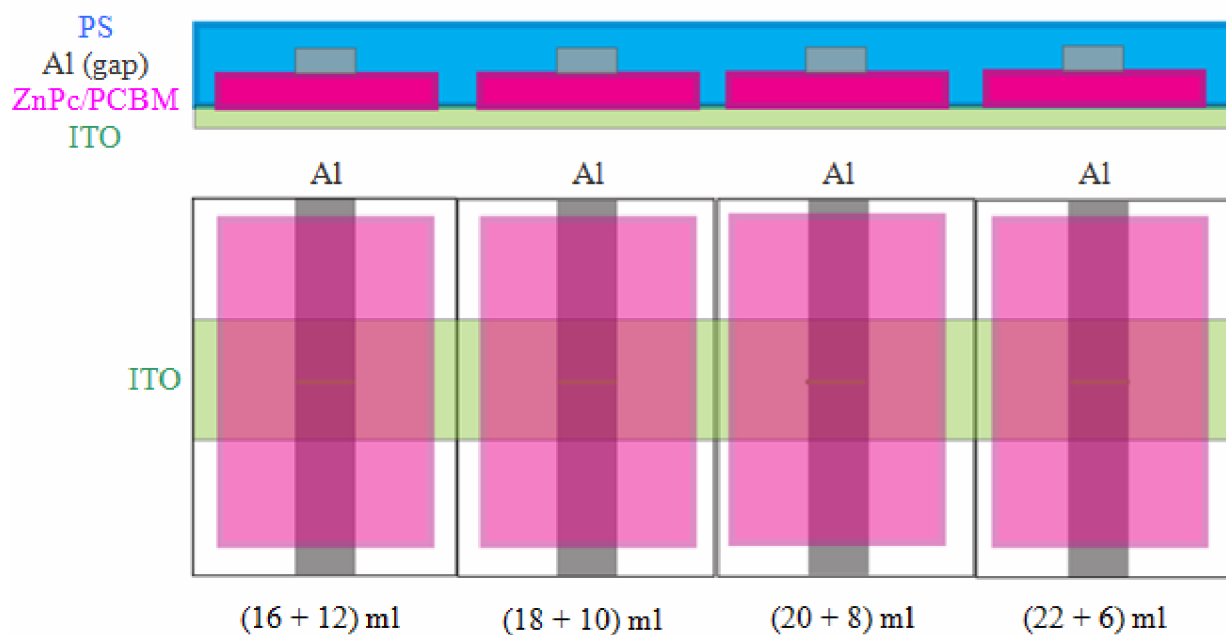


Obr. 18 Strukturní vzorec ftalocyaninu ZnOFTC(O-Bu)₈

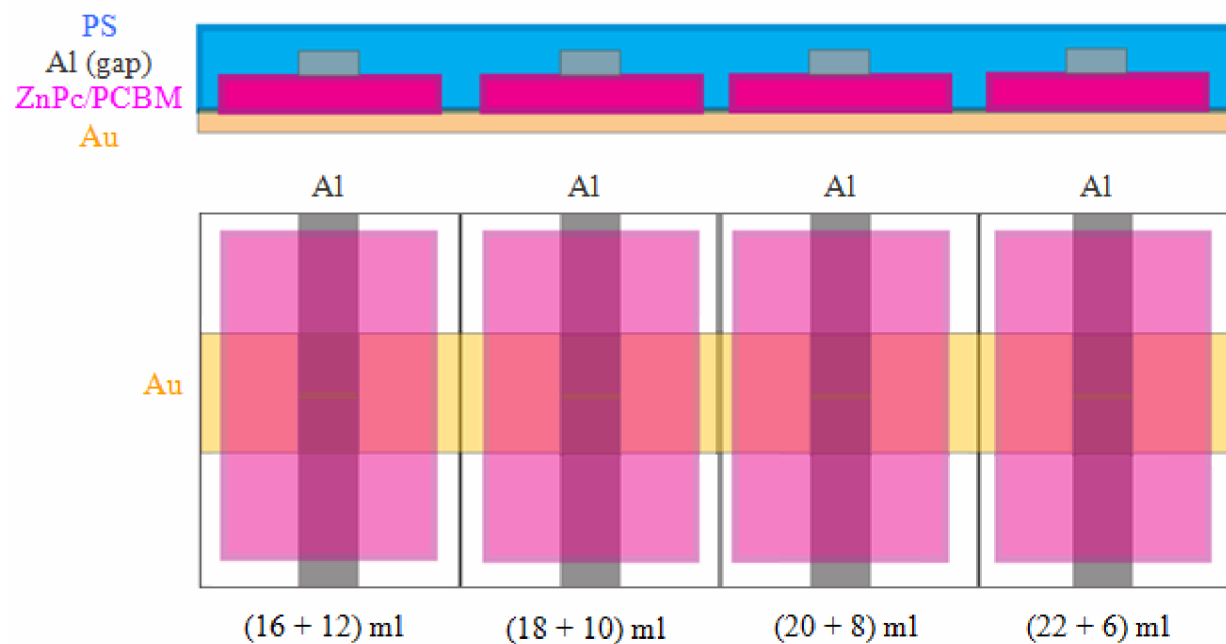
3.2 Popis vzorku

Měřený vzorek se skládá ze skleněné podložky. Na podložce ze skla se uprostřed nachází vrstva zlata, popř. ITA (směsný oxid india a cínu, In₂O₃.SnO₂), která díky své vysoké vodivosti zastává funkci spodní elektrody (tvoří tedy jeden z kontaktů vzorku). Zbývající horní kontakt je tvořen vrstvičkou hliníku (Al) napařenou na aktivní vrstvu (viz *Obr. 19* a *Obr. 20*).

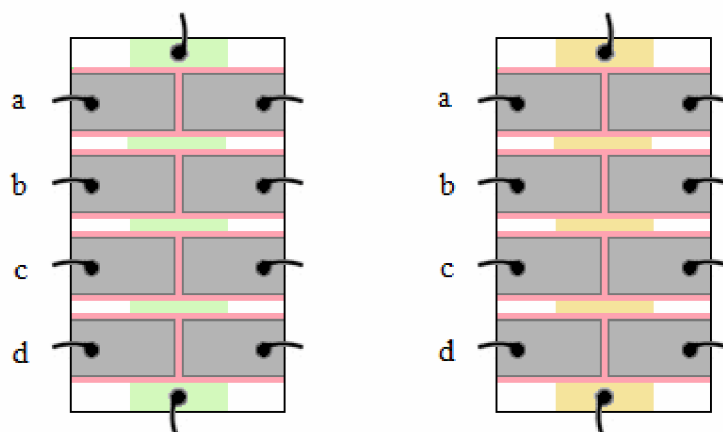
Jelikož vrstvička ITO pokrývá před úpravou skla celou plochu podložky (a to je nevhodné pro měření), je nutné část této vrstvy odstranit odleptáním v roztoku HCl a destilované vody (v poměru 1:1), do kterého se přidá malé množství práškového zinku. Odleptaná podložka se potom důkladně přečistí postupně v tenzidu, Mili-Q vodě, acetonu a nakonec chloroformu. Pokud bude jako spodní elektroda využito zlato, je nutné nejprve podložku odleptat od ITA kompletně celou a poté na ni nechat napařit zlatý kontakt. Na takto připravený substrát sklo/ITO, popř. sklo/Au se tiskem za předem definovaných podmínek nanese aktivní vrstva (mix ftalocyaninu zinku s PCBM), na kterou se po zaschnutí vakuově napaří hliníkové kontaktovací plošky a vzorek se nakonec nakontaktuje měděnými drátky pomocí stříbrné pasty (viz *Obr. 21*).



Obr. 19 Uspořádání vrstev měřeného vzorku, spodní elektroda ITO



Obr. 20 Uspořádání vrstev měřeného vzorku, spodní elektroda Au



Obr. 21 Nakontaktovaný vzorek s označením jednotlivých kontaktů (a, b, c, d)

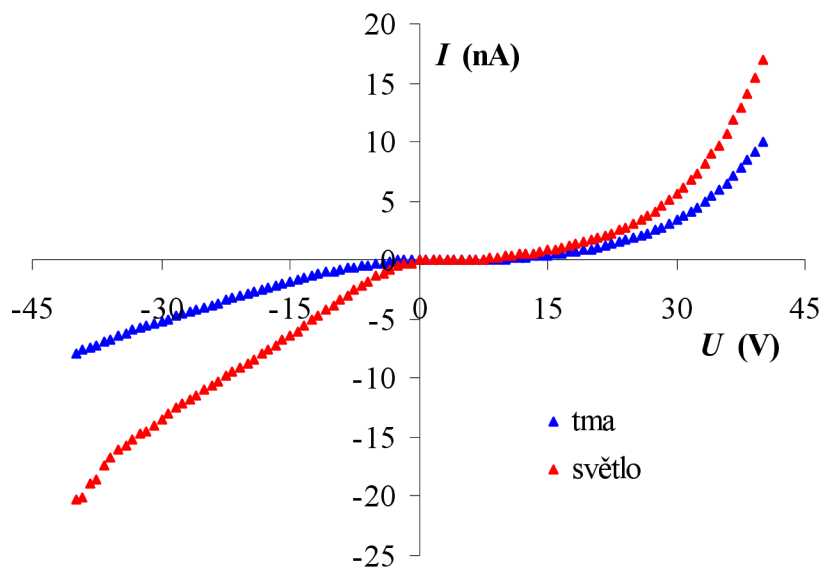
Byly připraveny následující vzorky k proměření (viz *Tabulka II*). Na těchto materiálech mohou být potom provedeny měření jak sendvičové, tak i gapové struktury.

Tabulka II Vzorky k proměření

poř. číslo	kontakt	podložka	elektroda	ZnPc/PCBM (ml)	elektroda
1	a	sklo	Au	16 + 12	Al (gap)
	b			18 + 10	
	c			20 + 8	
	d			22 + 6	
2	a	sklo	Au	16 + 12	Al (gap)
	b			18 + 10	
	c			20 + 8	
	d			22 + 6	
3	a	sklo	ITO	16 + 12	Al (gap)
	b			18 + 10	
	c			20 + 8	
	d			22 + 6	
4	a	sklo	ITO	16 + 12	Al (gap)
	b			18 + 10	
	c			20 + 8	
	d			22 + 6	

3.3 Stejnoseměrná měření

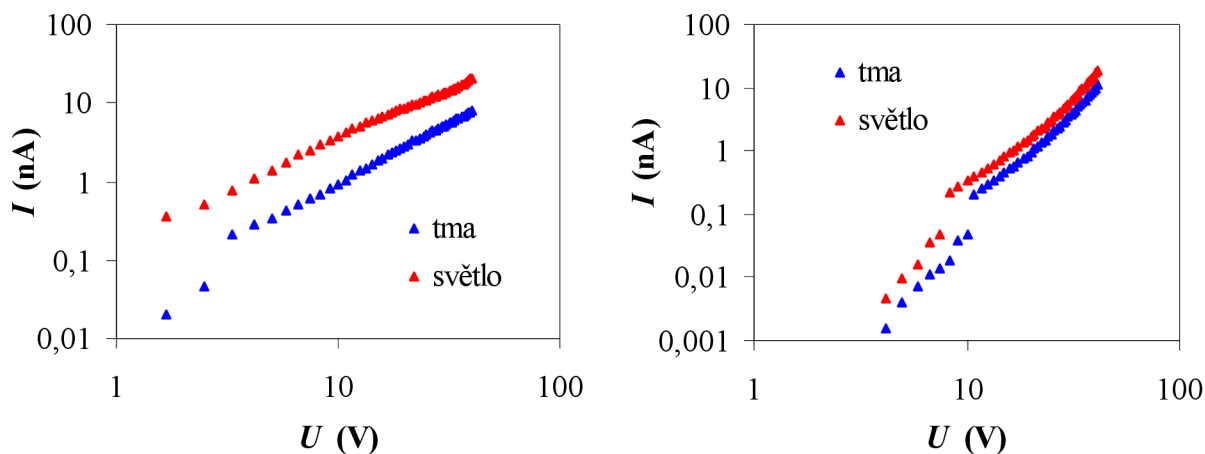
V rámci tohoto experimentu byly změřeny volt-ampérové charakteristiky výše popsaných vzorků ftalocyaninů při konstantní teplotě, a to za tmy a za světla. Naměřené výsledky budou demonstrovány na vzorku s pořadovým číslem 3 pro kontakt b (sendvič). Na následujícím grafu (Obr. 22) je zobrazen příklad V-A charakteristiky, ze které je zřejmý diodový charakter měřeného vzorku.



Obr. 22 V-A charakteristika měřeného kontaktu (diodový charakter)

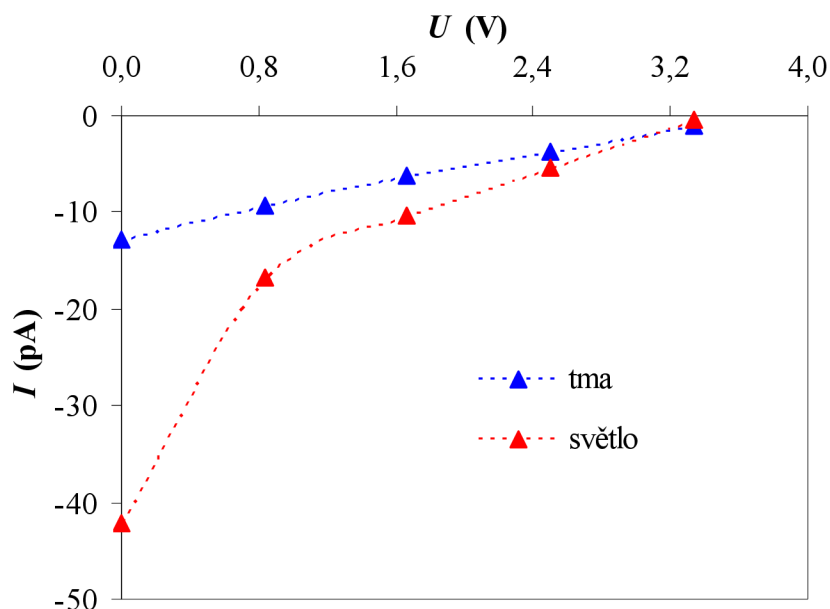
V grafu (viz Obr. 22) můžeme navzájem porovnat sklon jednotlivých křivek, tedy porovnat menší či větší vodivost za tmy a za světla – čím blíže je charakteristika přikloněna k ose proudu, tím větší má součástka vodivost. Vzorek tedy vykazuje jistou fotovodivost.

Na dalším grafu (Obr. 23) je vyobrazen propustný a závěrný směr V-A charakteristiky v logaritmickém měřítku na obou osách.



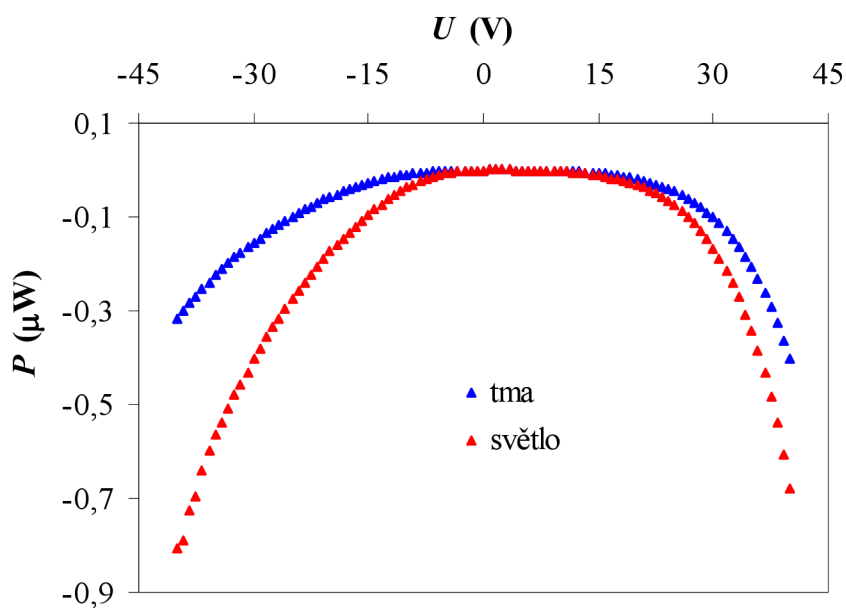
Obr. 23 Propustný (vlevo) a závěrný směr (vpravo) V-A charakteristiky, log-log měřítko

Pro vyhodnocení účinnosti fotovoltaických článků se vychází ze znalosti IV. kvadrantu V-A charakteristiky (viz *Obr. 24*) měřené při osvětlení, kde $I_{SC} = -42,1 \text{ pA}$ je elektrický proud nakrátko při nulovém napětí (Short Circuit) a $U_{OC} = 3,3 \text{ V}$ je napětí naprázdno při nulovém proudu (Open Circuit).



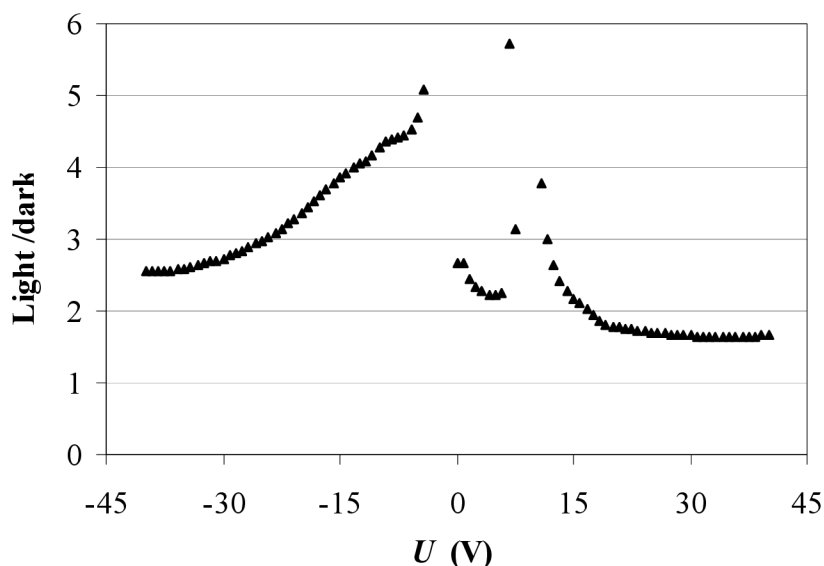
Obr. 24 V-A charakteristika IV. kvadrant

Důležitým parametrem je i maximální výkon P_{max} získávaný z článku. Lze ho najít jako maximum z níže uvedené výkonové charakteristiky (viz *Obr. 25*), odpovídá mu absolutní hodnota největšího součinu hodnot napětí U_{MAX} a proudu I_{MAX} , kde $I_{MAX} = -10,4 \text{ pA}$ a $U_{MAX} = 1,7 \text{ V}$. Potom $P_{MAX} = |U_{MAX} I_{MAX}| = 17,3 \text{ pW}$.



Obr. 25 Grafické znázornění výkonu (maximum odpovídá P_{max})

Změnu vodivosti při měření za světla můžeme vidět na posledním grafu (Obr. 26). Je zřejmé, že světlem se odbourává bariéra měřená za tmy, proto touto strukturou teče větší proud za světla (fotoproud je až pětkrát větší než temnotní proud).



Obr. 26 Grafické znázornění fotovodivosti (poměr hodnot proudu za světla a za tmy)

3.4 Střídavá měření, frekvenční závislosti

Frekvenční závislosti vzorku byly naměřeny na impedančním analyzátoru HP 4192A metodou impedanční spektroskopie, a to měřením absolutní hodnoty (velikosti) admitance $|Y|$ a fázového posuvu mezi konduktancí a susceptancí φ . Platí následující vztahy

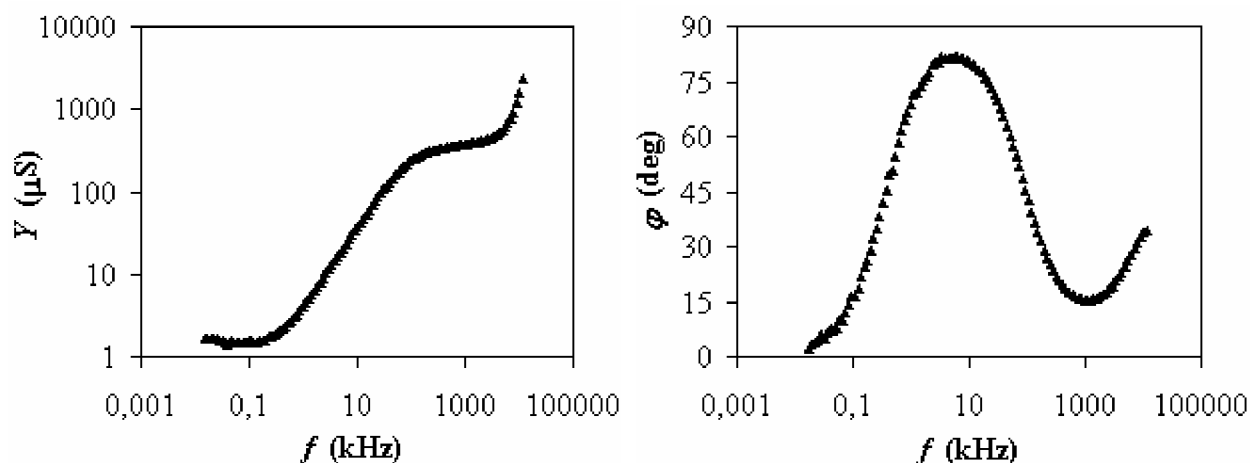
$$Y(\omega) = G_p + iB_p = |Y| \exp(i\varphi), \quad |Y| = \sqrt{G_p^2 + B_p^2}, \quad \arctg(B/G) = \varphi. \quad (26)$$

V rámci měření na daném přístroji se může libovolně nastavit amplituda přiloženého napětí, rozsah frekvencí pro měření, počet kroků měření, měření v sériovém či paralelním módu a lze také nastavit dávky urychlující měření.

Pokud se změří vzorek, který se chová jako sériový model, závislost vypočtené susceptance B_p na konduktanci G_p vykreslí Cole-Cole diagram. Pokud by se ovšem vzorek choval jako paralelní model, musely by se získané veličiny přepočítat na veličiny, které by byly naměřeny sériově (tedy na reaktanci X_s a rezistanci R_s), neboť Cole-Cole diagram bude v takovém případě závislost reaktance X na rezistanci R .

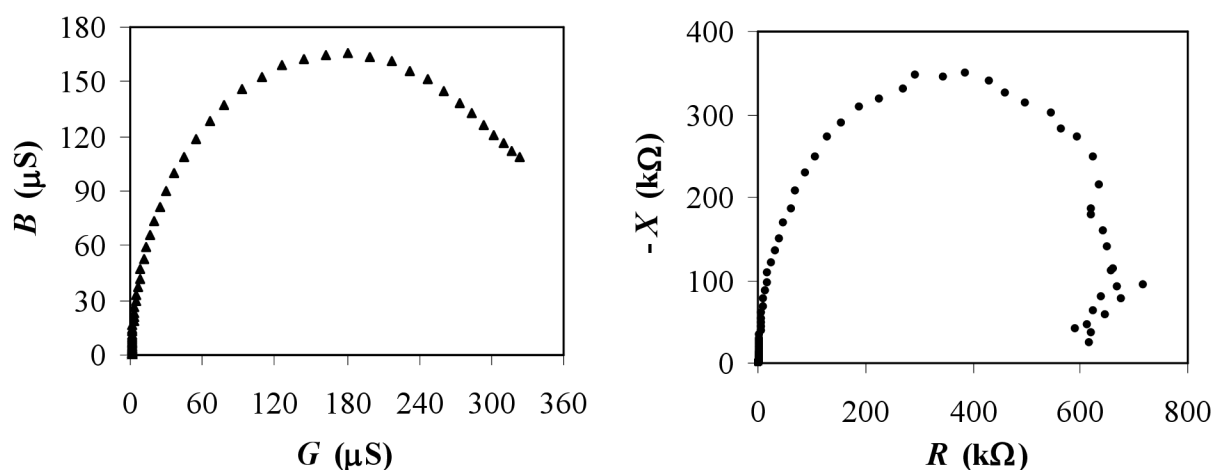
V rámci tohoto experimentu byly změřeny impedanční charakteristiky výše popsaných vzorků ftalocyaninů při konstantní teplotě, a to za tmy a za světla. Komplexní proměření struktury vzorků probíhalo při napětí (Voltage) 1 V, v rozmezí napětí (Bias) -35 V až 35 V a v rozsahu frekvencí 0,5 Hz až 12 MHz. Naměřené výsledky budou demonstrovány na vzorku s pořadovým číslem 2 pro kontakt c (sendvič), pro příkládané napětí (Bias) 17 V a pro měření za světla.

Naměřené závislosti impedančních spekter jsou znázorněny na grafu (Obr. 27).



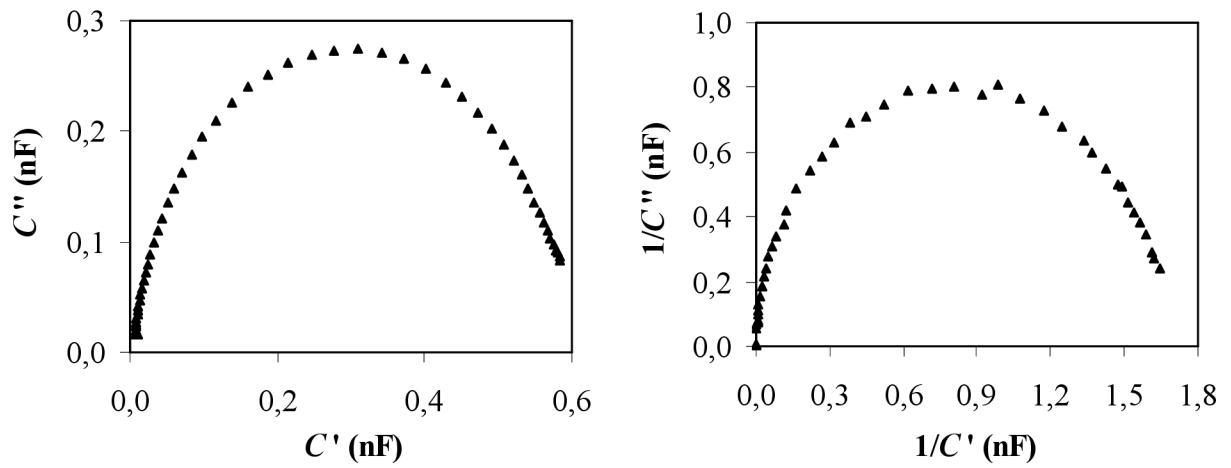
Obr. 27 Závislost admitance na frekvenci (vlevo), závislost fázového posuvu mezi konduktancí a susceptancí na frekvenci (vpravo)

Na následujícím grafu (Obr. 28) je zobrazen příklad závislosti vypočítané susceptance B na konduktanci G , tj. $B = \sqrt{G(G_s - G)}$, resp. závislosti přepočítané reaktance X na rezistanci R , tj. $X = \sqrt{R(R_p - R)}$.



Obr. 28 Závislost susceptance na konduktanci (vlevo, sériový model), resp. závislost reaktance na rezistanci (vpravo, paralelní model)

Cole-Cole diagram (viz Obr. 29) může být také znázorněn jako závislost imaginární složky paralelní kapacity C'' na její reálné složce C' , tj. $C'' = \sqrt{C''(C'_s - C')}$, resp. jako závislost převrácené hodnoty imaginární složky sériové kapacity $1/C''$ na převrácené hodnotě její reálné složky $1/C'$, tj. $1/C'' = \sqrt{1/C''(1/C'_p - 1/C')}$.



Obr. 29 Závislost imaginární složky paralelní kapacity na její reálné složce (vlevo, sériový model), závislost převrácené hodnoty imaginární složky sériové kapacity na převrácené hodnotě její reálné složky (vpravo, paralelní model)

Tato data budou podrobena další analýze (viz kapitola 4.2.2).

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Elektrická a optoelektrická měření

V rámci tohoto experimentu byly provedeny charakterizace struktur ftalocyaninů zinku ZnPc (mohou být využity jako aktivní vrstva fotovoltaických článků), a to pomocí elektrických a optoelektrických měření. Za tímto účelem byly postupně proměřeny V-A charakteristiky za tmy a při osvětlení (vzdálenost elektrod 25 μm , tloušťka vzorku přibližně 200 nm, osvit $P_0 = 2,2 \text{ mW/cm}^2$).

Ke zpracování naměřených dat budeme využívat těchto vztahů

$$FF = \frac{P_{\text{MAX}}}{I_{\text{sc}}U_{\text{oc}}}, \eta = \frac{P_{\text{MAX}}}{P_0}. \quad (27)$$

Zjištěné parametry můžeme vidět v tabulce níže (viz *Tabulka III*).

Tabulka III Naměřené a vypočítané hodnoty pro různé elektrody

Měřená elektroda	P_{max} (W)	I_{sc} (A)	U_{oc} (V)	FF	η (%)
2b	$3,69 \cdot 10^{-9}$	$-9,97 \cdot 10^{-9}$	0,83	0,44	$5,50 \cdot 10^{-3}$
2c	$4,40 \cdot 10^{-9}$	$-7,03 \cdot 10^{-9}$	2,50	0,25	$6,56 \cdot 10^{-3}$
2d	$8,81 \cdot 10^{-11}$	$-6,03 \cdot 10^{-12}$	0,83	0,18	$1,31 \cdot 10^{-4}$
3b	$1,46 \cdot 10^{-9}$	$-2,79 \cdot 10^{-9}$	2,50	0,21	$2,18 \cdot 10^{-3}$
3c	$1,73 \cdot 10^{-11}$	$-4,21 \cdot 10^{-11}$	3,33	0,12	$2,58 \cdot 10^{-5}$
4a	$1,49 \cdot 10^{-12}$	$-6,39 \cdot 10^{-12}$	0,83	0,28	$2,22 \cdot 10^{-6}$
4b	$5,85 \cdot 10^{-10}$	$-7,77 \cdot 10^{-10}$	3,33	0,23	$8,72 \cdot 10^{-4}$
4c	$2,09 \cdot 10^{-12}$	$-4,09 \cdot 10^{-12}$	2,50	0,20	$3,12 \cdot 10^{-6}$
4d	$1,80 \cdot 10^{-12}$	$-3,51 \cdot 10^{-12}$	1,67	0,31	$2,68 \cdot 10^{-6}$

Na základě zjištěných účinností η můžeme konstatovat, že tyto vrstvy nelze využít jako funkční (články dodávají zanedbatelný výkon do vnějšího obvodu).

4.2 Dielektrická a optodielektrická měření (frekvenční měření)

V rámci tohoto experimentu byly provedeny charakterizace struktur ftalocyaninů zinku ZnPc, a to pomocí dielektrických a optodielektrických měření. Za tímto účelem byly postupně proměřeny impedanční spektra daných vzorků za tmy a při osvětlení.

Naším cílem bude určit zapojení náhradního elektrického obvodu (model) a stanovit parametry tohoto náhradního obvodu u vybraného vzorku. Tyto parametry byly zjišťovány následujícím způsobem

- asymptoticky (ze závislosti příslušné kapacity C na vodivosti G , odhad parametrů),
- víceparametrickou lineární regresí experimentálních dat, fitováním Cole-Cole diagramů (jedná se o metodu, jak podrobněji určit tyto parametry).

4.2.1 Vyhodnocení C-G charakteristik (asymptotické)

Ke zpracování naměřených dat budeme využívat těchto přepočtů mezi veličinami pro sériový model

$$Y(\omega) = |Y(\omega)| \exp(i\varphi) = |Y(\omega)| [\cos(\varphi) + i \sin(\varphi)], \quad (28)$$

$$\text{kde } G_p(\omega) = |Y(\omega)| \cos(\varphi), \quad C'_p(\omega) = \frac{B_p(\omega)}{\omega} = \frac{|Y(\omega)| \sin(\varphi)}{\omega}.$$

Pro paralelní model budeme ke zpracování naměřených dat využívat následujících přepočtů mezi veličinami

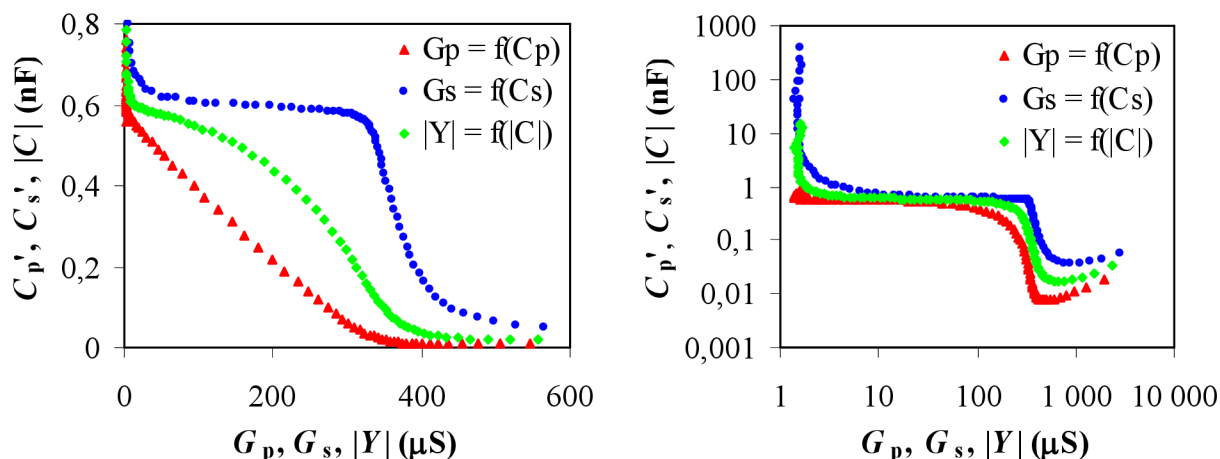
$$Z(\omega) = \frac{1}{|Y(\omega)|} \exp(-i\varphi) = \frac{1}{|Y(\omega)|} [\cos(\varphi) - i \sin(\varphi)], \quad (29)$$

$$\text{kde } G_s(\omega) = \frac{|Y(\omega)|}{\cos(\varphi)}, \quad C'_s(\omega) = \frac{B_s(\omega)}{\omega} = \frac{|Y(\omega)|}{\omega \sin(\varphi)}.$$

Vyneseme-li do grafu (*Obr. 30*) modifikované Cole-Cole diagramy, tj. závislosti $C'_p = f(G_p)$ a $C'_s = f(G_s)$ spolu se závislostí absolutní hodnoty kapacity $|C(\omega)|$, kde $|C(\omega)| = |Y(\omega)|/\omega$, na absolutní hodnotě admitance $|Y(\omega)|$, jsme schopni asymptoticky určit příslušné hodnoty vodivosti G a kapacity C (viz *Tabulka IV*, jedná se pouze o odhad těchto parametrů).

Tabulka IV Příslušné hodnoty vodivosti G a kapacity C

Měřená elektroda	G_1 (μS)	G_2 (μS)	C_1 (nF)	C_2 (nF)
2c	1,51	340,0	0,59	<0,01



Obr. 30 Modifikované Cole-Cole diagramy (lineární měřítko vlevo, log-log měřítko vpravo)

Důvodem, proč „kapacita“ při vyšších hodnotách vodivosti opět roste (viz Obr. 30), může být částečně induktivní charakter měřeného vzorku (indukčnost).

4.2.2 Vyhodnocení z Cole-Cole diagramů

Pro získání Cole-Cole diagramu v paralelní kapacitě bylo využito těchto vztahů

$$Y(\omega) = G_p(\omega) + iB_p(\omega), \quad B_p(\omega) = \omega C'_p(\omega), \quad (30)$$

$$Y(\omega) = G_p(\omega) + i\omega C'_p(\omega), \quad \frac{Y(\omega)}{i\omega} = \frac{G_p(\omega)}{i\omega} + C'_p(\omega), \quad (31)$$

$$C_p(\omega) = C'_p(\omega) - iC''_p(\omega) \quad (32)$$

a v sériové kapacitě vztahů následujících

$$Z(\omega) = R_s(\omega) + iX_s(\omega), \quad X_s(\omega) = -\frac{1}{\omega C'_s(\omega)}, \quad (33)$$

$$Z(\omega) = R_s(\omega) - \frac{i}{\omega C'_s(\omega)}, \quad i\omega Z(\omega) = i\omega R_s(\omega) + \frac{1}{C'_s(\omega)}, \quad (34)$$

$$\frac{1}{C_s(\omega)} = \frac{i}{C''_s(\omega)} + \frac{1}{C'_s(\omega)}. \quad (35)$$

Abychom tedy získali z naměřených dat důležité parametry podrobněji, data fitujeme pomocí víceparametrické lineární regrese. Postup odvození je následující. Vycházíme z rovnice elipsy (fitování získaných Cole-Cole diagramů, viz Obr. 31)

$$\left(\frac{x-x_0}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{y_1}\right)^2 = 1. \quad (36)$$

Vyjádříme-li z této rovnice neznámou y , dostaneme

$$y^2 = 2yy_0 - x^2 \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 + 2xx_0 \left(\frac{y_1}{x_1} \right) + \left(y_1^2 - x_0^2 \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 - y_0^2 \right). \quad (37)$$

Jedná se o víceparametrickou lineární regresi

$$Y = AX_1 + BX_2 + CX_3 + D, \quad (38)$$

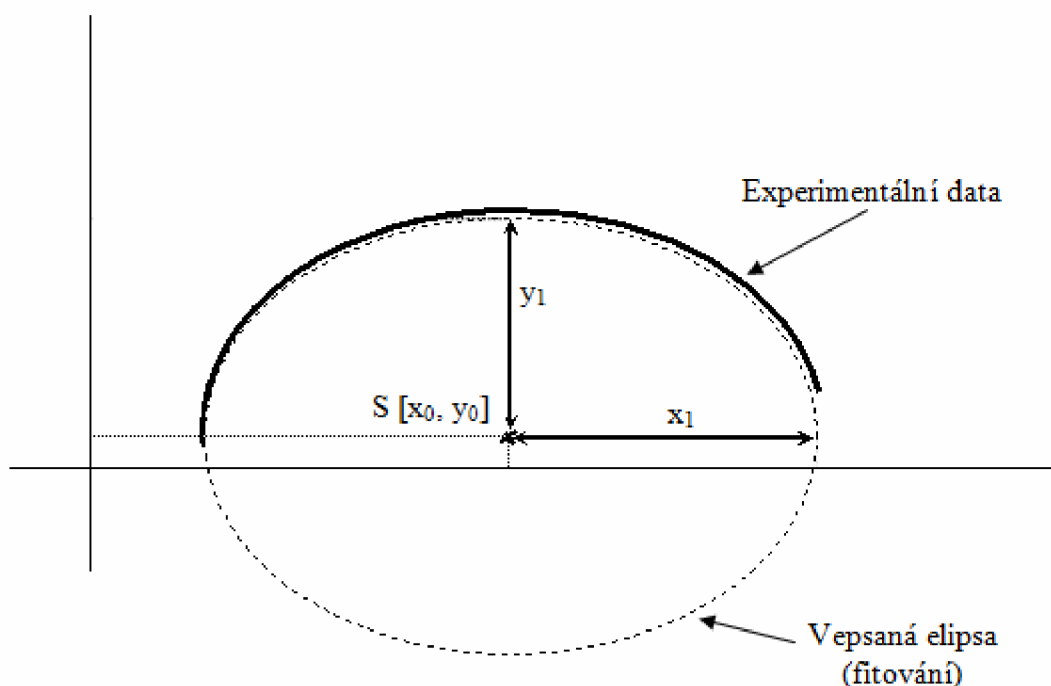
kde $X_1 = x^2$, $X_2 = x$, $X_3 = y$

a koeficienty $A = 2y_0$, $B = -\left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2$, $C = 2x_0 \left(\frac{y_1}{x_1} \right)$, $D = y_1^2 - x_0^2 \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 - y_0^2$.

Po vyjádření x_0 , x_1 , y_0 a y_1 z příslušných koeficientů dostáváme

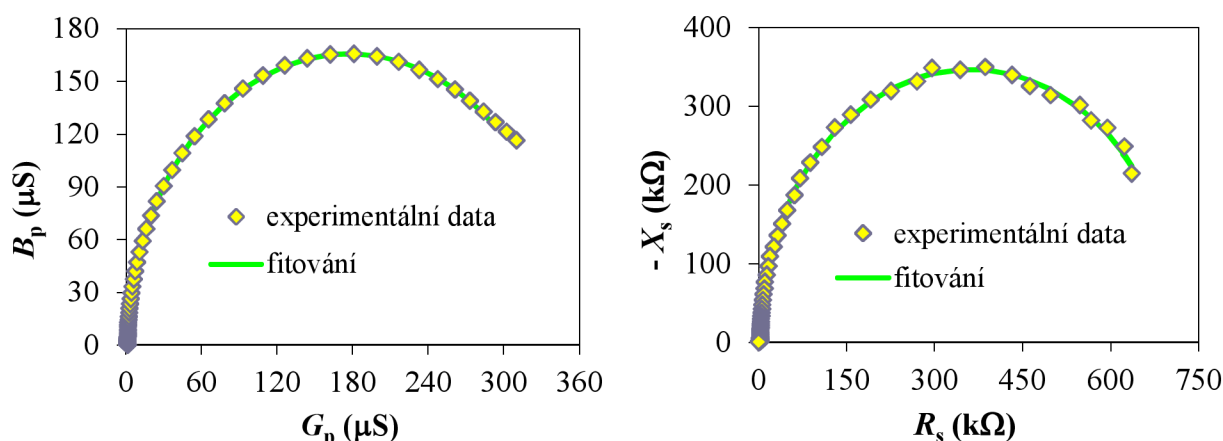
$$x_0 = -\frac{C}{2B}, \quad x_1 = \sqrt{\frac{1}{B} \left(\frac{A^2}{4} - \frac{C^2}{4B} + D \right)}, \quad (39)$$

$$y_0 = \frac{A}{2}, \quad y_1 = \sqrt{\frac{A^2}{4} - \frac{C^2}{4B} + D}. \quad (40)$$

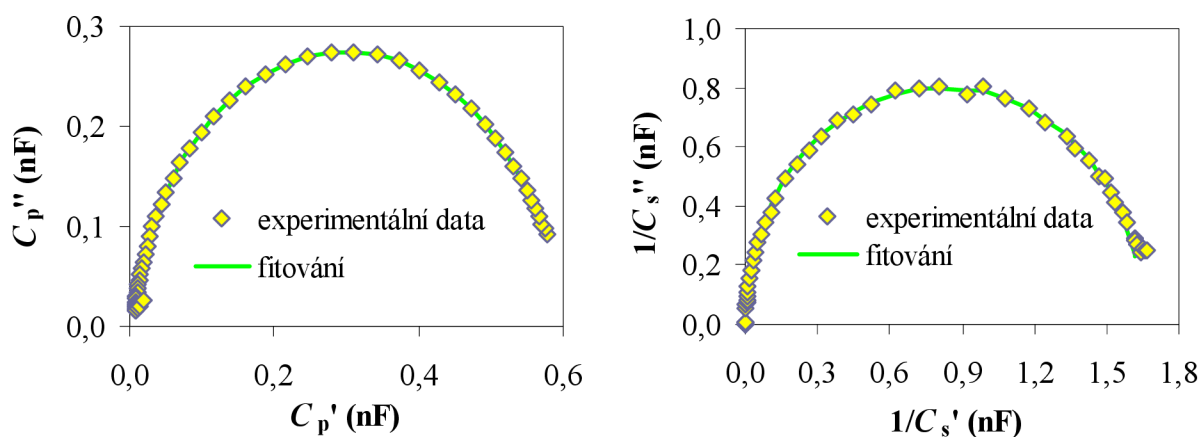


Obr. 31 Fitování měřených Cole-Cole diagramů

Tato víceparametrická lineární regrese byla provedena na všech Cole-Cole diagramech uvedených v experimentální části této práce (viz kapitola 3.4). Na následujících grafech (Obr. 32 a Obr. 33) jsou znázorněna všechna fitovaná data.



Obr. 32 Fitování Cole-Cole diagramu pro závislost susceptance na konduktanci (vlevo), resp. pro závislost reaktance na rezistanci (vpravo)



Obr. 33 Fitování Cole-Cole diagramu v paralelní kapacitě (vlevo), resp. v sériové kapacitě (vpravo)

Všechny zjištěné koeficienty víceparametrické lineární regrese a z nich vypočítané parametry jsou shrnuty v tabulkách níže (viz *Tabulka V* a *Tabulka VI*).

Tabulka V Důležité koeficienty získané z měřených dat fitováním pomocí víceparametrické lineární regrese

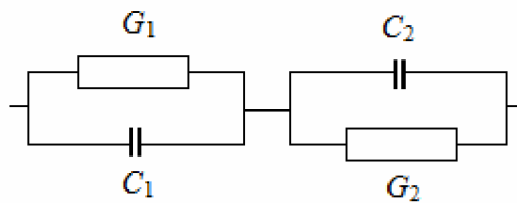
	x_0	y_0	x_1	y_1
$B_p = f(G_p)$	$1,77 \cdot 10^{-4} \text{ S}$	$1,09 \cdot 10^{-7} \text{ S}$	$1,75 \cdot 10^{-4} \text{ S}$	$1,66 \cdot 10^{-4} \text{ S}$
$-X_s = f(R_s)$	$3,61 \cdot 10^5 \text{ } \Omega$	$7,95 \cdot 10^3 \text{ } \Omega$	$3,57 \cdot 10^5 \text{ } \Omega$	$3,39 \cdot 10^5 \text{ } \Omega$
$C_p'' = f(C_p')$	$4,46 \cdot 10^{-8} \text{ F}$	$2,60 \cdot 10^{-11} \text{ F}$	$6,04 \cdot 10^{-10} \text{ F}$	$4,17 \cdot 10^{-10} \text{ F}$
$1/C_s'' = f(1/C_s')$	$3,42 \cdot 10^{11} \text{ F}^{-1}$	$3,30 \cdot 10^9 \text{ F}^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{10} \text{ F}^{-1}$	$1,40 \cdot 10^{11} \text{ F}^{-1}$

Tabulka VI Vypočítané parametry z výše zjištěných koeficientů (hodnoty vodivosti a kapacity)

	G_1 (μS)	G_2 (μS)	C_1 (nF)	C_2 (pF)
Regrese	1,40	350,6	1,21	8,76
Odhad	1,51	340,0	0,59	<10

Parametry korelují s vyhodnocením charakteristik $C = f(G)$.

Na základě zjištěných parametrů náhradního elektrického obvodu můžeme předpokládat, že vzorek se skládá z následujícího modelu zapojení (viz Obr. 34).



Obr. 34 Zapojení náhradního elektrického obvodu (model)

5 ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na studium elektrických, optoelektrických, dielektrických a optodielektrických vlastností měřených struktur.

V teoretické části této práce byla zpracována rešerše o možnosti využití organických (polymerních) materiálů v optoelektronických a elektroluminiscenčních prvcích. Dále byla popsána stejnosměrná a střídavá měření pro charakterizaci elektrických signálů těchto struktur s tenkými polymerními vrstvami.

Studovanými materiály byly ftalocyaniny zinku (ZnPc) a směsi těchto ftalocyaninů s PCBM na skleněné podložce.

Při stejnosměrném měření volt-ampérových charakteristik byly změřeny závislosti proudu na napětí. V rámci tohoto experimentu byly tedy provedeny charakterizace struktur ftalocyaninů zinku ZnPc (tyto materiály mohou být využity jako aktivní vrstva solárních článků) pomocí elektrických a optoelektrických měření. Za tímto účelem byly postupně proměřeny V-A charakteristiky za tmy a při osvětlení. Na základě zjištěných účinností η (viz *Tabulka III*) lze konstatovat, že tyto vrstvy nelze využít jako funkční (články dodávají zanedbatelný výkon do vnějšího obvodu). Z provedených měření můžeme dále konstatovat, že světlem se odbourává bariéra měřená za tmy, a to je důvod, proč u těchto struktur zjišťujeme větší vodivost za světla než za tmy (výraznou fotovodivost).

Při střídavém neboli frekvenčním měření byly změřeny závislosti velikosti admitance a fázového posuvu mezi konduktancí a susceptancí na frekvenci. Na základě tohoto experimentu byly provedeny charakterizace struktur ftalocyaninů zinku ZnPc pomocí dielektrických a optodielektrických měření. Za tímto účelem byly postupně proměřeny impedanční spektra (impedanční charakteristiky) daných vzorků za tmy a při osvětlení. Naším cílem bylo určit zapojení náhradního elektrického obvodu (model) a stanovit parametry tohoto náhradního obvodu u vybraného vzorku (vzorek s pořadovým číslem 2, kontakt c, sendvičová struktura, měření za světla, přikládané napětí 17 V). Tyto parametry byly zjišťovány nejprve asymptoticky z modifikovaných Cole-Cole diagramů, tj. ze závislosti příslušné kapacity C na vodivosti G . Odhadnuté parametry se nachází v tabulce IV (viz *Tabulka IV*). Pro získání důležitých parametrů z naměřených dat detailněji byla tato data fitována pomocí víceparametrické lineární regrese (fitování získaných Cole-Cole diagramů). Ze známých koeficientů rovnice byly nakonec vypočteny hodnoty vodivosti G a hodnoty kapacity C . Všechny dosažené výsledky jsou shrnuty v tabulce V a v tabulce VI (viz *Tabulka V* a *Tabulka VI*). Na základě těchto parametrů náhradního elektrického obvodu můžeme předpokládat, že vzorek se skládá z kombinace paralelního i sériového modelu zapojení (viz *Obr. 34*).

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SKOTHEIM, Terje A; REYNOLDS, John R. *Conjugated polymers: processing and applications*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. 2 sv. (různé str.). ISBN 15-744-4665-7
- [2] VOJÁČEK, A. *Přehled typů displejů OLED a jejich nové varianty* [online]. 2009 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2006081701>>
- [3] VOJÁČEK, A. *LEP, PLED = Polymer OLED* [online]. 2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: <<http://www.hw.cz/soucastky/lep-amp-pled-polymer-oled.html>>
- [4] LÁNÍČEK, R. *Elektronika: obvody, součástky, děje*. 1. vyd. Praha: BEN, 1998. 479 s. ISBN 80-86056-25-2
- [5] FLOKOVÁ, K. *Fotovoltaické systémy, jako alternativní zdroj elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 37 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [6] JANSSEN, R. *Introduction to polymer solar cells* [online]. 2008 [cit. 2011-04-18]. Dostupné z: <<http://user.chem.tue.nl/janssen/SolarCells/Polymer%20solar%20cells.pdf>>
- [7] KOLÁR, V.; VRÁNA, V. *Elektrické obvody stejnosměrného proudu* [online]. 2007 [cit. 2011-04-10]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_ss_obvody_bc.pdf>
- [8] ĎURIŠ, T. *Jednosměrné a střídavé elektrické merania fotovoltických článkov a modulov*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2009. 157 s., 1 s. příloh. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Vladimír Šály, Ph.D.
- [9] MACDONALD, J. R. *Impedance Spectroscopy: Emphasizing Solid Materials and Systems*. 1. vyd. New York: John Wiley & Sons, 1987. 368 s. ISBN 0-471-83122-0
- [10] BENTEN, H.; KUDO, N.; OHKITA, H.; ITO, S. Layer-by-layer deposition films of copper phthalocyanine derivative; their photoelectrochemical properties and application to solution-processed thin-film organic solar cells. *Thin Solid Films*, 2009, s. 2016-2022.
- [11] AMBROŽOVÁ Ř., J.; BEZDĚKOVÁ, E.; LOUČKOVÁ, P. a kol. Využití ftalocyaninových preparátů šetrných k prostředí k ochraně okruhů chladících vod před růstem řas a sinic. *Chemické listy*, 2007, s. 315-322.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

OLED	organická světlo emitující dioda (organic light emitting diode)
PLED	polymerní světlo emitující dioda (polymer light emitting diode)
OFET	organický palem řízený tranzistor (organic field effect tranzistor)
OPV	organická fotovoltaika (organic photovoltaic)
PCBM	fenyl-C61-methylester kyseliny máselné (phenyl-C61-butyric acid methyl ester)
SMOLED	světloemitující dioda z malých organických molekul (small molecule light emitting diode)
ITO	směsný oxid india a cínu (indium tin oxide)
HOMO	nejvyšší obsazený molekulový orbital (highest occupied molecular orbital)
LUMO	nejnižší neobsazený molekulový orbital (lowest unoccupied molecular orbital)
OTFT	organický tenkovrstvý tranzistor (organic thin film tranzistor)
I	elektrický proud
A	ampér (jednotka proudu)
U	napětí
V	volt (jednotka napětí)
$\Delta\sigma$	změnu elektrické vodivosti fotovoltaického článku v důsledku osvětlení
σ_L	vodivost materiálu při osvětlení
σ_D	vodivost materiálu za tmy (bez osvětlení)
σ	elektrická vodivost
q	elementární náboj
F	intenzita elektrického pole
n_e	hustota elektronů
n_h	hustota děr
μ_e	pohyblivost elektronů
μ_h	pohyblivost děr
I_D	diodový proud (za tmy)
I_S	saturační proud
k_B	Boltzmanova konstanta, $h = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
T	absolutní teplota
K	kelvin (jednotka teploty)
n	faktor ideality diody
OPN	oblast prostorového náboje
I_{INJ}	proud injektovaných elektronů a děr
I_R	rekombinační proud
I_S	saturační proud difúzního procesu
I_{PH}	fotoindukovaný proud
I_{SH}	svodový proud
R_S	sériový odpor solárního článku
R_{SH}	paralelní odpor solárního článku
η	účinnost přeměny energie záření solárního článku na energii elektrickou

P_0	výkon záření dopadajícího na článek o ploše S
P_{MAX}	maximální výkon
I_{SC}	elektrický proud nakrátko při nulovém napětí (Short Circuit)
U_{OC}	napětí naprázdno při nulovém proudu (Open Circuit)
FF	faktor plnění (Fill Factor)
$M(\lambda)$	spektrální hustota dopadajícího elektromagnetického záření
λ	vlnová délka
h	Planckova konstanta, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s
c	rychlost světla ve vakuu, $c = 3 \cdot 10^8$ m.s ⁻¹
G_{SH}	paralelní vodivost solárního článku
Z	impedance
Y	admitance
R	rezistance
R_s	sériová rezistance
R_p	paralelní rezistance
X	reaktance
X_s	sériová reaktance
X_p	paralelní reaktance
B	susceptance
B_s	sériová susceptance
B_p	paralelní susceptance
G	konduktance
G_s	sériová konduktance
G_p	paralelní konduktance
C	kapacita
C_c	geometrická kapacita
C_s	sériová kapacita
C_s'	reálná složka sériové kapacity
C_s''	imaginární složka sériové kapacity
C_p	paralelní kapacita
C_p'	reálná složka paralelní kapacity
C_p''	imaginární složka paralelní kapacity
ε	komplexní permitivita
M	modulární funkce
ε_0	permitivita vakua
$F(\omega)$	frekvenční spektrum signálu (obraz Fourierovy transformace signálu)
$i = \sqrt{-1}$	imaginární jednotka
ω	úhlový kmitočet
$f(t)$	transformovaný (vstupní) spojitý signál
t	čas