

**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Patricie Klosse

Elektrické vlastnosti organických vrstev pro sluneční články

Katedra makromolekulární fyziky

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Jiří Toušek, CSc.

Studijní program: Učitelství fyziky pro střední školy

Studijní obor: FMUPN

Praha 2023

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce doc. RNDr. Jiřímu Touškovi, CSc. za odborné konzultace a vedení práce.

Rovněž bych chtěla poděkovat svojí konzultantce práce doc. RNDr. Janě Touškové, CSc. za pomoc s pochopením a její velkou trpělivost.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V dne.....

podpis

Název práce: Elektrické vlastnosti organických vrstev pro sluneční články

Autor: Patricie Klosse

Katedra / Ústav: Katedra makromolekulární fyziky

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Jiří Toušek, CSc., Katedra makromolekulární fyziky

Abstrakt: Cílem práce je změřit difúzní délku a pohyblivost nosičů náboje ve vrstvách polymeru MEH-PPV v závislosti na koncentraci nanočástic SiO₂. Vzorčky MEH-PPV obsahovaly částice s objemovými koncentracemi: 0,0 %; 3,5 %; 6,0 %; 18,5 %; 25,0 %. Difúzní délka byla měřena metodou povrchového fotonapětí (SPV). Difúzní délka u vzorků s nižšími koncentracemi: 0,0 %; 3,5 %; 6,0 % vyšla přibližně konstantní – asi 12 nm. U vzorků s koncentracemi 18,5 %; 25,0 % nebylo možné difúzní délku určit vzhledem k vlivu přídavných pastí vnášených nanočásticemi. Pohyblivost byla změřena metodou extrakce náboje působením lineárně rostoucího fotonapětí CELIV. Pohyblivost vyšla u vzorků 0,0 %; 3,5 %; 6,0 %; 18,5 %; s nižší koncentrací nanočástic v řádu 1E-06, ale u vzorku s koncentrací nanočástic 25 % se pohyblivost zvýšila o řád. To vysvětlujeme tím, že částice SiO₂ zlepšily vlastnosti materiálu.

Klíčová slova: organické vrstvy | difúzní délka | pohyblivost | nanočástice | polymer MEH-PPV

Title: Electrical properties of organic layers for solar cells

Author: Patricie Klosse

Department: Department of Macromolecular Physics

Supervisor: doc. RNDr. Jiří Toušek, CSc., Department of Macromolecular Physics

Abstract: The aim of this work is to measure the diffusion length and mobility of charge carriers in MEH-PPV polymer layers as a function of SiO₂ nanoparticle concentration. MEH-PPV samples contained particles with volume concentrations: 0.0%; 3.5%; 6.0%; 18.5%; 25.0%. The diffusion length was measured by the surface photovoltage (SPV) method. The diffusion length for the samples with lower concentrations: 0.0%; 3.5%; 6.0% was approximately constant at about 12 nm. For samples with concentrations of 18.5%; 25.0%, the diffusion length could not be determined due to the effect of additional traps introduced by the nanoparticles. The mobility was measured by charge extraction by applying a linearly increasing photovoltage method CELIV. The mobility came out to be in the order of 1E-06 for the samples 0.0%; 3.5%; 6.0%; 18.5%; with lower nanoparticle concentration, but the mobility increased by an order of magnitude for the sample with nanoparticle concentration of 25%. This is explained by the fact that the SiO₂ particles improved the material properties.

Keywords: organic layers | diffusion length | mobility | nanoparticles | polymer
MEH-PPV

Obsah

Úvod	1
1. Teoretická část	2
1.1. Organické materiály	2
1.2. Molekulární orbitaly	3
1.3. Vazby	3
1.4. Konjugované sloučeniny	4
1.5. Polymery	4
1.6. Excitace konjugovaných polymerů	5
1.7. Excitony	6
1.8. Poruchy v polymerech	6
1.9. Přenos náboje v polymerech	8
2. Měřený materiál a vzorky	9
3. Metoda povrchového fotonapětí (SPV)	10
2.1. Teorie	10
2.2. Experiment, výsledky a diskuse	15
4. Metoda extrakce náboje působením lineárně rostoucího napětí (CELIV)	20
4.1. Teorie	20
2.3. Experiment, výsledky a diskuse	23

Závěr	26
Seznam použité literatury	27
Seznam tabulek	30
Seznam použitých zkratek	31

Úvod

V roce 2020 bylo v České republice nejvíc vyprodukované elektřiny z fosilních paliv, a to více než 40 %, a dále pak z jaderné energie konkrétně více než 36 %. Jsme tedy stále zcela závislí na vyčerpitelných zdrojích energie. Ve stejném roce se vyráběla necelá 3 % spotřebované elektřiny v solárních elektrárnách (1). Jedná se však o fotovoltaické panely vyrobené z některé z forem křemíku. Z hlediska rozvoje využívání obnovitelných zdrojů je potřebné tyto zdroje dále zkoumat a zaměřit se i na jiné materiály, které mají potenciál pro využití v solární energetice.

Ve fotovoltaických článcích je třeba použít polovodičový materiál, v současnosti se obvykle na uvedené účely používá křemík, nebo polovodičové sloučeniny. Výroba těchto anorganických polovodičů je finančně náročná a články z nich vyrobené obvykle mají účinnost asi 20 %. V současnosti zkoumanými nicméně ještě hromadně nevyužívanými materiály pro zmíněné účely jsou polymery. Účinnost polovodičových článků vyrobených z polymerů je málo nad 10 %, tedy nižší než účinnost článků vyrobených z anorganických materiálů. Výhodou je však mnohem jednodušší, a tedy i levnější technologie výroby článků a značná úspora materiálů, protože vzhledem k poměrně vysokým absorpčním koeficientům stačí vyrábět články tenkovrstvé s tloušťkou kolem 100 nm.

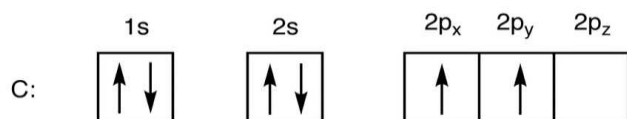
V průběhu posledního desetiletí proběhly různé pokusy o zlepšení jejich účinnosti. Jedním z nich je přidávání anorganických nanočástic do polymeru, což prokázalo velký potenciál pro zvýšení absorpčního oboru světla a snížení rekombinace nosičů náboje (2), případně struktury polymerů.

Zda je materiál vhodný pro použití jako polovodič do fotovoltaických článků určuje řada parametrů. V této práci se budeme zabývat polymerem MEH-PPV a určovat dva z důležitých parametrů v závislosti na koncentraci nanočástic SiO_2 . Zjišťovat budeme pohyblivost nosičů náboje a difúzní délku, což jsou transportní parametry, které přímo ovlivňují účinnost fotovoltaických článků. Difúzní délku budeme určovat metodou povrchového fotonapětí a pohyblivost náboje metodou extrakce náboje působením lineárně rostoucího fotonapětí CELIV.

1. Teoretická část

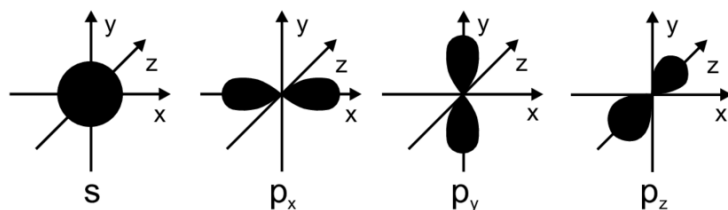
1.1. Organické materiály

V práci se budeme věnovat organickým sloučeninám. Organické sloučeniny je historické označení sloučenin, které pocházejí z živých organismů. Společnou vlastností všech organických sloučenin je to, že obsahují uhlík. Nachází se v periodické tabulce ve sloupci 4A. Elektronová konfigurace atomu je $1s^1 2s^2 2p^2$, v této konfiguraci může uhlík vytvářet jen dvě kovalentní vazby (3).



Obrázek 1 Elektronová konfigurace uhlíku, upraveno (4)

Orbitaly s vypadají jako koule v jejichž středu se nachází atomové jádro. Naproti tomu p orbitaly mají tvar činky s jádrem uprostřed. Orbitaly p ve stejné slupce jsou navzájem kolmé, jak je ukázáno na obrázku 2.

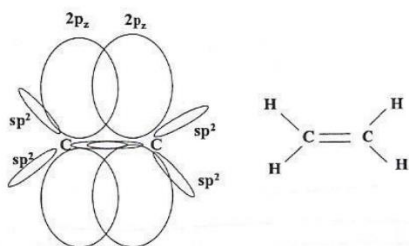


Obrázek 2 Tvary orbitalů (5) (6)

Empiricky však bylo zjištěno, že uhlík je schopen tvořit čtyři rovnocenné vazby. To je umožněno stavem zvaným hybridizace. Všechny tři orbitaly $2p$, se mohou kombinovat s orbitalem $2s$. Vzniknou tak 4 nesymetrické orbitaly sp^3 , číslice 3 zde značí počet p -orbitalů. Každý z nich má jeden větší a jeden menší lalok přičemž stejně velké laloky jsou umístěny tak, že jejich vrcholy svírají úhel $109,5^\circ$, takže orbitaly směřují do čtyř rohů tetraedru. V této konformaci se orbitaly nachází například ve sloučenině methan CH_4 . Naproti tomu ve sloučenině ethen se uhlík nachází v hybridizaci sp^2 . V této konformaci se orbital $2s$ kombinuje pouze s dvěma orbitaly $2p$.

1.2. Molekulární orbitály

Molekulární orbitály popisují pravděpodobnost výskytu elektronu v rámci molekuly. Teorie lineární kombinace atomových orbitalů říká, že molekulové orbitály vznikají lineární kombinací orbitalů atomových. Ke kombinaci dojde překryvem atomových orbitalů, jak je vidět na obrázku 3. Elektrony jsou sdílené mezi více atomy a nepřísluší pouze jednomu atomu, ale celé molekule. (3) (7)

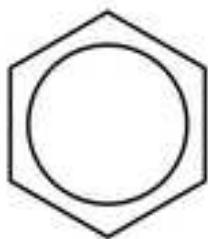


Obrázek 3 Orbitály ethenu (6)

1.3. Vazby

Kovalentní vazby, které vznikají v ose spojnice atomových jader se nazývají σ vazby. Vzájemným překrýváním elektronových oblaků elektronů, které se neúčastní této vazby, dochází k vytvoření vazby π . Tyto elektrony se volně pohybují po celém benzenovém kruhu – kruh značí vazbu, způsobenou π elektrony, rovné čáry označují vazbu σ , jak vidíme na obrázku 4. Zobrazení je alternativou mezomerního vzorce často používaného pro benzen a další uhlovodíky.

Vazby jsou tvořeny kombinací orbitalů. Kombinace může být vazebná – molekulový orbital má nižší energii než orbitály samostatně, nebo antivazebná, molekulový orbital má vyšší energii než orbitály samostatně. (3)



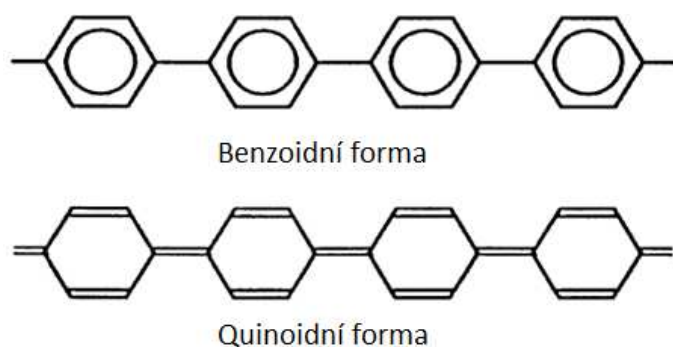
Obrázek 4 Benzen (8)

1.4. Konjugované sloučeniny

V molekulách organických sloučenin se mohou střídá mezi atomy uhlíku vazby jednoduché s násobnými. Konjugované sloučeniny jsou sloučeniny, u kterých se dvojná vazba střídá s jednoduchou. Tyto sloučeniny mají několik speciálních vlastností (mají díky typu vazby vysokou stabilitu a polovodivé vlastnosti). Například, proti jednoduché vazbě C-C v alkanech, ve kterých vzniká jednoduchá vazba překryvem sp^3 orbitalů obou uhlíků, v konjugovaném *dienu* je jednoduchá vazba daná překryvem sp^2 orbitalů obou atomů. U sp^2 je podíl s orbitalu vyšší než u sp^3 . Proto jsou u sp^2 elektrony blíže jádra. Příkladem může být buta-1,3-dien nebo benzenová jádra.

1.5. Polymery

Polymer je dlouhá makromolekula, obvykle organického původu. Jako makromolekula se označuje molekula s hmotností větší než 10^4 g/mol. Polymer může být složen z jednoho nebo více druhů atomů a jeho vlastnosti se nezmění přidáním nebo odebráním několika konstitučních jednotek. Aby došlo k vytvoření uhlíkatého řetězce polymeru, musí se k sobě atomy uhlíku dvou molekul dostatečně přiblížit tak, aby mezi nimi vznikla σ vazba. Přitom mohou nastat dvě energeticky odlišné konformace, jak vidíme na obrázku (9). Zatímco u benzoidní formy jsou uhlíky mezi sebou vázány jednoduchou vazbou, v quinoidní konformaci je mezi benzenovými kruhy vazba dvojná. (9)

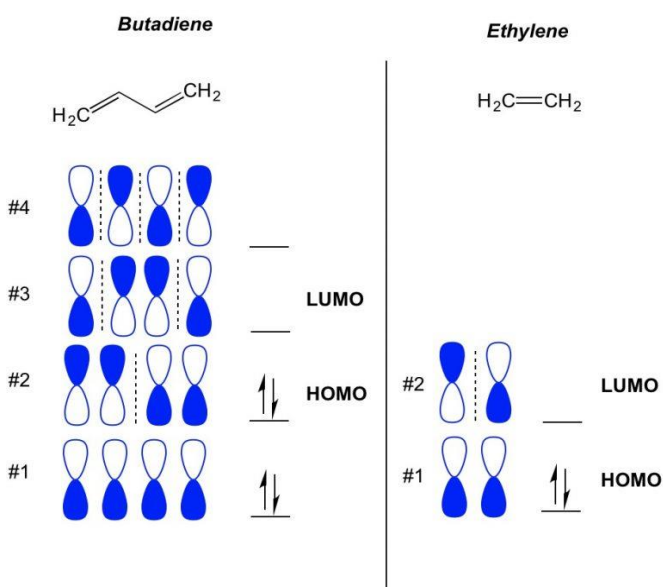


Obrázek 5 Benzoidní a quinoidní forma (10)

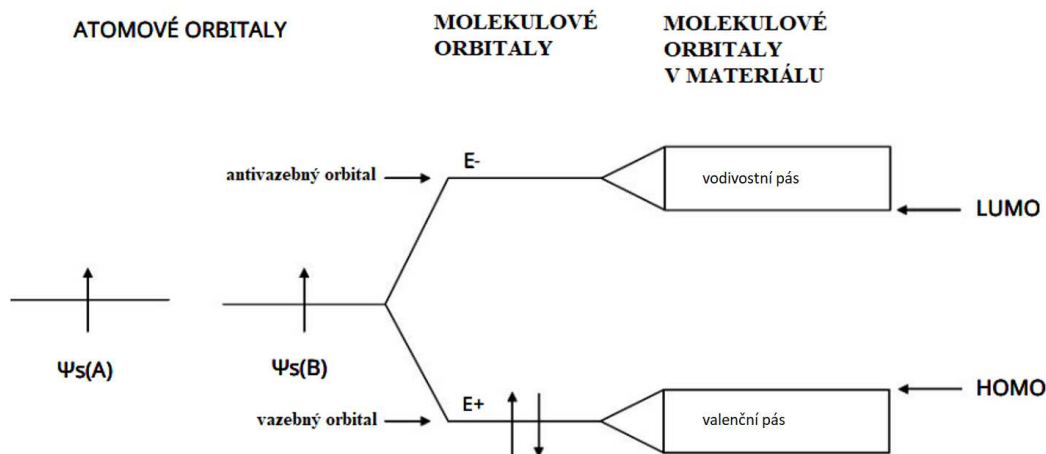
Polymery jsou dalším příkladem konjugovaných sloučenin, když obsahují střídavě jednoduchou a dvojnou vazbu. Průměrná vzdálenost, ve které konjugovaný polymer neobsahuje poruchu, se nazývá konjugační délka.

1.5. Excitace konjugovaných polymerů

V základním stavu jsou v molekule obsazené pouze vazebné orbitály. Avšak dodáním energie dojde k přechodu elektronu z nejvyšší obsazené hladiny do nejnižší neobsazené, která je antivazebná (3). Tento děj nazýváme excitace. Abychom věděli, jak se bude konjugovaná molekula chovat, není potřeba brát v úvahu celý systém orbitalů, ale stačí uvažovat pouze nejvyšší obsazený molekulový orbital nazývaný HOMO a nejnižší neobsazený molekulový orbital nazývaný LUMO. (9)



Obrázek 6 Orbitaly LUMO a HOMO (11)



Obrázek 7 Molekulové orbitály, upraveno, (6)

1.6. Excitony

Způsob, jak popsat transport náboje v rámci energetických pásů, je více podobný popisu dějů v anorganických polovodičích (9). Excitaci můžeme popsat pomocí částice zvané exciton. Exciton je neutrální částice, která se skládá z elektronu a díry. Vzhledem k velké coulombovské síle a nízké hodnotě elektrické permitivity organických materiálů je vazebná energie excitonu poměrně vysoká.

Elektron se excituje z valenčního pásu do vodivostního. Na místě elektronu zbude kladná díra. Díru působením coulombovských sil obklopí zbylé elektrony. Excitovaný elektron je tedy odpuzován a brání to rekombinaci. (9) K excitaci elektronu může docházet například v důsledku dopadu fotonů.

1.7. Poruchy v polymerech

Soliton

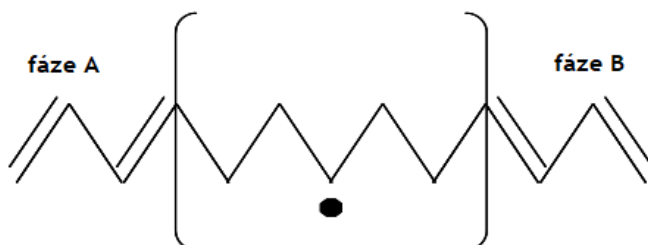
Soliton je strukturální porucha v konjugovaných polymerech typu trans. (6) Nastává při změně fáze v polymerním řetězci – pokud dvojná vazba byla na každém sudém uhlíku, po změně fáze bude na každém lichém. Soliton tvoří fázovou hranici mezi dvěma fázemi. Je delokalizovaný přes několik uhlíkových atomů. Interval mezi oběma fázemi obsahuje obvykle více než sedm uhlíků z řetězce. Rozhraní mezi oběma fázemi obsahuje nespárovaný elektron, který je v nevazném stavu, jak je vidět na obrázku 8.

Soliton mění potenciální energie elektronů v jeho blízkosti. Zmíněný nevázaný elektron se energeticky nachází uprostřed zakázaného pásu a nazýváme jej taky neutrální soliton. Pokud uprostřed zakázaného pásu jsou dva elektrony jedná se o záporný soliton, pokud naopak nepárový elektron chybí, jde o soliton kladný.

Solitony ovlivňují optické vlastnosti materiálů. Přechody v zakázaném pásu se projevují v absorpčních spektrech v infračervené oblasti.

Tabulka 1 Druhy solitonů

Soliton	Náboj	Spin
Neutrální	0	1/2
Kladné	+1	0
Záporné	-1	0



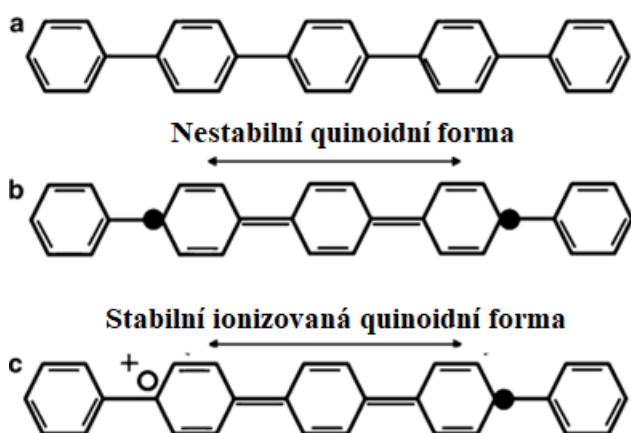
Obrázek 8 Soliton, upraveno (6)

Polarony

Jedná se o kombinaci náboje a doprovázející poruchy mřížky/polymerního řetězce.

Polaron je strukturální porucha, která se skládá ze dvou solitonů. Polarony mají neutrální, kladný nebo záporný náboj a spin podle toho, z jakých solitonů jsou složeny. Celkový náboj spojené částice bude součtem nábojů jednotlivých solitonů. Stejně tak

spin bude součtem spinů jednotlivých. Na obrázku 9 vidíme znázornění dvou různých typů polaronů. Zde jsou příslušné rozdílné fáze benzoidní a quinoidní.



Obrázek 9 (12) Verze a je polymer bez polaronu, verze b ukazuje polaron, u kterého je quinoidní forma obklopena benzoidní a obsahuje dva nevázané elektrony, verze c je stabilnější než b, místo jednoho nevázaného elektronu má díru, jedná se o iont.

1.9. Přenos náboje v polymerech

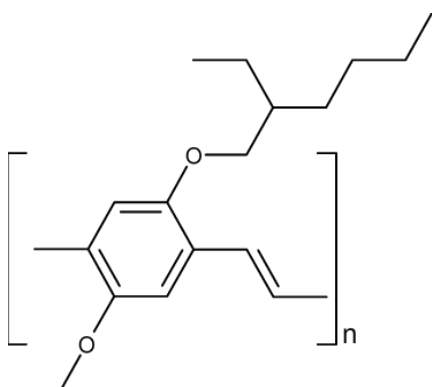
Transport náboje nastává nekoherentními přeskoky mezi sousedními transportními místy, uvnitř molekul a mezi nimi a nazývá se hopping. Proces je teplotně závislý.

Převládá-li transport v pásech, je možné přenos pomocí polaronů neuvažovat.

2. Měření materiál a vzorky

Měření bylo prováděno na polymeru poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-fenylenvinyle], zkráceně MEH-PPV s nanočásticemi SiO₂. Strukturální vzorec MEH-PPV můžeme vidět na obrázku 10. Úkolem bylo zjistit vliv různých koncentrací nanočástic na difúzní délku a pohyblivost nosičů náboje, případně na další parametry zkoumaných vzorků. Vzorky nám byly poskytnuty pracovníky Centra polymerních systémů Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Zde jen naznačíme stručný postup jejich přípravy.

Materiál MEH-PPV byl rozpuštěn v chloroformu a do roztoku byly přidány nanočástice SiO₂ kulovitěho tvaru o průměru 5 – 15nm, takže vznikl kompozitní komplex. Objemové poměry mezi nanočásticemi a polymerem byly: 0%, 3,5%, 6,0%, 18,5%, 25,0%. Rotačním nanášením na skleněnou podložku s vodivou vrstvou zkráceně pojmenovanou ITO, byly vytvořeny tenké vrstvy MEH-PPV o tloušťce 110 nm. ITO je slitinou o následujícím složení: 90% In₂O₃ a 10% SnO₂.



Obrázek 10 Strukturální vzorec MEH-PPV (13)

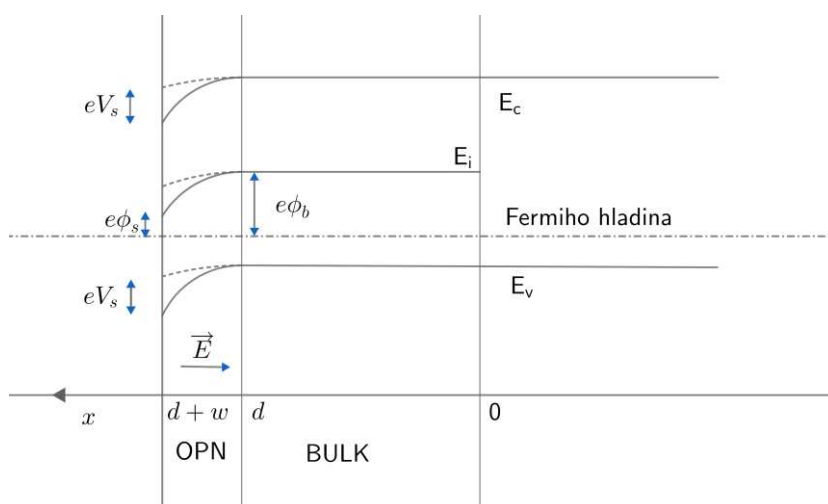
3. Metoda povrchového fotonapětí (SPV)

3.1. Teorie

Metoda SPV byla zobecněna na Katedře makromolekulární fyziky tak, že je nyní aplikovatelná na vzorky libovolné tloušťky a dovoluje určit kromě difúzní délky také šířku oblasti prostorového náboje (14). Je to technika pro charakterizaci polovodičů, která je založena na analýze změn povrchového potenciálu po osvětlení. V řadě případů vzniká povrchový potenciál pouze vlivem různých stavů na povrchu vzorku, ale někdy je potřeba aplikovat na povrch vhodnou elektrodu, takže se vytvoří dioda-Schottkyho kontakt, nebo přechod P-N. Díky SPV je možné zjistit difúzní délku excitonů, šířku OPN a bulku. My budeme zmíněné hodnoty zjišťovat u materiálu MEH-PPV. Jeho strukturální vzorec je na obrázku 10.

Budeme pracovat s polovodičem typu P. Po osvětlení vznikají excitony, které jsou na rozhraní OPN a neutrální oblasti (bulku) disociovány.

Energetické pásové schéma typu P polovodiče, který obsahuje OPN a bulk, vidíme na obrázku 11.

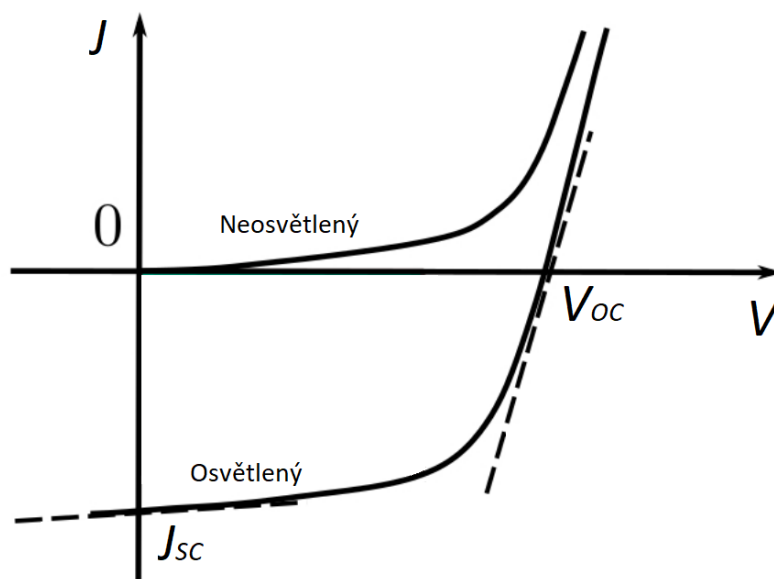


Obrázek 11 Energetické schéma valenčního a vodivostního pásu osvětleného a neosvětleného, d značí šířku bulku, w značí šířku OPN, ϕ_s povrchový potenciál a ϕ_b je objemový potenciál

Na vodorovné ose je znázorněná vzdálenost, na svislé ose energie. Plnou čarou jsou znázorněny hranice energetických pásů po vytvoření OPN. Přerušovaná čára znázorňuje situaci po osvětlení vzorku, kdy se energetické pásy narovnávají. Kontaktní

rozdíl potenciálů označujeme jako V_s . Na schématu je OPN oblast, ve které je vodivostní a valenční pás zakřivený.

Pro vysvětlení pojmů proud nakrátko a napětí naprázdno uvedeme voltampérové charakteristiky polovodičové diody před a po osvětlení.



Obrázek 12 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku, za tmy a po osvětlení

Schematicky vidíme voltampérovou charakteristiku na obrázku 12. Křivka procházející počátkem je voltampérová charakteristika neosvětleného vzorku, naproti tomu obdobná křivka posunutá o něco níže, je voltampérová charakteristika vzorku osvětleného. V_{oc} označíme napětí naprázdno a J_{sc} proud nakrátko.

Celkový proud, označený J je vyjádřen následujícím vztahem:

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right) - J_f, \quad [1]$$

kde n je faktor kvality, k je Boltzmannova konstanta, T je absolutní teplota, J_s je nasycený proud, J_f je světlem generovaný proud.

Pokud chceme vyjádřit napětí naprázdno, dosadíme $J = 0$. Po úpravách vyjde vzorec:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{e} \ln\left(1 + \frac{J_f}{J_s}\right). \quad [2]$$

Pokud je $J_f \ll J_s$, pak můžeme dle Taylorova rozvoje přibližně napsat rovnici:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{e} \left(\frac{J_f}{J_s} \right). \quad [3]$$

Vidíme, že fotogenerovaný proud V_{oc} je úměrný napětí naprázdno J_f . Proto nám stačí vypočítat fotogenerovaný proud a ten porovnávat s měřeným napětím, abychom získali parametry měřeného spektra.

Uvažujeme, že kvantový výtěžek fotogenerace excitonů je roven jedné a že proudy vznikající z excitonů, které jsou generovány v bulku a v OPN jsou nezávislé (14). Celkový proud se rovná součtu proudů z bulku a z OPN:

$$J_f = J_{BULK} + J_{OPN} \quad [4]$$

Neutrální oblast

Proud z bulku bude záviset na množství excitonů, které se dostalo na rozhraní OPN a bulku. Použijeme difúzní rovnici. Rovnice [5] je rovnicí pro tlustý vzorek:

$$D \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{\tau} = -\alpha I_0 (1 - R) e^{-\alpha x}, \quad [5]$$

kde D [cm²/s] je difúzní koeficient, Δn [1/cm³] koncentrace fotogenerovaných excitonů, x [cm] souřadnice, τ [s] střední doba života excitonů, I_0 [1/s] je fotonový tok dopadající na vzorek a α [cm⁻¹] absorpční koeficient. R je člen vyjadřující reflexi na povrchu vzorku. D lze vyjádřit vztahem

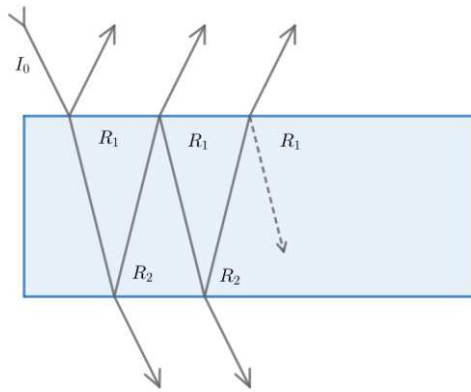
$$D = \frac{L^2}{\tau}, \quad [6]$$

kde L je difúzní délka.

Pracujeme-li s tenkým vzorkem, člen na pravé straně rovnice [5] bude mít na pravé straně člen, který vyjadřuje mnohonásobnou reflexi a absorpci světla. (15)

$$D \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{\tau} = -\alpha I_0 (1 - R_1) \frac{\exp(-\alpha x) + R_2 \exp(-\alpha(2h-x))}{1 - R_1 R_2 \exp(-2\alpha h)}, \quad [7]$$

kde $h = w + d$, R_1 je reflexe na osvětlené straně vzorku a R_2 na straně protilehlé.



Obrázek 13 Reflexe na vzorku

Okrajové podmínky difúzní rovnice popisuje na volném povrchu vztah:

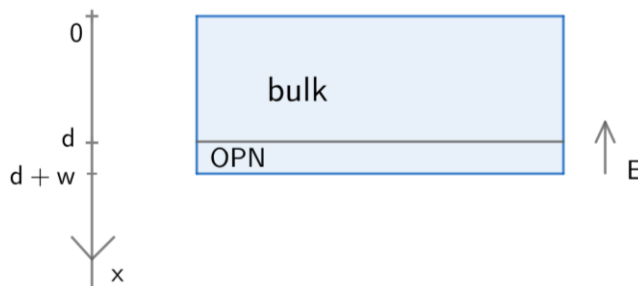
$$D \left. \frac{d \Delta n}{dx} \right|_{x=0} = s \Delta n(0), \quad [8]$$

kde s [cm/s] je rychlost povrchové rekombinace.

Na rozhraní s OPN odpovídá okrajovým podmínkám rovnice:

$$\Delta n(d) = 0 \quad [9]$$

Souřadnice používáme stejné, jako je uvedeno na schématu 14.



Obrázek 14 Schéma vzorku s OPN a bulkem

Proud z bulku vyjádříme rovnicí pro difúzní proud:

$$J_{BULK} = eD \left. \frac{d \Delta n}{dx} \right|_{x=d} \quad [10]$$

Výsledek je uveden v práci (15).

Oblast prostorového náboje

V OPN se náboje pohybují driftem v elektrickém poli. Předpokládáme, že koncentrace excitonů se v čase nemění.

Proud z OPN pro elektrony, můžeme vyjádřit pomocí rovnice kontinuity jako:

$$\frac{\partial \Delta n(x)}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{dJ_{OPN}}{dx} - \frac{\Delta n(x)}{\tau} + g(x). \quad [11]$$

Obdobnou rovnici lze použít i pro díry.

Časová změna koncentrace $\frac{\partial \Delta n}{\partial t}$ excitonů v oblasti OPN je ve stacionárním případě rovna nule. $\frac{dJ_{OPN}}{dx}$ hustota proudu z OPN a člen $\frac{\Delta n(x)}{\tau}$ vyjadřuje rekombinaci excitonů v OPN, $g(x)$ je označení pro rychlost generace excitonů v OPN.

Místo rekombinačního členu na pravé straně rovnice [11] zavedeme na základě Shockley-Ramoova teorému (16) funkci $G(0,1)$ – zisk, který udává příspěvek každého fotogenerovaného nosiče k proudu ve vnějším obvodu.

$$J_{OPN} = - \int_d^{d+w} eGg(x) \quad [12]$$

a po dalších úpravách, integrování rovnice a za předpokladu mnohonásobné reflexe platí (14):

$$J_{OPN} = a_1 \exp(-ad) G(1 - \exp(-aw)) + a_2 G(1 - \exp(-aw)), \quad [13]$$

$$\text{kde } a_1 = \frac{eI_0(1-R_1)}{(1-R_2R_1\exp(-2ah))} \quad \text{a} \quad a_2 = \frac{eI_0(1-R_1)R_2\exp(-ah)}{(1-R_2R_1\exp(-2ah))}.$$

Celkový fotogenerovaný proud

Celkový fotogenerovaný proud, jak je uvedeno výše, určíme podle rovnice [4]:

$$J_f = J_{BULK} + J_{OPN}$$

3.2. Experiment, výsledky a diskuse

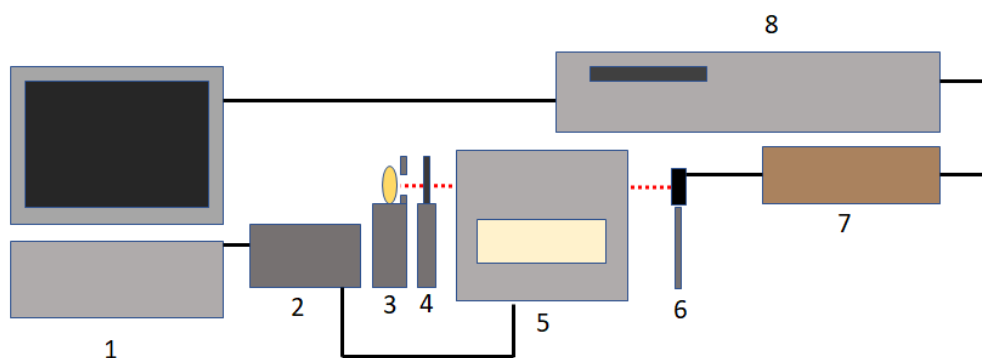
Cílem experimentu bylo zjišťování difúzní délky, šířky OPN a šířky bulku d . Zkoumáme výše zmíněné parametry organického polovodiče MEH-PPV v závislosti na koncentraci nanočástic SiO_2 . Výše uvedené parametry byly získané fitováním teoretického průběhu na experimentální body.

V experimentu byly v polovodiči vlivem světla generovány excitony. Materiál je připraven deponováním roztoku materiálu v chloroformu na podložku sklo/ITO. OPN se spontánně vytváří na rozhraní ITO a MEH-PPV. Díky vztahu $V_{oc} = \frac{nkT}{e} \left(\frac{J_f}{J_s} \right)$.

[3] stačilo místo proudu měřit napětí. Napětí generované na vzorku bylo snímáno pomocí kapacitní vazby. Jako izolant byla použita Mylarová folie a ITO tvořilo elektrody kondenzátoru. Sestavili jsme uvedeným způsobem kondenzátor, jehož přibližné schéma ukazuje obrázek 15. Na kondenzátoru bylo měřeno indukované napětí. Na sestavu bylo svíceno ze strany bulku. Světlo ze žárovky procházelo přerušovačem světla a následně monochromátorem, poté dopadalo na vzorek, spektrum fotonapětí bylo zaznamenáváno lock-in zesilovačem. Před samotným měřením bylo zjišťováno spektrum intenzity světla po průchodu sklem, ITO a Mylarem pomocí spektrálně nezávislého detektoru (vakuového termočláneku), který byl umístěn za výstupní štěrbinou monochromátoru. Termočlánek je tvořen komůrkou s okénkem z LiF. Uvnitř je terčik, který absorbuje světlo čímž se zahřívá. Zesoda k němu doléhá termočlánek, který reaguje na zvýšenou teplotu generováním napětí. Napětí se přepočítává na počet absorbovaných fotonů.



Obrázek 15 Schéma sestavy vzorku při metodě SPV



Obrázek 16 Schéma aparatury na měření spekter fotonapětí

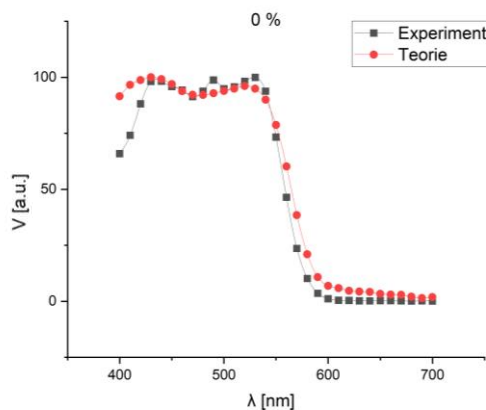
Uspořádání měřicí aparatury vidíme na obrázku 16. Jednotlivé komponenty jsou následující: 1. Počítač 2. Krokový motor 3. Žárovka 4. Chopper (přerušovač světla) 5. Monochromátor 6. Vzorek 7. Elektrometr 8. Lock-in zesilovač. Na počítači byl nastaven krok a počáteční a konečná vlnová délka. Měření začínalo na 400 nm vlnové délky a končilo na 700 nm. Přerušování bylo konstantně 11HZ.

Měření probíhalo při pokojové teplotě tak, že na počítači byl nastaven příslušný rozsah a krok měření. Vlnová délka světla byla nastavována z monochromátoru krokovým motorem řízeným počítačem. Měřené fotonapětí bylo průměrované z více hodnot, získaných v časovém úseku, jehož délka závisela na rozptylu těchto hodnot.

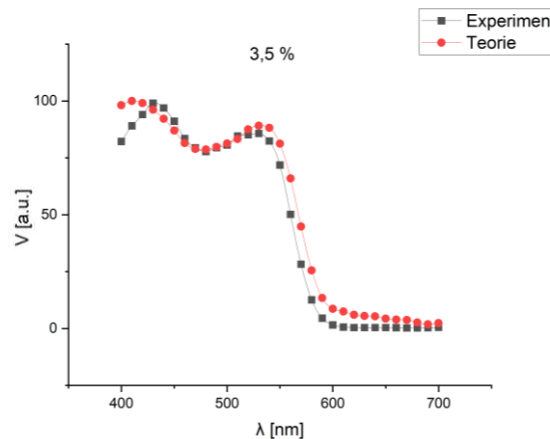
Měřené napětí při různých vlnových délkách světla, bylo přepočítáno na konstantní počet fotonů, vydělením naměřenou intenzitou pro jednotlivé vlnové délky. Pro získání hledaných parametrů byl použit program, ve kterém lze na teoretickou závislost napětí na vlnové délce fitovat hledané parametry tak, aby bylo dosaženo co nejlepší shody s experimentálně zjištěným spektrem. Program pracoval se spektrem absorpčních a reflexních koeficientů pro vzorky MEH-PPV bez nanočástic. Konečné grafické zpracování bylo provedeno v programu ORIGIN. Příslušné nařizované parametry jsou dále uvedeny v tabulce 1.

Teoretické a experimentální křivky závislosti fotonapětí na vlnové délce ukazují grafy 1-6. Grafy 5 a 6 fotonapětí na vzorkách s 18,5 % a 25,0 % nanočástic se značně odlišují od grafů 1 až 3 pro vzorky s nižší koncentrací nanočástic. Může to být způsobeno použitými absorpčními koeficienty. Již u vzorku s 18,5% a pak ještě významněji

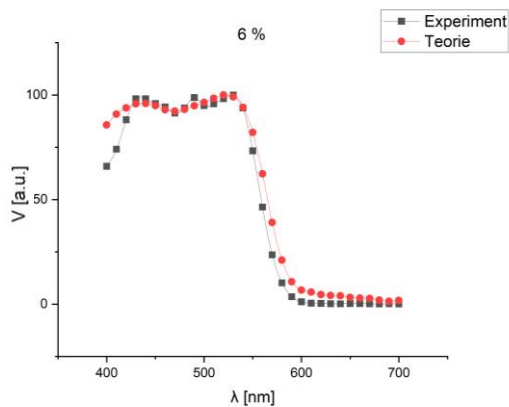
u vzorku s 25 % příměsí se mohou absorpční koeficienty poněkud odlišovat od koeficientů čistého materiálu.



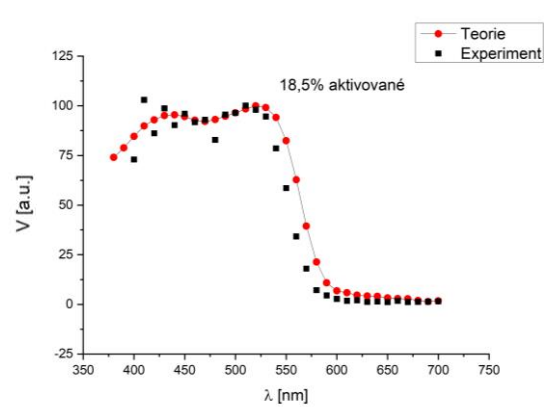
Graf 1 Normované spektrum generovaného fotonapětí, koncentrace nanočástic 0%,



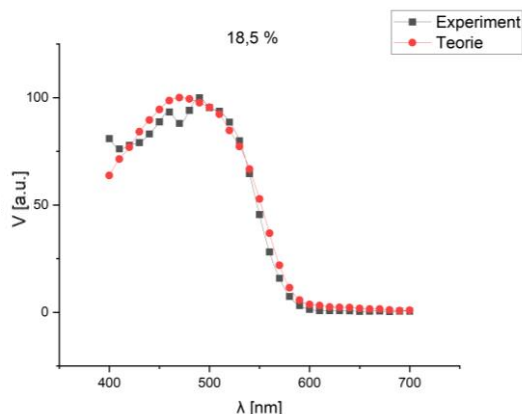
Graf 2 Normované spektrum generovaného fotonapětí, koncentrace nanočástic 3,5%



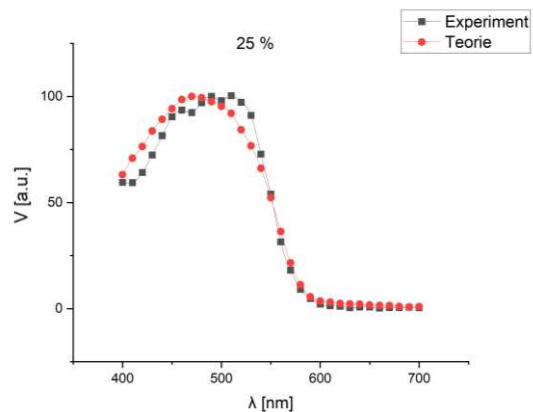
Graf 3 Normované spektrum generovaného fotonapětí, koncentrace nanočástic 6 %



Graf 4 Normované spektrum generovaného fotonapětí měřené do 24 hodin po aktivaci, koncentrace nanočástic 18,5 %,



Graf 5 Normované aktivované spektrum, víc než týden po aktivaci, generovaného fotonapětí, koncentrace nanočástic 18,5 %,



Graf 6 Normované spektrum, delší dobu po aktivaci generovaného fotonapětí, koncentrace nanočástic 25 %,

Tabulka 2 Difúzní délka L , šířka OPN w a šířka bulku d pro různé objemové koncentrace nanočástic

Koncentrace SiO ₂	0%	3,5%	6%	18,5%	25,0%
L [nm]	10±2	13±2	12±2	Neurčeno	Neurčeno
w [nm]	10±2	37±2	18±2	85±2	85±2
d [nm]	100	92	86	25	25

Chyby jsme určovali u difúzní délky a šířky OPN. Šířka bulku je přímo závislá na šířce OPN, chybu jsme tedy neurčovali. Chyba byla určovaná následovně. Prvním krokem bylo udělat nejlepší fit. Poté byla změněna hodnota veličiny, jejíž chyba byla zjišťována. Ostatními veličinami byl fit vždy vylepšen tak, aby byl co nejpodobnější fitu, který byl na začátku. Vždy pak se sledovalo, kdy už nelze graf nařítovat stejně dobře, jako při hodnotě původní.

Difúzní délka je značená L , šířka OPN w a šířka bulku d . Šířka OPN se zvětšující se koncentrací příměsi roste, a naopak šířka bulku se snižuje. To ukazuje na zvýšení odporu materiálu. Musíme ovšem uvážit, že v případě velkých koncentrací nanočástic, jsou tyto parametry méně spolehlivé. Difúzní délka byla přibližně konstantní (asi 12 nm) u vzorků bez příměsi nanočástic a s jejich nižší koncentrací. U vzorků s vyšší koncentrací nebylo možné difúzní délku určit.

Vzorky s vyšší koncentrací 18,5 % a 25 % byly připraveny později. První měření neodpovídala modelu SPV. Vzorky jsme aktivovali pomocí krátkého osvětlení spektrem žárovky. Vzorek 18,5 % jsme měřili do 24 hodin po zaktivování. Měření je

na grafu 4 a spektrum je podobné vzorkům s nižší koncentrací. Naproti tomu měření, které probíhalo týden po aktivaci už má charakter jiný, jak je vidět na grafu 5. Vzorek s 25 % jsme měřili delší dobu po aktivaci a graf 6 byl obdobný jako graf vzorku s 18,5 % měřený delší dobu po aktivaci.

Pro vysvětlení získaných výsledků uvažujeme, že nanočástice vnášejí do polymeru pravděpodobně hluboké pasti. Vzorky s nízkou koncentrací SiO₂ dobře vyhovují modelu SPV, avšak v případě vzorků s velkou koncentrací, se již vliv pastí uplatňuje a nelze jejich spektrum podle tohoto modelu vyhodnotit. Aktivací se pasti zaplní, takže neprobíhá interakce pásu s pastmi a vzorky s velkou koncentrací nanočástic se chovají jako vzorky bez vlivu pastí (tedy podobně jako vzorky na grafech 2 a 3), což ukazuje graf 4. Difúzní délka 11 nm, vzorku s koncentrací 18,5 % do 24 hodin po aktivaci, se těsně přibližuje k hodnotám určeným u vzorků s nízkou koncentrací nanočástic. S časem se zaplněné pasti začnou postupně vyprazdňovat, tak jak probíhá jejich interakce s pásem. Tato situace odpovídá „přechodnému“ nestacionárnímu stavu s neurčitou difúzní délkou (grafy 5 a 6). Poznamenejme, že spektrum vzorků s nízkými koncentracemi nanočástic se aktivací nezměnilo, což ukazuje, že vliv pastí se projevuje až od určitých koncentrací.

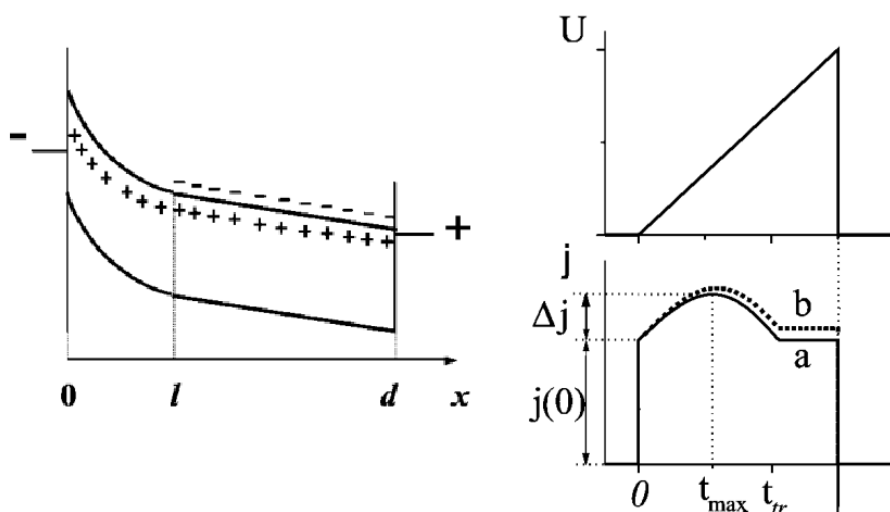
Zvětšená šířka oblasti prostorového náboje u vzorků s velkou koncentrací nanočástic ukazuje na sníženou dobu života a zvýšený odpor v důsledku větší koncentrace rekombinačních center.

Metodou SPV se podařilo určit difúzní délku a šířku oblasti prostorového náboje u vzorků s různou koncentrací nanočástic. Bylo zjištěno, že při větší koncentraci dopantů se vlastnosti materiálu tak změnili, že nebylo možno vyhodnotit pomocí stávající teorie. Aktivací se v těchto případech podařilo vliv nanočástic eliminovat.

4. Metoda extrakce náboje působením lineárně rostoucího napětí (CELIV)

4.1. Teorie

CELIV je metoda měření pohyblivosti nosičů náboje, která umožňuje změřit i materiály s širokým rozpětím vodivosti bulku. Jeden z kontaktů na vzorku je blokující. Na vzorek aplikujeme lineárně se zvyšující napětí, které při vhodné polaritě, odčerpává náboj ze vzorku, a sledujeme průběh proudu v čase. U měřeného proudu dojde nejprve ke zvýšení, poté naměříme maximum proudu, následované poklesem a pak proud zůstává konstantní. (17)



Obrázek 17 Schéma metody CELIV (17), základní princip, časový průběh napětí a proudu vzorkem, $j(0)$ je kapacitní proud

Uvažujme vzorek o tloušťce d s blokující elektrodou v poloze $x = 0$ a s rovnovážnou koncentrací nosičů náboje n . Působením lineárně rostoucího napětí, dochází k extrakci náboje do hloubky $l(t)$, kde $0 < l(t) < d$.

Pro výpočet extrahovaného proudu se používá Poissonova rovnice a rovnice kontinuity. Poissonova rovnice je:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}, \text{ kterou lze upravit na } -\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}, \quad [14]$$

kde ρ je hustota náboje, ϵ_0 permitivita vakua a ϵ permitivita materiálu.

Rovnici zintegrujeme:

$$E(0, t) - E(t, d) = \frac{Q(t)}{\varepsilon \varepsilon_0}, \text{ pokud dosadíme: } E(0, t) - E(t, d) = \frac{enl(t)}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad [15]$$

Rovnice vyjadřuje extrahovaný náboj Q .

Budeme potřebovat i rovnici kontinuity:

$$\operatorname{div} \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad [16]$$

kde \vec{j} značí proud.

Použijeme Gaussovu větu:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = j_d, \text{ po rozepsání extrahovaného náboje bude } en \frac{dl(t)}{dt} = \sigma E(d, t). \quad [17]$$

kde σ je vodivost. Parametry v rovnici [17] můžeme vyjádřit pomocí vztahu:

$$\sigma = en\mu, \quad [18]$$

kde μ je pohyblivost.

Lineárně se zvyšující napětí na vzorek označíme $U(t) = At$, kde směrnice A této závislosti je označovaná v literatuře jako rampa.

Dalšími úpravami získáme závislost proudu $j(t)$ na čase neboli proudovou tranzientu (17):

$$j(t) = \frac{A}{d} \left(\varepsilon \varepsilon_0 + \sigma t \left(1 - \frac{\mu A t}{2d^2} \right) \right), \text{ pro } t < t_r, \quad [19]$$

kde t_r je doba průchodu mezi elektrodami. Derivací rovnice získáváme t_{max} odpovídající maximálnímu proudu.

$$t_{max} = d \sqrt{\frac{2}{3\mu A}} \text{ z čehož plyne výraz pro pohyblivost } \mu = \frac{d^2}{3At_{max}^2}. \quad [20]$$

K vyjádření pohyblivosti se přidává korekční člen K (18), a pak používáme vztah:

$$\mu = \frac{d^2}{3At_{max}^2 K}, \quad [21]$$

kde $K = 1 + 0,36 \frac{\Delta j}{j_0}$. Za předpokladu, že platí podmínka $\frac{\Delta j}{j_0} < 10$ podle (18), kde j_0 je kapacitní proud, související s geometrickou kapacitou vzorku, Δj je rozdíl j_0 a j_{max} .

Teorie tak jak je používána v (16) nepočítá s přítomností pastí, které zachycováním náboje ovlivňují jeho transport. Pokud však bude zanedbán vliv pastí, může dojít až k chybě o řád (19). Vliv pastí bere v úvahu rovnice (19):

$$\mu e/h = \frac{1}{d} \int_d \mu_{e/h}^0 \frac{n_{e/h}^{free}(x,V)}{n_{e/h}^{free}(x,V) + n_{e/h}^{trapped}(x,V)}, \quad [22]$$

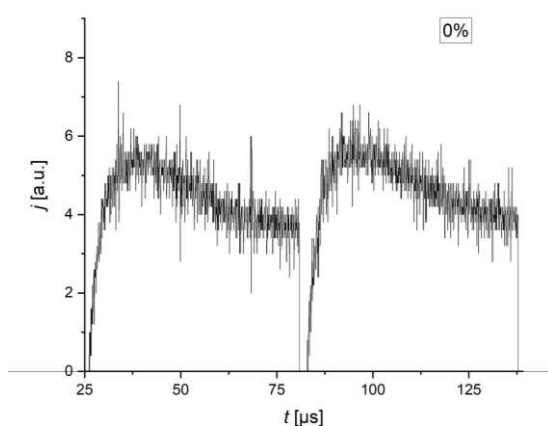
kde $\mu_{e/h}^0$ je mobilita volného náboje, $n_{e/h}^{free}(x,V)$ je hustota volných nábojů, $n_{e/h}^{trapped}(x,V)$ je hustota nábojů chycených v pastech. V je aplikované napětí a d tloušťka vzorku.

Jako další zjednodušení, teorie považuje koncentraci nosičů náboje n za konstantu. Koncentrace je funkcí napětí a pohyblivost funkcí koncentrace. Pohyblivost materiálu se mění s působícím napětím. Elektrické pole, s nímž je počítáno v teorii není konstantní, avšak hlavní extrakce náboje nastává v $t = t_{max}$ když je pole nejsilnější. Pohyblivost vypočtená dle (8) zhruba odpovídá elektrickému poli:

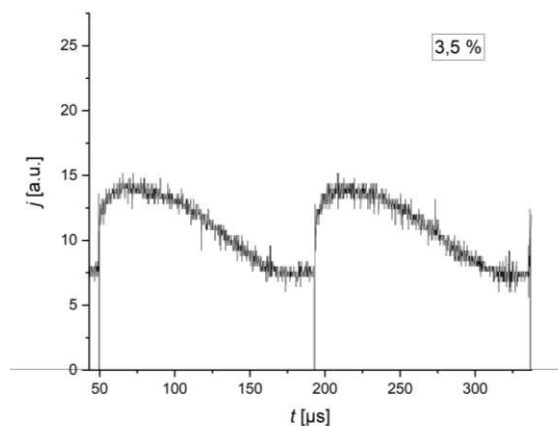
$$E_{t_{max}} = A_{t_{max}}/d. \quad [23]$$

4.2. Experiment, výsledky a diskuse

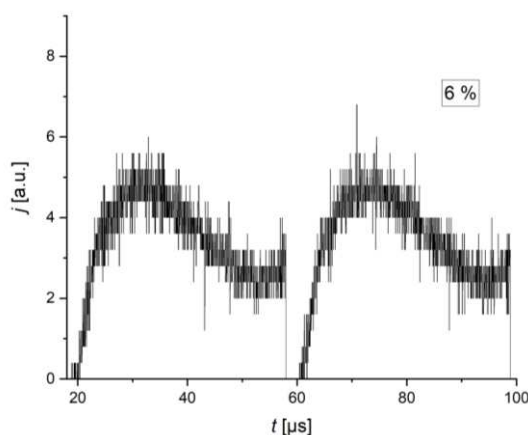
K měření byl použit, osciloskop OWON Smart ds7102V, držák se vzorkem a generátor trojúhelníkových napěťových pulzů Agilent33210A. Měření probíhalo za tmy a při pokojové teplotě. Vzorek byl opatřen blokující elektrodou LiF/Al a ohmickou elektrodou ITO. Závislosti měřených proudů na napětí (proudové transienty) jsou uvedeny na grafech 7 až 11.



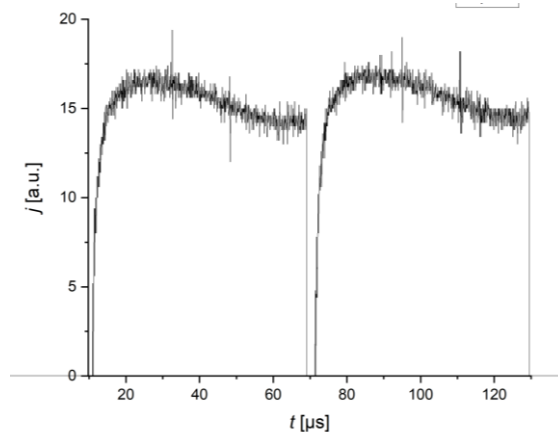
Graf 7 Časový průběh proudu vzorkem s koncentrací nanočástic 0 %



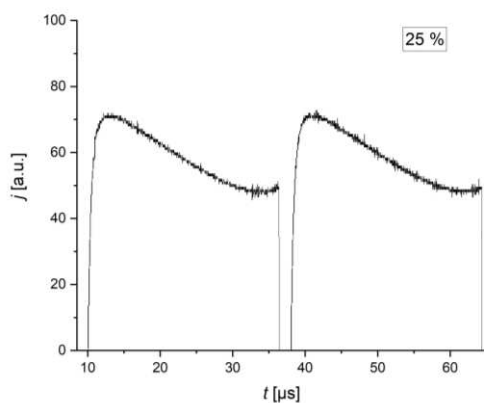
Graf 8 Časový průběh proudu vzorkem s koncentrací nanočástic 3,5 %



Graf 9 Časový průběh proudu vzorkem s koncentrací nanočástic 6 %



Graf 10 Časový průběh proudu vzorkem s koncentrací nanočástic 18,5 %



Graf 11 Časový průběh proudu vzorkem s koncentrací nanočástic 25 %

Naměřená data byla vyhodnocována podle rovnice [21]. Z grafů byly zjištěny příslušné hodnoty. Pro představu jsou některé z použitých hodnot pro vzorek s nulovou koncentrací uvedené v tabulce 3.

Tabulka 3 Parametry vzorku s koncentrací nanočástic 0%

d [nm]	U [V]	$1/f$ [μs]	A [V/s]	K	μ [cm ² V ⁻¹ s ⁻¹]
110	6,2	56,86	1,10E+05	0,87	3,60E-06

Výsledné hodnoty pohyblivostí jsou uvedené v tabulce 4.

Tabulka 4 Pohyblivost, pro různé koncentrace nanočástic ve vzorku

Koncentrace SiO ₂	0,0 %	3,5 %	6,0 %	18,5 %	25,0 %
μ [cm ² V ⁻¹ s ⁻¹]	3,6E-06	1,6E-06	2,4E-06	2,7E-06	6,0E-05

Poměrně nízká hodnota pohyblivosti 10⁻⁶ cm² V⁻¹ s⁻¹ u vzorků bez nanočástic a 3,5 %, 6 % a 18,5 %, ukazuje na možný vliv pastí, které se obvykle v polymerech vyskytují a pohyblivost obecně snižují. Pravděpodobně se u vzorků 0 % až 18,5 % prakticky neuplatňuje vliv nanočástic. U vzorku s vysokou koncentrací 25 % zřejmě se v experimentu vedle pastí projevuje nějaký silnější efekt, který pohyblivost naopak zvyšuje.

Možností je, že nanočástice zlepšují strukturu MEHPPV, může se jednat o vzrůst krystalinity, v důsledku vytvoření vazeb mezi OH skupinami na povrchu nanočástic SiO₂ a OH skupinami MEHPPV. Uvedené možnosti změny struktury materiálů v důsledku příměsi nanočástic zmiňují práce (20) a (21).

Závěr

U zkoumaných vzorků MEH-PPV s objemovou koncentrací nanočástic SiO₂: 0,0 %; 3,5 %; 6,0 %; 18,5 %; 25,0 % jsme určovali pohyblivost a difúzní délku nosičů náboje. Určené parametry jsou uvedeny v tabulce 4.

Difúzní délka byla změřena metodou SPV. Difúzní délka u vzorků s koncentracemi: 0,0 %; 3,5 %; 6,0 % vyšla u všech asi 12 nm. U vzorů s koncentracemi 18,5 %; 25,0 % nebylo možné difúzní délku určit. Může to být způsobeno absorpcí světla ovlivněnou přítomností hlubokých pastí vnášených do polymeru nanočásticemi. Avšak po následné aktivaci světlem se difúzní délka prakticky nelišila od hodnot získaných u vzorků s nízkými koncentracemi nanočástic. Grafy spekter fotonapětí byly podobné grafům vzorků s nižší koncentrací. Pasti se aktivací zaplní, a poté se vzorek po určité době chová jako kdyby tyto pasti neobsahoval.

Pohyblivost se měřila metodou extrakce náboje působením lineárně rostoucího napětí (CELIV). Pohyblivost byla u čtyř vzorků s nižší koncentrací nanočástic v řádu 10E-06, ale u vzorku s koncentrací nanočástic 25 % se pohyblivost zvýšila o řád, konkrétně byla 6,0E-05 cm²V⁻¹s⁻¹. Je pravděpodobné, že se zvyšující se koncentrací nanočástic vzrostla krystalinita v důsledku vazeb mezi OH skupinami v matici a nanočásticích, což zlepšilo vlastnosti materiálu.

Tabulka 5 Pohyblivost a difúzní délka v závislosti na koncentraci nanočástic

Koncentrace SiO ₂	0,0 %	3,5 %	6,0 %	18,5 %	25,0 %
μ [cm ² V ⁻¹ s ⁻¹]	3,6E-06	1,6E-06	2,4E-06	2,7E-06	6,0E-05
L [nm]	10±2	13±2	12±2	Neurčeno	Neurčeno

Bibliografie

1. Bilance elektrické energie. Český statistický úřad. [Online] 17. 4 2023. [Citace: 17. 4 2023.] https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/index.jsf?page=vystup-objekt&z=T&f=TABULKA&katalog=33415&pvo=ENE04&c=v3~8__RP2021.
2. KAMEL M., AL-JUMAILI A., OELGEMÖLLER M., JACOB M.,. Inorganic nanoparticles to overcome efficiency inhibitors of organic photovoltaics: An in-depth review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, Sv. 166, 112661.
3. MCMURRY J. *Organická chemie*. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická, 2007. ISBN: 978-80-214-3291-8.
4. DATILLA F. *Applications of carbon nanostructures to dye-sensitized solar cells*. Diplomová práce. Turin : University of Turin, 20. 10 2017.
5. NIESEN, B. *Performance Improvement of Organic Solar Cells by Metallic Nanoparticles*. disertační práce. Heverlee : Katholieke Universiteit Leuven – Faculty of Engineering, 19. 11 2012. ISBN 978-94-6018-550-2.
6. STELLA M. *Study of Organic Semiconductor Device Application*. disertační práce. Barcelona : Universitat de Barcelona, 02 2009.
7. KOEHLER A., BAESSLER H. *Electronic Processes in Organic Semiconductors*. Bayreuth : Wiley-VCH, 2015. ISBN 978-3-527-33292-2.
8. SWART M. *Bond orders in metalloporphyrins*. *Theoretical Chemistry Accounts*. 2020, Sv. 139, 160.
9. HEEGER A. S., SACRIFITCI N. B., NAMDAS E. J.,. *Semiconducting and Metallic Polymers*. Oxford : Oxford University Press, 2010. ISBN 978-0-19-852864-7.
10. MARUCCI A., BROWN S. D. M., PIMENTA M. A., MATTHEWS M. J., DRESSELHAUS M. S., NISHIMURA K., ENDO M. *Resonant Raman study of polyparaphenylene-based carbons*. *Journal of Materials Research*. 1131, 1999/03/01, Sv. 1124, 14.
11. *Molecular Orbital Theory. Organic chemistry*. [Online] 05. 06 2016. [Citace: 19. 02 2023.] <https://www.studyorgo.com/blog/molecular-orbita-theory/>.

12. GIULIANI M., MOTTA N. Polymer Self-assembly on Carbon Nanotubes. [autor knihy] Michele Giulianini a Nunzio Motta. Self-Assembly of Nanostructures, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology. Brisbane : Springer Science+Business Media, 2012.
13. PARASCHUK, D. Research Gate. Conjugated Polymer Solar Cells. [Online] 01. 05 2006. [Citace: 19. 04 2023.]
https://www.researchgate.net/publication/235126442_Conjugated_Polymer_Solar_Cells.
14. TOUŠEK J., TOUŠKOVÁ J., REMEŠ Z., ČERMÁK J., KOUSAL J., KINDL D., KUŘITKA I. Exciton diffusion length and concentration of holes in MEH-PPV polymer using the surface voltage and surface photovoltage methods. Chemical Physics Letters. 2021, Sv. 522.
15. TOUŠEK J., TOUŠKOVÁ J. A novel approach to the surface photovoltage method. Solar Energy Materials & Solar Cells. 2008, Sv. 92.
16. PEČEŇA R. Výzkum organických vrstev pro sluneční články. bakalářská práce. Praha : MFF UK, 2011.
17. JUŠKA G., ARLASKAS K., VILIUNAS M., KOČKA J. Extraction Current Transients: New Method of Study of Charge Transport in Microcrystalline Silicon. Physical Review Letters. 2000, Sv. 84, 21.
18. JUŠKA G., VILIŪNAS M., ARLAUSKAS K.,. Hole drift mobility in $\mu\text{c-Si:H}$. Journal of Applied Physics. 2001, Sv. 89, 9.
19. HANFLAND R., FISCHER M. A., BRÜTTING W., WÜRFEL U., MACKENZIE R. The physical meaning of charge extraction by linearly increasing voltage transients from organic solar cells. Applied Physics Letters. 2013, Sv. 106, 6.
20. SOLIMAN T. S., VSHIVKOV S. A., ELKALASHY S. I. Structural, thermal, and linear optical properties of SiO_2 nanoparticles dispersed in polyvinyl alcohol nanocomposite films. Polymer Composites. 2020, Sv. 41, 8.
21. YANG-YEN Y., WEN-CHANG CH. Morphology and properties of poly[2-methoxy-5-(2-ethyl-hexyloxy)-para-phenylene vinylene]/silica nanoparticle hybrid films. Polymer International. 2005, Sv. 54.

22. PIETRO C. Correlation between interface-dependent properties and electrical performances in OFETs. disertační práce. místo neznámé : Università degli Studi di Cagliari, 11. 19 2007.
23. KNAPP E., RUHSTALLER B. The role of shallow traps in dynamic characterization of organic semiconductor devices. *Applied Physics*. 2012, Sv. 112.
24. NEUKOM M. T., REINKE N. A., RUHSTALLER B. Charge extraction with linearly increasing voltage: A numerical model for parameter extraction. *Solar energy*. 2011, Sv. 85, 6.
25. SHOCKLEY W. Currents to Conductors Induced by a Moving Point Charge. *Journal of Applied Physics*. 1938, Sv. 9.

Seznam tabulek

Tabulka 1 Druhy solitonů.....	7
Tabulka 2 Difúzní délka L, šířka OPN w a šířka bulku d pro různé objemové koncentrace nanočástic.....	18
Tabulka 3 Parametry vzorku s koncentrací nanočástic 0%.....	24
Tabulka 4 Pohyblivost, pro různé koncentrace nanočástic ve vzorku	24
Tabulka 5 Pohyblivost a difúzní délka v závislosti na koncentraci nanočástic	26

Seznam použitých zkratk

MEH-PPV Poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-fenylenvinylen]

SPV Metoda povrchového fotonapětí

CELIV Metoda extrakce náboje působením lineárně rostoucího fotonapětí

OPN Oblast prostorového náboje