

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

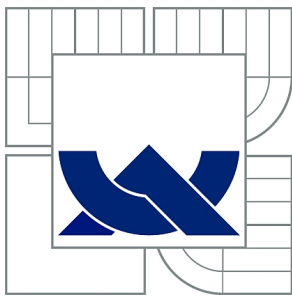
STUDIUM ELEKTRICKÝCH A DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ
TENKÝCH POLYMERNÍCH VRSTEV

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

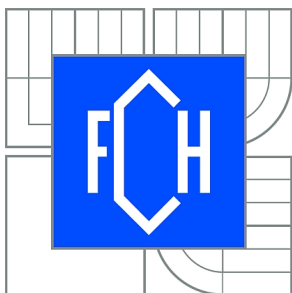
ZDEŇKA MIKLÍKOVÁ

BRNO 2013



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 ELEKTRICKÝCH A DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH POLYMERNÍCH VRSTEV

STUDY OF ELECTRICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES OF THIN POLYMER FILMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ZDEŇKA MIKLÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. OLDŘICH ZMEŠKAL, CSc.

BRNO 2013



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

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce: **FCH-BAK0718/2012** Akademický rok: **2012/2013**
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Student(ka): **Zdeňka Miklíková**
Studijní program: Chemie a chemické technologie (B2801)
Studijní obor: Spotřební chemie (2806R002)
Vedoucí práce **prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.**
Konzultanti:

Název bakalářské práce:

Studium elektrických a dielektrických vlastností tenkých polymerních vrstev

Zadání bakalářské práce:

1. Proveďte rešerši k využití statistických metod pro charakterizaci elektrických a dielektrických vlastností struktur s tenkými polymerními vrstvami
2. Analyzujte volt-ampérové charakteristiky a impedanční spektra s využitím statistických metod.
3. Srovnajte výsledky měření elektrických a dielektrických veličin.
4. Výsledky zpracujte do bakalářské práce.

Termín odevzdání bakalářské práce: 10.5.2013

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

Zdeňka Miklíková
Student(ka)

prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
Vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2013

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. Zejména byly studovány vlastnosti aktivní vrstvy směsi ZnPc/PCBM s Al nebo Au kontaktem připravené materiálovým tiskem na skleněné podložky. Na vybraných vzorcích byly nejprve měřeny volt-ampérové charakteristiky za tmy a světla, poté byly změřeny frekvenční závislosti (impedanční spektra) vybraných vzorků za tmy a nakonec byly proměřeny relaxační závislosti (tranzientní měření – závislosti proudu na čase při konstantním napětí) za tmy. Naměřená data pro tranzientní měření byla vyhodnocena pomocí fraktální analýzy v programu HarFA. 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 substrate, which consist of a thin active layer of mixture ZnPc/PCBM with Al or Au contact. On the selected samples were first measured current-voltage characteristics in the dark and during the exposure then on the selected samples were measured frequency dependences (impedance spectra) in the dark and finally on the selected samples were measured relaxation characteristics (transient response analysis – current dependences on time at constant voltage) in the dark. The measured data for transient measurement were evaluated using the methods of fractal analysis in HarFA. The results will be used to optimize the properties of photovoltaic cells.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaický článek, fuleren, ftalocyanin, volt-ampérová charakteristika, impedanční spektroskopie, tranzientní měření, Fourierova transformace, fraktální analýza

KEYWORDS

Photovoltaic cells, fulleren, phtalocyanine, current-voltage characteristic, impedance spectroscopy, transient response analysis, Fourier transformation, fractal analysis

MIKLÍKOVÁ, Z. *Studium elektrických a dielektrických vlastností tenkých polymerních vrstev*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2013. 58 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.

PROHLÁŠENÍ

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

.....
podpis studenta

Poděkování:

Chtěla bych velmi poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce, panu prof. Ing. Oldřichu Zmeškalovi, CSc. za jeho odborné rady, důsledné vedení, přátelský přístup a také jeho čas i přes neshody života.

Dále bych chtěla poděkovat mému příteli Filipu Hiclovi za jeho podporu a korekturu textu. A v neposlední řadě děkuji všem, kteří mi pomáhali a sdíleli se mnou cenné informace a zkušenosti a bez jejichž účasti by tato práce nemohla vzniknout.

OBSAH

1. ÚVOD	6
2. TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1. Měření elektrických a dielektrických veličin	7
2.2. Stejnosměrná (stacionární) měření	7
2.2.1. Měření stejnosměrných V-A charakteristik	7
2.2.2. Elektrické vlastnosti elektronických součástek	9
2.2.3. Elektrické vlastnosti optoelektronických součástek	14
2.3. Dynamická (nestacionární) měření	19
2.3.1. Tranzientní měření	19
2.3.2. Frekvenční měření (impedanční spektroskopie)	22
2.3.3. Měření šumů	23
2.3.4. Transformace signálů mezi frekvenční a časovou oblastí	24
2.4. Statistické metody: vyhodnocení tranzientních odezev	26
2.4.1. Fraktální analýza	26
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
3.1. Studované materiály	29
3.1.1. Aktivní vrstvy	29
3.1.2. Kontakty	30
3.1.3. Laminační vrstvy	30
3.2. Popis struktury vzorku	31
3.3. Příprava vzorku	32
3.4. Měřené struktury	33
3.5. Stejnosměrná měření	33
3.5.1. Měření volt-ampérové charakteristiky	34
3.5.2. Závěry	38
3.6. Střídavá měření	38
3.6.1. Měření impedančních charakteristik	38
3.6.2. Závěry	46
3.7. Tranzientní měření	47
4. ZÁVĚR	55
5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	57

1. ÚVOD

Pro konstrukci nových elektronických součástek jsou přínosnou oblastí k bádání nové polovodičové materiály na bázi organických polymerů: zejména i pro jejich rozsáhlé využití v nejrůznějších optoelektronických aplikacích. Ohromující pokrok a neustálý rozvoj v oblasti elektroniky má za následek hledání a testování stále nových materiálů, které vykazují lepší a výhodnější vlastnosti a delší životnosti. Hledání dokonalejších látek se ovšem neobejde bez rozsáhlého studia jejich elektrických a elektro-optických vlastností, tj. analýzy experimentálních dat.

Cílem práce je zpracování rešerše o možnosti využití statistických metod pro popis elektrických signálů struktur s tenkými polymerními (organickými) vrstvami a uplatnění těchto metod při vyhodnocení měřených volt-ampérových a impedančních charakteristik za tmy a světla. Pro tento účel byly připravené vzorky měřeny předem danými způsoby a poté byla získaná data analyzována.

Studovanými materiály byly směsi ftalocyaninů zinku (ZnPc) s fullerenem (PCBM) na skleněné podložce. Na těchto vzorcích byly postupně proměřeny volt-ampérové charakteristiky za tmy a světla, impedanční spektra za tmy a relaxační závislosti (tranzientní měření). Tranzientní závislosti byly také vyhodnocovány pomocí statistických metod.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Měření elektrických a dielektrických veličin

Rozeznáváme dva způsoby měření elektrických a dielektrických veličin:

- a) Stejnoseměrná (stacionární) měření
 - měření stejnosměrných V-A charakteristik,
 - měření elektrické vodivosti a fotovodivosti.
- b) Dynamická (nestacionární) měření
 - tranzientní měření,
 - frekvenční měření (impedanční spektroskopie),
 - měření šumů (v časové oblasti, ve frekvenční oblasti).

K tomu, abychom pochopili procesy složitějších studovaných funkčních vzorků je vhodné, seznámit se se základními elektronickými součástkami, které mohou být využity k vytvoření modelu vzorků (viz. kapitola 2.2.2. a 2.2.3.), [1].

2.2. Stejnoseměrná (stacionární) měření

Jde o metody měření elektrických veličin, kde budící signál není funkcí času (měřené veličiny jsou stálé, nebo se s časem pozvolna mění).

2.2.1. Měření stejnosměrných V-A charakteristik

Závislost elektrického proudu I procházejícího prvkem elektrického obvodu (např. rezistorem nebo tranzistorem) na přiloženém napětí U , se nazývá volt-ampérová (V-A) charakteristika, $I = f(U)$.

Elektrickým obvodem jsou většinou konstrukční útvary vzniklé spojením elektronických součástek (lineárních nebo nelineárních) se zdrojem elektrické energie. Jejich dalším záměrným seskupováním jsou vytvářeny útvary vyšší (elektronická zařízení), která zpracovávají signály, nebo signály vytvářejí, [2].

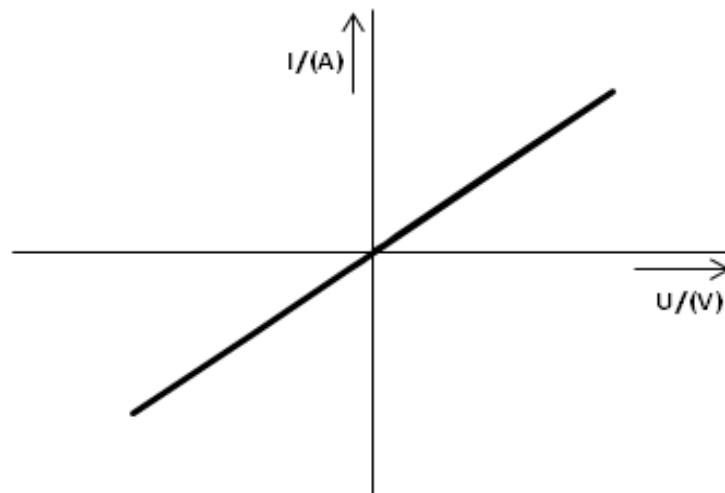
Součástky (elektronické prvky) jsou neoddelitelné součásti obvodu, které tvoří vodivou cestu, a mají přesně dané elektrické vlastnosti (parametry). Tyto parametry jsou popisovány pomocí obvodových veličin, mezi které především patří napětí a proud. Elektronické prvky lze rozdělit podle několika různých hledisek. Rozdělení prvků z pohledu energetického:

- Aktivní – jejich elektrické vlastnosti jsou proměnlivé a říditelné změnou proudu nebo napětí. V obvodu se chovají jako zdroje.
- Pasivní – jejich elektrické vlastnosti jsou stálé a nezávislé na přiváděném proudu nebo napětí. V obvodu se chovají jako spotřebiče elektrické energie.

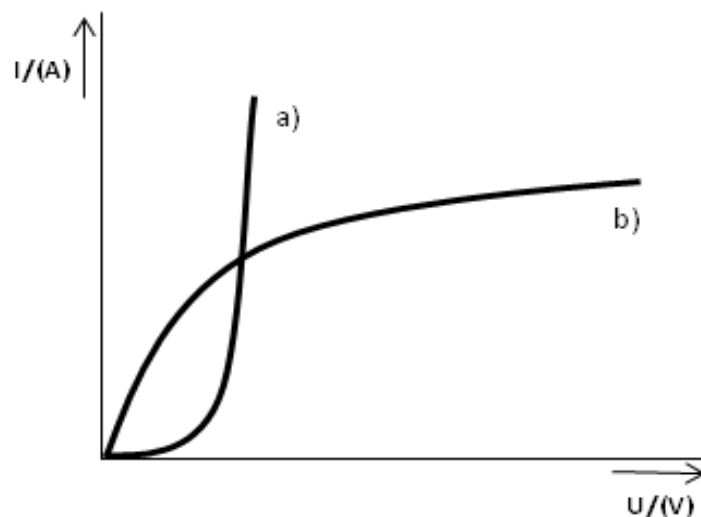
Rozdělení prvků podle volt-ampérové charakteristiky:

- Lineární – jejich základní parametr nezávisí na procházejícím proudu nebo napětí. Mají lineární V-A charakteristiku (procházející proud je přímo úměrný napětí a poměr mezi proudem a napětím, což je odpor, je konstantní). V-A charakteristika lineárních součástek je přímka (*Obr. 1*). Patří sem např. rezistory, fotorezistory, cívky, kondenzátory.
- Nelineární – existuje závislost hlavního parametru na procházejícím proudu nebo napětí. Nemají lineární V-A charakteristiku (procházející proud je nepřímo úměrný napětí a poměr mezi proudem a napětím, není konstantní). V-A charakteristika nelineárních součástek není přímka (*Obr. 2*). Patří sem např. polovodi-

čové prvky bez přechodu (termistory, varistory), polovodičové prvky s přechodem (diody, fotodiody, tranzistory, fototranzistory), [1].



Obr. 1 Volt-ampérová charakteristika lineárního prvku (např. rezistoru)



Obr. 2 Volt-ampérová charakteristika nelineárního prvku: a) diody, b) žárovky

Ve skutečnosti jsou ale všechny elektronické prvky alespoň částečně nelineární. Mohou za to Jouleovy ztráty (vznikají při průchodu elektrického proudu, vzorek se po průchodu proudem zahřívá a tím se mění jeho odpor). U většiny prvků se ovšem tato nelinearita zanedbává (cívky, kondenzátory, rezistory, fotorezistory).

Čím více je charakteristika přikloněná k proudové ose, tím větší má prvek vodivost. Čím více je charakteristika přikloněná k napěťové ose, tím větší je odpor prvku. Volt-ampérová charakteristika některých součástí bývá značně ovlivněna vnějšími vlivy jako je např. světlo, vlhkost, plyn. Změna tvaru V-A charakteristiky za tmy a osvětlení je typická pro fotovoltaické články nebo fotodiody, [2].

2.2.2. Elektrické vlastnosti elektronických součástek

Rezistory jsou nejběžnější součástkou v elektronických zařízeních. Jedná se o pasivní, lineární součástky, které vykazují elektrický odpor R . Odpor je přímo úměrně závislý na teplotě t . Hlavním důvodem pro zařazení rezistoru do elektrického obvodu je snížení velikosti elektrického proudu I nebo dosažení úbytku napětí U . Skutečné vlastnosti rezistorů jsou určeny mnoha parametry a jevy, [3]. Nejdůležitější z nich jsou:

- velikost elektrického odporu,
- teplotní závislost elektrického odporu,
- napěťová závislost elektrického odporu,
- mezní (průrazné) napětí,
- kmitočtová závislost elektrického odporu (impedance),
- maximální ztrátový výkon rezistoru,
- změna odporu v závislosti na čase (relaxace, degradace),
- šum rezistoru – vlivem nerovnoměrného pohybu elektronů v materiálu.

Další součástky podobné rezistoru jsou reostaty a potenciometry. Reostat je prvek elektrického obvodu, jehož hodnotu odporu lze nastavovat posunem jezdce. Potenciometr je prvek elektrického obvodu, jehož účelem je regulovat hodnotu napětí posunem jezdce, [2] - [4].

Kondenzátory jsou pasivní, lineární prvky elektrického obvodu, které mají schopnost akumulovat na svých elektrodách kladný a záporný elektrický náboj Q a vytvářet tím elektrické pole s okamžitou energií. Jeho hlavní vlastností je schopnost akumulovat elektrický náboj a hlavním parametrem je elektrická kapacita C (jednotkou je farad – F). Vlastnosti kondenzátoru lze popsat následujícími parametry:

- velikost kapacity,
- teplotní závislost kapacity,
- napěťová závislost kapacity,
- ztrátový odpor kondenzátoru,
- kmitočtová závislost kapacity (impedance),
- mezní (průrazné) napětí,
- mezní proud,
- maximální výkon,
- stárnutí (degradace) – časová změna parametrů.

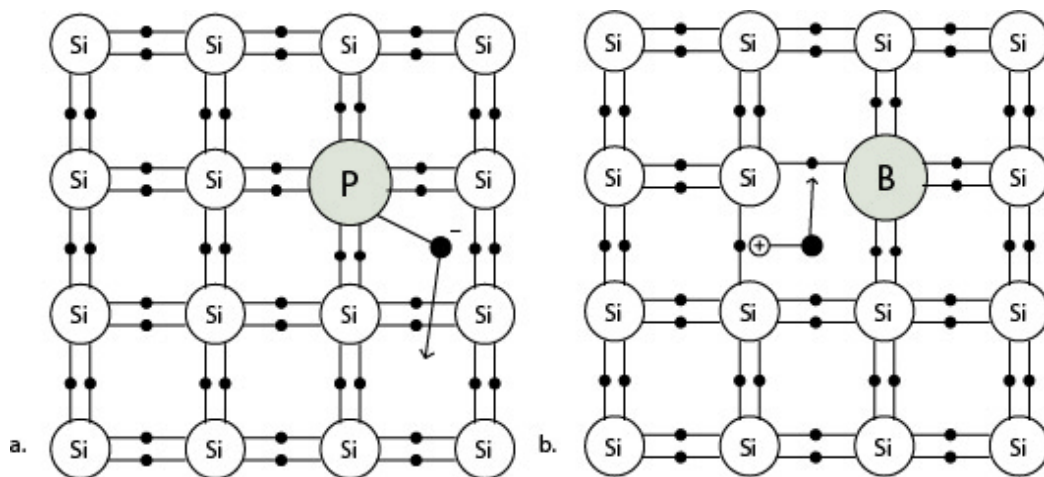
Kondenzátor nemůže být aktivním prvkem elektrického obvodu (při vybíjení se získá jen ta část energie, která byla nabíjením dodána). Při nabíjení kondenzátoru roste úměrně s nábojem také napětí mezi elektrodami. Kondenzátor je tvořen vodivými nebo polovodivými elektrodami, které jsou od sebe odděleny dielektrickou vrstvou (vzduch, vakuum, keramika atd.). Dielektrikum mezi elektrodami zabraňuje, aby se částice s nábojem dostaly do kontaktu, a tím došlo k neutralizaci elektrických nábojů. Jeho vlastnosti se mění s časem, teplotou a závisí na přiloženém napětí, [2] - [5].

Cívky jsou pasivní, lineární prvky elektrického obvodu, které akumulují magnetickou energii. Jsou charakterizovány vlastní indukčností L , což je schopnost cívky indukovat napětí při změně procházejícího proudu cívkou. Cívka se skládá z vodiče (měděný drát) navinutého do tvaru šroubovice nebo spirály a může nebo nemusí obsahovat jádro. Při narůstání proudu cívkou se zvyšuje energie magnetického pole cívky. Indukované napětí je tím větší, čím větší je počet závitů cívky N , [2] - [6].

Diody jsou polovodičové prvky elektrického obvodu, obvykle s jedním přechodem PN. Přechod PN vzniká na rozhraní mezi polovodiči typu N a P, [2].

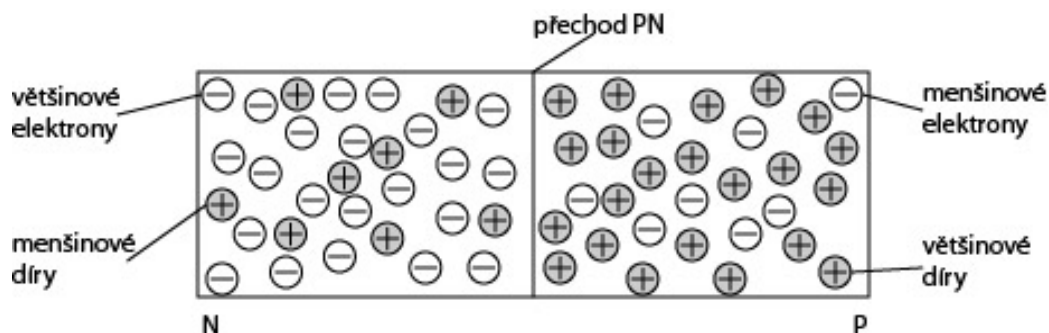
Polovodič typu N (*Obr. 3*) obsahuje v atomu krystalové mřížky čtyřmocného prvku (Si nebo Ge) také atomy pětímocného prvku (P, As nebo Sb). Tím se v krystalové mřížce objevují nadbytečné (volné) elektrony, které se již při nízké nebo pokojové teplotě ionizují a vedou elektrický proud. Z toho důvodu se pětímocné příměsi jmenují donory (dárce). V polovodiči typu N převažují jako nosiče proudu elektrony, které se nazývají většinové (majoritní) nosiče. Nepohyblivé díry se jmenují menšinové (minoritní) nosiče, [3].

Polovodič typu P (*Obr. 3*) obsahuje v atomu krystalové mřížky čtyřmocného prvku (Si nebo Ge) také atomy trojmocného prvku (B, In, Ga nebo Al). Tím se v krystalové mřížce objevují nadbytečné (volné) díry, které se navenek nepohybují, ale dodáním malé energie se můžou „pohybovat“ a tím vést elektrický proud. Z toho důvodu se trojmocné příměsi jmenují akceptory (příjemci). V polovodiči typu P převažují jako nosiče proudu díry, které se nazývají většinové (majoritní) nosiče. Elektrony se jmenují menšinové (minoritní) nosiče, [3].

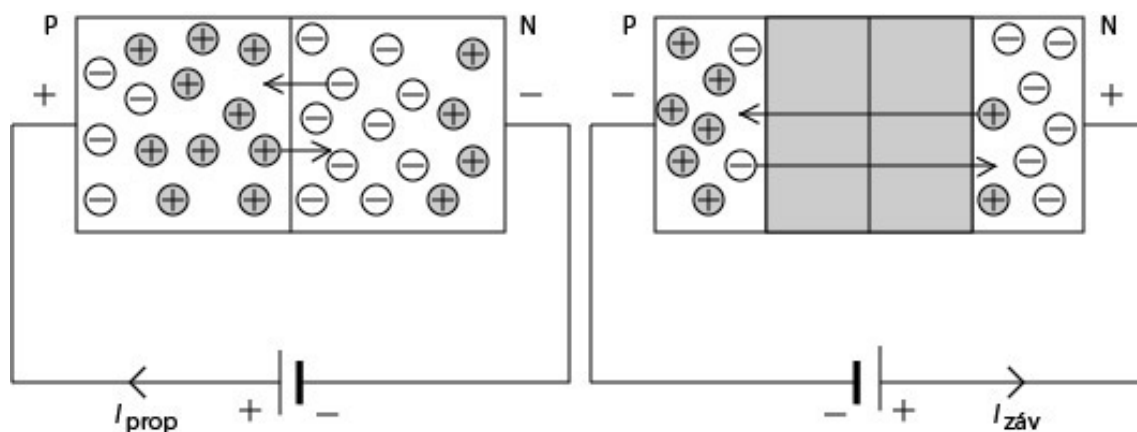


Obr. 3 Polovodič: a) typu N, b) typu P

Přechod PN (metalurgický přechod) je velmi tenká vrstva polovodiče, v níž vodivost typu N přechází ve vodivost typu P (*Obr. 4*). Důležitou podmínkou tohoto přechodu je, že v místě přechodu nesmí být porušena souvislost krystalické mřížky z toho důvodu, aby se elektrony mohly volně pohybovat touto oblastí z jedné vrstvy do druhé. Protože v oblasti P je přebytek děr a v oblasti N přebytek elektronů, působí mezi oblastmi přitažlivá elektrostatická síla. Z tohoto důvodu se nejvíce přitahují elektrony a díry v nejbližší oblasti přechodu PN. Některé díry z oblasti P poté přecházejí do oblasti N a elektrony z oblasti N do oblasti P. Jestliže přiložíme na přechod PN vnější napětí s kladným pólem na polovodič typu P a záporným pólem na polovodič typu N (jedná se o zapojení v propustném směru), budou se kladně nabitě díry a záporně nabitě elektrony pohybovat přes přechod PN (*Obr. 5*) a tím se vytvoří elektrický proud. Pokud je přechod PN zapojen obráceně (jedná se o zapojení v závěrném směru), tak elektrický proud neprochází, [2] - [4].



Obr. 4 Struktura přechodu PN

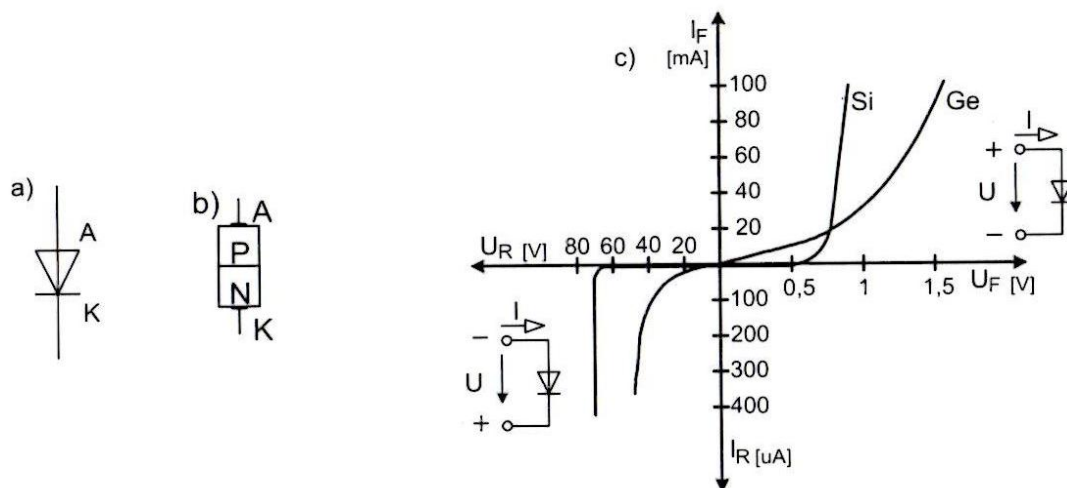


Obr. 5 Zapojení přechodu PN v propustném a závěrném směru

Při zvyšování koncentrace příměsí nad určitou mez se začne polovodič chovat jako kov. Jedná se o degenerovaný polovodič (např. N^+). Vlastní vodivost je tvořena stejným počtem elektronů a děr. Vlastní polovodič je dokonalý krystal bez poruch a příměsí. Nevlastní vodivost je při nulové teplotě ($T = 0K$) rovna nule (vodivost nosičů je nulová). Nevlastní polovodič lze upravit pomocí elektricky aktivních příměsí.

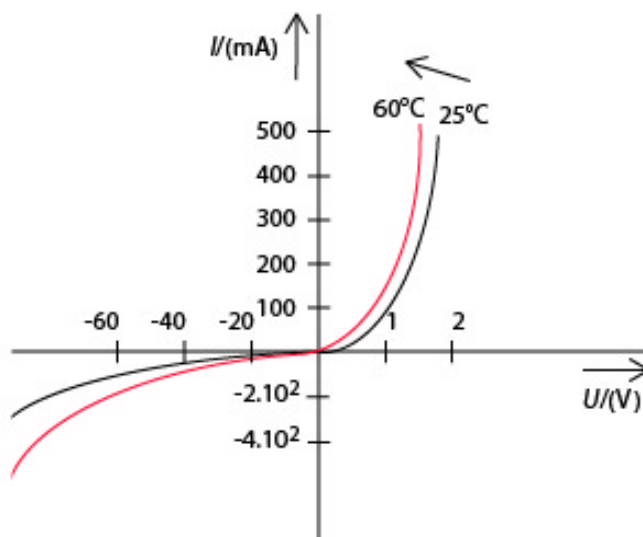
Základní funkcí diody je, že dovoluje tok elektrického proudu pouze v jednom směru (propustném směru), v závěrném směru elektrický proud diodou neprochází (Obr. 6). Podle použití rozeznáváme diody:

- usměrňovací,
- detekční a spínací,
- stabilizační a referenční,
- tunelové a inverzní,
- kapacitní,
- luminiscenční,
- fotodiody,
- speciální diody.



Obr. 6 Polovodičová dioda: a) schematická značka, b) struktura, c) V-A charakteristika Ge-diody a Si-diody [2]

Zdrojem tepla u diody je přechod PN. Volt-ampérovou charakteristiku polovodičů tedy silně ovlivňuje teplota, jak vidíme na obrázku (Obr. 7). Toho se využívá pro indikaci a měření teploty. Takové prvky měnící svůj odpor s teplotou jsou nazývány termistory, [2], [5], [7].



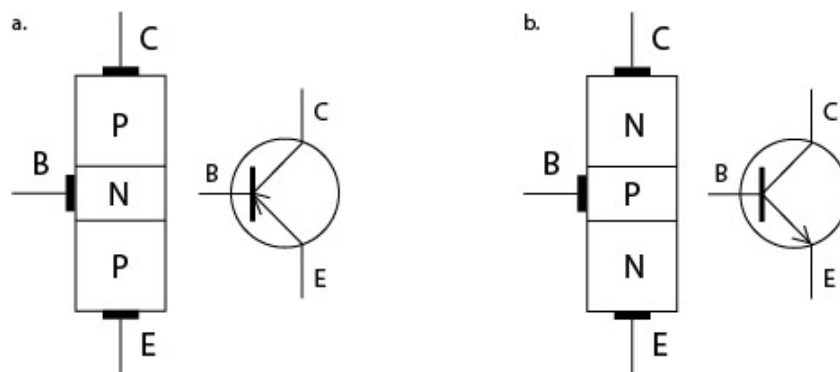
Obr. 7 Vliv teploty na V-A charakteristiku polovodičové diody

Tranzistory jsou aktivní, třívrstvé polovodičové součástky (obsahují polovodiče typu N a P), které mají zesilovací schopnost a transformují odpor. Základními materiály při výrobě tranzistorů jsou křemík a germánium. Podle technologie výroby rozlišujeme dva druhy tranzistorů – bipolární a unipolární. U bipolárních tranzistorů se na vedení proudu podílí oba dva typy nosičů (elektrony i díry). U unipolárních tranzistorů se na vedení proudu podílí pouze jeden typ nosičů, [2], [4], [8].

Bipolární tranzistory se skládají ze dvou polovodičových diod, z nichž první je zapojena v propustném směru a druhá v závěrném směru. Vedení elektrického proudu je realizováno oběma typy nosičů (elektrony i děrami). Bipolární tranzistor je tvořen dvěma přechody PN, které jsou zapojeny proti sobě a jedna oblast je oběma přechodům společná – báze (B). Další dvě oblasti mají vždy opačný typ vodivosti a nazývají se emitor (E) a kolektor (C). Podle

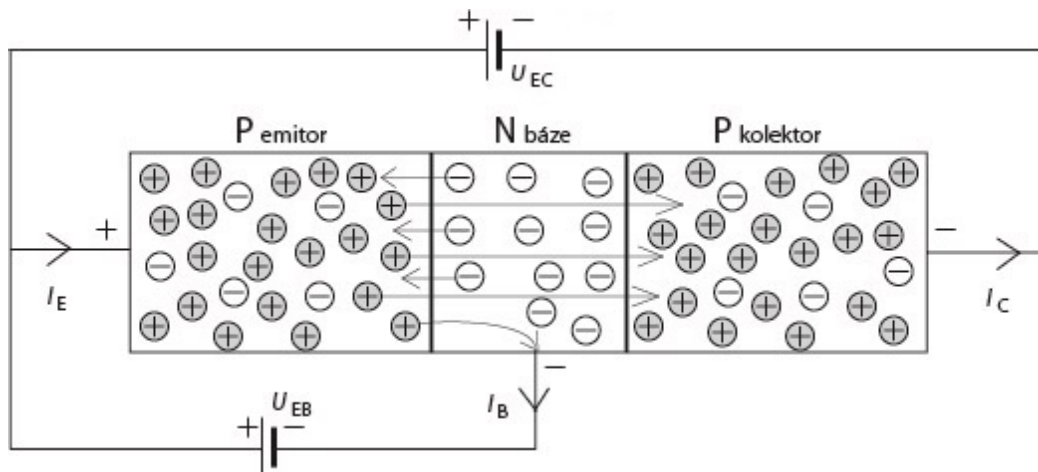
uspořádání těchto vrstev rozlišujeme tranzistor PNP a NPN (Obr. 8). Přechod, který je blíže k emitoru, je emitorovým přechodem a přechod, který je blíže ke kolektoru, se jmenuje kolektorový. V tranzistoru NPN malá změna napětí mezi emitorem a bází v propustném směru způsobí velkou změnu proudu z emitoru do báze. Protože báze je velmi tenká, tak se většina proudu dostane až do kolektoru, který je zapojen v závěrném směru a prochází jím tedy závěrný proud. U tranzistoru PNP probíhají děje obdobně. Pro charakteristiku těchto tranzistorů se využívá:

- I_B – proud báze,
- I_C – proud kolektoru,
- I_E – proud emitoru,
- U_{BE} – napětí mezi bází a emitorem,
- U_{CB} – napětí mezi kolektorem a bází,
- U_{CE} – napětí mezi kolektorem a emitorem.



Obr. 8 Schematické značky: a) PNP tranzistoru, b) NPN tranzistoru

Unipolární tranzistory jsou založeny na principu řízení pohybu nosičů náboje elektrickým polem. Vedení proudu se uskutečňuje jedním typem nosičů (většinou elektrony nebo děrami). Pojmenováváme je zkratkou FET. Vodivost tohoto tranzistoru můžeme měnit buď změnou průřezu vodivého kanálu, nebo změnou koncentrace většinových nosičů. Unipolární tranzistory se rozdělují na JFET, IGFET (MOSFET, MISFET) a TFT. Unipolární tranzistory jsou odolnější vůči změnám teploty než bipolární tranzistory, [4], [7], [8].



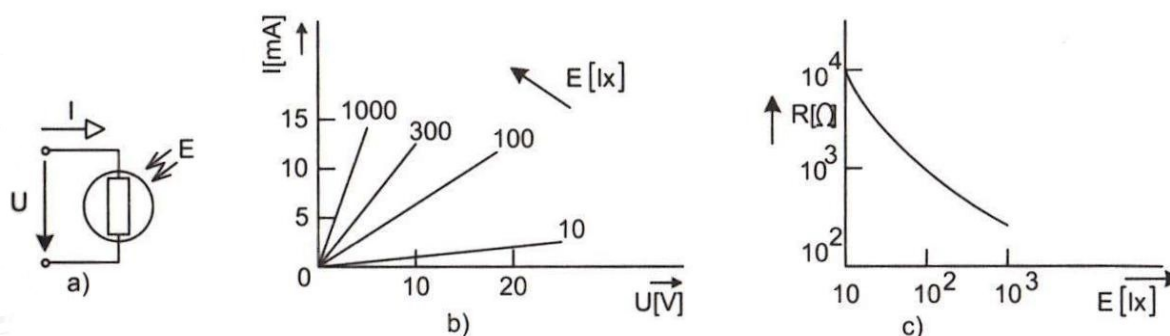
Obr. 9 Princip zapojení a fungování tranzistoru

2.2.3. Elektrické vlastnosti optoelektronických součástek

Volt-ampérovou charakteristiku většinou silně ovlivňují vnější vlivy jako světlo, teplota, vlhkost, plyny atd. Na světelné vlivy reagují detektory světelného záření (na teplotu teplotní senzory, na vlhkost vlhkostní senzory a na plyny plynové senzory). Detektory světelného záření přeměňují optické záření na elektrický signál. Mezi tyto senzory zařazujeme:

- fotorezistory (fotoodpory),
- fotodiody,
- fototranzistory,
- fotovoltaiické (solární) články.

Fotorezistory (fotoodpory) jsou lineární polovodičové součástky bez přechodu PN. Pracují na základě vnitřního fotoelektrického jevu. Řídící veličinou je osvětlení (*Obr. 10*). Volné nosiče proudu můžeme v polovodiči získat tím, že dodáme elektronům energii dopadem světla (zvýšíme vodivost). Při absorpci fotonů v polovodiči dochází ke vzniku (generování) pohyblivých nosičů náboje (elektronů a děr). Elektrická vodivost materiálu poté stoupá úměrně s počtem dopadajících fotonů z působícího světla. Po přiložení elektrického pole vnějšího zdroje napětí dojde k přesunu (transportu) elektronů a děr. To vede k měřitelnému proudu v obvodu. Jakmile světlo přestane působit, dojde k rekombinačním pochodům a polovodič se vrátí do původního stavu. Fotorezistory jsou sestrojovány tak, aby za tmy měly velký poměr odporu k odporu při osvětlení. Výhodou jejich použití je nízká cena a využití ve stejnosměrném i střídavém napětí. Nevýhodou jejich použití je velká teplotní závislost a změna odporu v závislosti na délce osvětlení, což se projeví na stárnutí součástky, [2], [9], [10].

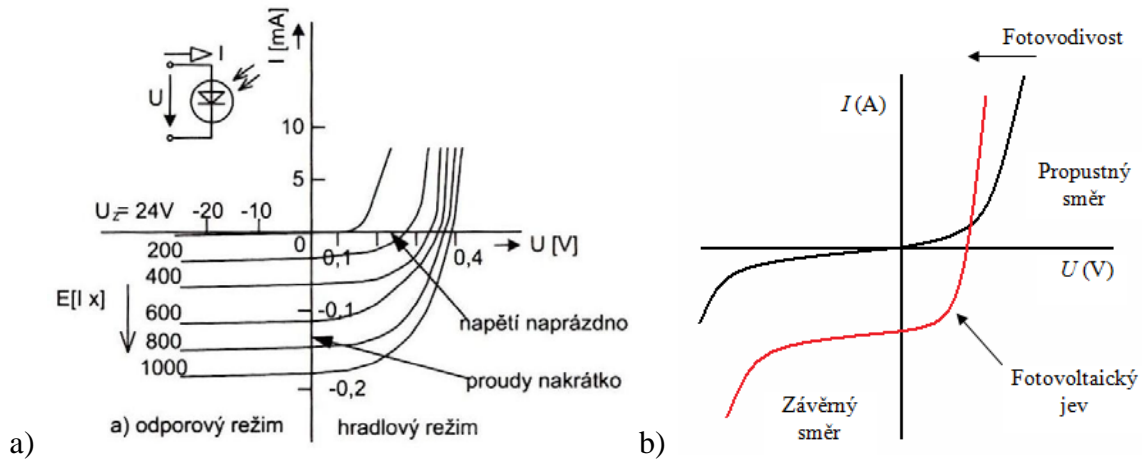


Obr. 10 Fotorezistor: a) schematická značka, b) soustava V-A charakteristik v závislosti na intenzitě osvětlení, c) závislost odporu fotorezistoru na osvětlení [10]

Fotodiody jsou polovodičové diody, které umožňují světelnému záření dopadat na přechod PN popřípadě přechod PIN. Pro svoji činnost využívají generaci párů elektron-díra v blízkosti přechodu PN nebo PIN. PN a PIN fotodiody (PIN fotodioda je polovodičová součástka s PN přechodem, kde mezi oblastmi P a N je oblast vlastního polovodiče – I) pracují na stejném principu. Foton, který vstupuje do fotodiody s dostatečnou energií, je absorbován. Vzniklý volný elektron a díra vytváří v polovodiči napětí (fotovoltaiický jev) nebo zvětšují vodivost (fotovodivostní jev). Maximální vlnová délka, při níž může ještě dojít k absorpci (absorpční hrana), je dána vztahem

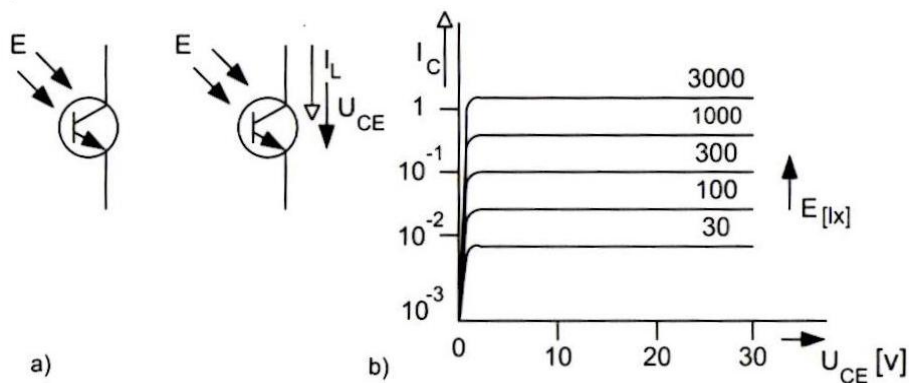
$$\lambda = \frac{1,24}{\Delta W}, \quad (1)$$

kde ΔW je šířka zakázaného pásu. Volt-ampérová charakteristika PN a PIN diody zasahuje do tří kvadrantů, jak vidíme na obrázku (Obr. 11). Osvětlená fotodioda se od neosvětlené liší tím, že neprochází počátkem V-A charakteristiky a vykazuje proud I_R v závěrném směru (závěrný proud roste s absorpcí fotonů), [9] - [12].



Obr. 11 a) Soustava V-A charakteristik fotodiody s vyznačenými pracovními oblastmi, [10]
b) V-A charakteristika fotodiody za tmy (černá) a za světla (červená) [12]

Fototranzistory jsou optoelektronické detekční prvky, v nichž je fotoelektrický proud, vznikající generací nosičů náboje vlivem dopadajícího světelného záření, zesílen (Obr. 12). Jsou to třívrstvé struktury typu PNP nebo NPN, tudíž se jedná o bipolární tranzistory. Elektrony (vlivem vnitřního elektrického pole) se pohybují směrem k emitorovému přechodu a díry ke kolektorovému přechodu. V důsledku polarizace emitorového přechodu v propustném směru způsobí jakákoliv změna jeho napětí změnu kolektorového proudu. Závěrně polarizovaný přechod báze-kolektor přitahuje nosiče náboje vzniklé v oblasti báze absorpcí světla. V bázi se poté z emitoru nahromadí nosiče stejného typu a následně jsou vtahovány do kolektoru a tím dochází k zesílení fotoelektrického proudu. Jsou citlivější než fotodioda (zesílení $10\times - 100\times$), [9] - [12].



Obr. 12 Fototranzistor: a) schematická značka, b) soustava V-A charakteristik v závislosti na intenzitě osvětlení [10]

Ve fotovoltaickém (hradlovém) režimu (IV. kvadrant) se dioda chová jako aktivní článek (zdroj energie). Dopadají-li na fotodiodu v hradlovém režimu fotony o energii větší, než je šířka zakázaného pásu, tak dochází k jejich absorpci a vznikají páry elektron-díra. Elektrony se poté uvolní do vodivostního pásu a díry do valenčního pásu. Mimo solárních článků jsou fotodiody (v hradlovém režimu) používány jako detektory s vysokou citlivostí. To je dáno tím, že jediným zdrojem v obvodu je fotodioda, čímž se výrazně omezí šum ve srovnání s režimem fotovoltaickým (za tmy proud neteče).

Ve fotovodivostním (odporovém) režimu (I. a III. kvadrant) se dioda chová jako pasivní článek (spotřebič), jehož elektrický odpor klesá s intenzitou ozáření. Většinou je proto připojena ke zdroji napětí v sérii s ochranným rezistorem, který ji polarizuje do závěrného směru. Dopadající fotony opět generují volné páry elektron-díra jako ve fotovoltaickém režimu. V tomto případě je ale na přechodu PN fotodiody vyšší intenzita elektrického pole (kvůli závěrné polarizaci). Proto je tato oblast širší a volné generované nosiče náboje se rychleji přemisťují přes přechod PN. S rostoucí rychlostí nosičů náboje se zvyšuje přenosová rychlost fotodiody. Nevýhodou je vznik teplotně závislého proudu za tmy (vznik přídavného šumu).

Pokud citlivost těchto fotodiod nedostačuje, je možné použít lavinových PIN fotodiod, které vykazují vlastní zesílení. Vlastní zesílení fotoelektrického proudu je způsobeno přiložením velkého závěrného napětí, které urychluje vzniklé nosiče náboje natolik, že při srážce s mřížkou krystalu polovodiče dojde k vyražení dalších elektronů (sekundárních) z mřížky. Je potřeba kvalitní, stabilizovaný zdroj napětí, přičemž potřebná hodnota napětí je pro každou fotodiodu různá (i ze stejného materiálu), [9] - [12].

Fotovoltaické články jsou polovodičové součástky alespoň s jedním přechodem PN, které fungují na principu fotovoltaického jevu (patří mezi vnitřní fotoelektrické jevy). Pracují v hradlovém režimu fotodiody (IV. kvadrant). Vlivem světla dochází k posunutí V-A charakteristiky k zápornějším hodnotám proudu (chová se jako zdroj energie). Díky tomu se hodnotí kvalita přeměny energie solárních článků (*Obr. 11*). Vyrábí se nejčastěji z křemíku (také z Ge, Se). Působením světelného záření na článek vzniká fotoelektrický jev a tím je produkován elektrický proud. Při dopadu světelného záření na přechod PN se uvolní elektrony (díky předání světelné energie atomům v krystalové mřížce). Tyto elektrony se hromadí v N vrstvě a díry v P vrstvě. Dojde-li poté v ochuzené vrstvě (úzká vrstva bez volných nosičů náboje) k absorpci fotonu, pak vznikne volný pár elektron a díra. Vznik volného páru vyvolá proud nosičů náboje přechodem PN. Obvodem začne protékat elektrický proud po připojení článku k zátěži. Volt-ampérová charakteristika ideálního solárního článku za tmy je definována vztahem

$$I = I_D = I_S \left[\exp \left(\frac{eU}{k_B T} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

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

Reálný solární článek za tmy se od ideálního liší (např. důsledkem generace a rekombinace nosičů náboje). Můžeme jej definovat vztahem pro jednodiodový model za tmy

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

kde n je faktor ideality diody. Nabývá hodnot $n > 1$.

Dvoudiodový model za tmy pak lze definovat podle vztahu

$$I = I_D = I_{INJ} + I_R = I_{S1} \left[\exp \left(\frac{eU}{n_1 k_B T} \right) - 1 \right] + I_{S2} \left[\exp \left(\frac{eU}{n_2 k_B T} \right) - 1 \right], \quad (4)$$

kde I_{INJ} je proud injektovaných elektronů z polovodiče typu N do polovodiče typu P a děr z P do N (difúzní proud v oblasti emitoru a báze), I_R je rekombinační proud v ochuzené oblasti, I_{S1} a I_{S2} je saturační proud difúzního procesu, n_1 a n_2 je faktor ideality diody charakterizující proces injekce s ideální hodnotou $n_1 = 1$ a $n_2 = 2$, [9] - [12].

Volt-ampérovou charakteristiku fotovoltaického článku při osvětlení lze popsat jednodiodovým a dvoudiodovým modelem

$$I = I_{PH} - I_D = I_{PH} - I_S \left[\exp \left(\frac{eU}{nk_B T} \right) - 1 \right], \quad (5)$$

$$I = I_{PH} - I_D = I_{PH} - I_{S1} \left[\exp \left(\frac{eU}{n_1 k_B T} \right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp \left(\frac{eU}{n_2 k_B T} \right) - 1 \right], \quad (6)$$

kde I_{PH} je fotoindukovaný proud.

Reálnou volt-ampérovou charakteristiku ovšem negativně ovlivňují i další parametry jako parazitní odpory R_S a R_{SH} , teplota, intenzita osvětlení atd. Reálná volt-ampérová charakteristika solárního článku za tmy lze popsat jednodiodovým modelem

$$I = I_D + I_{SH} = I_S \left[\exp \left(\frac{e(U - R_S I)}{nk_B T} \right) - 1 \right] + \frac{U - R_S I}{R_{SH}}, \quad (7)$$

resp. dvoudiodovým modelem

$$I = I_{S1} \left[\exp \left(\frac{e(U - R_S I)}{n_1 k_B T} \right) - 1 \right] + I_{S2} \left[\exp \left(\frac{e(U - R_S I)}{n_2 k_B T} \right) - 1 \right] + \frac{U - R_S I}{R_{SH}}, \quad (8)$$

kde I_{SH} je svodový proud, R_S je sériový a R_{SH} je paralelní odpor solárního článku.

Reálná volt-ampérová charakteristika solárního článku za osvětlení lze popsat jednodiodovým modelem

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} = I_{PH} - I_S \left[\exp \left(\frac{e(U - R_S I)}{nk_B T} \right) - 1 \right] - \frac{U - R_S I}{R_{SH}}, \quad (9)$$

resp. dvoudiodovým modelem

$$I = I_{PH} - I_{S1} \left[\exp \left(\frac{e(U - R_S I)}{n_1 k_B T} \right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp \left(\frac{e(U - R_S I)}{n_2 k_B T} \right) - 1 \right] - \frac{U - R_S I}{R_{SH}}. \quad (10)$$

Účinnost přeměny energie záření solárního článku na energii elektrickou, se pro ideální případ definuje vztahem

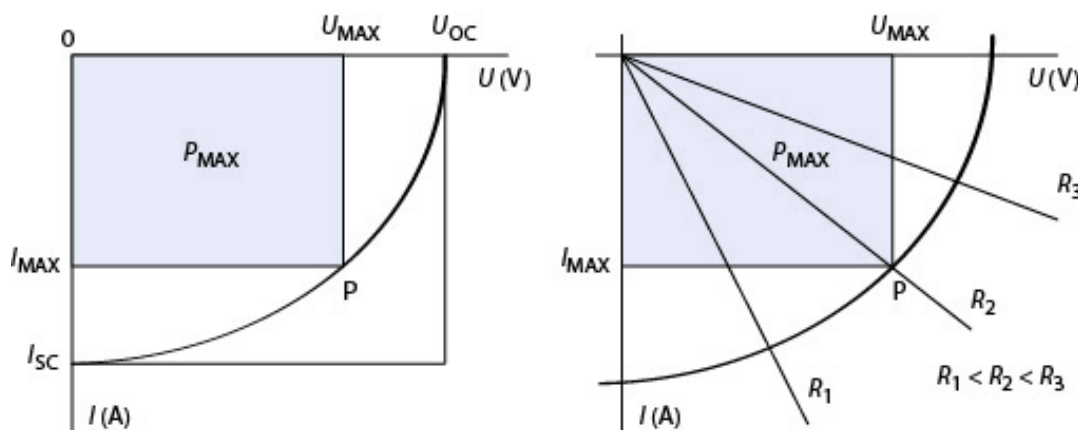
$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P} = \frac{|U_{MAX} I_{MAX}|}{P_0} = \frac{I_{SC} U_{OC} FF}{S \int_0^{\infty} M(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda}, \quad (11)$$

kde P_{MAX} je maximální výkon získaný z článku, P_0 je výkon záření dopadajícího na článek o ploše S , U_{MAX} je maximální napětí, I_{MAX} je maximální proud, I_{SC} je elektrický proud nakrátko při nulovém napětí, U_{OC} je napětí naprázdno při nulovém proudu, FF je faktor plnění. Integrál představuje celkový výkon dopadajícího záření na jednotku plochy S , $M(\lambda)$ je spektrální hustota dopadajícího elektromagnetického záření a hc/λ představuje energii jednoho fotonu o vlnové délce λ . Vysoká účinnost solárního článku tedy závisí na velké hodnotě I_{SC} , U_{OC} a FF , [1], [12].

Faktor plnění FF je v ideálním případě definován vztahem

$$FF = \frac{P_{MAX}}{I_{SC} U_{OC}} = \frac{|U_{MAX} I_{MAX}|}{I_{SC} U_{OC}}. \quad (12)$$

Graficky faktor plnění znázorňujeme jako podíl ploch obdélníků podle obrázku (Obr. 13)



Obr. 13 Grafické znázornění parametrů k určení faktoru plnění

Jakmile se překročí napětí naprázdno U_{OC} , tak dochází k prudkému nárůstu elektrického proudu opačné polarity. Klasické grafické zobrazení volt-ampérové charakteristiky je ve IV. kvadrantu). Často se však tato závislost kreslí v I. kvadrantu, [1], [12].

Reálnou hodnotu faktoru plnění ovšem negativně ovlivňují i další parametry jako parazitní odpory R_S a R_{SH} , teplota, intenzita osvětlení atd. Reálná hodnota faktoru plnění se poté vypočítá podle vztahu

$$FF = \frac{\left(\frac{I_{SC}}{U_{OC}} - G_{SH} \right) \left(\frac{U_{OC}}{I_{SC}} - R_S \right)}{(1 - R_S G_{SH})^2}, \quad (13)$$

kde G_{SH} je paralelní vodivost.

2.3. Dynamická (nestacionární) měření

Jedná se o metody měření elektrických a dielektrických veličin. Budící signál je funkcí času. Dynamická měření rozdělujeme do 3 skupin:

- tranziентní měření,
- frekvenční měření (impedanční spektroskopie),
- měření šumů (v časové oblasti a frekvenční oblasti).

Jako budící signál využíváme:

- časově proměnný zdroj napětí $u(t)$, měří se proudová odezva $i(t)$ a k interpretaci výsledků se používá Fourierova transformace, získá se frekvenční závislost impedance, (viz kap. 2.3.1. – Tranziентní měření),
- harmonický zdroj napětí o frekvenci ω a amplitudě U_0 , měří se amplituda proudu I_0 a fázový posun proudu Φ_0 vzhledem k napětí (viz kap. 2.3.2. – Frekvenční měření),
- generátor šumu o známém šumovém napětí $u(t)$, měří se šumová proudová odezva $i(t) + \Delta i(t)$ a frekvenční závislost impedance se určí pomocí Fourierovy transformace (viz kap. 2.3.3. – Měření šumů).

2.3.1. Tranziентní měření

Měří se přechodová odezva neboli odezva přechodu z jednoho stacionárního stavu do jiného. Toho lze využít při měření impedance. Nejdříve dodáme na vzorek časově proměnné napětí $u(t)$, poté změříme proudovou odezvu $i(t)$ a následně určíme frekvenční závislost impedance pomocí Fourierovy transformace (měření je velmi jednoduché, ale zpracování výsledků složité). Pro proměřování časových odezev $i(t)$ se používají zesilovače, osciloskopy atd., [1], [12], [13]. Jako budící signál využíváme:

- schodovou funkci,
- delta funkci,
- obdélníkovou funkci,
- lineárně rostoucí funkci,
- trojúhelníkovou funkci,
- harmonickou funkci.

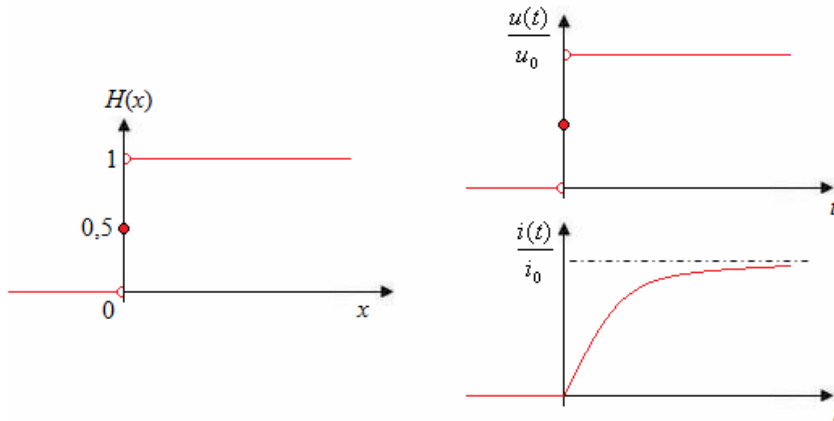
Všechny dále popsané funkce jsou pro RC obvod (zdroj napětí, rezistor, kondenzátor).

Heavisideova schodová funkce $H(x)$ je matematickou funkcí, označovanou jako jednotkový skok. Pro záporné hodnoty argumentů nabývá nulové hodnoty, pro kladné hodnoty argumentů je rovna jedné a pro nulovou hodnotu argumentů je rovna 0,5. Lze ji popsat následujícím obrázkem (*Obr. 14*) a definovat vztahem

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1/2, & x = 0, \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$u(t)/u_0 = H(t), \quad i(t)/i_0 = 1 - e^{-t/\tau} \quad \text{pro } t \geq 0, \quad (15)$$

kde $u(t)$ je časově proměnné napětí, u_0 je hodnota budícího napětí, $i(t)$ je proudová odezva, i_0 je hodnota ustáleného proudu a τ je časová konstanta, [1], [12].

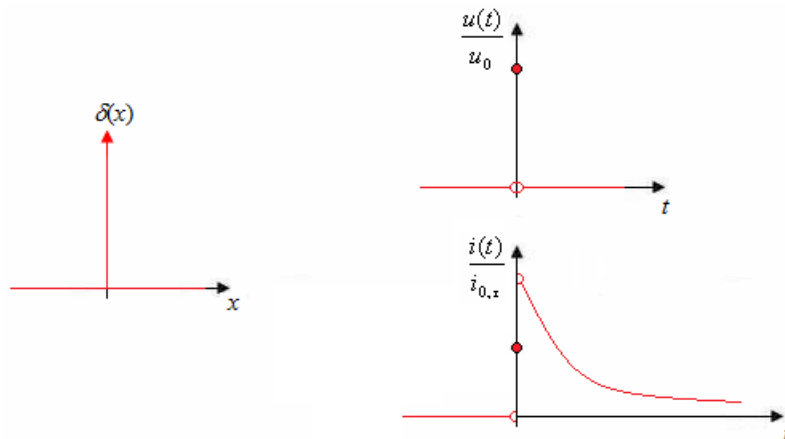


Obr. 14 Heavisideova schodová funkce (příklad pro RC obvod) [1]

Diracova delta funkce $\delta(x)$, je matematickou funkcí, označovanou jako derivace schodové funkce. Pro záporné a kladné hodnoty argumentů nabývá nulové hodnoty a pro nulové hodnoty argumentů se tato funkce blíží nekonečnu, [1], [12]. Lze ji popsat následujícím obrázkem (Obr. 15) a definovat vztahem

$$\delta(x) = \frac{d}{dx} [H(x)] = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \infty, & x = 0, \\ 0, & x > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$u(t)/u_0 = \delta(t), \quad i(t)/i_{0,\tau} = e^{-t/\tau} \quad \text{pro } t \geq 0, \quad (17)$$

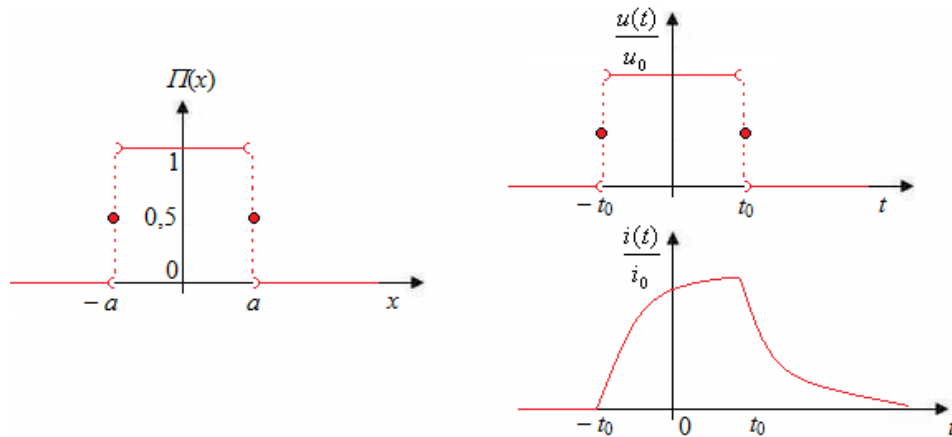


Obr. 15 Diracova delta funkce (příklad pro RC obvod) [1]

Obdélníková funkce $\Pi(x)$, je matematickou funkcí. Je definována jako rozdíl dvou Heavysideových schodových funkcí, [1], [12]. Lze ji popsat následujícím obrázkem (Obr. 16) a definovat vztahem

$$\Pi(x) = H(x+a) - H(x-a) = \begin{cases} 0, & |x| > a \\ 1/2, & |x| = a \\ 1, & |x| < a \end{cases}, \quad (18)$$

$$u(t)/u_0 = H(t+t_0) - H(t-t_0), \quad i(t)/i_{0,\tau} = e^{-t+t_0/\tau} - e^{-t-t_0/\tau} \text{ pro } t \geq 0, \quad (19)$$

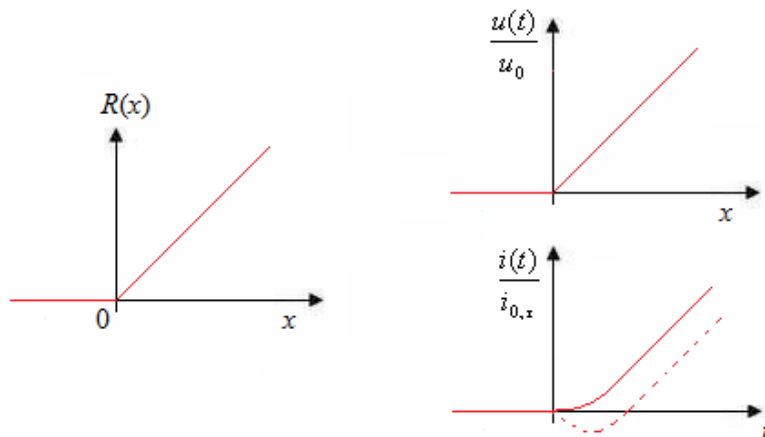


Obr. 16 Obdélníková funkce (příklad pro RC obvod) [1]

Lineárně rostoucí funkce $R(x)$, je matematickou funkcí. Je definována jako součin Heavysideovy schodové funkce a proměnné x , [1], [12]. Lze ji popsat následujícím obrázkem (Obr. 17) a definovat vztahem

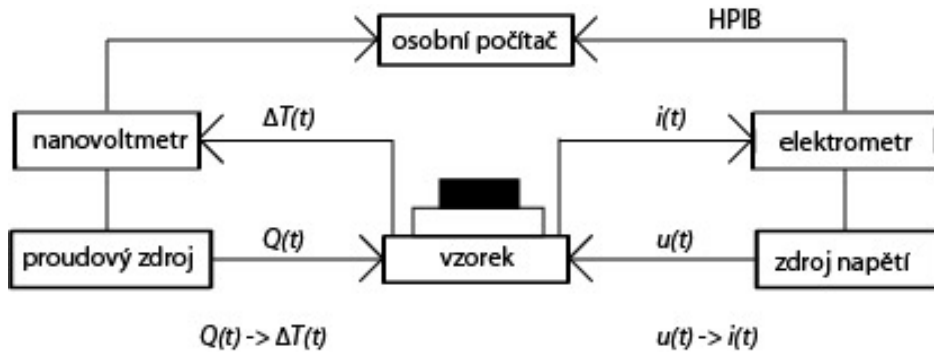
$$R(x) = x H(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ x, & x > 0 \end{cases}, \quad (20)$$

$$u(t)/u_0 = R(t) = t, \quad i(t)/i_{0,\tau} = t/\tau - (1 - e^{-t/\tau}), \quad t \geq 0, \quad (21)$$



Obr. 17 Lineárně rostoucí funkce (příklad pro RC obvod) [1]

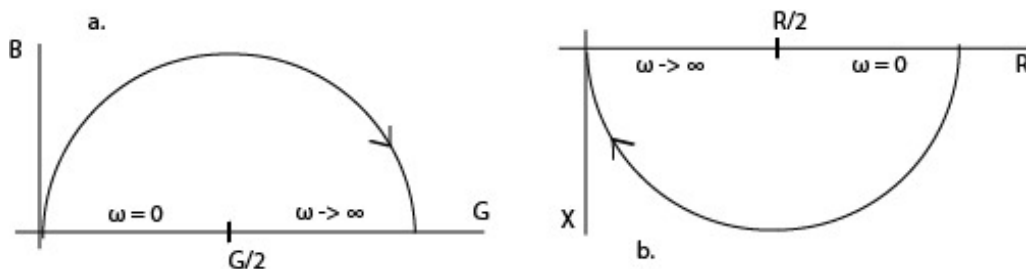
Tranzientní měření se využívají např. k měření tepelných vlastností látek $Q(t) \rightarrow \Delta T(t)$, elektrických vlastností látek $u(t) \rightarrow i(t)$, $q(t) \rightarrow i(t)$ (Obr. 18), resp. k měření optoelektrických vlastností látek $\Phi(t) \rightarrow i_f(t)$, [1], [12].



Obr. 18 Schéma zapojení a měření teplotních závislostí tepelných a elektrických vlastností látek

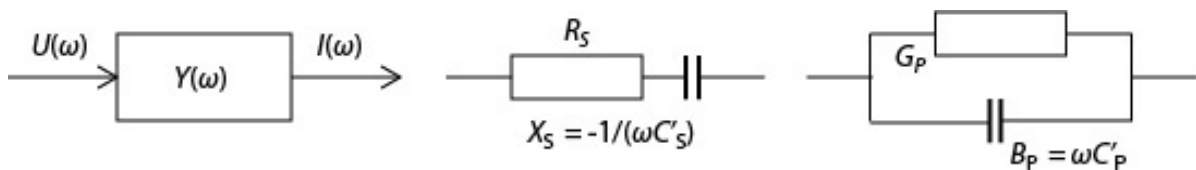
2.3.2. Frekvenční měření (impedanční spektroskopie)

Zabývá se studiem frekvenční odezvy střídavého elektrického proudu a slouží ke studiu dielektrických vlastností prostředí jako funkcí frekvence. Frekvenční měření se často využívá k popisu elektrického chování systému, kde je systém ovlivňován řadou úzce spojených procesů. Impedanční spektroskopie je charakterizována jako souhrn informací o jedné nebo více impedančních funkcích (Z impedance, Y admittance, M modulární funkce, ϵ dielektrická permitivita). Velmi důležitým popisem pro tyto systémy se stalo Cole-Coleovo vyjádření (Obr. 19) reálné a imaginární permitivity pro dielektrický systém v komplexní rovině (Cole-Cole diagram), [1], [12].



Obr. 19 Závislost a) susceptance na konduktanci v sériovém modelu, b) reaktance na rezistanci v paralelním modelu

Frekvenční měření (přímé měření impedance Obr. 20) spočívá v aplikaci jednofrekvenčního napětí (harmonický zdroj napětí o frekvenci ω a amplitudě U_0) a měření amplitudy I_0 a fázového posuvu proudu Φ_0 (nebo reálné a imaginární části proudu dané frekvence). Měřicí přístroje měří frekvenci automaticky v rozmezí frekvencí od 1 mHz do 10 MHz, [1], [12].



Obr. 20 Frekvenční měření, sériové a paralelní zapojení RC obvodu

Mezi základní veličiny patří *impedance* Z , *admittance* Y , poté *rezistance* R_s , *reaktance* X_s , *konduktance* G_p a *susceptance* B_p . Mezi těmito veličinami jsou následné vztahy

$$Z(\omega) = 1/Y(\omega), \quad (22)$$

$$Z(\omega) = R_s(\omega) + iX_s(\omega), \quad Y(\omega) = G_p(\omega) + iB_p(\omega), \quad (23)$$

pro reaktanci a susceptanci (kapacitanci) platí

$$X_s(\omega) = -\frac{1}{\omega C_s(\omega)}, \quad B_p(\omega) = \omega C_p(\omega), \quad (24)$$

kde

$$C(\omega) = \varepsilon(\omega)S/l = C'(\omega) + iC''(\omega), \quad (25)$$

C je kapacita a dolní index určuje, zda jde o sériové (s) nebo paralelní (p) zapojení (Obr. 20).

Další veličinou je *komplexní permitivita*. Tyto veličiny spolu souvisí podle vztahu

$$\varepsilon(\omega) = \frac{Y(\omega)}{\omega C_c} = \frac{G_p(\omega) + iB_p(\omega)}{\omega C_c} = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega), \quad (26)$$

kde $C_c = \varepsilon_0 S/l$ je geometrická kapacita pro plochu S a l je vzdálenost elektrod, ε_0 je permitivita vakua, [6].

Cole-Cole diagram (Obr. 19) vyjadřuje závislost susceptance na konduktanci v sériovém obvodu nebo závislost reaktance na rezistanci v paralelním obvodu, [1], [12]. Můžeme jej vyjádřit pomocí vztahů

$$B^2 + (G - G_s/2)^2 = (G_s/2)^2, \quad B^2 = G(G_s - G), \quad (27)$$

$$X^2 + (R - R_p/2)^2 = (R_p/2)^2, \quad X^2 = R(R_p - R), \quad (28)$$

$$G_s = 1/R_s, \quad R_p = 1/G_p. \quad (29)$$

2.3.3. Měření šumů

Šum je s časem měnící se rušivý signál, který vzniká jako důsledek pohybu částic uvnitř vodičů a polovodičů. Všechny procesy odehrávající se v materiálech na mikroskopické úrovni se projeví při měření makroskopických veličin. Charakter šumu je velmi rozmanitý a lze ho měřit ve dvou oblastech. V časové oblasti $i(t)$ a ve frekvenční oblasti $Y(\omega)$. Šumy nejsou jen negativní signály. Jdou využít i pozitivně jako zdroj informace o materiálech, ve kterých vznikají, [1], [12]. Rozeznáváme například tyto druhy šumů:

- impulzní šum,
- výstřelový šum,
- tepelný šum,
- bílý šum,
- šedý šum,

- modrý šum,
- purpurový šum,
- praskavý šum,
- $1/f$ šum,
- $1/f^2$ šum.

Impulzní šum vzniká v polovodičích v důsledku náhodných fluktuací při pohybu nosičů náboje. Projevuje se jako časově závislé vysoké kolísání elektrického proudu. Skládá se z náhlých impulzů. Čas vzniku a doba trvání jsou parametry zcela náhodné a nepředvídatelné.

Výstřelový šum vzniká v polovodičích v důsledku náhodného kolísání počtu nosičů náboje. Projevuje se jako časově závislé mírné kolísání elektrického proudu. Vyskytuje se u součástek s PN přechodem.

Tepelný šum vzniká ve vodičích v důsledku tepelného pohybu nosičů náboje. Projevuje se jako vznik náhodného elektrického proudu.

Bílý šum má charakteristické rovnoměrné rozložení. Amplituda bílého šumu se mění jen nepatrně.

Šedý šum má charakteristický pokles amplitudy při středních hodnotách frekvence.

Modrý šum je typický svým narůstáním intenzity v závislosti na frekvenci. Modrý šum roste lineárně (3 dB na oktávu).

Purpurový šum je typický svým narůstáním intenzity v závislosti na frekvenci. Purpurový šum ovšem narůstá 2x rychleji než modrý šum, tedy 6 dB na oktávu.

Praskavý šum vzniká v polovodičích v důsledku nehomogenní struktury polovodičového materiálu. Projevuje se jako náhodný impulz proudu a napětí.

$1/f$ šum a $1/f^2$ šum (růžový a červený šum) vznikají pouze v elektrickém poli. Lze je využít jako měřítko pro určování spolehlivosti a kvality zařízení.

Při měření šumů se měří přechodová odezva soustavy (s šumem), neboli odezva přechodu z jednoho stacionárního stavu do jiného. Nejdříve se na vzorek napojí budící napětí $u(t)$, poté se změří šumová proudová odezva a nakonec se určí frekvenční závislost impedance (pomocí Fourierovy transformace), [1], [12].

2.3.4. Transformace signálů mezi frekvenční a časovou oblastí

K převodu signálů mezi frekvenční a časovou oblastí lze využít

- periodické transformace (např. Fourierova: harmonická funkce a Walsh-Hadamardova: obdélníková funkce),
- waveletové (vlnkové) transformace (např. Haarova: obdélníková funkce).

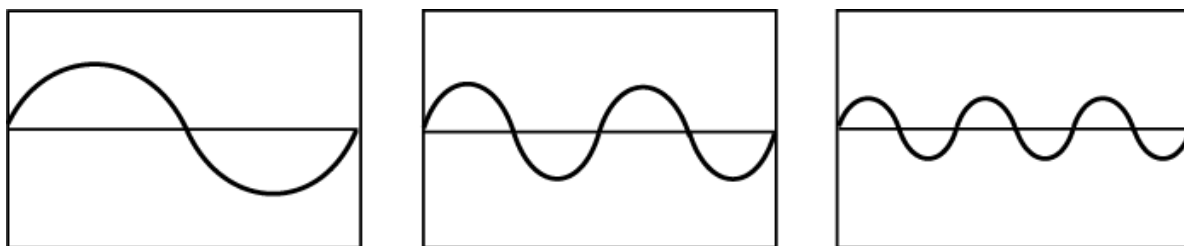
Fourierova transformace (Obr. 21) využívá pro rozklad analyzovaných signálů harmonické funkce (sin, cos) různých kmitočtů. Amplitudy harmonických složek jsou dány koeficienty Fourierova rozvoje. Každý analyzovaný signál lze tedy vyjádřit jako součet sinusových nebo

kosinusových funkcí s různou frekvencí a amplitudou. Podmínkou je nutnost integrovatelnosti transformované funkce, [1], [12] - [14]. Fourierova transformace je definována vztahy

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (30)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (31)$$

kde $F(\omega)$ je frekvenční spektrum signálu, ω je úhlový kmitočet, i je imaginární jednotka, $f(t)$ je transformovaný spojitý signál, a platí $e^{-i\omega t} = \cos(\omega t) - i \sin(\omega t)$



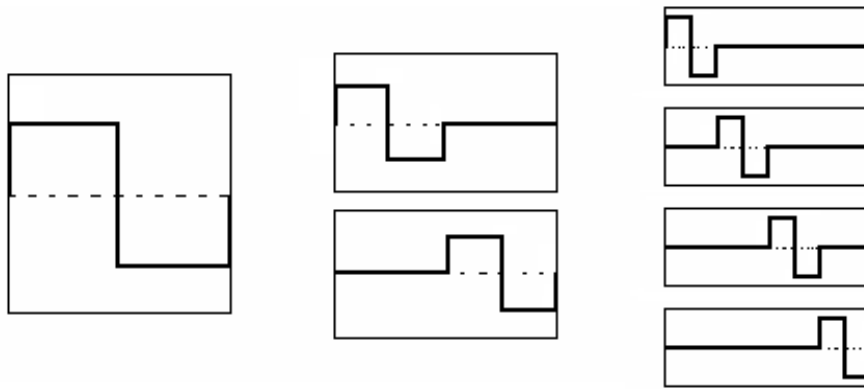
Obr. 21 Fourierova transformace na bázi funkce sinus (změna měřítka) [12]

Haarova transformace (Obr. 22) využívá pro rozklad analyzovaných signálů vlnek (waveletů). Změna měřítka a posunutí základní vlnky nám dává vlnkový koeficient signálu. Vlnky mají charakter impulzního a přechodového signálu. Tato transformace je vhodná pro analýzu rychle se měnících signálů a pro analýzu nestacionárních signálů. Signál se postupně rozkládá na menší funkce (wavelety) až na mateřský wavelet (např. jeden signál o amplitudě 2 je rozložen na dva obdélníkové pulzy s amplitudou 1 a ty jsou dále rozloženy na další dva obdélníkové pulzy o amplitudě 1/2). Haarova vlnka je nejjednodušší vlnka a můžeme ji definovat vztahem

$$WT(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{\tau, s}(t) dt, \quad (32)$$

$$\psi_{\tau, s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right), \quad (33)$$

kde τ je časové posunutí, s je měřítko, $x(t)$ je vstupní analyzovaný signál, ψ je transformační funkce, [1], [12], [14].



Obr. 22 Haarova transformace (změna měřítka a posun) [1]

2.4. Statistické metody: vyhodnocení tranzientních odezev

Statistické metody jsou využívány ve všech oborech. Máme nespočet statistických metod. Statistická fyzika vysvětluje makroskopické vlastnosti materiálů na základě mikroskopických vlastností jejich částic pomocí matematického aparátu.

2.4.1. Fraktální analýza

Fraktál je nekonečně členitý útvar a můžeme jej chápat jako objekt, jehož geometrická struktura se neustále opakuje (např. vločka sněhu). Soběpodobné fraktály jsou struktury, ve kterých se opakuje původní originální motiv a jakýkoliv výsek je přesnou kopií. Soběpříbuzné fraktály jsou struktury, ve kterých se opakuje motiv, ale jakýkoliv výsek je jen podobnou kopií. Fraktál má dvě nejdůležitější charakteristiky a to fraktální dimenzi D a fraktální míru K .

Fraktální dimenze D udává míru nepravidelnosti (úroveň členitosti) daného objektu. Tato dimenze nemusí být charakterizována celočíselnou hodnotou, může obsahovat i iracionální čísla. Fraktální dimenze se srovnává s dimenzí topologickou (celočíselnou). Pokud se tyto dimenze budou lišit málo, tak je objekt málo členitý, pokud hodně, tak je objekt velmi členitý.

Fraktální míra K udává geometrické vlastnosti objektu (délku, plochu, objem), může být vyjádřena např. pixely nebo voxely. Slouží k určování velikosti objektů, [1], [12], [14], [15].

Pro výpočet základních charakteristik černobílých obrázků (vytvořených např. prahováním šedých obrázků) používáme pro fraktální analýzu následující vztahy. Fraktální dimenzi D vypočítáme ze vztahu

$$D = \frac{\ln N}{\ln r} = -\frac{\ln N}{\ln \varepsilon}, \quad (34)$$

kde N je celkový počet čtverců (bílých, černých, resp. černo-bílých), $\varepsilon = 1/r$ je velikost měřítka (čtverců). Fraktální míru K vypočítáme ze vztahu

$$N = K r^D, \quad (35)$$

pomocí lineární regrese následující rovnice

$$\ln N = \ln K + D \ln r, \quad (36)$$

tato rovnice odpovídá rovnici přímky $y = a + bx$ a koeficienty a, b lze použít k určení obou fraktálních parametrů.

Entropii S fraktální struktury vypočítáme ze vztahu [14], [15]

$$S = D \ln r. \quad (37)$$

Velikost černé plochy prahovaného obrázku vypočítáme ze vztahu

$$A_B = \frac{K_{BBW} - K_{BW}}{K_{BBW} + K_{WBW} - K_{BW}}, \quad (38)$$

velikost bílé plochy prahovaného obrázku vypočítáme ze vztahu

$$A_W = \frac{K_{WBW} - K_{BW}}{K_{BBW} + K_{WBW} - K_{BW}}, \quad (39)$$

a velikost plochy pokrývající rozhraní (je úměrná délce křivky) vypočítáme ze vztahu

$$A_{BW} = \frac{K_{BW}}{K_{BBW} + K_{WBW} - K_{BW}}, \quad (40)$$

kde K_{BBW} je fraktální míra černých čtverců včetně křivky, K_{BW} je fraktální míra čtverců křivky, K_{WBW} je fraktální míra bílých čtverců včetně křivky.

Součet všech ploch je rovna

$$A_B + A_W + A_{BW} = 1. \quad (41)$$

Maximální hodnota fraktální míry K prahovaných obrázků o velikosti strany 256 pixelů je

$$K_{\max} = K_B + K_W + K_{BW} = (256 \times 256) \text{ pixelů}. \quad (42)$$

Střední hodnotu AVG prahovaného obrázku (relativní velikost černé plochy) vypočítáme ze vztahu

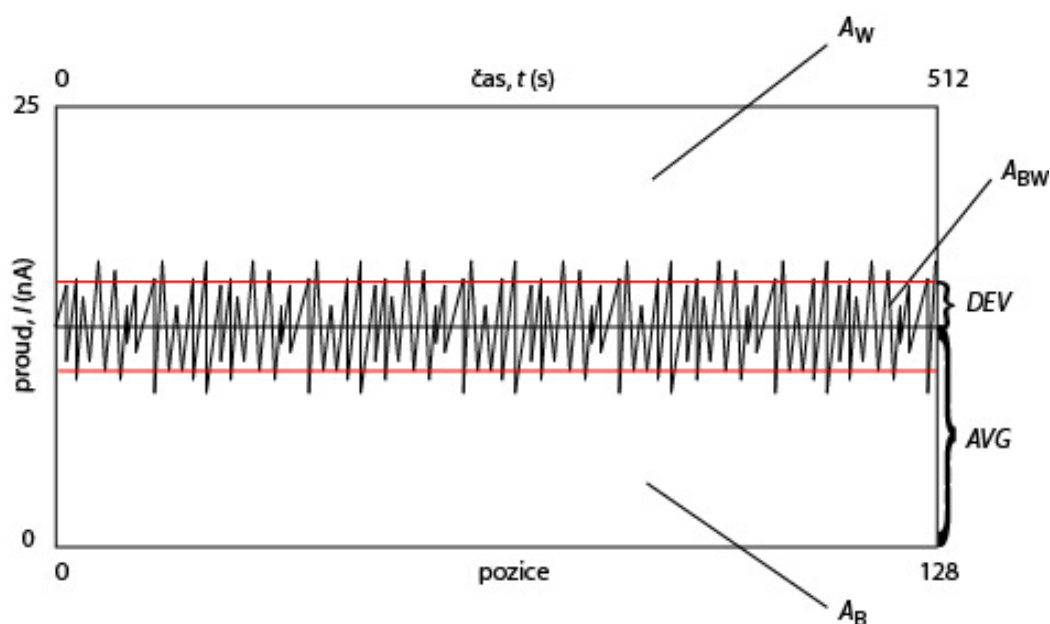
$$AVG = A_B + \frac{A_{BW}}{2}. \quad (43)$$

Směrodatnou odchylku DEV (relativní chyba stanovení velikosti černé plochy) vypočítáme ze vztahu

$$DEV = \frac{A_{BW}}{2}. \quad (44)$$

Analogicky lze analyzovat i signály (časové závislosti), kdy plocha pod křivkou je A_B , plocha nad křivkou je A_W a plocha křivky (úměrná délce křivky) je A_{BW} . Pak AVG je střední hodnota analyzované závislosti a DEV je její směrodatná odchylka (Obr. 23), [14], [15].

Fraktální analýzu můžeme provádět různými metodami. První metodou je např. metoda analyzující oblast o definovaném poloměru (radius method). Je založena na počítání černých a bílých pixelů ve vymezené části obrazce. Následně fraktální dimenze D určená pomocí vztahu (35) poskytne informaci o fraktální charakteristice daného obrazce. Druhou nejpoužívanější metodou je **metoda počítání čtverců** (box counting method). Je založena na počítání čtverců složených z matice pixelů v obrazci: bílých, černých a černo-bílých. Další, vlnková metoda (wavelet method) je založena na použití dvou dimensionální Haarovy transformace. Z analýzy vyplývá, že všechny tři uvedené metody pracují na podobném principu, každá z nich je však vhodná pro jiné aplikace, [14].



Obr. 23 Základní charakteristiky fraktální analýzy měřeného signálu

Pro stanovení fraktální dimenze D lze použít např. program HarFA, který byl vyvinut na Fakultě chemické VUT v Brně. Jedná se o softwarovou aplikaci, která analyzuje obrazová data, signály, videa, atd. pomocí Fourierovy (harmonické) a Haarovy (waveletové) analýzy, společně s fraktální analýzou. Tyto analýzy využívají integrační a sumační pravidla a poté přiřazují prostorovým funkcím např. funkce prostorových frekvencí, viz kapitola 2.3.3., [1], [12], [14].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Náplní této bakalářské práce byla analýza volt-ampérových charakteristik, impedančních spekter a tranzientních odezev vzorků derivátů ftalocyaninů naměřených

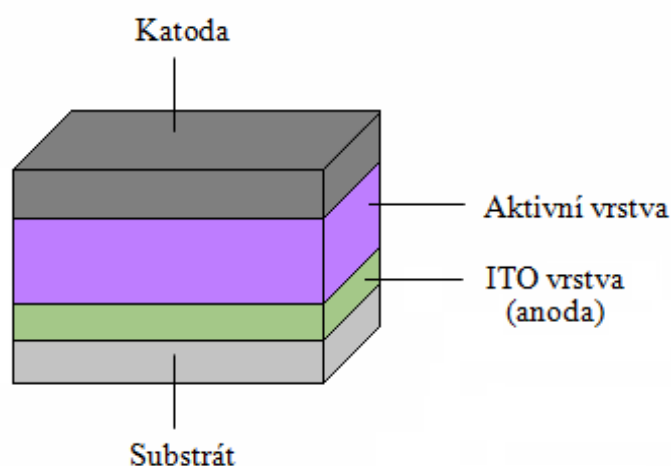
- za tmy a světla,
- pro různé koncentrace aktivní vrstvy (ZnPc/PCBM),
- pro dvě odlišné elektrody (katoda z Al, Au).

3.1. Studované materiály

Organické fotovoltaické články (OPV) jsou tvořeny podložkou, substrátem (sklo, plast), transparentní ITO vrstvou (anoda), organickým polovodičem (aktivní vrstva) a kovovou katodou (zlato, hliník). Jednoduchá struktura tohoto článku je uvedena na obrázku (Obr. 24).

U organických fotovoltaických článků (OPV) jsou důležitými studovanými materiály

- aktivní vrstvy (ZnPc/PCBM),
- kontakty (Au, Al, ITO),
- laminární vrstvy (EVA, PMMA, PS, PVP).



Obr. 24 Struktura organického fotovoltaického článku

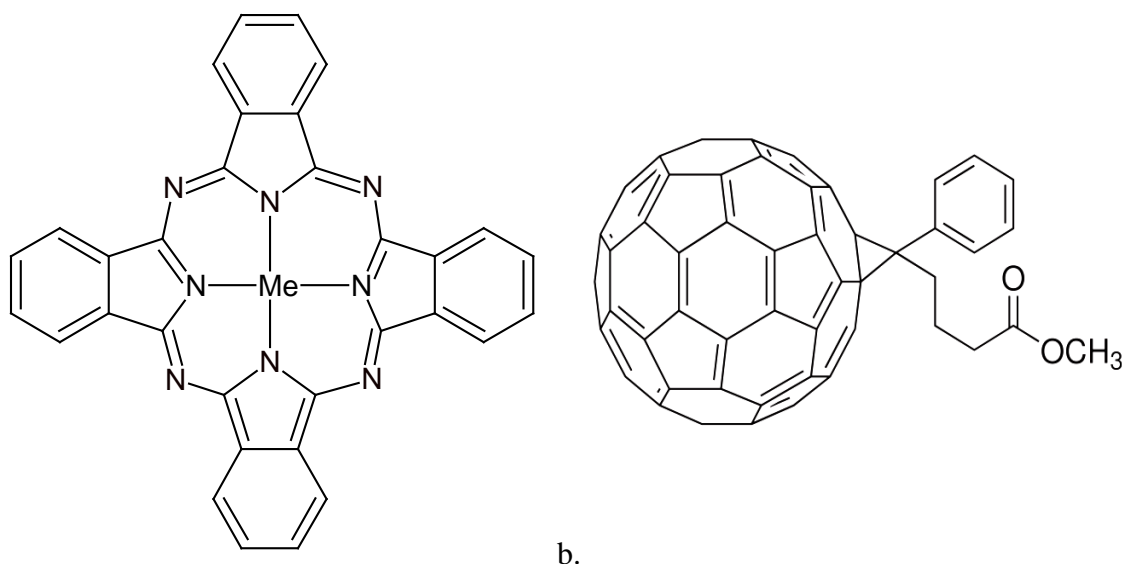
3.1.1. Aktivní vrstvy

U organického fotovoltaického článku se využívají jako aktivní vrstvy organické polovodičové materiály. Organické polovodičové materiály jsou mnohem lepší než anorganické polovodičové materiály, kvůli menší náročnosti na výrobu (organické materiály lze nanášet přímo z roztoku), nejsou drahé a lze je nanášet i na ohebné materiály. Aktivní vrstvy musí být velmi vodivé, fotovodivé a musí vykazovat teplotní a chemickou stabilitu. Z těchto důvodů byly pro organické fotovoltaické články vybrány směsi ftalocyaninů zinku s deriváty fullerénů (ZnPc/PCBM).

Ftalocyaniny jsou organické polymerní materiály, mají rozsáhlý delokalizovaný π -konjugovaný systém. Díky tomuto delokalizovanému systému jsou ftalocyaniny schopny absorbovat viditelné světlo a být použity jako ambipolární vodivé materiály. Mají dobré optoelektrické vlastnosti, jsou teplotně a chemicky stabilní. Ftalocyanin je tmavě modrý pigment, který vzniká jako vedlejší produkt při přípravě z ftalimidu a acetanhydridu. Pokud se jedná o kovové komplexy ftalocyaninů (Obr. 25), tak dva vodíkové atomy v centru jsou nahrazeny kovem

(Cu, Zn, atd.). Využití ftalocyaninů je velmi rozmanité a pestré, např. elektronika, biologie, medicína, atd., [12].

Fullerény jsou organické, polymerní, toxické, dráždivé materiály rozpustné v chlorbenzenu a organických rozpouštědlech. Fullerény jsou velmi dobrými příjemci elektronů, velmi dobře fotovodivé a jsou dobře modifikovatelné v organických rozpouštědlech. U tištěných fotovoltaických článků se využívá vlastností fullerénů (rozpuštění fullerénu v chlorbenzenu a tím vytvoření donor-akceptorní směsi, která je fotovodivá). V této bakalářské práci používáme fullerén PCBM = [6,6]-Phenyl C71 butyric acid methyl ester (směs sloučenin) z firmy Sigma-Aldrich, [16].



Obr. 25 Základní struktura a) ftalocyaninů s centrálním atomem kovu (ZnPc), b) derivátu fullerenu (PCBM)

3.1.2. Kontakty

Jako kontakty se u organických fotovoltaických článků využívají velmi vodivé materiály, které vykazují teplotní a chemickou stabilitu. Proto jsou nejpoužívanějšími kontakty zlato (Au), hliník (Al) a ITO vrstva (směsný oxid india a cínu).

Zlato (Au) je vysoce tepelně i elektricky vodivý, chemicky odolný, měkký, ušlechtilý, drahý kov. V organických fotovoltaických člancích se využívá jako katoda.

Hliník (Al) je dobře tepelně i elektricky vodivý, lehký, nestálý, neušlechtilý, kujný kov. V organických fotovoltaických člancích se využívá jako katoda.

ITO vrstva je vrstva směsného oxidu india a cínu. Je vysoce elektricky vodivá, tenká, stálá a transparentní. Vykazuje malý elektrický odpor, dobrou adhezi ke sklu, odolává vlhkosti a UV záření. Je chemicky velmi stabilní, mechanicky odolná. Chová se, jako degenerovaný polovodič typu N. V organických fotovoltaických člancích se využívá jako anoda, [12].

3.1.3. Laminační vrstvy

Laminační materiály neboli zapouzdřovací materiály slouží k ochraně organických fotovoltaických článků. Fotovoltaické články nesmí navlhnout ani být jiným způsobem poškoze-

ny, proto se v posledních letech klade velký důraz na tento materiál, který je na bázi polymerů. Laminační materiál nesmí ovlivňovat kvalitu článku a hlavně jeho vlastnosti. Na základě těchto požadavků (dobrá adheze, stejná tepelná expanze, výborná propustnost světla, velmi nízká hydrolyza, chemická odolnost, atd.) bylo vybráno několik materiálů, které by neměly zásadně ovlivňovat kvalitu článků. Laminovat můžeme dvojím způsobem a to laminací a tiskem. Fakulta chemická VUT v Brně využívá laminaci tiskem, [17].

Etylen vinyl acetát (EVA) byl asi od poloviny 80. let vybrán jako nejlepší laminační materiál pro solární články. EVA (termoset) je náhodný kopolymer nepolárního etylenu a polárního vinyl acetátu (obsah 33%). Stabilizace požadovaných vlastností je dosažena několika přídatnými plnivými jako UV stabilizátory a antioxidanty. Proces laminace a vytvrzení probíhá ve vakuovém laminátoru nebo tiskem. Na laminaci solárních článků se využívají dva typy EVA (EVA 15295 a EVA A9918), jejich jediný rozdíl je v délce laminace, [17], [18].

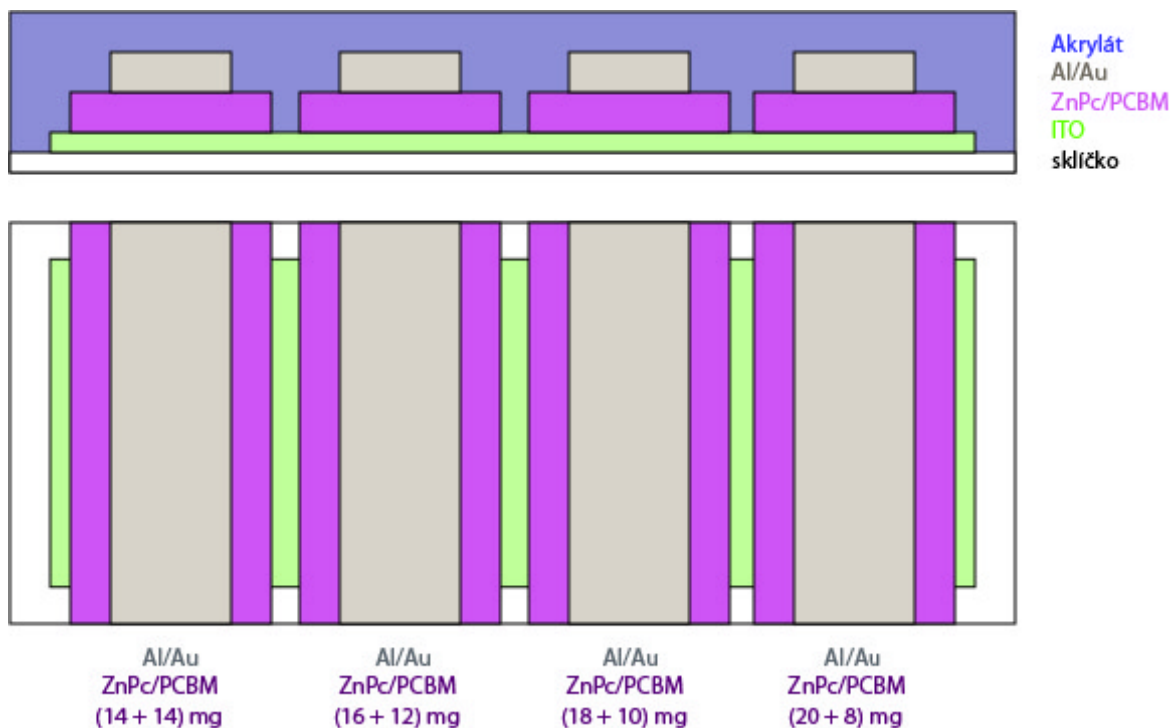
Polymetylmetakrylát (PMMA) je kopolymer akrylonitrilu s metylmetakrylátem (vzniká reakcí acetonu s kyanovodíkem). Jedná se o termoplast. Jeho polymerací v bloku se vyrábí organické sklo (plexisklo). PMMA má vynikající fotostabilitu a propustnost světla, odolává vodě, má dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti. Nanášení PMMA na fotovoltaický článek se provádí tiskem, [18].

Polystyren (PS) vzniká radikálovou polymerací styrenu (styren se připravuje dehydrogenací etylbenzenu). Reakce probíhá velmi snadno, za normálních podmínek. Existuje několik typů PS: sklovitý, houževnatý, pěnový, atd. V praxi se především uplatňuje houževnatý PS (je modifikován kaučukem). PS má v porovnání s PMMA horší vlastnosti. Má menší propustnost světla a menší teplotní rozpětí. Nanášení PS na fotovoltaický článek se provádí tiskem, [18].

Polyvinylpyrrolidon (PVP) je homopolymer. Vzniká z vinylpyrrolidonu. PVP je dobře rozpustný ve vodě. Toho se využívá pro nanášení velmi tenkých vrstev PVP na fotovoltaické články, protože PVP poté zasychá v podobě vloček, které vytvářejí film. Tento film je hydrofobický a vysoce fotocitlivý, [18].

3.2. Popis struktury vzorku

Námi měřený vzorek (25 mm × 75 mm) je složen ze skleněné podložky. Na ní se nachází tenká ITO vrstva, která plní funkci spodní elektrody (anody), díky své vysoké vodivosti. Na ITO vrstvě je aktivní vrstva, na kterou je následně napařen horní kontakt (katoda) z hliníku nebo zlata. Vzorek je nakonec zapouzdřen laminací (*Obr. 26*).



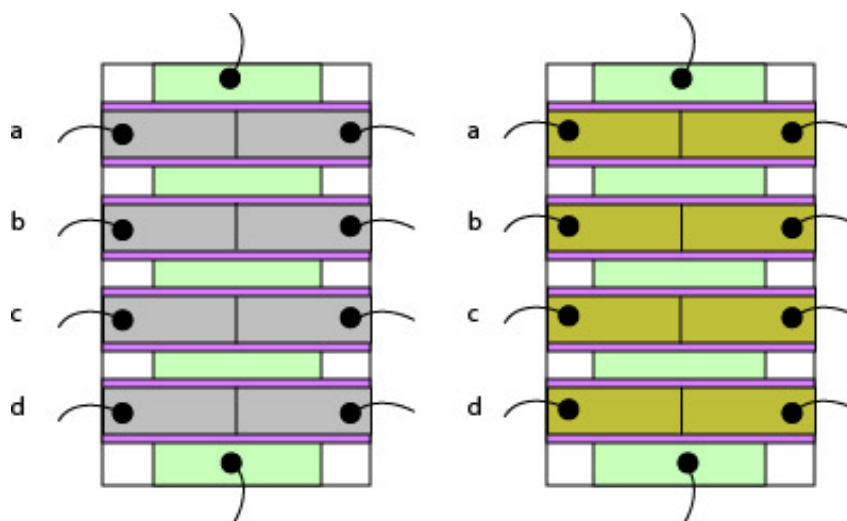
Obr. 26 Uspořádání vrstev měřeného vzorku

3.3. Příprava vzorku

Nejdříve si připravíme sklíčka velká 25 mm × 75 mm a důsledně je vyčistíme, aby byla dokonale čistá. Poté na jednotlivá sklíčka nanese tenkou vrstvu ITO, a umístíme je na podložku tak, abychom je nemohli poškodit. Pomocí METEXu zjistíme, na které straně sklíčka se nachází ITO vrstva (ITO vrstva má malý odpor, kdežto sklo má velký odpor) a dále pracujeme s ITO vrstvou nahore. Poté přesně doprostřed, podél sklíčka, nalepíme na ITO vrstvu izolepu o rozměrech 18 mm × 70 mm a dokonale vyhladíme. Následně sklíčka vložíme do příslušné nádoby (ITO vrstvou nahoru) a přelijeme roztokem HCl (HCl:dH₂O 1:1 V/V). Do roztoku ještě nasypeme 2 lžičky práškového zinku. Necháme leptat ITO vrstvu po dobu cca 30 s, poté roztok zředíme destilovanou vodou. Sklíčka vyjmeme, odstraníme izolepu, očistíme acetonem, ještě vyčistíme v rukavicích pomocí detergentu Star SOP a opláchneme destilovanou vodou. Následně sklíčka vložíme do dH₂O s tenzidem Star50 P a sklíčka necháme čistit v UZ vaně. Poté je opláchneme dH₂O a 30 min namáčíme v Mili-Q vodě. Po 30 min vodu vyměníme a sklíčka čistíme 30 min v UZ vaně. Sklíčka opláchneme v acetonu a poté čistíme 15 min v UZ vaně. Nakonec sklíčka usušíme. V případě, že na nanášení první vrstvy bylo použito rozpouštědlo, je třeba, aby byla sklíčka (jako poslední krok) vložena na 30 min, v UZ vaně, do tohoto rozpouštědla.

Příprava měděných (Cu) drátků a aplikace na vzorky: Cu drátěné klubko nastříháme na 8 cm kousky a opálíme polyuretanovou izolaci z konců drátků. Opálené drátky ponoříme do roztoku HCl (HCl:dH₂O 1:1 V/V) na cca 15 min. Po 15 min drátky vyjmeme a očistíme. Poté pomocí pinzety vytvoříme na jednom konci drátku očko a měděný drát vyrovnáme, aby byl co nejrovnější (bez ohybů, lomů, kroucení). Na připravené vzorky připevňujeme měděné drátky s očkama pomocí vodivých past. Vodivé pasty se musí ředit svým specifickým ředidlem. Pasta se nanese na elektrodu vzorku, očko měděného drátu se ponoří do pasty a následně umístí na počátek elektrody vzorku a zakápně se opět pastou (Obr. 27). Pasta nesmí zasahovat na

ITO vrstvu a nesmí spojit dvě elektrody. Takto připravené vzorky se nechají zaschnout v Petriho miskách cca do druhého dne a následně se laminují tiskem.



Obr. 27 Nakontaktovaný vzorek s označením kontaktů

3.4. Měřené struktury

Připravené (Obr. 26), nakontaktované (Obr. 27) vzorky byly proměřeny podle tabulky (Tabulka I). Vzorky se liší hliníkovým a zlatým kontaktem a různou koncentrací aktivní vrstvy (ZnPc/PCBM). Vzorky měly vždy sandwichovou strukturu. V práci jsou diskutovány výsledky pro žlutě označené vzorky.

Tabulka I. Struktura studovaných vzorků

číslo	kontakt	podložka	elektroda	ZnPc/PCBM (mg) 1 ml CIB + 2 ml CHN	elektroda	laminace - podmínky
1	a	sklo	ITO	14 + 14	Al	akrylát - 16n, 20 μ m, 40 °C, 1 vrstva
	b			16 + 12		
	c			18 + 10		
	d			20 + 8		
2	a	sklo	ITO	14 + 14	Au	akrylát - 16n, 20 μ m, 40 °C, 1 vrstva
	b			16 + 12		
	c			18 + 10		
	d			20 + 8		

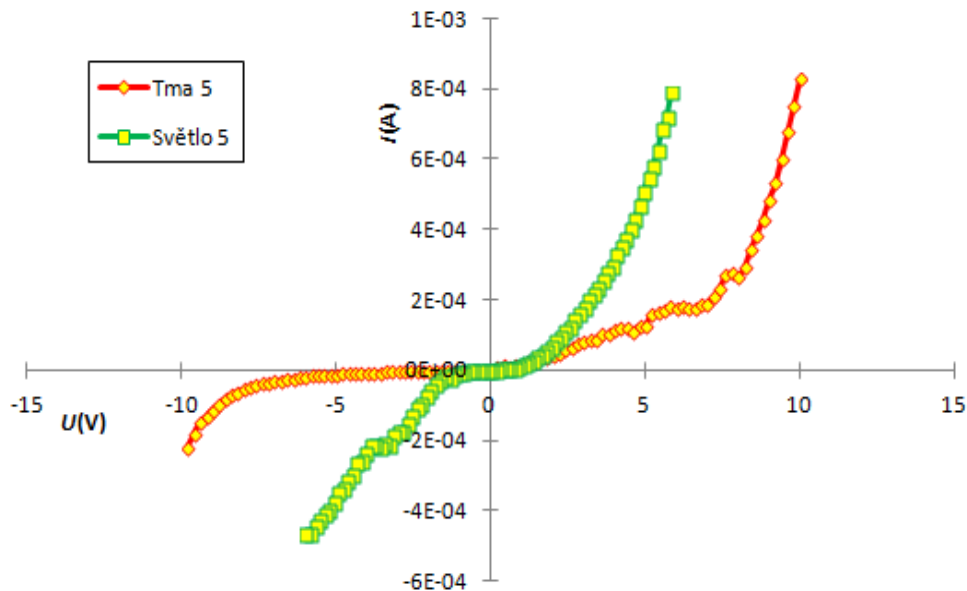
3.5. Stejnoseměrná měření

V tomto experimentu byly proměřeny volt-ampérové charakteristiky vzorků, popsanych v předchozí tabulce (Tabulka I), při konstantní teplotě, za tmy a za světla. Vzorky byly vždy proměřeny 7 \times za tmy a 7 \times za světla, vždy hned za sebou (např. světlo 2 udává 2. měření daného vzorku při osvětlení, tma 6 udává 6. měření daného vzorku za tmy). Vzorky byly měřeny na přístroji Keithley 6517A, Tento zdroj stejnosměrného elektrického napětí umožňuje analyzovat elektrický proud a elektrické napětí. Volt-ampérové charakteristiky (závislost elektrického proudu na napětí) byly již zmiňovány v kapitole 2.2.3. (elektrické vlastnosti optoelektronických součástek – fotovoltaické články).

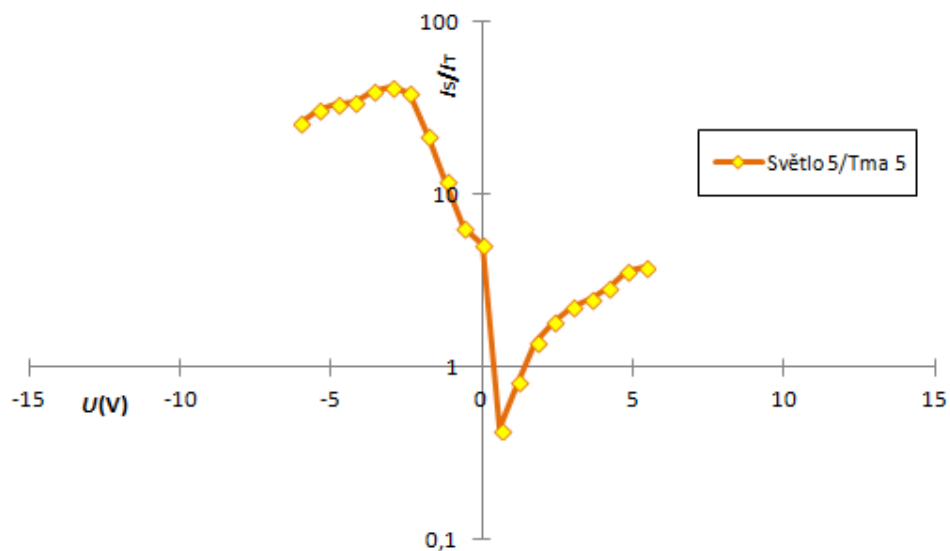
3.5.1. Měření volt-ampérové charakteristiky

Vzorek 1c

Na obrázku (Obr. 28) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorku 1c (18-10), viz *Tabulka I*. Z obrázku je zřejmé, že pro obě polarity napětí dochází ke změně volt-ampérové charakteristiky vlivem osvětlení. Je také zřejmý slabý diodový charakter (nesymetrické volt-ampérové charakteristiky). Vzorek je fotovodivý, protože foton proud je až 60× větší než proud temnotní (po ozáření vzorku jím prochází větší elektrický proud). Na následujícím obrázku (Obr. 29) je uveden poměr volt-ampérové charakteristiky za světla a za tmy vzorku 1c v logaritmickém měřítku na ose y (poměr I_S/I_T , I_S je proud za světla, I_T je proud za tmy). Z obrázku je zřejmé, že vzorek je fotovodivý (hodnota poměru fotonproudu a temnotního proudu je větší než 1).



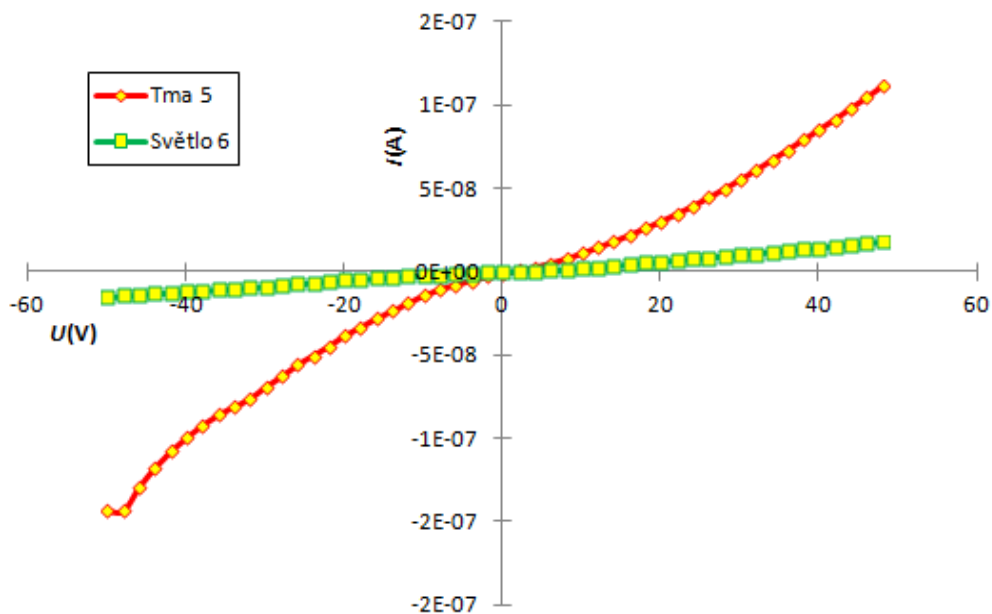
Obr. 28 Volt-ampérové charakteristiky vzorku 1c naměřené za tmy a při osvětlení



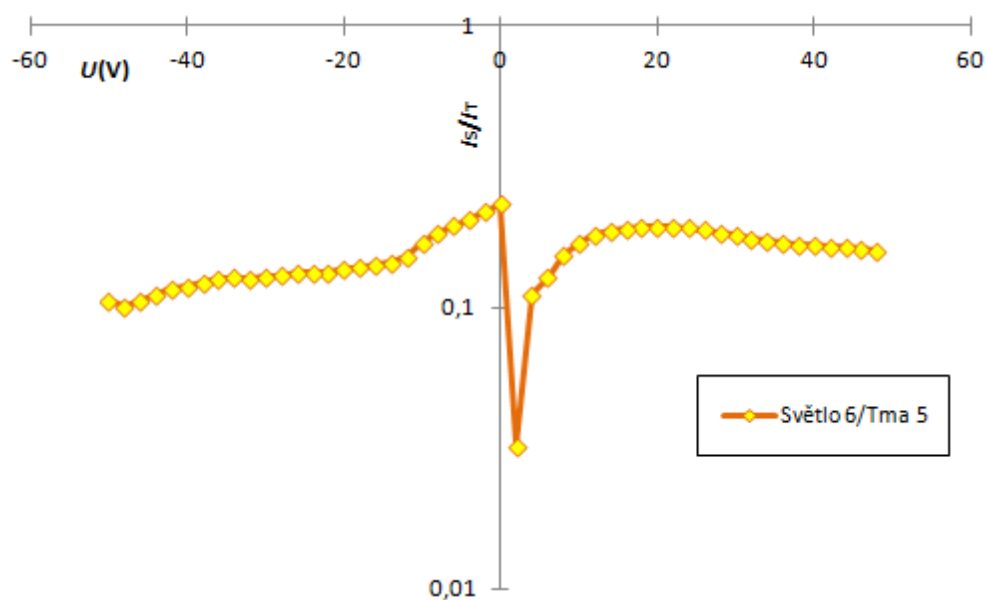
Obr. 29 Závislosti poměru fotonproudu a temnotního proudu (Obr. 28) na napětí

Vzorek 1b

Na obrázku (Obr. 30) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorku 1b (16-12), viz Tabulka I. Z obrázku je zřejmé, že pro obě polarities napětí dochází ke změně volt-ampérové charakteristiky vlivem osvětlení. Volt-ampérové charakteristiky jsou nelineární a symetrické. Vzorek vykazuje světlem generovanou bariéru, tzn., že po ozáření vzorku jím prochází menší elektrický proud než za tmy (asi 8×). Vzorek tedy nevykazuje fotovodivost. Na následujícím obrázku (Obr. 31) je uveden poměr volt-ampérové charakteristiky za světla a za tmy vzorku 1b v logaritmickém měřítku na ose y (poměr I_S/I_T , I_S je proud za světla, I_T je proud za tmy). Z obrázku je zřejmé, že vzorek vykazuje světlem generovanou bariéru (hodnota poměru fotoproudu a temnotního proudu je menší než 1).



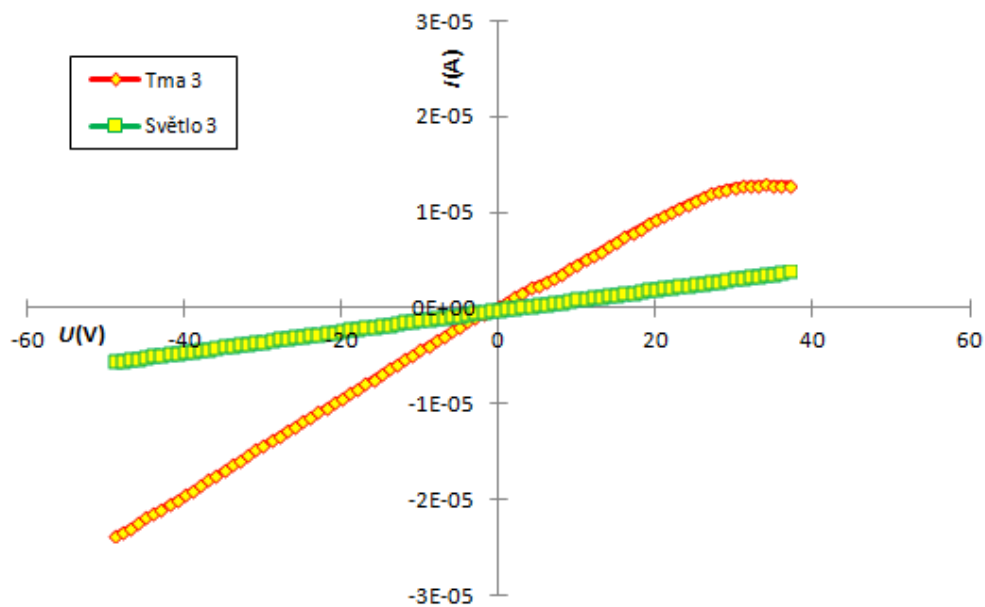
Obr. 30 Volt-ampérové charakteristiky vzorku 1b naměřené za tmy a při osvětlení



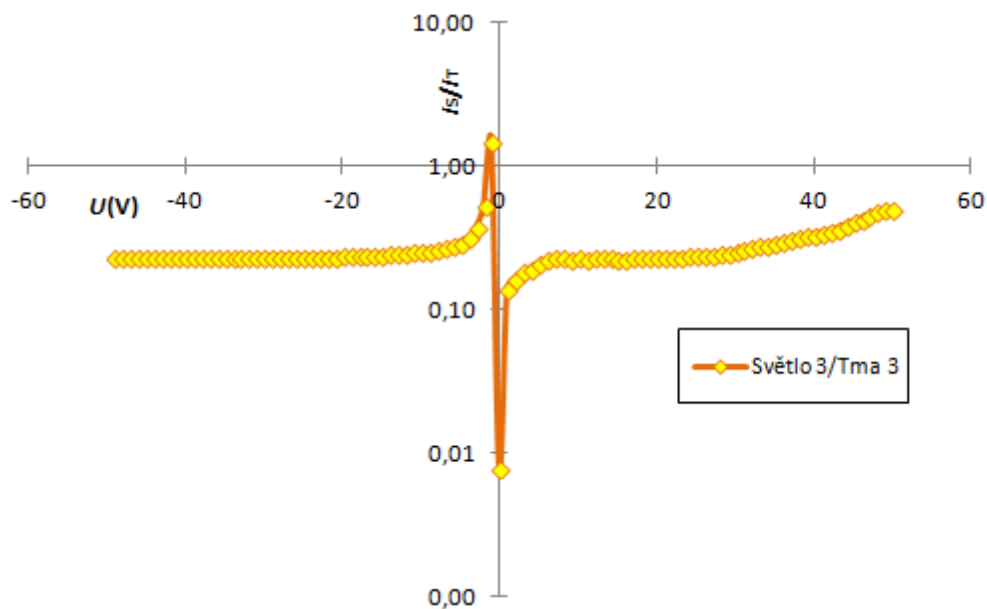
Obr. 31 Závislosti poměru fotoproudu a temnotního proudu (Obr. 30) na napětí

Vzorek 2a

Na obrázku (Obr. 32) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorku 2a (14-14), viz Tabulka I. Z obrázku je zřejmé, že pro obě polarities napětí dochází ke změně volt-ampérové charakteristiky vlivem osvětlení. Na rozdíl od předcházejícího vzorku, který má nelineární charakter má tento vzorek volt-ampérové charakteristiky lineární (ohmický charakter). Vzorek vykazuje světlem generovanou bariéru, tzn., že po ozáření vzorku jím prochází menší elektrický proud než za tmy (o půl řádu menší). Vzorek tedy nevykazuje fotovodivost. Na následujícím obrázku (Obr. 33) je uveden poměr volt-ampérové charakteristiky za světla a za tmy vzorku 2a v logaritmickém měřítku na ose y (poměr I_S/I_T , I_S je proud za světla, I_T je proud za tmy).



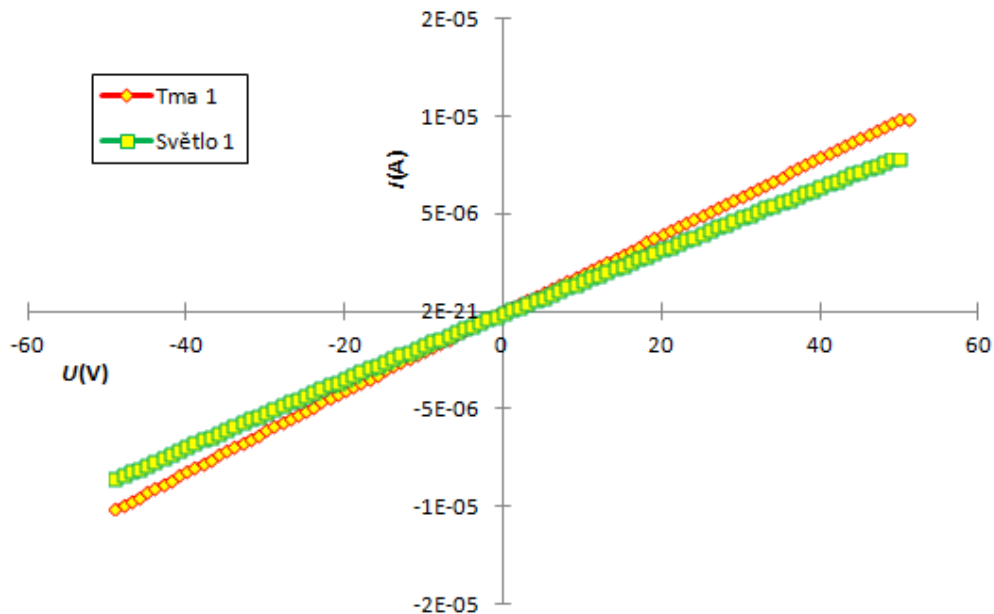
Obr. 32 Volt-ampérové charakteristiky vzorku 2a naměřené za tmy a při osvětlení



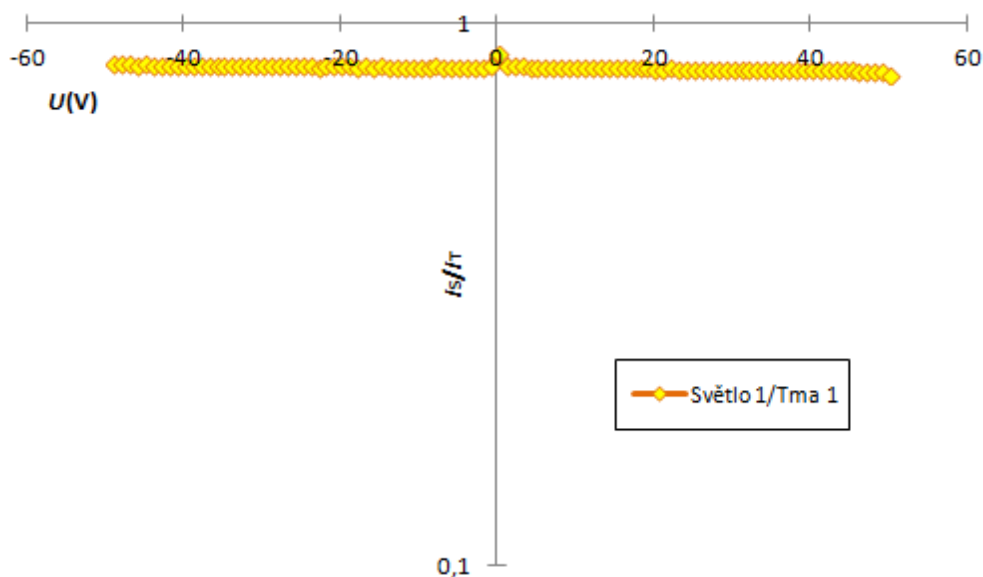
Obr. 33 Závislosti poměru fotoproudu a temnotního proudu (Obr. 32) na napětí

Vzorek 2c

Na obrázku (Obr. 34) jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky vzorku 2c (18-10), viz Tabulka I. Z obrázku je zřejmé, že pro obě polaritiny napětí dochází ke změně volt-ampérové charakteristiky vlivem osvětlení. Stejně jako předcházející vzorek, má tento vzorek volt-ampérové charakteristiky lineární (ohmický charakter). Vzorek vykazuje světlem generovanou bariéru, tzn., že po ozáření vzorku světlem jím prochází nepatrně menší elektrický proud než za tmy. Vzorek tedy nevykazuje fotovodivost. Na následujícím obrázku (Obr. 35) je uveden poměr volt-ampérové charakteristiky za světla a za tmy vzorku 2c v logaritmickém měřítku na ose y (poměr I_S/I_T , I_S je proud za světla, I_T je proud za tmy).



Obr. 34 Volt-ampérové charakteristiky vzorku 2c naměřené za tmy a při osvětlení



Obr. 35 Závislosti poměru fotoproudu a temnotního proudu (Obr. 34) na napětí

3.5.2. Závěry

Byly diskutovány výsledky měření volt-ampérových charakteristik za tmy a za osvětlení. Celkově byl jeden vzorek fotovodivý a tři vzorky vykazovaly světlem generovanou bariéru. Vzorek 1c byl fotovodivý a vykazoval fotoproud asi 60× větší než proud temnotní. Vzorky 1b, 2a a 2c vykazovaly světlem generovanou bariéru. Vzorek 1b vykazoval největší bariéru (fotoproud byl asi 8× menší než proud temnotní) a vzorek 2c vykazoval nejmenší bariéru (proudy byly téměř srovnatelné). Vzorky 2a a 2c (Au kontakt) měly lineární průběh volt-ampérové charakteristiky, naopak vzorky 1b a 1c (Al kontakt) měly nelineární průběh.

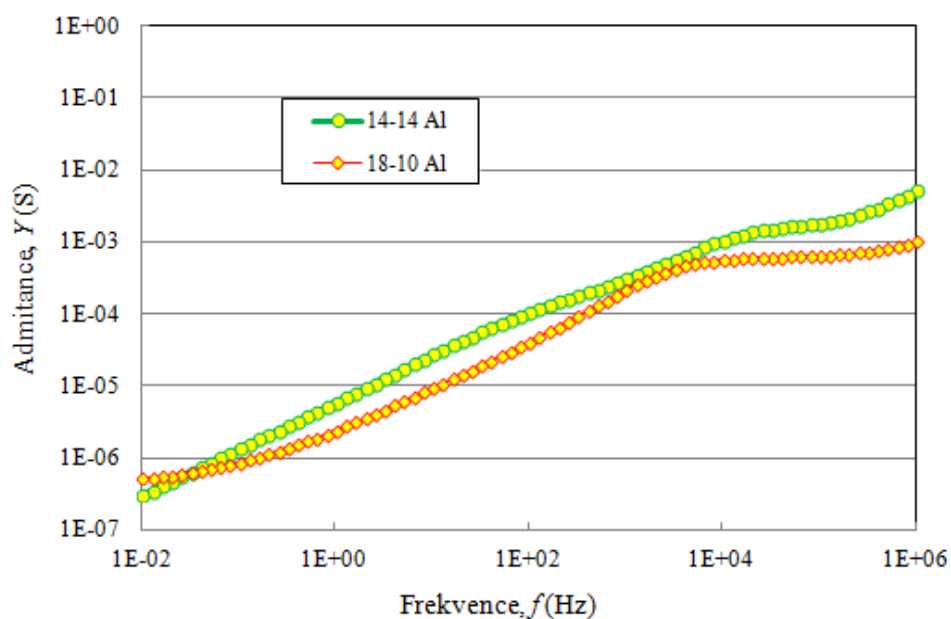
3.6. Střídavá měření

V tomto experimentu byly proměřeny impedanční (frekvenční) charakteristiky vybraných vzorků, popsanych v předchozí tabulce (*Tabulka I*), při konstantní teplotě. Všechny vzorky byly měřeny pouze za tmy, proto nebylo možné studovat fotodielektrické vlastnosti. Vzorky byly měřeny pomocí impedančního analyzátoru HP 4192A. Tento přístroj analyzuje vztah mezi vstupním napětím a výstupním proudem. Z nich stanovuje admitanci vzorku a fázový posun mezi proudem a napětím. Střídavá měření (i se základními výpočty) byla již popsána v kapitole 2.3.2. i se základními výpočty pro konstrukci Cole-Cole diagramů.

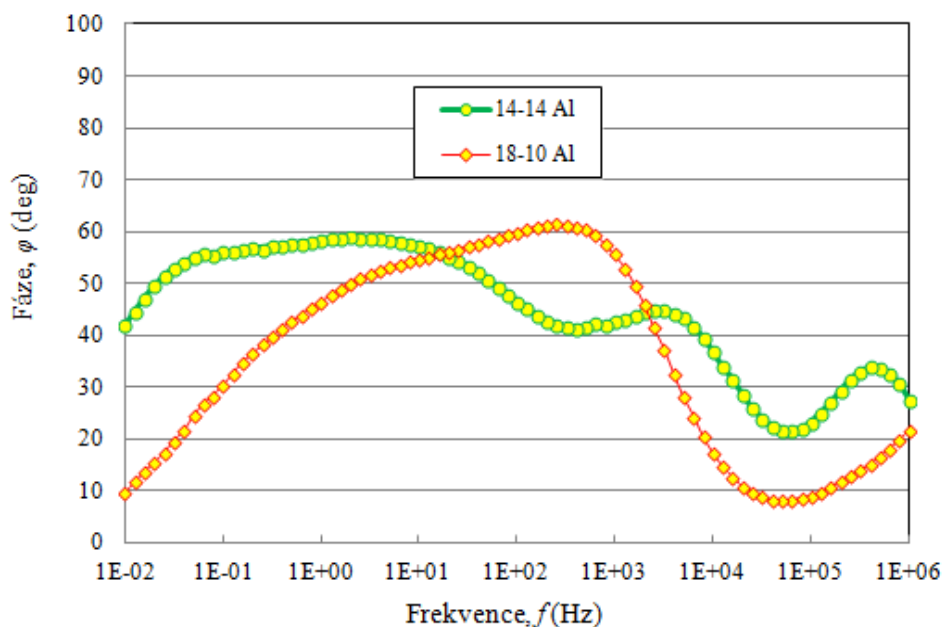
3.6.1. Měření impedančních charakteristik

Vzorky s Al kontaktem

Na obrázcích jsou závislosti admitance (*Obr. 36*) a její fáze (*Obr. 37*) na frekvenci pro vzorky 14-14 a 18-10 opatřených Al kontakty. Z prvního obrázku je zřejmé, že admitance se pro oba vzorky s rostoucí frekvencí zvětšuje. Z fáze lze odhadnout oblasti frekvencí, kde má vzorek ohmický charakter (fáze je malá, pro 0° by to byl ideální rezistor) a oblasti, kde má vzorek kapacitní charakter (fáze je velká, pro 90° by to byl ideální kondenzátor). Složitá závislost fáze na frekvenci ukazuje na poměrně složitý model sestávající z minimálně čtyř paralelních RC obvodů u vzorku 14-14 a minimálně tří paralelních RC obvodů u vzorku 18-10.

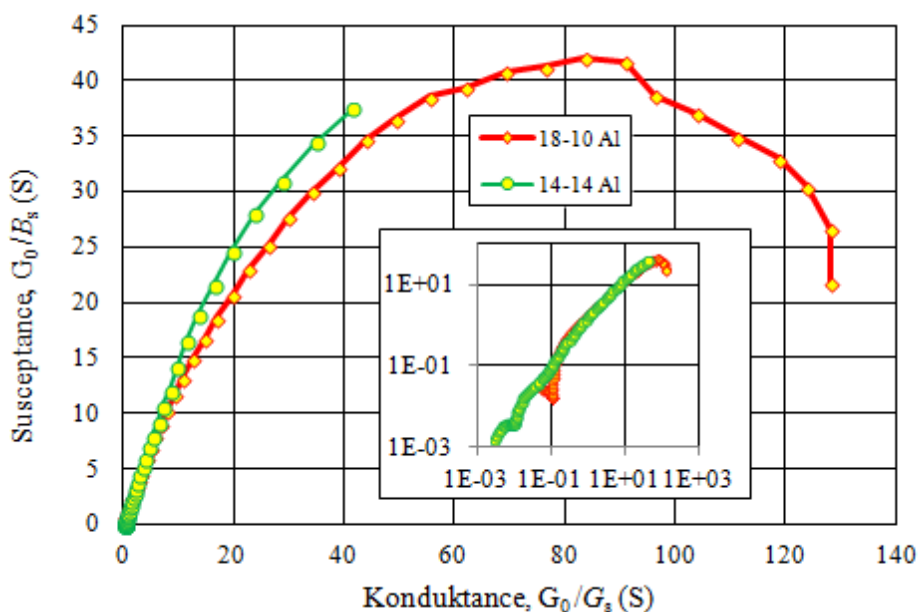


Obr. 36 Graf závislosti admitance na frekvenci u Al kontaktu

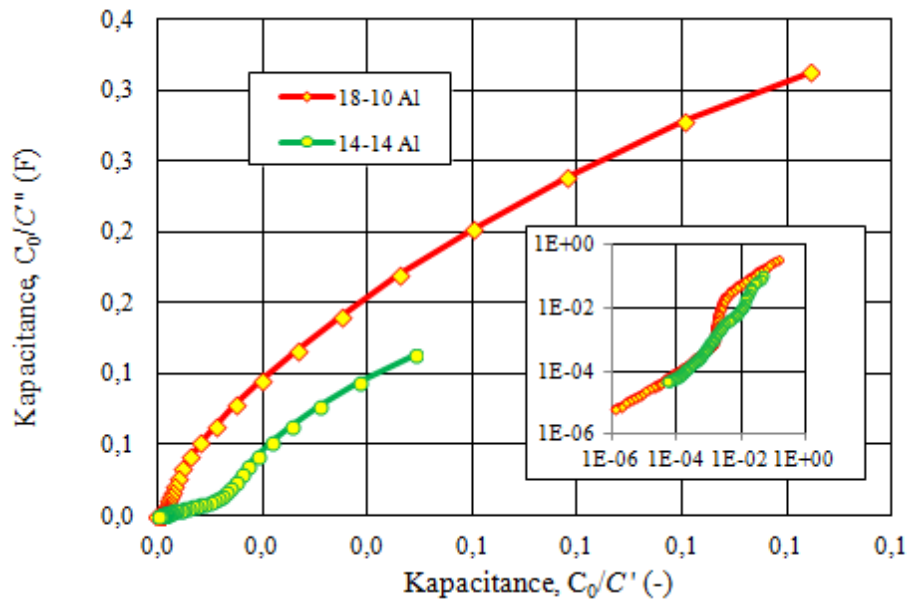


Obr. 37 Graf závislosti fáze na frekvenci u Al kontaktu

Na dalších obrázcích jsou Cole-Cole diagramy, což je závislost susceptance na konduktanci vzorku (Obr. 38), viz rovnice (27) a závislost imaginární složky kapacitance na reálné složce kapacitance (Obr. 39), viz rovnice (25) pro vzorek s Al kontaktem. Z obrázku jsou zřejmé jen závislosti pro velké frekvence, kdy je admittance v řádu 10^{-3} . Závislosti jsou vyneseny v relativních jednotkách pro $G_0 = 1,621 \cdot 10^{-5}$ S (objemová vodivost). Detailnější informace pro celý rozsah frekvencí je zřejmý z obrázku vloženého. Jedná se o tytéž grafy v logaritmickém měřítku.

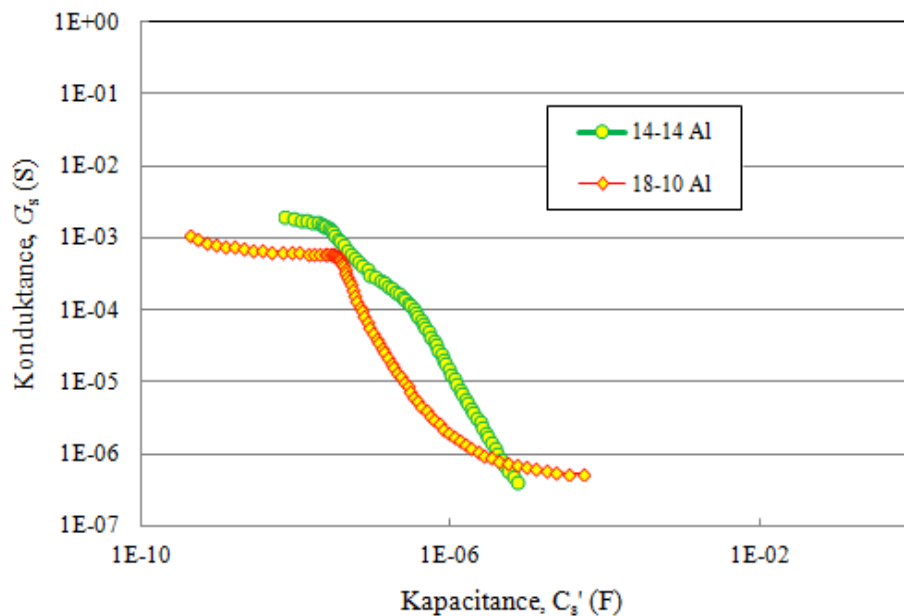


Obr. 38 Graf závislosti susceptance na konduktanci u Al kontaktu

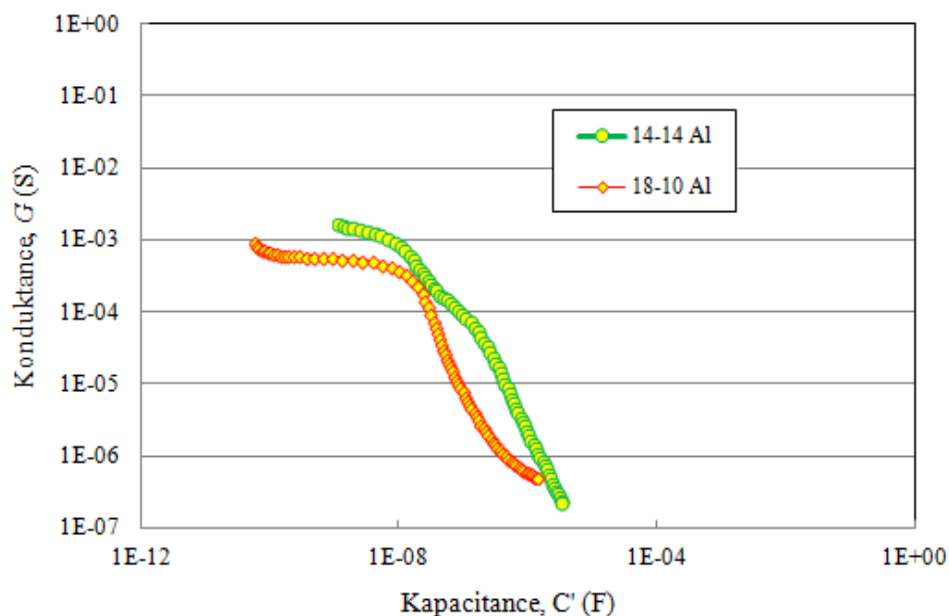


Obr. 39 Graf závislosti imaginární složky kapacity na reálné složce kapacity u Al kontaktu

Na dalších obrázcích jsou závislosti konduktance na kapacitě v sériovém zapojení (Obr. 40) a konduktance na kapacitě v paralelním zapojení (Obr. 41) s použitím Al kontaktu. Z obrázků je zřejmé, že konduktance se s rostoucí kapacitací snižuje (vodivost vzorku se s jeho zvyšujícím se zdánlivým odporem snižuje). Platí pro vzorek 14-14 i 18-10.



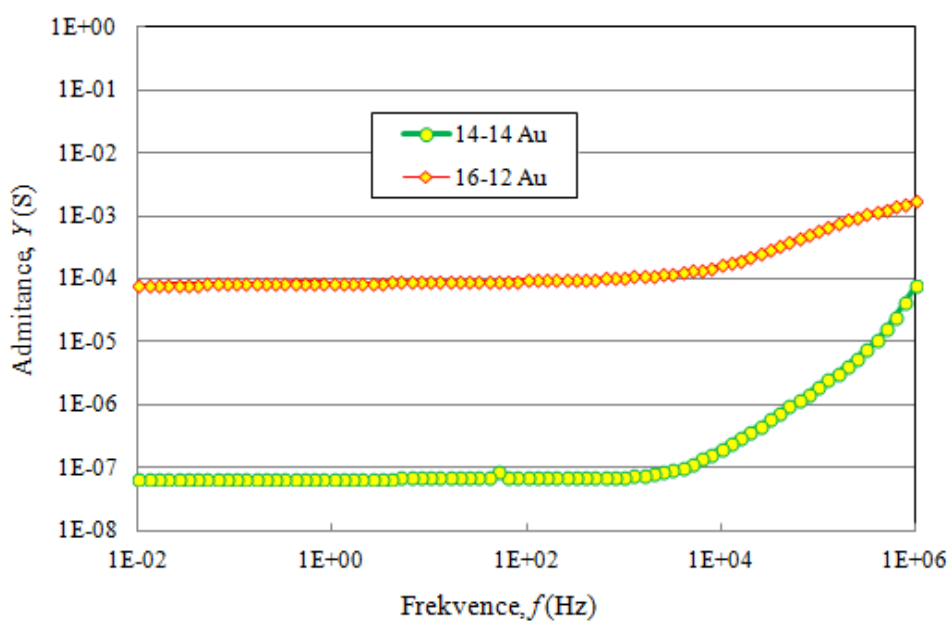
Obr. 40 Graf závislosti konduktance na kapacitě v sériovém zapojení u Al kontaktu



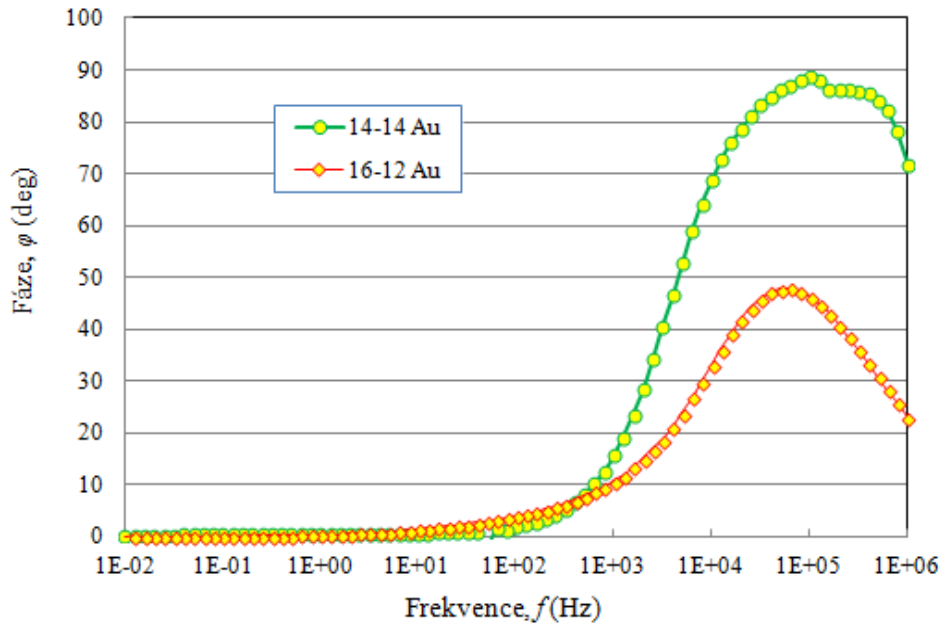
Obr. 41 Graf závislosti konduktance na kapacitanci v paralelním zapojení u Al kontaktu

Vzorky s Au kontaktem

Na obrázcích jsou závislosti admitance (Obr. 42) a její fáze (Obr. 43) na frekvenci pro vzorky 14-14 a 16-12 opatřených Au kontakty. Z prvního obrázku je zřejmé, že admitance se pro oba vzorky s rostoucí frekvencí zvětšuje. Z fáze lze odhadnout oblasti frekvencí, kde má vzorek ohmický charakter (fáze je malá, pro 0° by to byl ideální rezistor) a oblasti, kde má vzorek kapacitní charakter (fáze je velká, pro 90° by to byl ideální kondenzátor). Závislost fáze na frekvenci ukazuje na model sestávající z minimálně jednoho paralelního RC obvodu u obou vzorků (14-14 i 16-12).

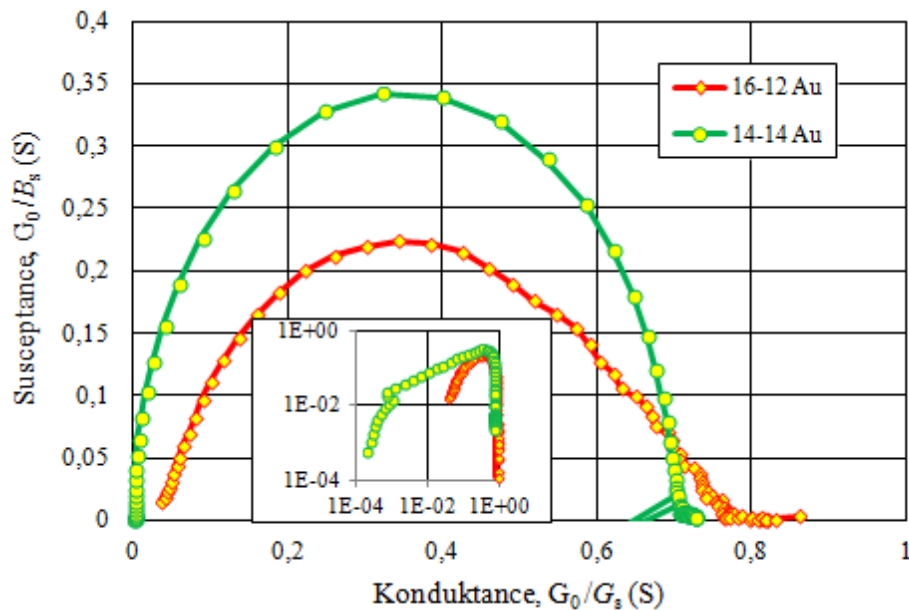


Obr. 42 Graf závislosti admitance na frekvenci u Au kontaktu

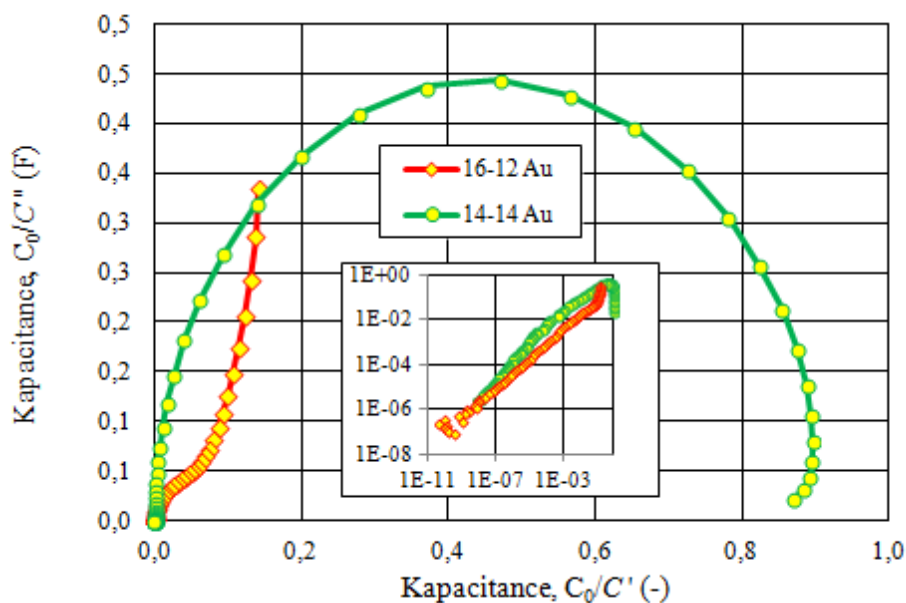


Obr. 43 Graf závislosti fáze na frekvenci u Au kontaktu

Na dalších obrázcích jsou Cole-Cole diagramy, což je závislost susceptance na konduktanci vzorku (Obr. 44), viz rovnice (27) a závislost imaginární složky kapacitance na reálné složce kapacitance (Obr. 45), viz rovnice (25) pro vzorek s Au kontaktem. Z obrázku jsou zřejmé jen závislosti pro velké frekvence, kdy je admittance v řádu 10^{-4} . Závislosti jsou vyneseny v relativních jednotkách pro $G_0 = 1,621 \cdot 10^{-5}$ S (objemová vodivost). Detailnější informace pro celý rozsah frekvencí je zřejmý z obrázku vloženého. Jedná se o tytéž grafy v logaritmickém měřítku.

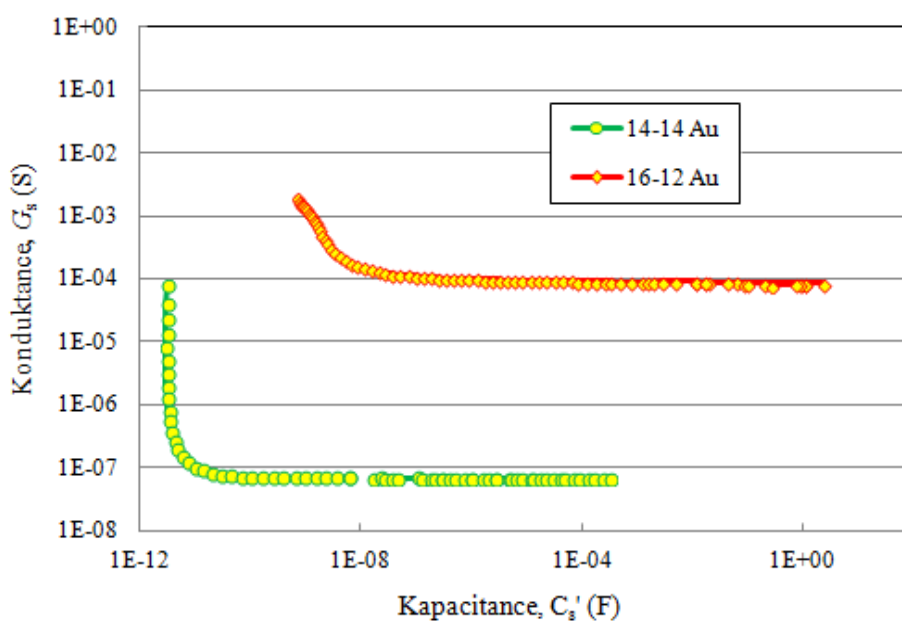


Obr. 44 Graf závislosti susceptance na konduktanci u Au kontaktu

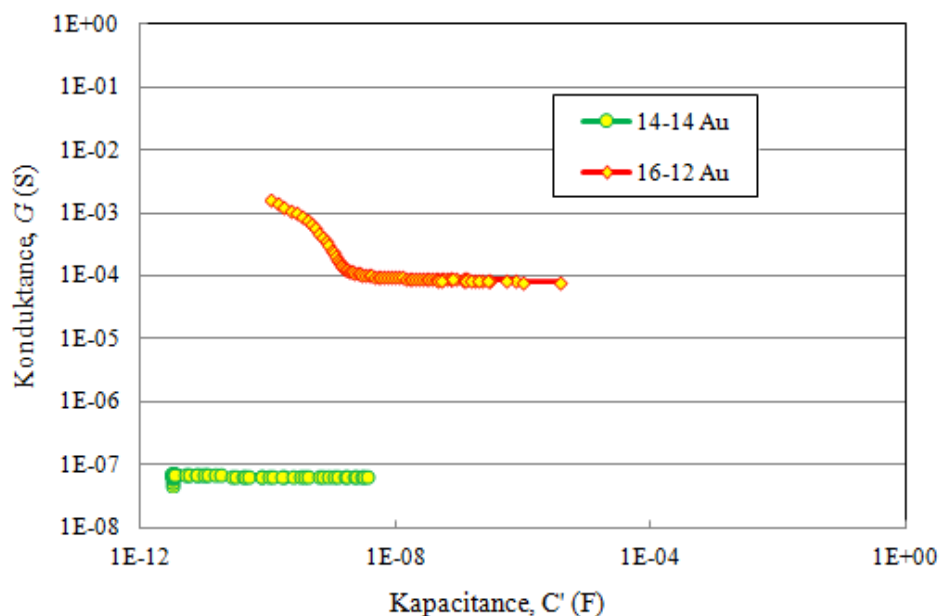


Obr. 45 Graf závislosti imaginární složky kapacity na reálné složce kapacity u Au kontaktu

Na dalších obrázcích jsou závislosti konduktance na kapacitanci v sériovém zapojení (Obr. 46) a konduktance na kapacitanci v paralelním zapojení (Obr. 47) s použitím Au kontaktu. Z obrázků je zřejmé, že konduktance se s rostoucí kapacitancí snižuje a poté zůstává konstantní (vodivost vzorku se s jeho zvyšujícím se zdánlivým odporem snižuje a poté zůstává konstantní). Platí pro vzorek 14-14 i 16-12. Vzorek 14-14 v sériovém zapojení vykazuje geometrickou kapacitu tzn., že kapacitance má hodnotu přibližně 10^{-11} F (poměr $S/l \approx 1$, $\epsilon_r \approx 1$ a $\epsilon_0 \approx 10^{-11}$).



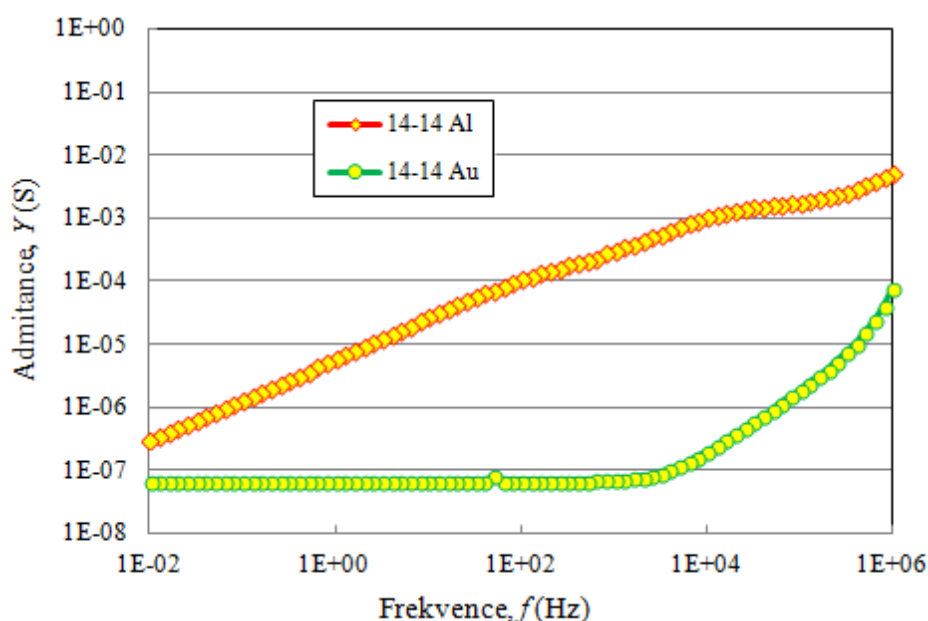
Obr. 46 Graf závislosti konduktance na kapacitanci v sériovém zapojení u Au kontaktu



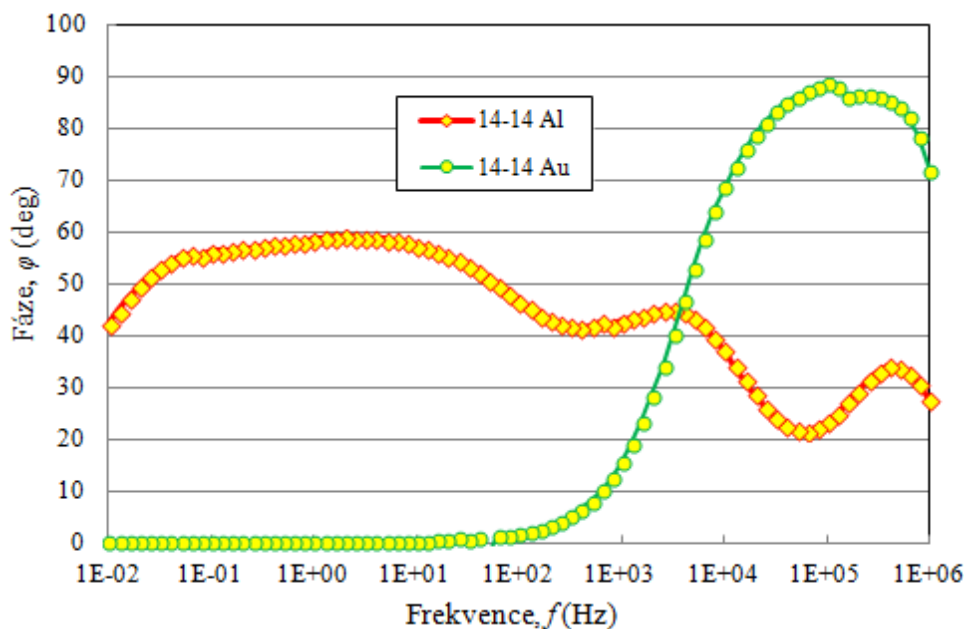
Obr. 47 Graf závislosti konduktance na kapacitanci v paralelním zapojení u Au kontaktu

Srovnání vzorků s Al a Au kontaktem

Na obrázcích jsou závislosti admitance (Obr. 48) a její fáze (Obr. 49) na frekvenci pro vzorky 14-14 opatřených Al a Au kontaktem. Z prvního obrázku je zřejmé, že admitance obou kontaktů se s rostoucí frekvencí zvětšuje. Pro Al kontakt, ale mnohem rychleji. Závislost fáze na frekvenci u Al kontaktu ukazuje na model sestávající z minimálně čtyř paralelních RC obvodů a závislost fáze na frekvenci u Au kontaktu ukazuje na model sestávající z minimálně jednoho paralelního RC obvodu. Zatímco vzorek s Au kontaktem vykazuje ze začátku ohmický charakter, vzorek s Al kontaktem vykazuje ze začátku kapacitní charakter a poté vykazuje vzorek s Au kontaktem kapacitní charakter a vzorek s Al kontaktem ohmický charakter.

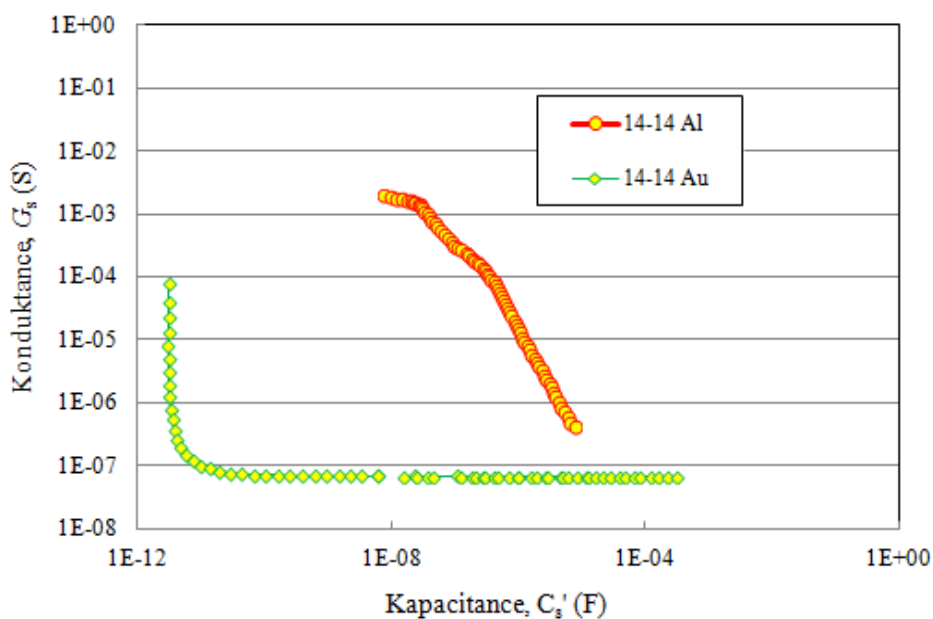


Obr. 48 Porovnání závislosti admitance na frekvenci mezi Au a Al kontaktem

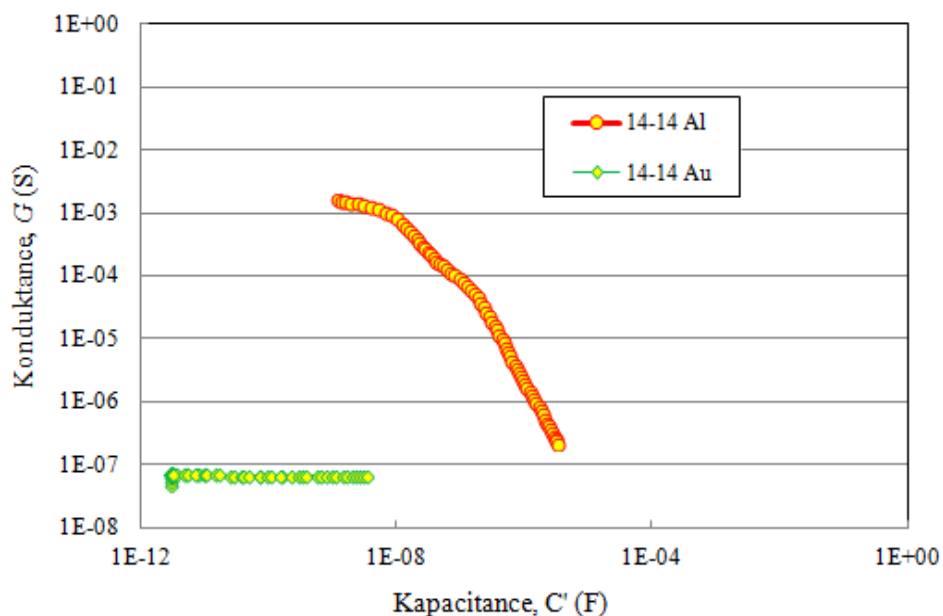


Obr. 49 Porovnání závislosti fáze na frekvenci mezi Au a Al kontaktem

Na dalších obrázcích jsou závislosti konduktance na kapacitanci v sériovém zapojení (Obr. 50) a konduktance na kapacitanci v paralelním zapojení (Obr. 51) s použitím Al a Au kontaktu. Z obrázků je zřejmé, že pro Al kontakt se konduktance s rostoucí kapacitancí prudce snižuje (vodivost vzorku se s jeho zvyšujícím se zdánlivým odporem snižuje), zatímco pro Au kontakt se konduktance s rostoucí kapacitancí snižuje a poté zůstává konstantní (vodivost vzorku se s jeho zvyšujícím se zdánlivým odporem snižuje a poté zůstává konstantní), ale stále je vodivost vzorku s Au kontaktem mnohem nižší než s Al kontaktem a také zasahuje do větší oblasti.



Obr. 50 Porovnání závislosti konduktance na kapacitanci v sériovém zapojení mezi Al a Au kontaktem

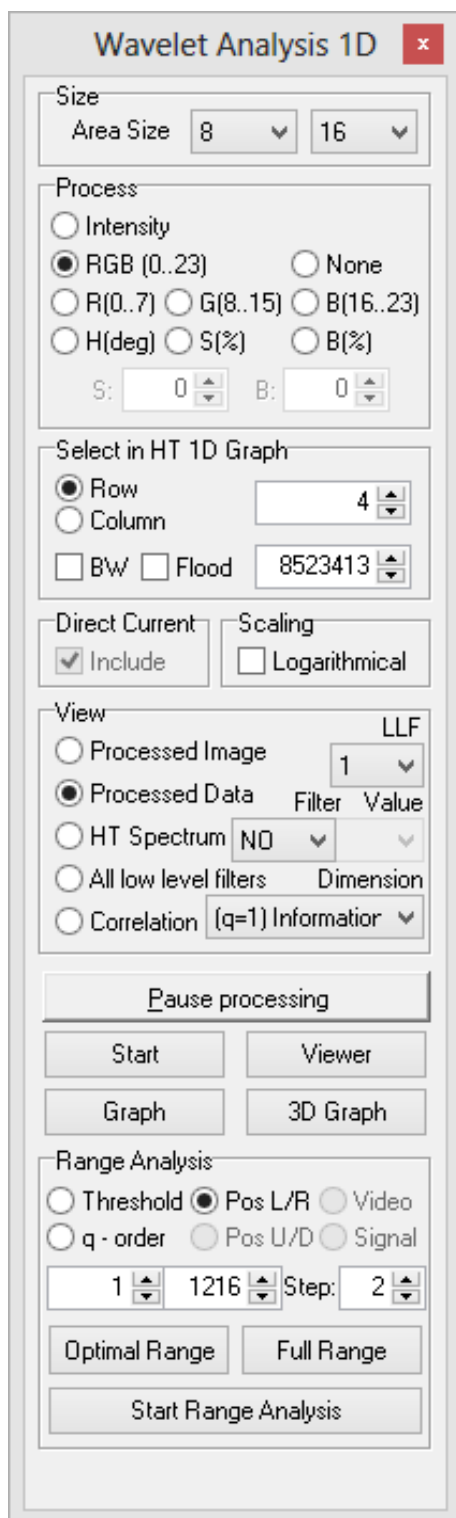


Obr. 51 Porovnání závislosti konduktance na kapacitanci v paralelním zapojení mezi Al a Au kontaktem

3.6.2. Závěry

Byly diskutovány výsledky měření impedanční (frekvenční) charakteristiky za tmy. Byly srovnávány různé koncentrace aktivní vrstvy s Al a Au kontaktem a poté stejná koncentrace aktivní vrstvy s různými kontakty (Al a Au). Všechny vzorky se chovaly podobně. Admitance vždy s rostoucí frekvencí rostla. Konduktance vždy s rostoucí kapacitancí klesala. Rozdíly nastaly v závislosti fáze na frekvenci. Každý ze vzorků poté vykazoval jiný model RC obvodu. Vzorek 1a vykazoval model sestávající z minimálně čtyř paralelních RC obvodů, vzorek 1c vykazoval model sestávající z minimálně tří paralelních RC obvodů a vzorky 2a, 2b vykazovaly model sestávající z minimálně jednoho paralelního RC obvodu. Detailnější analýza impedančních závislostí bude provedena v následujícím období.

3.7. Tranzientní měření



Pro vyhodnocení volt-ampérových charakteristik, které jsou zatíženy šumem (viz. kapitola 2.3.3.) lze použít program HarFA vytvořený na FCH VUT v Brně. Byla měřena závislost proudu na čase při konstantním napětí. Poté byla tato relaxační závislost podrobena fraktální analýze v programu HarFA (viz kapitola 2.4.1.), [15].

Nastavení programu HarFA bylo vždy totožné (viz Obr. 52). Pro analýzu naměřených dat jsme využili 1D vlnkovou analýzu (Wavelet Analysis 1D), která slouží pro analýzu signálů. Počet vzorků v rámci jedné analýzy byl 128 (Area size: 8×16). Byla analyzována reálná data (Process: RGB, tj. 2^{24} kvantovacích úrovní). Naměřené závislosti nebyly prahovány (převedeny do černobílých pixelů, odškrtnutý BW). V následující nabídce zpracováváme data, nikoliv obrázek (View: Processed Data). Poslední nabídka (Range Analysis) umožňuje analyzovat průběh všech naměřených dat a zde využíváme posuvu analyzované plochy (128 vzorků) zleva doprava (pos L/R) po kroku 2 (Step), tedy analyzujeme každou druhou hodnotu (pro lepší názornost a orientaci).

Jakmile jsou naměřená data zanalyzována programem HarFA, tak získáváme všechny potřebné charakteristiky pro popis analyzovaných šumů (fraktální dimenzi – D_{BBW} , D_{WBW} , D_{BW} , fraktální míru – K_{BBW} , K_{WBW} , K_{BW} , entropii – S_{BBW} , S_{WBW} , S_{BW} , plochu – A_B , A_W , A_{BW} , střední hodnotu AVG a směrodatnou odchylku DEV).

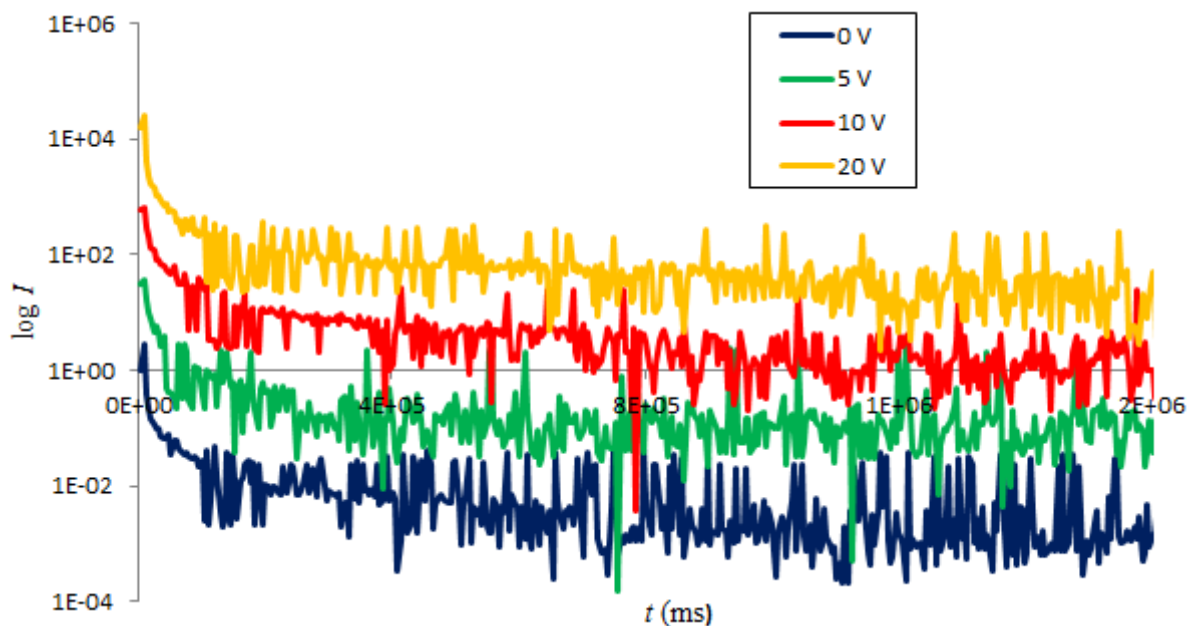
Analýza byla vždy provedena na nejméně 470 datech, která byla měřena po 4 sekundách, celé měření trvalo cca 32 minut (při 0 V a 20 V měření trvalo $3 \times$ déle).

Obr. 52 Základní nastavení programu HarFA

Experimentální data

Pomocí programu HarFA byly analyzovány výsledky tranzientních měření (odezvy na napěťový skok) vzorku 1d (viz Tabulka I). Jak vidíme z obrázku (Obr. 53, kde je závislost proudu v logaritmickém měřítku na čase v ms) měly šumy pro všechna měření za tmy, tj. pro nastavená stejnosměrná napětí (0 V, 5 V, 10 V, 20 V) stejný charakter. Aby to bylo zřejmé,

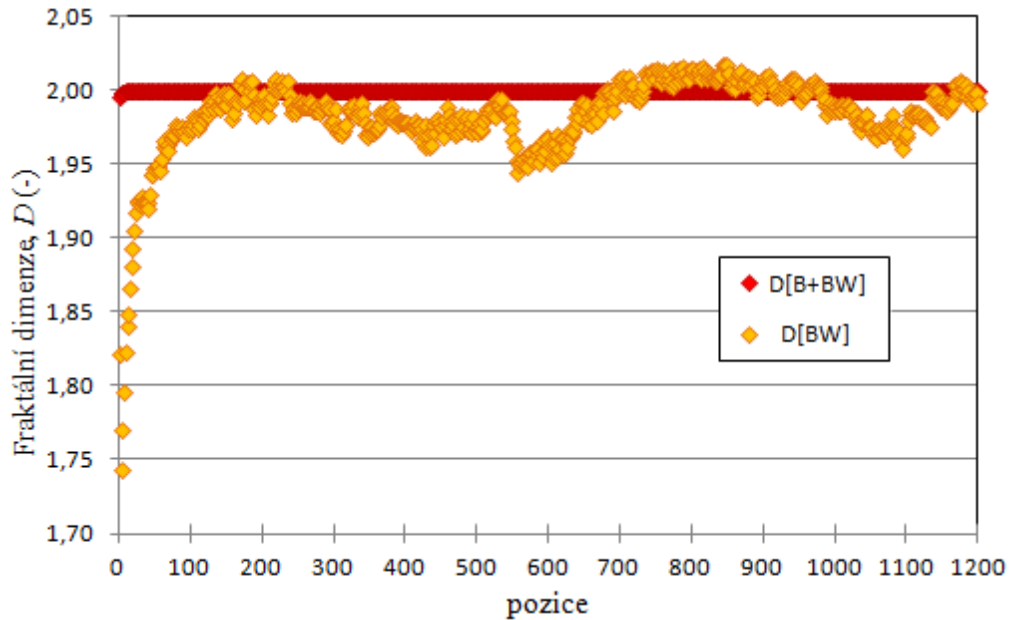
byly proudy vynásobeny různými konstantami ($0\text{ V} - 10^5\times$, $5\text{ V} - 10^7\times$, $10\text{ V} - 10^8\times$, $20\text{ V} - 10^9\times$). Všechna vynesena data v grafu jsou v absolutní hodnotě.



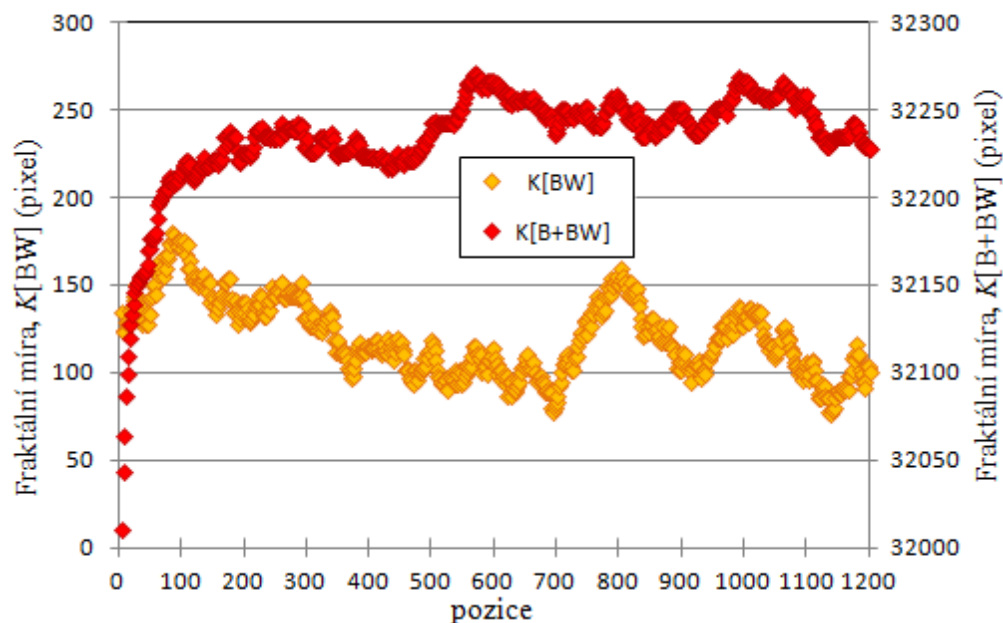
Obr. 53 Závislost proudu v logaritmickém měřítku na čase pro různá stejnosměrná napětí, pro odlišení byly závislosti vynásobeny různými konstantami ($0\text{ V} - 10^5$, $5\text{ V} - 10^7$, $10\text{ V} - 10^8$, $20\text{ V} - 10^9$)

Výsledky tranzientních měření pro napětí 0 V

Na obrázku (Obr. 54) je uvedena závislost fraktální dimenze D na pozici při stejnosměrném napětí 0 V. Z obrázku je zřejmé, že fraktální dimenze křivky (D_{BW}) se nejprve zvyšuje a poté kolísá kolem hodnoty 1,98. Tato vysoká hodnota (maximální fraktální dimenze může nabývat hodnoty 2,00) vypovídá o poměrně velkém šumu (signál s fraktální dimenzí rovné 1,00 by nebyl šumem zatížen vůbec). Hodnoty fraktální dimenze větší než 2,00 jsou chybné avšak v intervalu statistické chyby $\pm 0,02$ dávají reálné výsledky. Fraktální dimenze plochy pod křivkou včetně křivky ($D_{\text{B+BW}}$) nemá fraktální strukturu, hodnota fraktální dimenze se blíží k hodnotě 2,00. Na následujícím obrázku (Obr. 55) je uvedena závislost fraktální míry K na pozici při stejnosměrném napětí 0 V. Fraktální míra plochy pod křivkou včetně křivky ($K_{\text{B+BW}}$) vyjadřuje množství elektrického náboje, který projde měřeným vzorkem v závislosti na čase (AVG), fraktální míra křivky (K_{BW}) pak vyjadřuje jeho fluktuaci v závislosti na čase (DEV). Z obrázku je zřejmé, že po celou dobu měření prochází vzorkem přibližně stejné množství elektrického náboje, jeho fluktuace je o tři řády menší ($32\,250 \pm 110$ pixelů).



Obr. 54 Závislost fraktální dimenze na pozici při 0 V

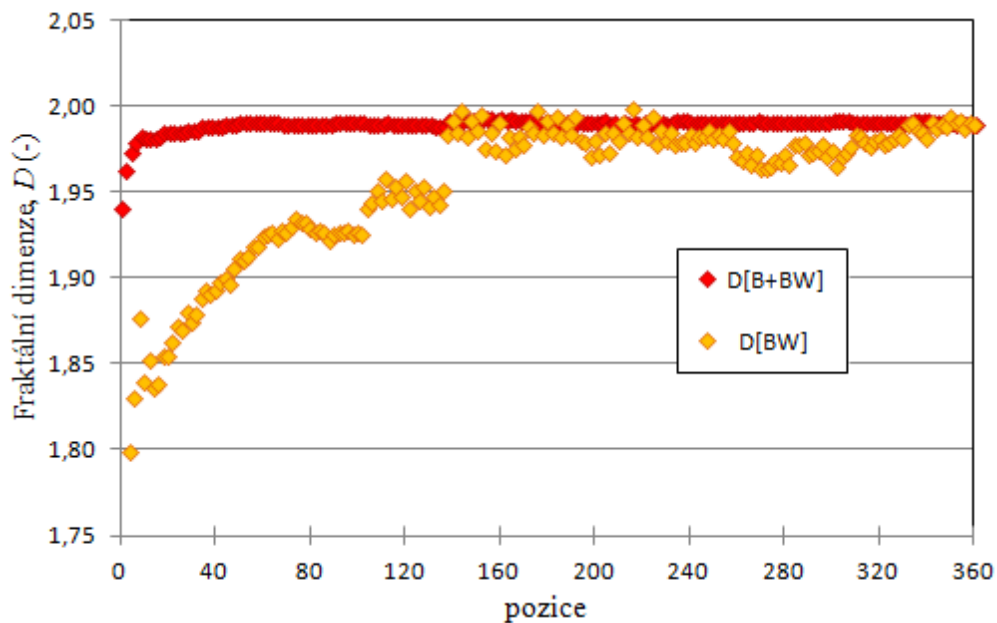


Obr. 55 Závislost fraktální míry na pozici při 0 V

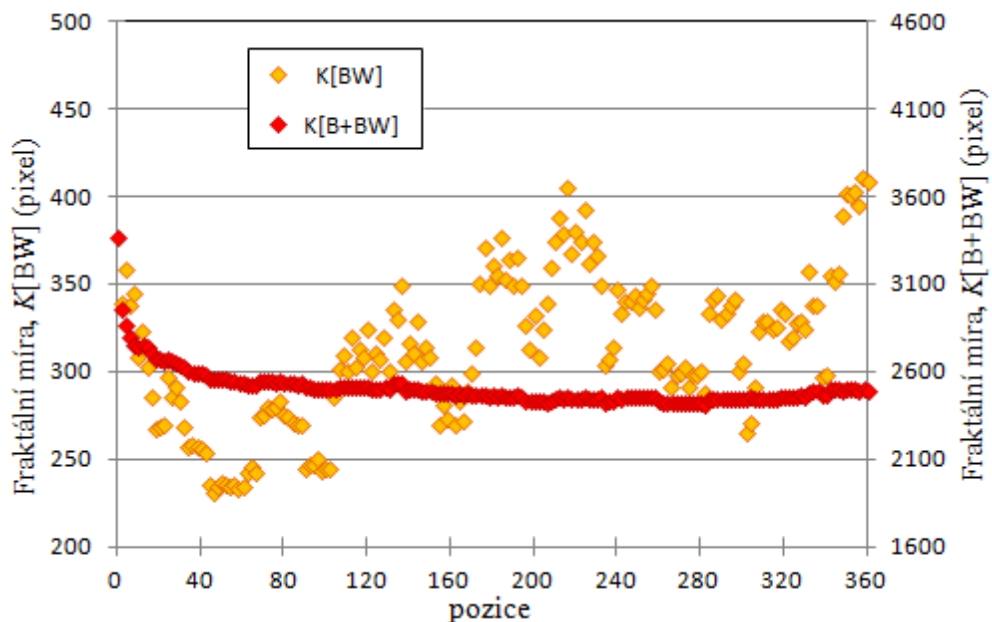
Výsledky tranzientních měření pro napětí 5 V

Na obrázku (Obr. 56) je uvedena závislost fraktální dimenze D na pozici při stejnosměrném napětí 5 V. Z obrázku je zřejmé, že fraktální dimenze křivky (D_{BW}) se nejprve pomalu zvyšuje a poté kolísá kolem hodnoty 1,98. Tato vysoká hodnota vypovídá o poměrně velkém šumu. Hodnoty fraktální dimenze větší než 2,00 nejsou v tomto měření přítomny. Fraktální dimenze plochy pod křivkou včetně křivky (D_{B+BW}) má na rozdíl od předcházejícího měření fraktální strukturu, hodnota fraktální dimenze je 1,99. Na následujícím obrázku (Obr. 57) je uvedena závislost fraktální míry K na pozici při stejnosměrném napětí 5 V. Fraktální míra plochy pod křivkou včetně křivky (K_{B+BW}) vyjadřuje množství elektrického náboje, který projde měřeným vzorkem v závislosti na čase (AVG), fraktální míra křivky (K_{BW}) pak vyjadřuje jeho fluktuaci

v závislosti na čase (DEV). Z obrázku je zřejmé, že po celou dobu měření prochází vzorkem přibližně stejné množství elektrického náboje, s velmi proměnlivou fluktuací ($2\,550 \pm 310$ pixelů). Na rozdíl od předcházejícího měření, je zde fluktuace vyšší a mnohem proměnlivější.



Obr. 56 Závislost fraktální dimenze na pozici při 5 V

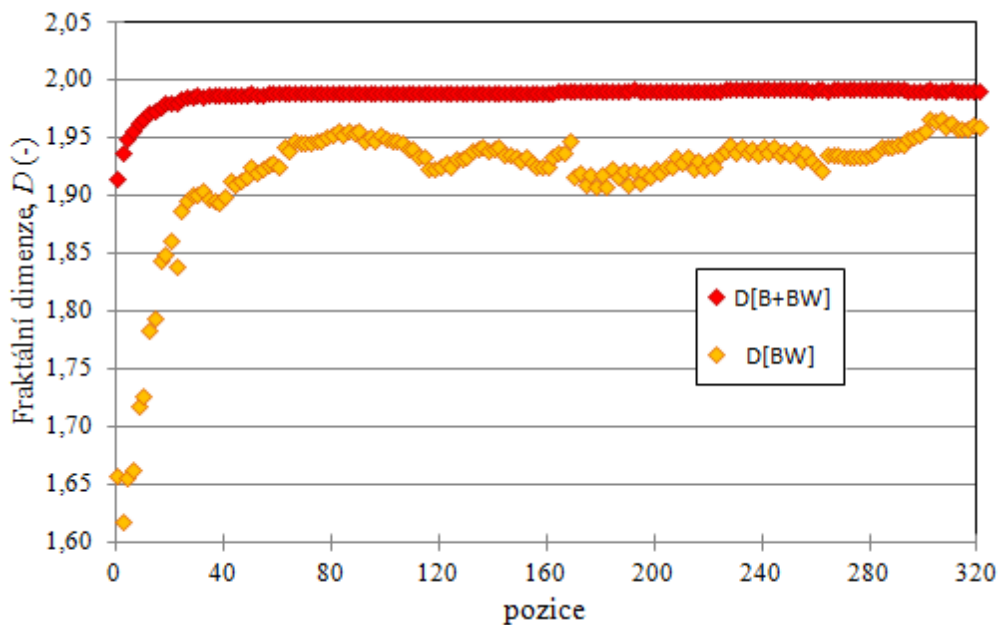


Obr. 57 Závislost fraktální míry na pozici při 5 V

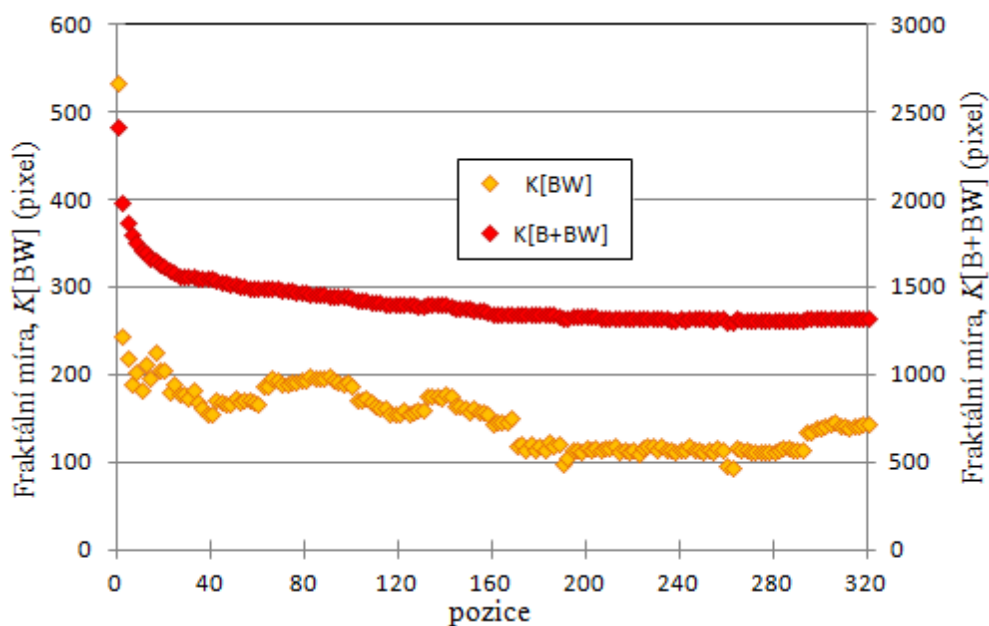
Výsledky tranzientních měření pro napětí 10 V

Na obrázku (Obr. 58) je uvedena závislost fraktální dimenze D na pozici při stejnosměrném napětí 10 V. Z obrázku je zřejmé, že fraktální dimenze křivky (D_{BW}) se nejprve zvyšuje a poté kolísá kolem hodnoty 1,93. Tato hodnota vypovídá o menším šumu než v předchozích měřeních. Hodnoty fraktální dimenze větší než 2,00 nejsou v tomto měření přítomny. Fraktální dimenze plochy pod křivkou včetně křivky (D_{B+BW}) má na rozdíl od prvního měření fraktální

strukturu, hodnota fraktální dimenze je 1,99. Na následujícím obrázku (Obr. 59) je uvedena závislost fraktální míry K na pozici při stejnosměrném napětí 10 V. Fraktální míra plochy pod křivkou včetně křivky (K_{B+BW}) vyjadřuje množství elektrického náboje, který projde měřeným vzorkem v závislosti na čase (AVG), fraktální míra křivky (K_{BW}) pak vyjadřuje jeho fluktuaci v závislosti na čase (DEV). Z obrázku je zřejmé, že po celou dobu měření prochází vzorkem přibližně stejné množství elektrického náboje, jeho fluktuace je též přibližně konstantní ($1\,400 \pm 160$ pixelů). Na rozdíl od předcházejících měření je zde fluktuace poměrně vysoká v závislosti na prošlém elektrickém náboji.



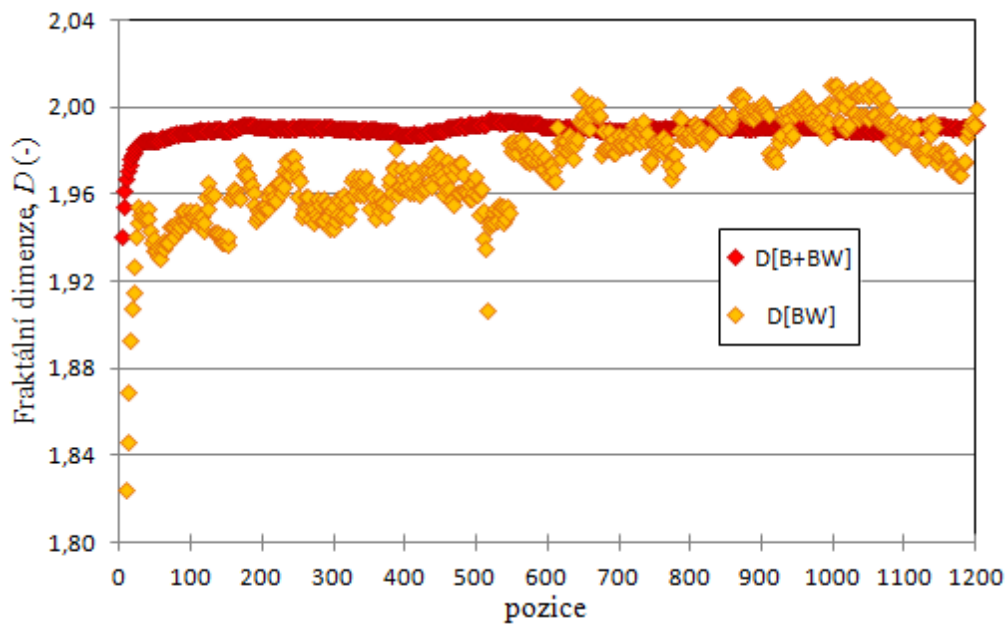
Obr. 58 Závislost fraktální dimenze na pozici při 10 V



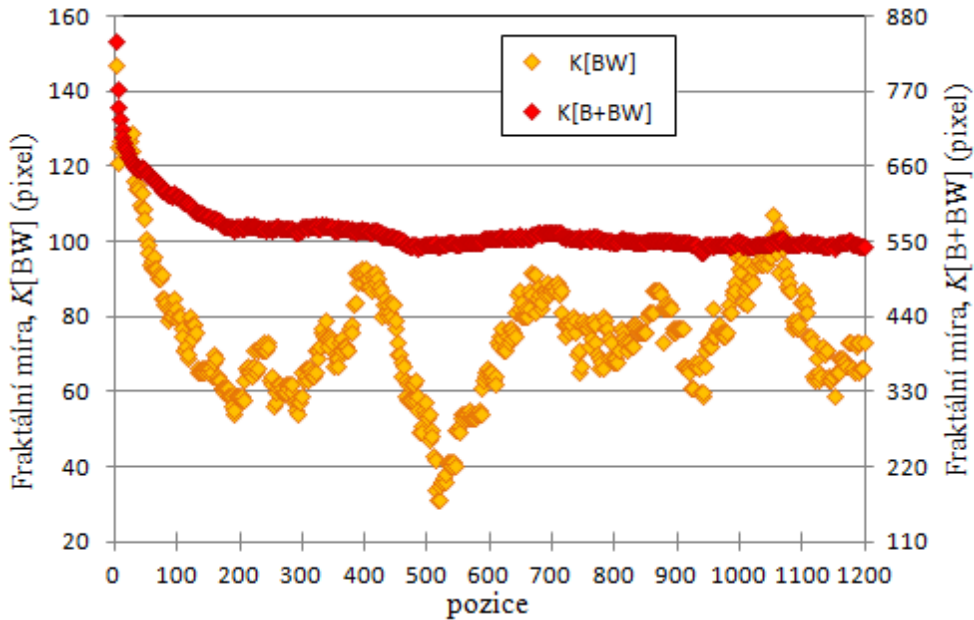
Obr. 59 Závislost fraktální míry na pozici při 10 V

Výsledky tranzientních měření pro napětí 20 V

Na obrázku (Obr. 60) je uvedena závislost fraktální dimenze D na pozici při stejnosměrném napětí 20 V. Z obrázku je zřejmé, že fraktální dimenze křivky (D_{BW}) se nejprve rychle zvyšuje a poté kolísá kolem hodnoty 1,98. Tato vysoká hodnota vypovídá o poměrně velkém šumu. Hodnoty fraktální dimenze větší než 2,00 jsou chybné avšak v intervalu statistické chyby $\pm 0,02$ dávají reálné výsledky. Fraktální dimenze plochy pod křivkou včetně křivky (D_{B+BW}) má na rozdíl od prvního měření fraktální strukturu, hodnota fraktální dimenze je 1,99. Na následujícím obrázku (Obr. 61) je uvedena závislost fraktální míry K na pozici při stejnosměrném napětí 20 V. Fraktální míra plochy pod křivkou včetně křivky (K_{B+BW}) vyjadřuje množství elektrického náboje, který projde měřeným vzorkem v závislosti na čase (AVG), fraktální míra křivky (K_{BW}) pak vyjadřuje jeho fluktuaci v závislosti na čase (DEV). Z obrázku je zřejmé, že po celou dobu měření prochází vzorkem přibližně stejné množství elektrického náboje, s velmi proměnlivou fluktuací (560 ± 70 pixelů). Na rozdíl od předcházejících měření je zde (jako u předešlého měření) fluktuace velmi vysoká v závislosti na prošlém elektrickém náboji.



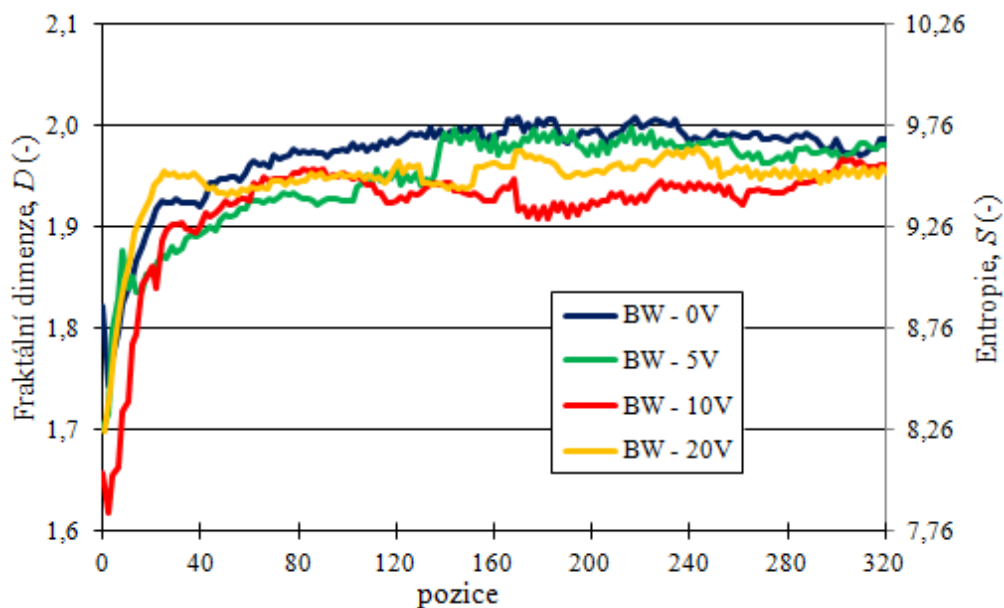
Obr. 60 Závislost fraktální dimenze na pozici při 20 V



Obr. 61 Závislost fraktální míry na pozici při 20 V

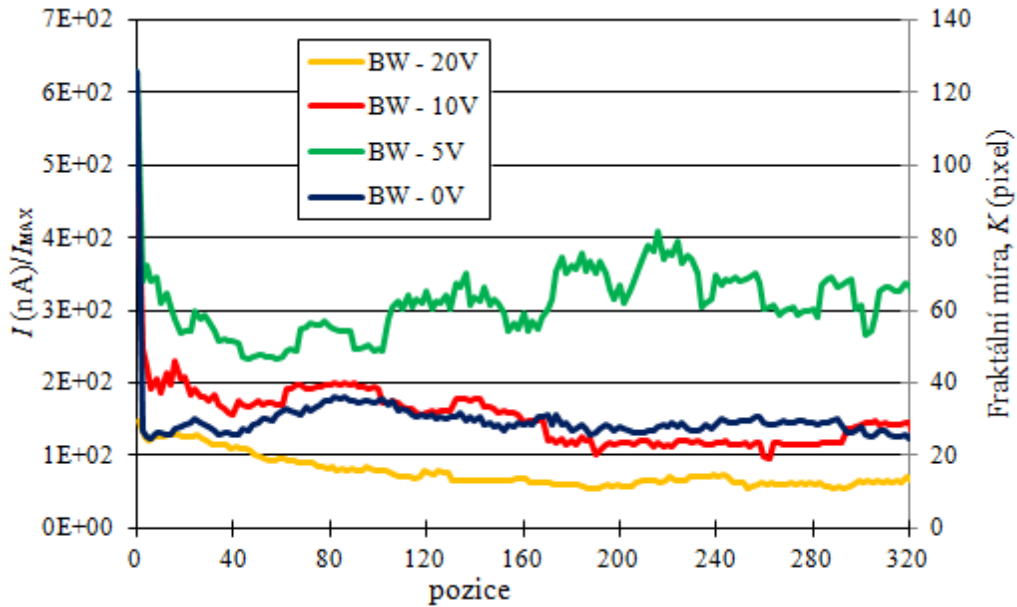
Srovnání fraktální dimenze a fraktální míry pro různá napětí

Na obrázku (Obr. 62) jsou uvedeny závislosti fraktální dimenze D , resp. entropie S vypočtené podle vztahu (37) na pozici pro všechny analyzované tranzienty. Z obrázku je zřejmé, že fraktální dimenze křivek (D_{BW}) se nejprve do pozice 60 mění (roste) a poté se od pozice 60 nemění (zůstává téměř konstantní). Nejmenší fraktální dimenze v závislosti na entropii nastává pro napětí 10 V, nejvyšší hodnoty dosahuje pro napětí 0 V. Z toho vyplývá, že všechny hodnoty jsou zatíženy šumem, ať už větším nebo menším. Všechny závislosti jsou v rozmezí hodnot fraktální dimenze 1,6 – 2,0.



Obr. 62 Závislost fraktální dimenze na pozici a entropie na pozici při různých stejnosměrných napětích

Na obrázku (Obr. 63) jsou uvedeny závislosti fraktální míry K , resp. poměru I/I_{MAX} vypočtené podle vztahu (36) na pozici pro všechny analyzované tranzienty. Proud I je v jednotkách nA (10^9 A pro snadnější a lepší analýzu), I_{MAX} je velikost měřítka (vždy námi zvolená hodnota). Z obrázku je zřejmé, že fraktální míra křivky (K_{BW}) se nemění v závislosti na pozici (stejně jako předchozí analýza). Nejmenší fraktální míra v závislosti na poměru I/I_{MAX} nastává u 20 V naopak nejvyšší hodnoty dosahuje 5 V. Všechny závislosti jsou v rozmezí hodnot fraktální míry 0 – 85 pixelů.



Obr. 63 Závislost fraktální míry na pozici a poměru I/I_{max} na pozici při různých stejnosměrných napětích

4. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na studium elektrických, dielektrických a optoelektrických vlastností měřených struktur vzorků. Důležitými studovanými materiály byly aktivní vrstvy, které se skládaly z ftalocyaninů zinku (ZnPc) a směsi těchto ftalocyaninů s PCBM. Dále byly studovány vlivy různých kontaktů (Al, Au) na měřené výsledky.

V teoretické části byla zpracována rešerše o základních elektrických a optoelektrických součástkách, následně způsoby vyhodnocování získaných elektrických signálů a šumů. V úvodu experimentální části jsou uvedeny základní charakteristiky ftalocyaninů a fullerenu (aktivní vrstvy fotovoltaických článků), příprava vzorků a měřené struktury vzorků.

Cílem stejnosměrných měření (volt-ampérové charakteristiky vzorků – závislosti proudu na napětí) bylo zjistit, které vzorky jsou fotovodivé, resp. které vzorky vykazují světlem generovanou bariéru. Protože materiály z ftalocyaninů zinku (ZnPc) a směsi těchto ftalocyaninů s PCBM mohou být využity jako aktivní vrstva fotovoltaických článků, byly při těchto experimentech proměřeny volt-ampérové charakteristiky vzorků za tmy a osvětlení. Největší fotovodivost měl vzorek 1c (*Obr. 28*) s koncentrací 18-10, největší světlem generovaná bariéra byla zjištěna pro vzorek 1b (*Obr. 30*) s koncentrací 16-12 (viz *Tabulka I*).

Cílem střídavých (frekvenčních) měření bylo zjistit vliv kontaktů (Al, Au) na transportní vlastnosti elektrického náboje. Byly změřeny závislosti admitance a její fáze na frekvenci, závislost konduktance na kapacitanci a dále byly vytvořeny Cole-Cole diagramy, což jsou závislosti susceptance na konduktanci a imaginární složky kapacitance na reálné složce kapacitance. Protože kontaktní materiály musí být velmi vodivé a odolné, byly použity kontakty z hliníku (Al) a zlata (Au) a tyto kontakty byly dále proměřeny nejen vůči sobě, ale také při různých koncentracích aktivní vrstvy. U hliníku byla proměřena koncentrace 14-14 a 18-10 a u zlata byla proměřena koncentrace 14-14 a 16-12 (viz *Tabulka I*). Pokud porovnáme Al kontakt při koncentraci 14-14 s koncentrací 18-10 (např. *Obr. 36*) zjistíme, že závislosti jsou téměř shodné a liší se jen minimálně. Vzorek 1a s koncentrací 14-14 a kontaktem Al vykazuje nejlepší injekční vlastnosti (přenos elektrického náboje). Dále když porovnáme Au kontakt při koncentraci 14-14 s koncentrací 16-12 (např. *Obr. 42*) zjistíme, že závislosti jsou odlišné a mnohem výhodnější je vzorek 2b s koncentrací 16-12 (má lepší injekční vlastnosti). Nejdůležitějším porovnáním je vodivost a vlastnosti Al a Au kontaktu. Pokud porovnáme Al vzorek 1a s Au vzorkem 2a (koncentrace 14-14, např. *Obr. 48*) je naprosto zřejmé, že Al kontakt je mnohem více vodivý a tím má větší injekční vlastnosti než Au kontakt.

Můžeme tedy říci, že hliníkový (Al) kontakt je mnohem lepší z hlediska injekce nosičů náboje než zlatý (Au) kontakt, ať už při stejnosměrných měřeních, tak i při střídavých měřeních a je tedy vyhovujícím materiálem pro přípravu fotovoltaických článků z tenkých organických polymerních vrstev. U stejnosměrných měření byla s jistotou nejlepší koncentrace aktivní vrstvy 18-10 s Al kontaktem. U střídavých měření nemůžeme s jistotou říci, která koncentrace je lepší – podle střídavých měření nelze určovat, co je lépe fotovodivé, protože vše měříme za tmy (14-14 i 18-10 měly podobné křivky). Ale s ohledem na volt-ampérové charakteristiky můžeme tvrdit, že i u střídavých měření byla výhodnější koncentrace 18-10.

Pomocí tranzientních měření jsme sledovali chování šumů. Každé měření je totiž zatíženo šumem, který více či méně ovlivňuje výslednou analýzu dat. Většinou byl charakter šumu

stejný pro celou analyzovanou oblast – měl stejnou fraktální dimenzi (resp. entropii) a to pro všechna měřená napětí (0 V, 5 V, 10 V, 20 V).

Závěrem je nutno říci, že všechny vzorky, které byly měřeny, byly laminovány akrylátem. Bylo zjištěno, že zhoršoval (z důvodu velikosti odporu srovnatelného s odporem měřeného vzorku) všechny naměřené výsledky. Proto došlo ke změně laminační vrstvy na PVP (polyvinylpyrrolidon), který má takový odpor, že neovlivňuje naměřené charakteristiky. Dalším dosud nevyřešeným problémem je degradace vzorků vlivem opakovaného měření a stárnutí vzorků.

5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] POSPÍŠIL, J. *Studium elektrických vlastností tenkých polymerních vrstev*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2010. 44 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
- [2] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika I: [učebnice]*. Dotisk 1. vyd.. České Budějovice: Kopp, 2005, 272 s. ISBN 80-7232-171-4.
- [3] MUSIL, V., BRZOBOHATÝ, J., BOUŠEK, J. a PRCHALOVÁ, I.. *Elektronické součástky*. 3. uprav.vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 222 s. ISBN 80-214-1776-5.
- [4] GASCHA, Heinz a PFLANZ, Stefan. *Kompendium fyziky: vzorce, zákony a pravidla, úlohy, příklady a jejich řešení, podrobná slovníková část*. Vyd. 1. Praha: Universum, 2008, 488 s. ISBN 978-80-242-2013-0.
- [5] KOKTAVÝ, Bohumil a KOKTAVÝ, Pavel. *Elektřina a magnetismus: učební text pro studenty distančního a denního studia*. 3. uprav. vyd. Brno: CERM, 1998, 88 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0995-9.
- [6] MOLHANEC, Martin. Dielektrické vlastnosti tuhých látek. *Katedra elektrotechnologie*. [online]. Praha, 2008, aktualizováno 2012-02-07 [cit. 2013-01-31]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_4.pdf>.
- [7] ZAJÍC, Jan. *Fyzika II: (Elektřina a magnetismus)*. 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 1999, 171 s. ISBN 80-7194-237-5.
- [8] MECHLOVÁ, Erika a KOŠTĚÁL, Karel. *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz: [učebnice]*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1999, 588 s. ISBN 80-7196-151-5.
- [9] SALEH, B. *Základy fotoniky 3*. 1. vyd. Praha: MATFYZPRESS Univerzita Karlova, 1995, 778 s. ISBN 80-85863-05-7.
- [10] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika III*. 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 2005, 237 s. ISBN 80-7232-241-9.
- [11] WILFERT, Otakar. *Optoelektronika: přednášky*. 1. vyd. Brno: VUT FEKT, 2002, 121 s. ISBN 80-214-2264-5.
- [12] POSPÍŠIL, Jan. *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.
- [13] KLÍČ, Alois, DUBCOVÁ, Miroslava a VOLKA, Karel. *Fourierova transformace: S příklady z infračervené spektroskopie*. Vyd. 3. Praha: VŠCHT, 2002, 196 s. ISBN 80-7080-478-5.
- [14] ZMEŠKAL, O., DZIK, P., VESELÝ, M.: *Entropy of Fractal Systems*. Computers and mathematics with applications (2013), DOI 10.1016/j.camwa.2013.01.017.
- [15] ZMEŠKAL, O., VESELÝ, M., DZIK, P., VALA, M.: *Energy and Entropy of Fractal Objects: Application to Gravitational Field*. Nostradamus: Modern Methods of Prediction, Modeling and Analysis of Nonlinear Systems (2013), DOI 10.1007/978-3-642-33227-2.

- [16] Organic and Printed Electronics: PCBM - Based n-Type Semiconductors. *Sigma-Aldrich* [online]. St. Louis, 2002, aktual. 2013-01-09 [cit. 2013-02-27]. Dostupné z: <<http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/pcbm.html>>.
- [17] ĎURIŠ, T. *Jednosmerné a striedavé elektrické merania fotovoltaických článkov a modulov*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2009. 157 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Vladimír Šály, Ph.D.
- [18] VESELÝ, Karel. *Polymery: Struktura, syntézy, vlastnosti, zpracování*. Brno: ČSPCH, 1992, 178 s. ISBN 80-02-00951-7.