

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření vodivosti organických vodivých sloučenin

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej BÍLÝ**
Osobní číslo: **E10B0285P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Měření vodivosti organických vodivých sloučenin**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište základní principy a mechanismy vodivosti v organických elektroaktivních sloučeninách.
2. Diskutujte problematiku měření elektrické vodivosti elektroaktivních organických materiálů a zpracujte přehled vhodných měřících metod.
3. Proměřte elektrickou vodivost vybraných elektroaktivních organických materiálů metodou TLM (Transfer-Length Method).
4. Diskutujte zjištěné výsledky a popište přínos metody TLM pro měření vodivosti organických sloučenin.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Petty, M., C.: **Molecular Electronics: From Principles to Practice**. Wiley, 2007.
2. Meller, G.; Grasser, T. :**Organic Electronics - Advances in Polymer Sciences**. Springer, 2010.
3. Yong, X. et al.: **Modified transmission-line method for contact resistance extraction in organic field-effect transistors**. Applied Physics Letters, Volume: 97, Issue: 6. 2010
4. **Elektronické informační zdroje.**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Silvan Pretl

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Silvan Pretl

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan



L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na měření vodivosti organických vodivých sloučenin. Konkrétně je v práci řešena struktura, fyzikální vlastnosti organických materiálů a jejich další využití. V další části se předložená práce zabývá popisem konkrétních vhodných metod pro měření vodivosti organických materiálů a nejdůležitější součástí práce je praktické měření a demonstrace výsledků pomocí využití Transfer length method metody na vybraných měřících vzorcích.

Klíčová slova

Elektrická vodivost, organický vodivý materiál, PEDOT: PSS, metody pro měření vodivosti, substrát, depozice materiálu, TLM metoda

Abstract

This thesis is focused on measurement of the conductivity of conductive organic compounds. Specifically, it deals with the structure and physical properties of organic materials and their further use. The next part of this thesis describes the specific methods suitable for measuring conductivity of organic materials and the most important part of the thesis is practical measurement and result demonstration using Transfer length method on selected samples.

Key words

Electrical conductivity, organic conductive material, PEDOT: PSS, methods of conductivity measurement, substrate, deposition of organic material, TLM method

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 6.6.2013

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Silvanovi Pretlovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 VODIVÉ ORGANICKÉ MATERIÁLY	11
1.1 ELEKTRICKÁ VODIVOST	11
1.2 VODIVÉ ANORGANICKÉ MATERIÁLY	12
1.3 CHARAKTERISTIKA ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ.....	12
1.4 VODIVOST ORGANICKÉHO MATERIÁLU	13
1.5 ORGANICKÉ VODIVÉ MATERIÁLY	16
1.6 APLIKACE VODIVÝCH ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ	17
2 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI.....	19
2.1 KONDUKTOMETRIE	19
2.2 PŘÍMÁ METODA MĚŘENÍ VODIVOSTI	20
2.3 METODA DVOUHROTOVÉ SONDY	21
2.4 ČTYŘBODOVÁ METODA.....	21
2.5 METODA VAN DER PAUWA	22
2.6 BEZ ELEKTRODOVÉ INDUKČNOSTNÍ MĚŘENÍ VODIVOSTI.....	23
2.7 TLM METODA	24
2.8 POROVNÁNÍ.....	25
3 PRAKTICKÁ ČÁST	27
3.1 MĚŘÍCÍ PLÁN	27
3.2 TOPOLOGIE MĚŘÍCÍCH VZORKŮ	27
3.3 PŘÍPRAVA SUBSTRÁTŮ	28
3.4 DEPOZICE ORGANICKÉHO VODIVÉHO MATERIÁLU	28
3.5 MĚŘENÍ	29
3.6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	29
ZÁVĚR.....	33
POUŽITÁ LITERATURA	34
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

G [S].....	Vodivost
I [A].....	Elektrický proud
R [Ω].....	Elektrický odpor
U [V].....	Elektrické napětí
S[mm ²].....	Průřez vodiče
l[m].....	Délka vodiče
ρ [Ω .m].....	Rezistivita
σ [S.m ⁻¹].....	Konduktivita (měrná elektrická vodivost)
L[μ m].....	Vzdálenost elektrod
Q [C].....	Celkový náboj
n [cm ⁻³].....	Koncentrace volných nosičů náboje
μ [m ² V ⁻¹ s ⁻¹].....	Pohyblivost volných nosičů náboje
E _c [eV].....	Energie vodivostního pásu
E _g [eV].....	Energie zakázaného pásu
E _v [eV].....	Energie valenčního pásu
R _s [Ω /sq].....	Vrstvový odpor (Sheet resistance)
R _c [Ω .m].....	Kontaktní odpor (Contact resistance)
W [μ m].....	Šířka
t [μ m].....	Tloušťka
TLM	Transfer lenght method

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na měření vodivosti organických sloučenin.

Elektrická vodivost materiálů, je jeden ze základních a důležitých elementů elektrických měření. U anorganických materiálů byla elektrická vodivost důkladně zkoumána, ale s postupným rozvojem technologie se začínají objevovat nové materiály, jejichž vodivé vlastnosti jsou díky jejich struktuře ještě lepší a jejich cena není příliš vysoká. Řeč je samozřejmě o organických materiálech, které jsou předmětem velkého množství studií s ohledem na jejich možné komerční využití v organické elektronice. Jeden z důvodů je určitě ten, že mechanické parametry organických materiálů jsou slučitelné s vlastnostmi pružných a ohebných plastových substrátů, které jsou otevřeny zcela novým aplikačním schopnostem. Další z důvodů by mohl být u dobrého nanášení velmi tenkých vrstev materiálů.

V teoretické části je popsána problematika elektrické vodivosti organických materiálů. Jako pomůcka je přiložen stručný popis fyzikálních vlastností anorganických materiálů. Zde jsou velmi dobře vidět základní rozdíly mezi těmito dvěma rozdílnými skupinami. Jedna z nejdůležitějších součástí, jak získat při měření co nejlepší výsledky, je volba vhodného materiálu. K našim účelům volba padla na dobře vodivý organický materiál PEDOT: PSS, který je v posledních letech velice používán.

Druhá kapitola uvádí přehled vhodných měřících metod pro měření vodivosti organických sloučenin. Jsou zde popsány vlastnosti jednotlivých metod měření elektrické vodivosti. Popis je doplněn schématy zapojení.

Experimentální část se zabývá samotným měřením elektrické vodivosti organických materiálů. Pro změření elektrické vodivosti několika substrátů, byl nanesen organický materiál PEDOT: PSS a substráty byly změřeny vhodnou měřící metodou. V této části bylo za úkol aplikovat metodu TLM, na měření elektrické vodivosti a ukázat její vlastnosti, výhody a nedostatky. Hodnocení této metody je velice kladné a u materiálu dobrých vlastností nelze jinak než doporučit.

1 Vodivé organické materiály

Studium a výzkum pevných látek se ustálilo jako samostatný fyzikální obor na přelomu 20. a 30. let dvacátého století. Do té doby se vědecký výzkum soustředil především na kovy a slitiny a hlavně na studium jejich elektrických, magnetických a mechanických vlastností.

V této době byly předloženy také základy kvantové mechaniky, která umožňuje vysvětlit vlastnosti látek, které nelze pozorovat vlastním okem. Vznik kvantové mechaniky tedy umožnil popsání struktur těchto látek a výpočet energetických stavů valenčních elektronů, které určují vlastnosti všech vodivých látek.

1.1 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost (konduktance) je fyzikální veličina popisující schopnost látky vést elektrický proud. Je definována vztahem

$$G = \frac{I}{U} = \frac{1}{R}, \quad (1)$$

kde I je elektrický proud, U elektrické napětí a R elektrický odpor. Konduktanci lze též vyjádřit pomocí vztahu

$$G = \sigma * \frac{S}{l}, \quad (2)$$

kde σ je měrná elektrická vodivost (konduktivita), S je plocha průřezu vodiče a l značí délku vodiče.

Konduktivita je pak dána vztahem

$$\sigma = Q * n * \mu, \quad (3)$$

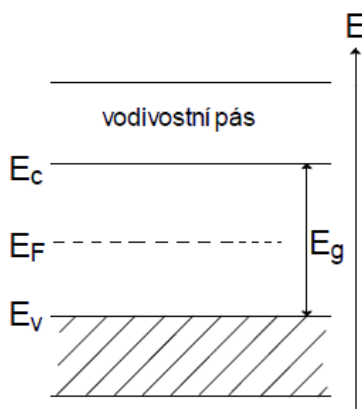
kde Q je celkový náboj, n udává koncentraci volných nosičů náboje a μ je pohyblivost volných nosičů náboje. [1]

1.2 Vodivé anorganické materiály

Než se začneme zabývat problematikou organických vodivých materiálů, bylo by dobré si nejdříve vysvětlit základní pojmy u anorganických materiálů, které jsou svou strukturou jednodušší, aby bylo patrné, jakými rozdílnými vlastnostmi se tyto dvě skupiny materiálů liší.

Elektrickou vodivost můžeme vysvětlit pomocí pásové teorie, kdy se vlastnosti látek odvíjejí od způsobu rozdělování elektronů ve valenčním a elektronovém pásu a jsou ovlivněny pomocí zakázaného pásu.

Energetický diagram látek se schématicky znázorňuje pomocí dvou energetických pasů, valenčního pásu a vodivostního pásu. Valenční pás je ohraničen nejvyšší energií (E_v) elektronů, vázaných v elektronovém obalu atomu a vodivostní pás je naopak omezen nejnižší energií E_c , kterou nabývá volný elektron uvolněný ze silového působení nukleonu. Rozdíl těchto energií nazýváme energie zakázaného pásu E_g (obr. 1). Když je valenční pás zcela zaplněn valenčními elektrony a je oddělen od vodivostního pásu širokým zakázaným pásem, jedná se o energii několika elektronvoltů, elektrony pak mohou přejít do vodivostního pásu pouze při dodání značně velké energie. Taková látka se chová jako nevodič (izolant). Naopak u vodičů je valenční pás zaplněn částečně a šířka zakázaného pásu je velice malá, takže elektronu stačí minimální energie k přechodu do vodivostního pásu. Pokud je energie zakázaného pásu v rozmezí od 0 až 2 eV, potom tyto látky nazýváme jako polovodiče. [1]



Obr. 1: Pásové schéma polovodiče. E_v - hrana valenčního pásu, E_F - Fermiho hladina, E_g - energie zakázaného pásu, E_c - hrana vodivostního pásu, E - osa znázorňující energii [18]

1.3 Charakteristika organických materiálů

Obecně lze vodivé organické materiály rozdělit do dvou hlavních skupin.

- Nízkomolekulární látky

Jsou to látky o nízké molekulové hmotnosti. [10]

- Polymer

Jsou látky skládající se z molekul jednoho nebo více druhů atomů, které jsou navzájem propojené. Makromolekuly jsou složeny z velkého počtu atomů, které jsou mezi sebou vázány chemickými vazbami do dlouhých řetězců, které se pravidelně opakují. Toto nazýváme monomerní jednotkou (mer), kde počet merů udává polymerační stupeň n , který dosahuje hodnot 10 až 10^6 . Sloučeniny s nízkým polymeračním stupněm nazýváme oligomery. Polymery typicky vznikají polymerací nebo polykondenzací. [2] [19]

Z hlediska elektrické vodivosti můžeme rozdělit organické látky do několika skupin:

- kompozitní organické vodivé látky (látky s nevlastní vodivostí)

Vodivost organických látek je zajištěna pomocí malých částic vodivého anorganického materiálu, které tvoří strukturu organického materiálu. [16]

- látky s intrinsickou vodivostí (s vlastní vodivostí)

Vodivost u organických látek s vlastní vodivostí je způsobena speciálním uspořádáním vzájemných vazeb molekul v organickém materiálu. [16]

1.4 Vodivost organického materiálu

Na rozdíl od anorganických polovodičů, kde je struktura materiálu určena hlavně silnými kovalentními vazbami mezi jednotlivými atomy v krystalové mřížce, tak v organických látkách, které jsou většinou tvořeny atomy uhlíku, vodíku, dusíku a kyslíku, je vzájemné působení molekul ovlivněno pomocí slabých van der Walsových sil nebo působením vodíkových vazeb. Ve srovnání vzdáleností jsou mezimolekulární vzdálenosti velké oproti vzdálenostem mezi atomy nebo ionty anorganických materiálů. Šířka zakázaného pásu je velká a pohyblivost nosičů náboje malá. Takové látky jsou většinou špatně vodivé. Elektrickou vodivost lze zvýšit pomocí ionizovatelných skupin, které připojíme k základní molekulové vazbě, např. nahrazením některých atomů uhlíku. [3] [18]

Nutnou podmínkou vodivosti organických materiálů je přítomnost konjugované vazby v molekulové struktuře, to znamená pravidelné střídání jednoduché a dvojité vazby v molekulární struktuře. Základní vlastností, která vychází z konjugace je, že π elektrony jsou mnohem více pohyblivé než σ elektrony a mohou se tak pohybovat po konjugovaném řetězci. Ve struktuře organických materiálů existuje mnoho nepravidelností, což způsobuje rozptyl energie, čímž je ovlivněno rozdělení hustoty elektronových stavů. [3] [18]

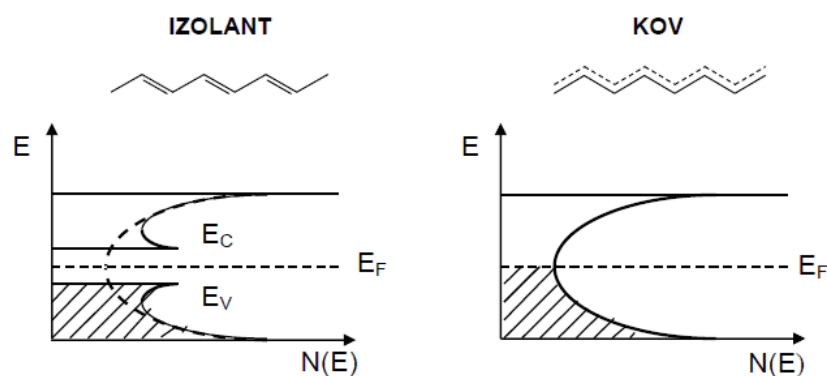
Elektrickou vodivost makromolekuly omezuje řada činitelů:

- Délky jednoduchých a dvojných vazeb nejsou stejné, jejich střídání sice stabilizuje organický materiál, ale nezaručuje, že se elektrony budou správně přemísťovat.
- Rotace řetězců a připojených bočních skupin porušuje propojení vazeb mezi molekulami.
- Propojený řetězec často obsahuje nelineární poruchy, které jsou opraveny pouze v rozsahu několika vazeb. [18]

Takové porušení polykonjugovaného elektronového systému může vest k dvojnásobné degeneraci základního stavu a vzniku elektronového stavu ve středu pásu zakázaných energií. Samotná konjugace tedy nestačí k vytvoření dobře vodivého organického materiálu.

Vznik dvojné vazby může být chápán jako Peierlsův přechod kov–izolant v jednorozměrném prostoru. Je známo, že jednodimenzionální kov se z poloviny zaplněným energetickým pásem je nestabilní vzhledem k přechodu kov–izolant a mění se na izolant při nízkých teplotách.

V kovovém stavu (obr. 2) mají všechny vazby v organickém materiálu stejnou délku a elektrony, které nejsou navázány jsou přemístěny v celém systému makromolekuly. Dvojně vazby se vytvářejí v nekovovém stavu. Peierlsův přechod se někdy definuje jako přechod z neuspořádaného stavu do uspořádaného stavu. V důsledku vazby k mřížce vede párování elektronů k uspořádanému stavu, na rozdíl od párování elektronů v supravodivém stavu, kde uspořádaný stav je ideálně vodivý. Elektrony, ale také další vazební skupiny, jsou párovány, což zmenšuje prostor ve vzájemném prostoru. To způsobuje nespojitost energie a hybnosti elektronů a vytváří pás zakázaných energií. Materiál se pak chová jako polovodič. [9]

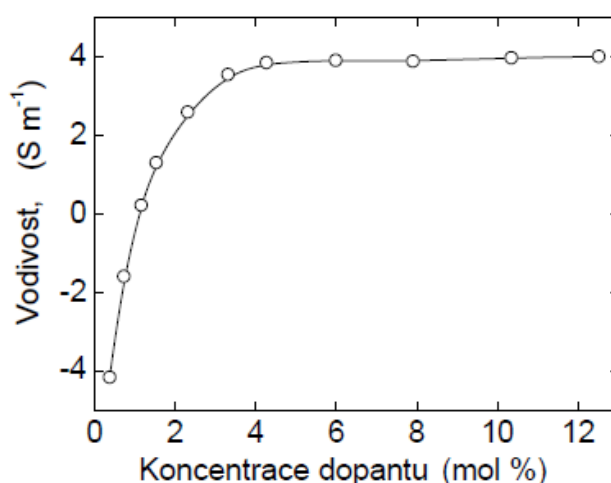


Obr. 2: Schématické znázornění Peierlsova přechodu, E je energie, $N(E)$ je distribuční funkce elektronových stavů [18]

Tento jev je především způsoben malým počtem sousedů v mřížkových bodech.

Na rozdíl od nadbytečného elektronu přidaného do vodivostního pásu, například

legováním, nadbytečný elektron ve vybuzeném pásu bude deformovat mřížku v důsledku silné elektron-fononové vazby, změní se elektronová struktura deformované mřížky a kolem nadbytečného elektronu nastane kolaps pásu zakázaných energií. Může tedy pomoci legování nebo zahřátí zrealizovat fázový přechod izolant–kov. Legování představuje snižování počtu elektronů nebo redukci úseků polymerního řetězce a na úrovni vyšší než 1 mol % zcela eliminuje Peierlsův přechod a polymerní řetězec by se měl chovat jako vodič. Z dosavadních výzkumů bylo skutečně pozorováno, že během legování došlo k velkému zvýšení elektrické vodivosti. Průběh ukazuje obr. 3. [8][18]



Obr. 3: Závislost jak se přidáváním dopantu zvyšuje elektrická vodivost [18]

Běžné vodivé polymery jsou ve srovnání s jinými polymerními materiály obtížně zpracovatelné. V běžných rozpouštědlech se nerozpouštějí, nelze je převést do taveniny, proto je zapotřebí řetězec nahradit vhodnými bočními skupinami např. polymerními latexy, které lze použít pro přípravu vodivých polymerních filmů. [9] [18]

Molekuly si v molekulovém krystalu plně zachovávají svou „osobitost“, na rozdíl od silně vázaných atomů a iontů v kovalentních a iontových krystalech. Z tohoto pohledu se organický materiál jeví jako zředěný molekulární plyn. Z tohoto důvodu není přenos náboje z jedné organické molekuly na druhou tak jednoduchý a je závislý na mezimolekulovém přeskočení, tzv. hoppingu, který většinou probíhá po energetických stavech pod hranou vodivostního pásu a nad hranou valenčního pásu. Podstata těchto stavů vyplývá z rozptýlení energie elektronové polarizace P . [9]

Elektronová polarizace polymeru nosiče náboje určuje jeho vlastní energii, a tedy i

polohu vodivostní hladiny v energetickém schématu elektronových stavů. Hrana valenčního pasu E_v tedy leží nad nejvyšší obsazenou energetickou hladinou neutrální molekuly. Energetický rozdíl je dán velikostí střední energie elektronové polarizace organického materiálu. [18]

1.5 Organické vodivé materiály

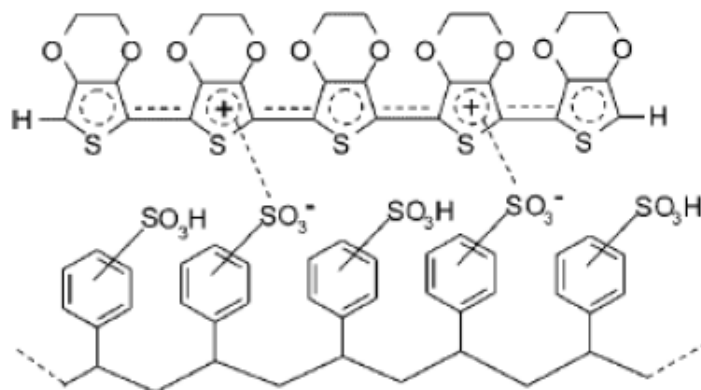
Organické materiály jsou v posledních letech studovány z hlediska využití v elektronice především proto, že jejich výroba není ve srovnání s klasickými anorganickými součástkami tak nákladná. Mezi jejich dobré vlastnosti patří to, že vrstvy mohou být nanášeny za pokojové teploty přímo z roztoku, nebo tiskovými metodami, což výrazně snižuje energetickou náročnost celého procesu. [3] Jako velice dobrý materiál se jeví PEDOT: PSS, hlavně díky jeho vodivosti. O jeho dobrých vlastnostech jsme mohli přesvědčit v praktickém měření, kdy práce s ním byla jednoduchá, o tom ale později.

PEDOT: PSS

Jedná se o polymer s dobrou vodivostí Poly (3,4-etylenedioxythiofen) nebo PEDOT, což je vodivý polymer vzniklý z 3, 4 - ethylenedioxythiophene nebo EDOT monomerů.[12]

Mezi výhody tohoto organického materiálu patří především jeho vysoká stabilita a úzký zakázaný pás. Naopak jeho velká nevýhoda je špatná rozpustnost. Toto se dá ale obejít pomocí složení PEDOT: PSS, kde PSS je polystyrensulfonát, látka dobře rozpustná ve vodě. PEDOT je složený ze záporně nabitého polymeru nazvaného PSS⁻ a kladně nabitého polymeru zvaného PEDT⁺. [12] Rozdílnost nábojů určuje dobrou vodivost tohoto polymeru.

Uvádí se, že při nízkém napětí je materiál vodivý, ale při vyšším napětí dojde k trvalé změně jeho vlastností a materiál se stává nevodivým. Není zcela jasné, proč se polymer stane nevodivým, když jím projde vysoký proud, ale mohlo by to být tím, že teplo vygenerované průchodem proudu dá PSS⁻ vrstvě dostatek energie k zachycení kladně nabitých vodíkových iontů, které se rozpustí na povrchu a přemění PSS⁻ vrstvu na neutrální formu.[12] Tento materiál se používá jako transparentní vodivý polymer s vysokou tažností v různých aplikacích. Po přidání některých organických sloučenin jako jsou například methylpyrrolidon, iontové kapaliny nebo povrchově aktivní látky se mnohonásobně zvyšuje vodivost. Díky této vlastnosti je vhodný pro transparentní elektrody, například v dotykových obrazovkách. Kvůli velmi vysoké vodivosti může být použit jako materiál na katody v kondenzátorech. [5] [6] [7][13]



Obr. 4: Molekulární struktura PEDOT:PSS [13]

1.6 Aplikace vodivých organických materiálů

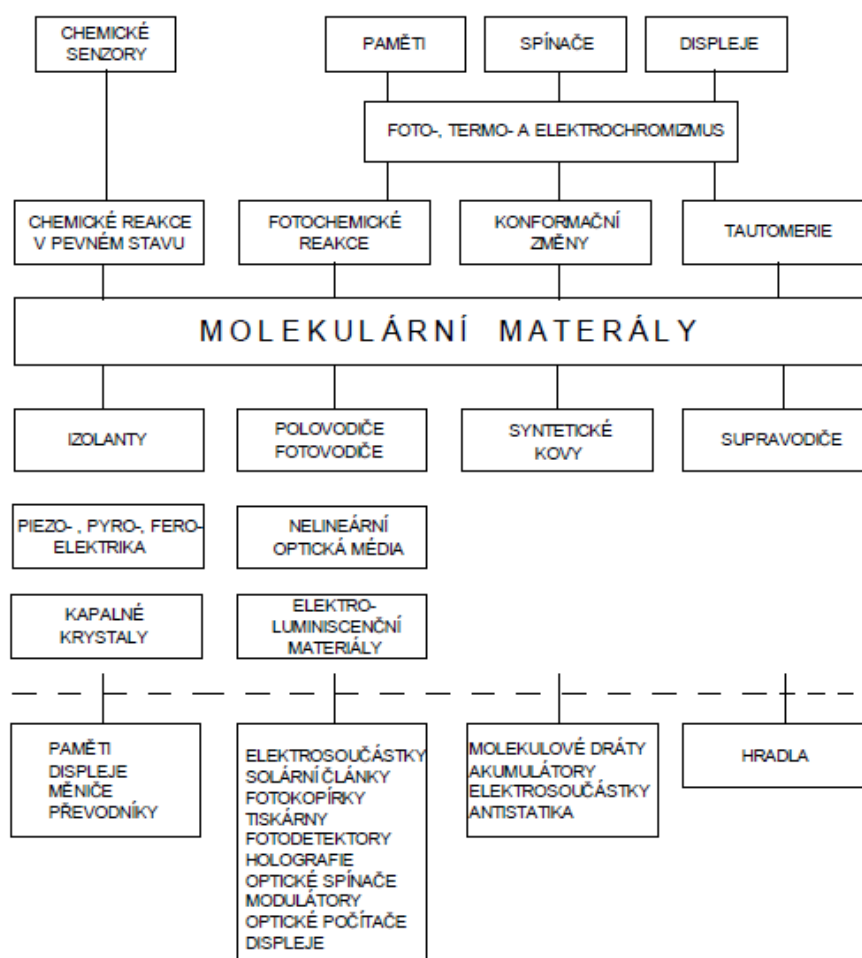
Aplikací, kde lze použít organické materiály, neustále přibývá. Jedním z důvodů je určitě schopnost molekul vytvářet takové struktury, které budou odpovídat vlastnostem, které zrovna u dané aplikace potřebuje. Toto vede k neustále rychlejšímu růstu počtu nových organických sloučenin a hledání jejich dobrých vlastností.

Zájem o organické sloučeniny silně vzrostl po objevení materiálů s vysokou elektrickou vodivostí a supravodivostí, s nelineárními optickými, pyroelektrickými a piezoelektrickými vlastnostmi. Nízkomolekulární i polymerní organické látky můžeme používat v různých formách jako jednosložkové monokrystaly, polykrystalické a amorfnní vrstvy, apod. Některé molekulární materiály se spontánně organizují a vytvářejí uspořádané struktury. Více funkční molekulové řetězce mohou být vytvářeny také technikou nazývanou modulová chemie, která spočívá v postupném sjednocování dvourozměrných struktur na tuhých substrátech. [3] [6] [18]

Funkci organických materiálů můžeme rozdělit do několika odvětví, např. makroskopické materiály mohou být užity jako pasivní nebo aktivní složky klasických vícesložkových součástí (např. vodivé polymery v akumulátorech, molekulové polovodiče ve funkci chemických senzorů nebo fotoaktivní materiály v matricích holografických paměti). [8]

Zjistilo se, že celá řada funkcí organických materiálů vychází z vlastností jednotlivých molekul a jejich propojení mezi sebou. Jednotlivé molekuly mohou být aktivní při čtení, přenosu nebo záznamu informace, jestliže bude využito vhodné metody adresování a detekce. Soubor molekul s vhodnou strukturou umožňuje přesun nábojů v určeném směru na vzdálenost řadově převyšující typické meziatomové vzdálenosti. [4] [18]

Jedna molekula může vykonávat funkci molekulového spínače multistabilního prvku umožňujícího otevření nebo zavření přenosové cesty pro přenos informace nebo směrování informace do předem určeného místa aktivní molekuly. Některé molekuly jsou bistabilní nebo multistabilní, to znamená, že mohou být užity jako paměťové prvky. Jednou z výhod molekulární elektroniky je, že není tak energeticky náročná. Další výhodou je i snadná technologie výroby – vrstvy lze například dobře tisknout. Běžnými tiskařskými technikami lze dosáhnout běžně rozlišení 40–500 μm . Pro řadu levných aplikací to postačuje, zdaleka to však nedosahuje možností technologie křemíkových polovodičů. [4] [18]



Obr. 4: Využití organických materiálů v elektronice [18]

2 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI

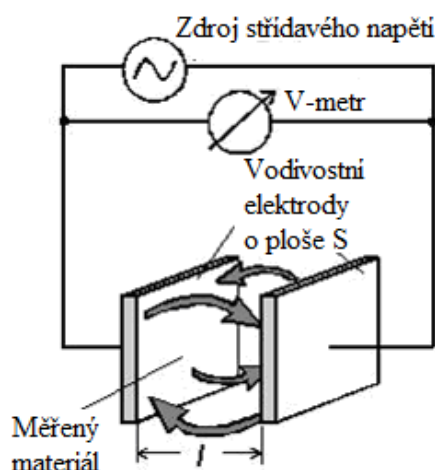
Měření elektrické vodivosti je jedním ze základních stavebních prvků elektrických měření. Vždyť měření elektrického odporu je jedním z nejpoužívanějších měření u anorganických materiálů a proto existuje mnoho metod, jak elektrický odpor určit. Naopak u organických materiálů ještě není tolik metod na změření vodivosti známo, možná i z toho důvodu, že se organické materiály začaly používat teprve v „nedávné době.“ Proto se tato část bakalářské práce bude právě zabývat vhodnými metodami a jejich modifikacemi pro změření elektrické vodivosti organických sloučenin, jejich principy a vlastnostmi.

2.1 Konduktometrie

Konduktometrie je metoda, kde se na základě měření elektrické vodivosti stanovuje schopnost zkoumaného materiálu vést elektrický proud. Na této vlastnosti se různou měrou podílí celá struktura měřeného materiálu, přičemž působení jednotlivých látek nelze úplně rozlišit. Na tuto vlastnost má velký vliv také teplota měřeného materiálu. Tato metoda se používá hlavně pro materiály, které jsou v tekutém stavu a pro měření jejich vodivosti používáme přístroje, které se nazývají konduktometry. [14] [15]

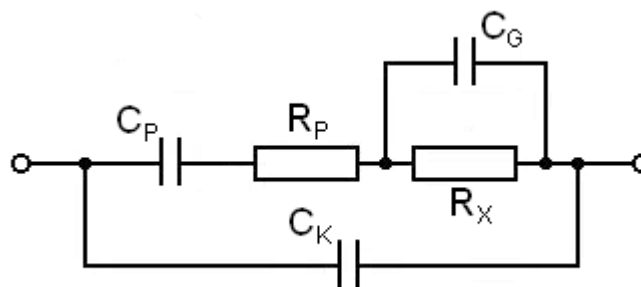
Principiální schéma zapojení obvodu pro měření vodivosti materiálu je na obr. 5. Měření vodivosti materiálu se provádí za pomoci vodivostní sondy, v níž je měřený materiál. V sondě jsou umístěny dvě elektrody, jimiž prochází konstantní proud I . Ideální vodivostní sondu lze popsat jediným prvkem a to odporem měřeného roztoku R_x . [15]

V tomto případě určíme R_x z napětí naměřeného voltmetrem a použitím Ohmova zákona $U = I * R_x$ (4)



Obr.5: Schéma zapojení a princip měření vodivosti pomocí konduktometru. [14]

V praxi ovšem musíme počítat s tím, že sonda není ideální, proto skutečná vodivostní sonda má náhradní schéma složitější, viz. Obr. 6.



Obr. 6: Náhradní schéma skutečné vodivostní sondy (R_X – odpor materiálu, C_G – geometrická kapacita sondy, C_P – polarizační kapacita, R_P – polarizační odpor, C_K – kapacita kabelu) [14]

Po přiložení střídavého napětí na elektrody, vznikne na vnitřní straně elektrod dvouvrstva nábojů. Tato dvouvrstva je způsobena řadou jevů, které se nazývají polarizace elektrod. V náhradním obvodu sondy (obr. 6) je polarizace elektrod vyjádřena jako sériová kombinace odporu R_P a kapacity C_P . [14]

Polarizační jev se nejvíce uplatňuje u materiálů s velmi vysokou vodivostí a při napájení s nízkým kmitočtem. Obě složky polarizační impedance jsou však frekvenčně závislé. Obecně platí, že při kmitočtu napájení do 5 kHz se hodnota C_P pohybuje od 10 μF do 100 μF a hodnota R_P mezi 10 m Ω a 10 Ω . Obvyklá hodnota kapacity je mezi 10 pF až 100 pF. [15]

2.2 Přímá metoda měření vodivosti

Přímá metoda měření vodivosti je nejjednodušší metodou měření elektrického odporu v běžné elektrotechnické praxi. Měřený materiál v sérii s ampérmetrem je připojen ke zdroji stejnosměrného napětí a celkový odpor R získáme z Ohmova zákona. U polovodičů má tato metoda jen omezený význam. Lze ji totiž uplatnit jedině, když měřený materiál má jednoduché rozložení s konstantními a známými rozměry (délkou, průřezem) a máme tedy možnost vypočítat rezistivitu ze změřeného odporu R . [15]

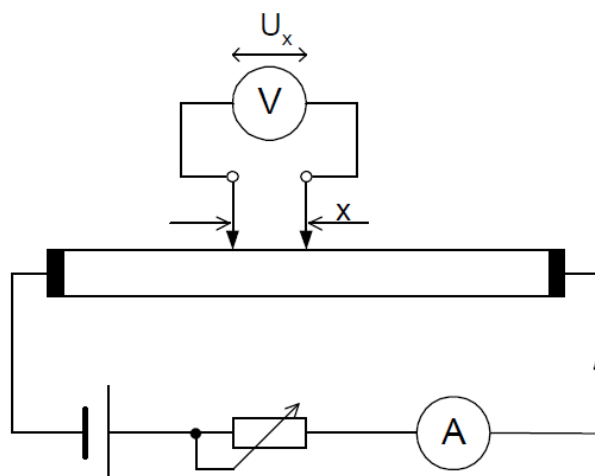
Při aplikaci této metody je vzorek opatřen na svých koncích dvěma proudovými kontakty, jejichž odpor se započítává do změřeného odporu R . Proto je žádoucí, aby tyto kontakty byly provedeny co nejkvalitněji. [15]

2.3 Metoda dvouhrotové sondy

Metoda využívající dvouhrotové sondy je znázorněna na obr. 7. Materiál, nanesený na vzorek konstantního průřezu S , je zapojen do obvodu zdroje pomocí plošných proudových kontaktů. Pro zjištění ρ se použije měřicí hlavice se dvěma hrotovými potenciálovými sondami, které mají stálou vzdálenost x . Hroty se dotýkají polovodiče na rovinné plošce, o šířce několika málo milimetrů. Při známém průřezu S , vzdálenosti hrotů x , proudu I a napětí U_x mezi hroty je rezistivita dána vztahem:

$$\rho = \frac{U_x}{I} * \frac{S}{x} \quad (5)$$

Popsaná metoda není náročná a její hlavní výhoda spočívá v možnosti zjistit rozložení ρ podél vzorku a při malé vzdálenosti hrotů také podrobně vyšetřit případné nehomogenity měřeného materiálu. [11] [14]



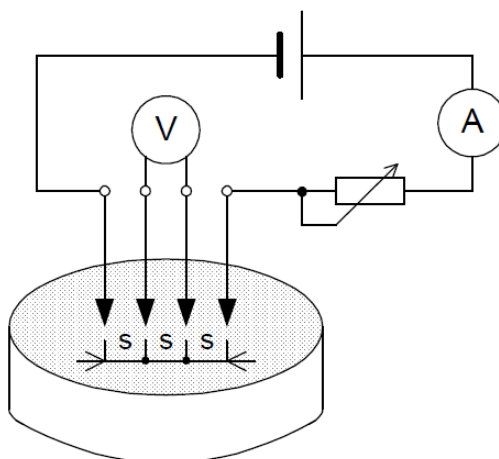
Obr. 7: Metoda dvouhrotové sondy [14]

2.4 Čtyřbodová metoda

Metoda čtyřbodová (čtyřhrotová), která je znázorněna na obr. 8, byla vyvinuta pro měření rezistivity materiálu naneseného na objemnějších typech měřených vzorků, které nemají jednoduchý geometrický tvar. Základem měření je měřicí hlavice se čtyřmi hrotovými kontakty, přičemž dva krajní jsou proudové a vnitřní dva jsou napěťové. Vzdálenost mezi kontakty bývá stejná, přibližně 1 mm, aby byl výpočet jednodušší. [11] [14]

Rezistivitu lze vypočítat ze vztahu: $\rho = 2\pi * S * \frac{U}{I}$, (6)

kde S je vzdálenost mezi hroty, U , I jsou změřené velikosti napětí a proudu.



Obr. 8: Schéma čtyřbodové metody měření rezistivity [14]

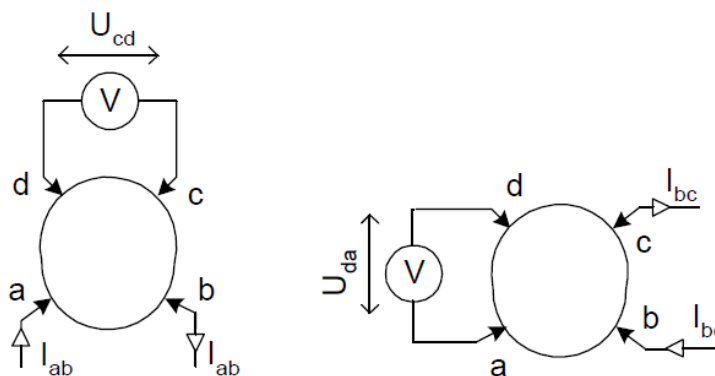
2.5 Metoda Van der Pauwa

Tato metoda se používá, když se potřebuje určit rezistivita materiálu na ploché destičce. Vzorek musí mít stejnou tloušťku, ale nemusí mít jednoduchý pravidelný tvar. Metoda využívá čtyř bodových kontaktů, které jsou na obvodu měřícího vzorku.

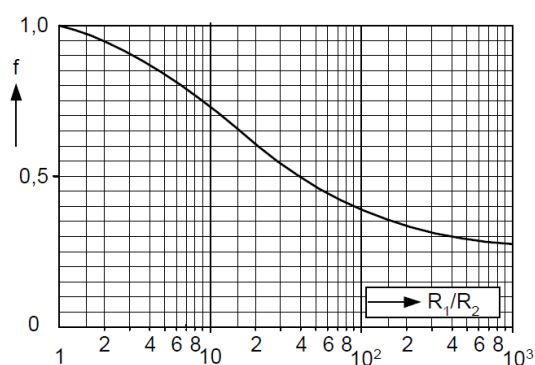
Měření se skládá ze dvou samostatných kroků, jak je znázorněno na obr. 9. V prvním kroku se změří velikost $R_1 = \frac{U_{cd}}{I_{ab}}$ a v druhém kroku se změří s velikost $R_2 = \frac{U_{da}}{I_{bc}}$. Z těchto údajů a známé tloušťky destičky se rezistivita určí ze vztahu:

$$\rho = \frac{\pi * h}{\ln 2} * \frac{R_1 + R_2}{2} * f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (7)$$

v němž $f(R_1/R_2)$ je číselná velikost korekčního činitele, kterou lze odečíst z grafu na obr. 10. Korekční činitel přihlíží k rozdělení kontaktů po obvodu destičky. Kdyby destička byla kruhová a měla rozmístěné kontakty symetricky proti sobě, byly by odpory R_1 , R_2 u homogenního materiálu stejně velké a $f(R_1/R_2) = 1$. [14]



Obr. 9: Měření metodou Van der Pauwa [14]

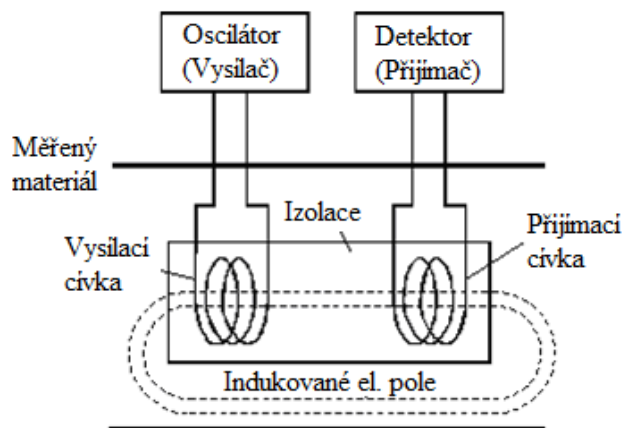
Obr. 10: Průběh činitele f v závislosti na R_1/R_2 [14]

2.6 Bez elektrodové indukční měření vodivosti

Jak ukazuje obr. 11, jsou v měřeném materiálu ponořeny dvě cívky, které jsou úplně oddělené od materiálu elektricky nevodivým materiálem, nejčastěji plastem.

Na tzv. vysílací cívku je přiveden z oscilátoru střídavý proud o frekvenci řádově několik desítek kHz. Měřidlo, které je naopak připojeno k přijímací cívice, měří proud, který je v této cívice indukovaný. Jeho velikost je přímo úměrná vodivosti měřeného materiálu.

V principu jde o transformátor, kde je vysílací cívka primárním vinutím a přijímací cívka vinutím sekundárním a jádrem je měřený materiál. [14]



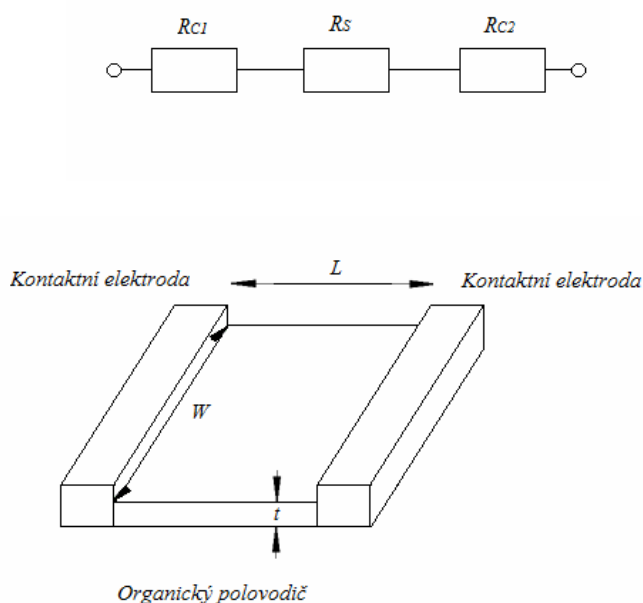
Obr. 11: Princip bez elektrodového měření vodivosti [14]

2.7 TLM metoda

Základní myšlenka TLM je, že zdánlivý celkový odpor R modelu na Obr. 13 je formulovaný jednoduchou rovnicí:

$$R = R_S + R_{C1} + R_{C2} = \rho * \frac{L}{W * t} + R_C, \quad (8)$$

kde R_S je vrstvý odpor organického polovodiče, R_C je celkový kontaktní odpor a parametry t (tloušťka), L (délka), W (šířka) jsou geometrické rozměry organické vrstvy a přilehlých elektrod. ρ je rezistivita organického materiálu. Kvůli tomu, že je obvykle odpor nezávislý na délce kanálu, může být využito toho, že ho můžeme snadno oddělit pomocí měření několika párů elektrod, mezi kterými je jen malá vzdálenost. [4][16][19] Po vynesení do grafu závislosti délky elektrod a celkového odporu, lze odvodit kontaktní odpor a vrstvý odpor. Pomocí funkce lineární regrese, kdy přímka protne osu Y , dostáváme hodnotu kontaktního odporu R_C a zároveň směrnice regresní přímky určuje vrstvý odpor R_S , jak je následně znázorněno na obr. 16 a dále v přílohách na obr 1-4.



Obr. 13: Model zahrnující odpor R_s v sérii s kontaktními odpory R_c . [19]

Vrstvový odpor je základním parametrem vodivých a odporových vrstev. Vrstvový odpor vyjadřuje hodnotu odporového materiálu, v němž je zahrnuta konstantní tloušťka vrstvy, a proto bývá často označovaná jako odpor na čtverec. S pomocí hodnoty vrstevového odporu jsou charakterizovány například tlustovrstvé a tenkovrstvé vodivé organické materiály. [4]

Kontaktní odpor je odpor, který vzniká při spojování materiálů. Příčinou jeho zvyšování mohou být například nerovnosti mezi spoji nebo nečistoty na povrchu spojů, čímž se snižuje plocha S . [4]

2.8 Porovnání

Když bychom porovnali tyto měřicí metody, co se složitosti a přesnosti týče, nejlépe jsou na tom dvoubodová metoda a TLM, kdy realizace dvoubodové metody je velice jednoduchá a umožňuje snadno a rychle určit rozložení rezistivity měřeného materiálu.

Dvoubodová metoda je úzce spjatá se čtyřbodovou metodou, která svými dalšími elektrodami omezuje kontaktní odpor měřeného materiálu. Jediný rozdíl je v tom, že čtyřbodová metoda se používá pro objemnější typy vzorků, na kterých je materiál nanesen.

TLM je velice šikovní metoda, která nám zaručí rychlé a relativně správné výsledky, ovšem ne vždy jí lze použít, protože u nerovnoměrně naneseného materiálu se může stát, že dojde k tomu, že kontaktní odpor vyjde záporný, což je z praktického hlediska nesmysl. Proto

je nutno dbát na výběru vhodného materiálu a jeho manipulaci s ním. V praxi je dost často využívána metoda Van der Pauwa z důvodu, že je materiál většinou nanášen na plochou tenkou destičku a také hlavně její přesnosti, kdy dochází k podrobnějšímu proměření po více krocích a tudíž k přesnějším výsledkům. Jako nevhodnou laboratorní metodou se jeví bezelektrodová indukční metoda, která využívá hlavně pro měření elektrolytu.

3 Praktická část

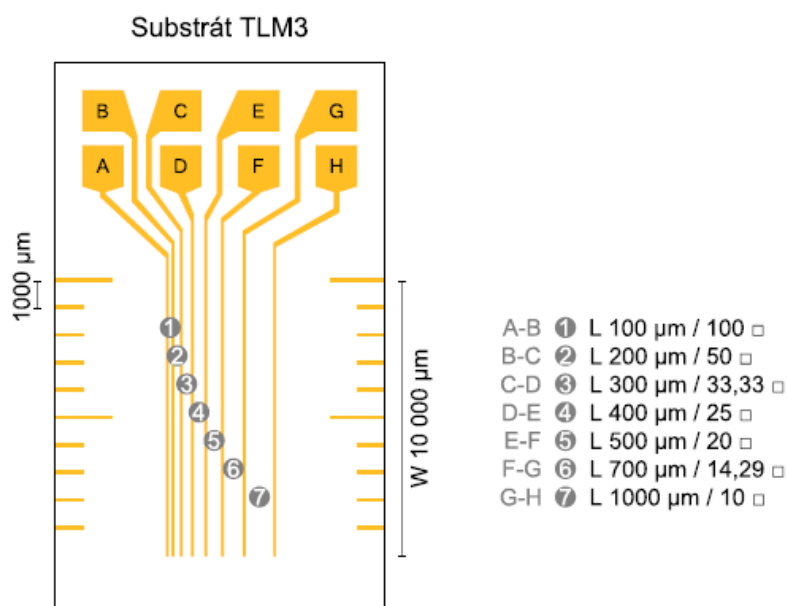
V praktické části bakalářské práce bylo potřeba proměřit několik sad měřících vzorků (substrátů) s různými vodivými organickými materiály. Jako vhodná měřicí metoda byla vybrána dvoubodová metoda, hlavně kvůli její jednoduchosti a přesnému určování rezistivity. K její realizaci bylo potřeba provést několik kroků, které jsou popsány v této kapitole.

3.1 Měřicí plán

Aby bylo získáno dost materiálu k porovnávání a demonstraci výsledků, určilo se, že měření proběhne pro pět různých vhodných materiálů typu PEDOT:PSS, které budou značeny M1-M5. Vždy jeden materiál bude nanesen na šest substrátů S1-S6. Každý substrát bude změřen pomocí dvoubodové metody a výsledky budou dále zpracovány pomocí TLM metody.

3.2 Topologie měřících vzorků

Vzorek je sklo-epoxidový substrát s elektrodami vyleptanými v plátované mědi, které byly následně chemicky pozlacené. Jednotlivé elektrody, mezi kterými se měřil elektrický odpor jsou označené jako A-H, se vzdálenostmi L1-L7 mezi sebou. [17]



Obr. 14: Topologie měřícího vzorku[19]

3.3 Příprava substrátů

V první řadě bylo potřeba vybrat a zkontrolovat substráty, jestli nemají porušené kontaktní vývody a elektrody. Po tomto kroku následovalo vystřihání substrátů, protože jsou vyráběny frézováním velké sklo-epoxidové desky. Následovalo obroušení nerovných výstupků pomocí pilníku z důvodů lepší manipulace, kdy bylo následně potřeba pracovat pouze pomocí pinzety, aby nedošlo ke zbytečnému zanesení elektrod. Potom bylo potřeba měřicí substráty omýt pod tekoucí vodou s pomocí mycích prostředků z důvodů odstranění prachových a mastných nečistot. Pro vyšší přesnost měření a zbavení se zbytku nečistot byly substráty ošetřeny pomocí demineralizované vody, aby při nanášení materiálu a měření nedocházelo ke zbytečným chybám. Tyto mycí kroky bylo nutno provést ještě dvakrát po sobě. Na závěr pak byly substráty ještě třikrát ošetřeny v ultrazvukové lázni (izopropylalkohol a demivoda v poměru 1:1), vždy po dobu patnácti minut. Následně byly vysušeny pomocí horkého vzduchu a uloženy v Petriho misce v běžných laboratorních podmínkách.

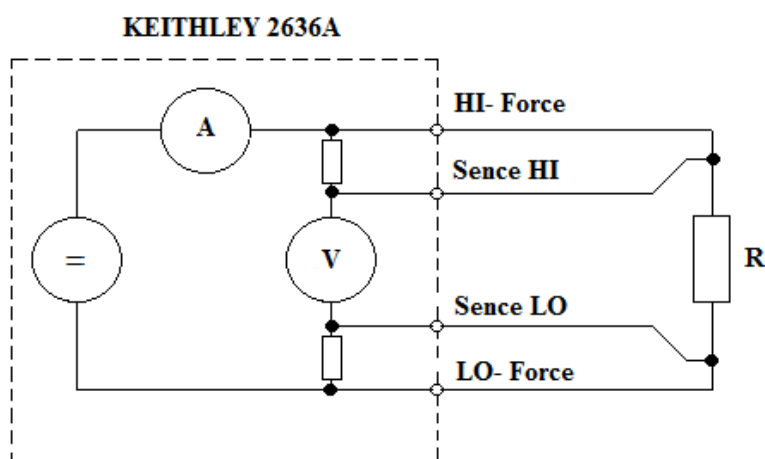
3.4 Depozice organického vodivého materiálu

Vybraných pět různých variant materiálů PEDOT: PSS bylo vždy před nanášením na substrát potřeba pořádně, nezávisle dlouho na čase, promíchat. K tomuto účelu slouží třepačka, která rozmíchává materiály, aby došlo k promíchání pevných látek, které se postupně usazují a vytváří tak nehomogenní charakter. Protřepání je proto nezbytné a zlepšuje následnou depozici materiálu. Postup spočíval v tom, že vždy jeden materiál byl zanesen pomocí injekční stříkačky do speciálního přípravku, který byl dvakrát důkladně ošetřen v ultrazvukové lázni. Vše bylo realizováno pomocí zdvihacího zařízení, na kterém byly nastaveny vhodné počáteční podmínky: Rychlost ponoru a vytahování- 50 mm/min a doba setrvání ve vodivém materiálu- 60 sekund. Při vyšší rychlosti a kratší době setrvání by totiž mohlo dojít k nerovnoměrnému nanesení materiálu a nanesená vrstva materiálu by byla příliš slabá nebo naopak příliš silná. Substrát byl vždy upevněn do svěráku a pomocí zdvihacího zařízení byl ponořován do přípravku s daným materiálem. Zde setrval nadefinovanou dobou a posléze byl vytažen a uskladněn v Petriho misce. Po depozici šesti substrátů byl vyměněn materiál a vše se opakovalo. Tento postup byl realizován pro všechny substráty. Po skončení depozice organického materiálu následovalo už jen vysušení substrátů v horkovzdušné peci, při teplotě 100° C, po dobu jedné hodiny, aby se odpařila zbytková vlhkost a materiál vrstev se dobře usadil. Tomuto popsanému postupu nanášení materiálu se říká Dip-coating a je velice často používaný především při vytváření tenkých vrstev na substrátech.

3.5 Měření

Samotné měření proběhlo v uzavřených prostorech s konstantní teplotou 24, 9° C při vlhkosti vzduchu 42%. Před začátkem byla nastavena konstantní hodnota napětí na hodnotu 1V. Při měření bylo využito dvoubodové metody, ale z důvodu potlačení kontaktního odporu zde byly přidány další dvě sondy. Substrát byl uchycen tak, aby se kontakty měřícího přístroje dotýkaly všech elektrod. Dvojice sond HI a LO byly vždy připojeny na jednotlivé sousedící elektrody (AB, BC, CD, DE, EF, FG, GH), mezi kterými byl následně změřen elektrický proud a elektrický odpor. Takto se postupovalo u všech měřících vzorků. Všechny údaje byly zaznamenány a dále zpracovány.

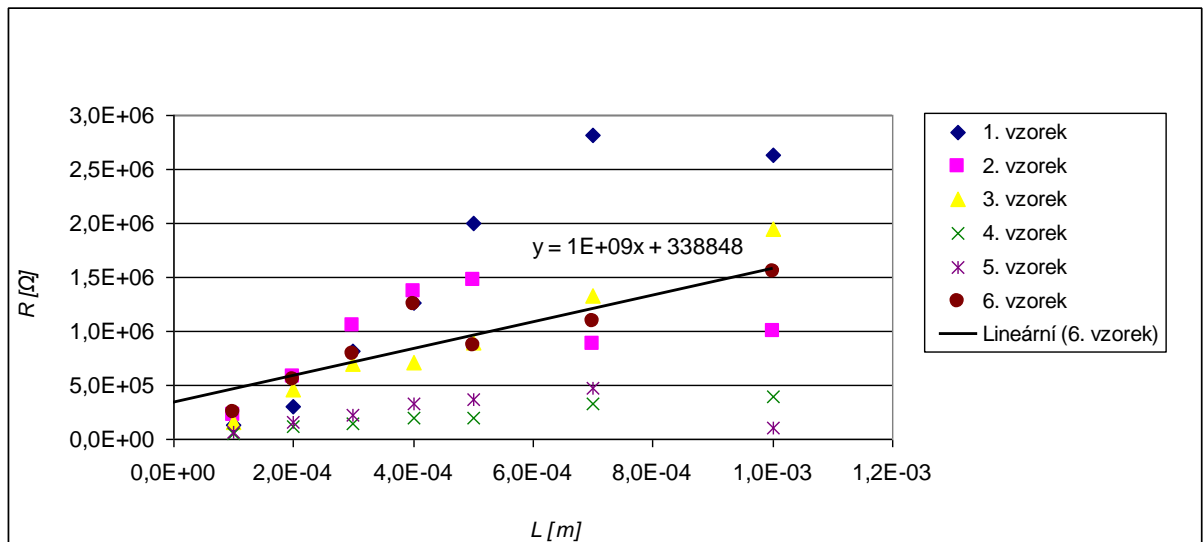
Schéma zapojení:



Obr. 15: Schéma zapojení praktického měření pomocí čtyřbodové metody

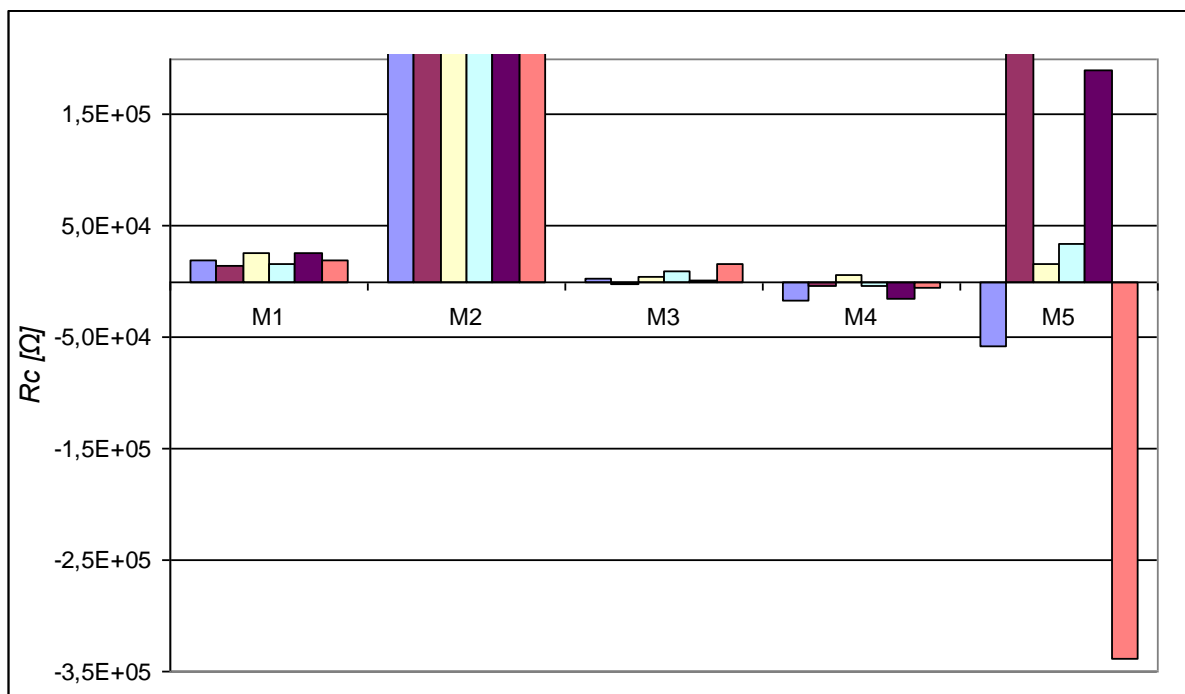
3.6 Výsledky měření

Ukázku naměřených hodnot zobrazuje obr. 16, na kterém se nachází graf, vyjadřující závislost mezi změřeným odporem a vzdáleností mezi jednotlivými elektrodami. Jako ukázka je u 6. substrátu vynesena lineární regrese a zobrazená regresní rovnice, ze které lze následně určit kontaktní odpor R_c a vrstevný odpor R_s . U jednotlivých průběhů si můžeme všimnout, že ne všechny substráty vykazují lineární nebo jemu podobný charakter. Mohlo by to být způsobeno tím, že disperze materiálu způsobuje nehomogenní charakter, což může zapříčinit nedokonalou tloušťku vrstvy nanášeného materiálu a následné odchylky, jak je možno vidět například na obr. 16, u 1. a 2. vzorku. Ostatní pro průběhy pro zbylé materiály je možno vidět příloze.



Obr. 16: Závislost změřeného odporu na vzdálenosti elektrod pro 5. sadu substrátů pro materiál M5.

Na obr. 17 můžeme pozorovat závislost jednotlivých kontaktních odporů pro jednotlivé sady materiálů M1-M5, které jsou určeny pomocí průsečíku regresní přímky s osou Y. U materiálů M1 a M2 lze vidět, že TLM opravdu dobře funguje. Ovšem u ostatních materiálů zejména u M4 je vidět, že matematický postup nefunguje správně. Příčina by mohla být v tom, že během nanášení se mohl materiál špatně usadit a vytvořit nerovnoměrnou vrstvu.

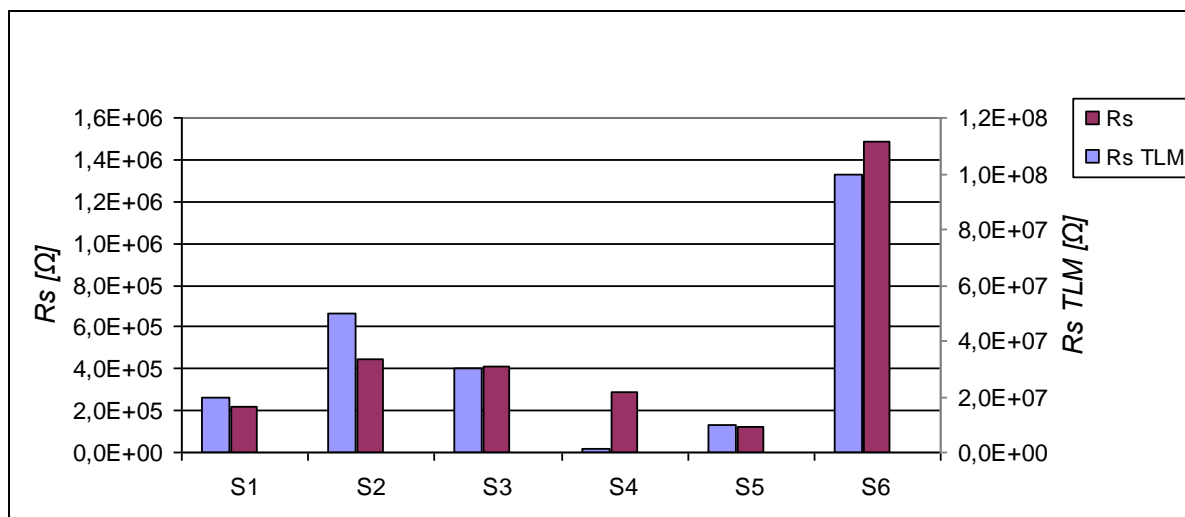


Obr. 17: Graf kontaktních odporů u jednotlivých materiálů M1-M5.

Následující postup byl takový, že z naměřených hodnot ze dvoubodové metody byl vyjádřen a dopočítán vrstvý odpor R_s , ze vztahu:

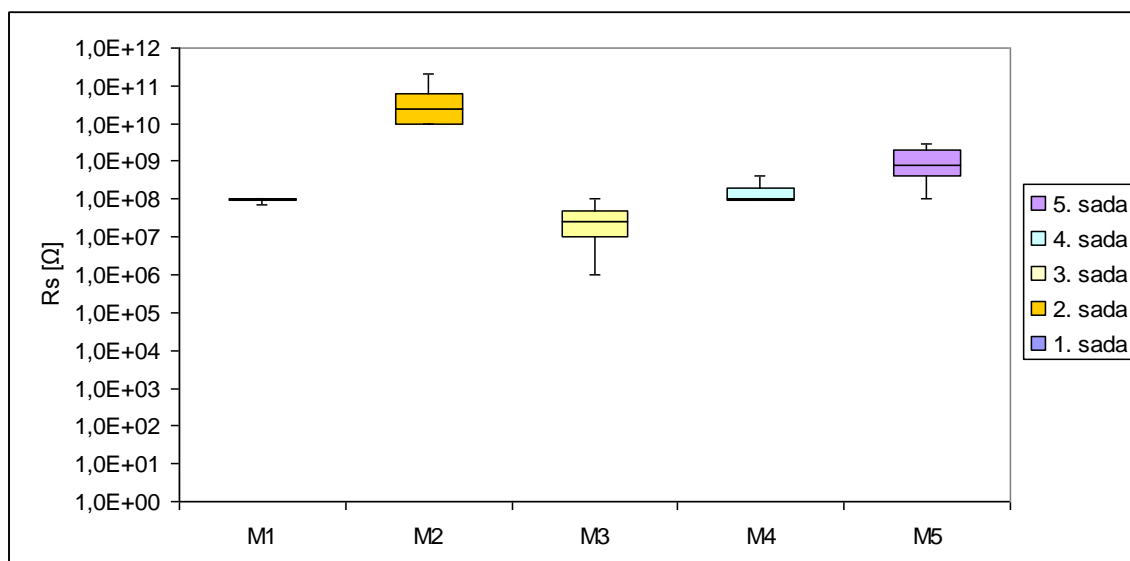
$$R = \rho * \frac{L}{W * t} = R_s * \frac{L}{W} \Rightarrow R_s = \frac{R * W}{L} \quad (9)$$

a byl porovnán s vrstvovým odporem R_s vyjádřeným pomocí TLM, jak je znázorněno na obr. 18. Metoda TLM vykazuje mnohem větší hodnoty vrstvého odporu než běžná dvoubodová metoda. U materiálu M4 si můžeme všimnout, že metoda TLM selhala. Důvodem může být disperze materiálu, kdy při dip-coatingu mohlo dojít k nedokonalému nanesení tloušťky vrstvy. Ostatní porovnání vrstvových odporů lze nalézt v příloze.



Obr. 18: Porovnání R_s dvoubodové metody a TLM u 3. sady substrátů, pro materiál M3.

Na obr. 19 je možno vidět variační rozpětí jednotlivých měřených vzorků v sadě, (rozdíl mezi maximální hodnotou a minimální hodnotou vrstvého odporu R_s). Kdy největší variační rozpětí je u vzorku M3 a M5, kdy z matematického postupu TLM metody vycházely různé hodnoty odporů R_s . Je to zřejmě důsledek nehomogenní vrstvy naneseného materiálu. Naopak nejmenší variační rozpětí je u materiálu M1, kde se hodnoty vrstvého odporu pochybují kolem stejných hodnot (viz. Obr. 5, přílohy). Je zde vynesena i střední hodnota a medián. Největších hodnot vrstvého odporu R_s dosahoval organický materiál M2, řádově $G\Omega$, ostatní materiály vykazovaly hodnoty řádově $M\Omega$.



Obr. 19: Graf s variačním rozpětím, mediánem a střední hodnotou vrstvého odporu R_s u jednotlivých druhů organických materiálů M1-M5.

Závěr

Úkolem empirické části bakalářské práce bylo provést měření vodivosti, následně výsledky zpracovat pomocí metody TLM a ukázat přínos této metody.

Použití TLM metody při měření vodivosti bych hodnotil kladně. Měření proběhlo velice rychle a až na pár hodnot odchylojících se od normy, si dovoluji tvrdit, že TLM metoda je přesná. Už jen díky vlastnosti, že je kontaktní odpor je nezávislý na délce kanálu, může být využito toho, že ho můžeme snadno oddělit pomocí měření několika párů elektrod, mezi kterými je malá vzdálenost a následně lze rychle a snadno zjistit vrstevný odpor R_s a kontaktní odpor R_c daného materiálu pouze ze směrnice regresní přímky.

Samozřejmě že by během měření mohly vzniknout některé chyby, například u dip-coatingu, při ponořování měřícího vzorku do materiálu, kdy by vlivem nedokonalé rychlých reflexů mohlo dojít k přílišnému ponoření destičky do materiálu, než je znázorněná stupnice (na obr. 14), a tím by mohlo dojít k ovlivnění měřících elektrod. Další chyba by mohla být taková, že by při nanášení materiálu PEDOT: PSS na substrát došlo k nedokonalému nanesení vrstvy na kontakty. Proto matematický popis TLM metody není příliš vhodný v případě, kdy kontaktní odpor R_c vychází záporně. Mezi další chyby, které by mohly při měření vzniknout, bych zahrnul nedbalou manipulaci se substráty, kdy by měření mohlo být ovlivněno špatným dotykem kontaktů elektrod a měřících sond nebo dále zaokrouhlování v numerickém softwaru. Tyto drobné chyby se dají snadno odstranit, protože jsou ovlivněny lidským faktorem.

TLM metoda má určitě svá pro a proti. Co se týče její aplikace při nanášení materiálu na tenké vrstvy funguje velice dobře, proto je možné, že po dalších výzkumech jistě najde uplatnění i v jiných technologiích.

Použitá literatura

- [17] Pretl, S.: Contact properties of PEDOT: PSS, Plzeň: Západočeská univerzita, 2010
- [15] Elektrotechnická měření. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 255 s. ISBN 80-730-0022-9.
- [11] Maceška, R.: Měření vodivosti kapalných sloučenin, Brno: VUT 2009
- [16] Xu, Y,: Modified transmission-line Method for contact resistance extraction in organic field-effect transistors, Applied Physics Letters, vol. 97, no 6
- [4] PETTY, Michael C. *Molecular electronics: from principles to practice*. Hoboken, NJ: John Wiley, c2007, xxiii, 517 p. ISBN 04-700-1308-7.
- [9] GRASSER, Tibor, Gregor MELLER a Marc BALDO. *Organic electronics*. New York: Springer, c2010, xiv, 328 p. Advances in polymer science, 223. ISBN 978-364-2045-387.
- [10] Česka M.: Nízkomolekulární materiály pro organickou elektrotechniku a fotoniku, Brno: VUT 2012
- [5] Weiter M.: Pokročilé materiály pro organickou elektroniku a fotoniku, Brno: VUT 2013
- [19] Pflieger, J.: Polymerní nanostruktury v optoelektronice, Praha: Ústav makromolekulární chemie AV ČR
- [16] Džugan T.: Senzory par a plynů na bázi ftalocyaninů, Plzeň: Západočeská univerzita 2012
- [3] Sedmidubský, D.: Základy chemie pro bakaláře, Praha: Vysoká škola chemicko-technologická 2011
- [18] Organické materiály. [online]. 2006 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/141298/PokrokyMFA_51-2006-1_5.pdf
- [1] Blecha, T.: Fyzika polovodičů, Z prezentace předmětu KET/Fyzikální elektronika, Plzeň: Západočeská univerzita, 2013.
- [6] Vodivé polymery: Inteligentní materiály pro nové století. In: [online]. 2001 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.vesmir.cz/clanek/vodive-polymery>
- [8] Optoelektronické materiály a vlastnosti. [online]. 2012 [cit. 2013-06-03]. Dostupné z: <http://www.imc.cas.cz/cpmtow/cz/lab-optoelektronicke-materialy-a-vlastnosti.html>
- [13] MATERIAL ASPECTS OF PEDOT: PSS. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.jncasr.ac.in/shruti/chapter2.pdf>
- [7] Nový typ paměťového média. [online]. 2004, roč. 2, č. 9 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_09_mat.html

[12] PEDOT:PSS. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit.2013-05-20]. Dostupné z:

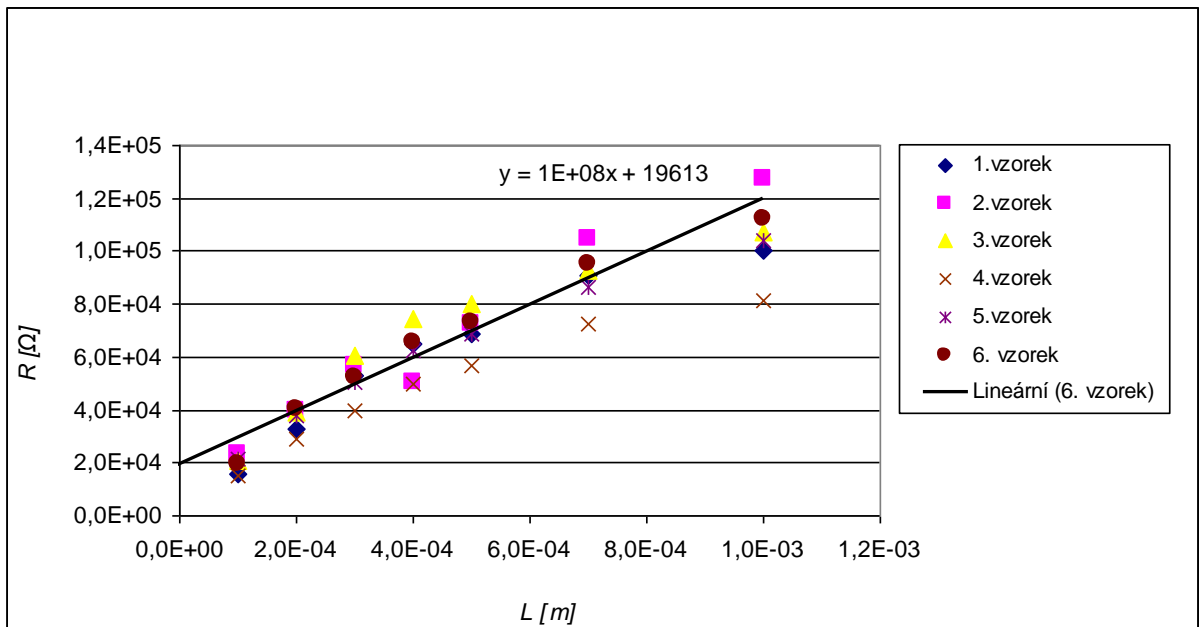
<http://en.wikipedia.org/wiki/PEDOT:PSS>

[2] Polymer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polymer>

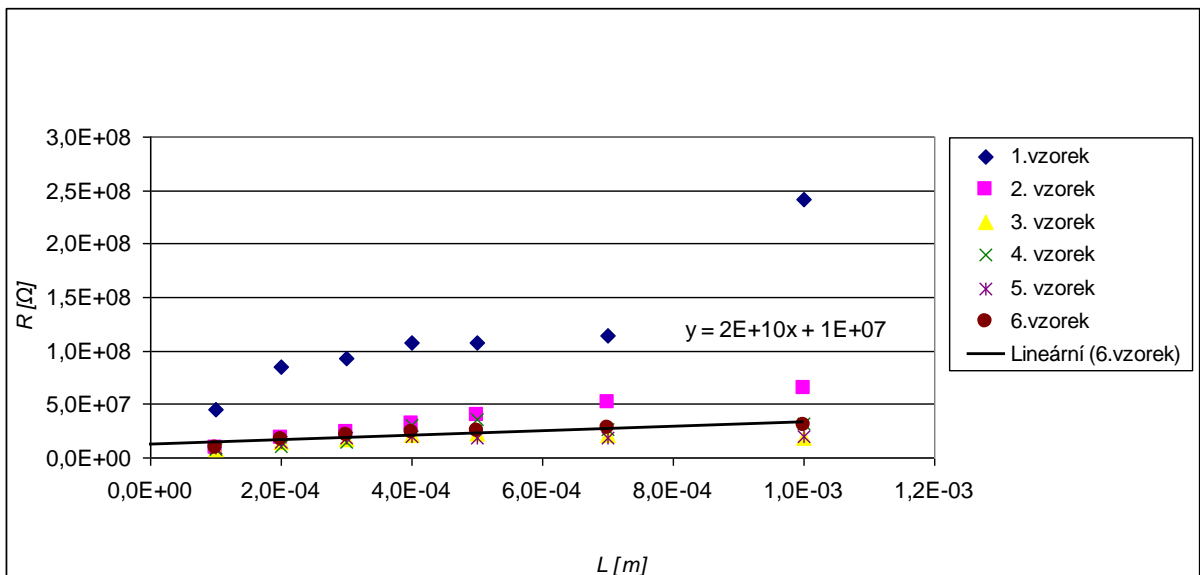
[14] VLASTNOSTI POLOVODIČŮ. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z:

http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_2.pdf

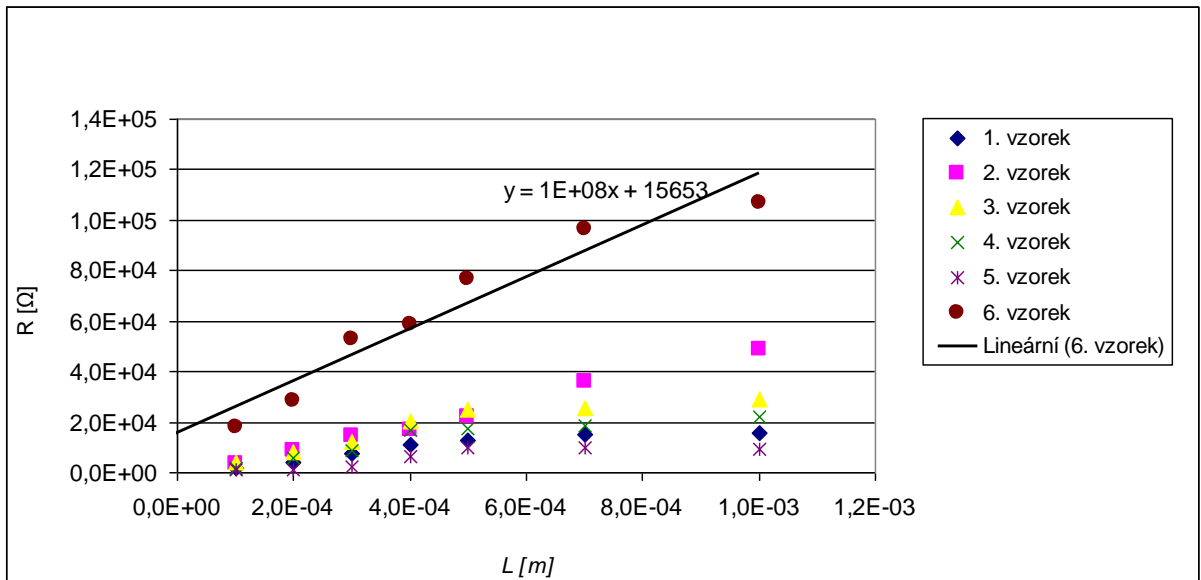
Přílohy



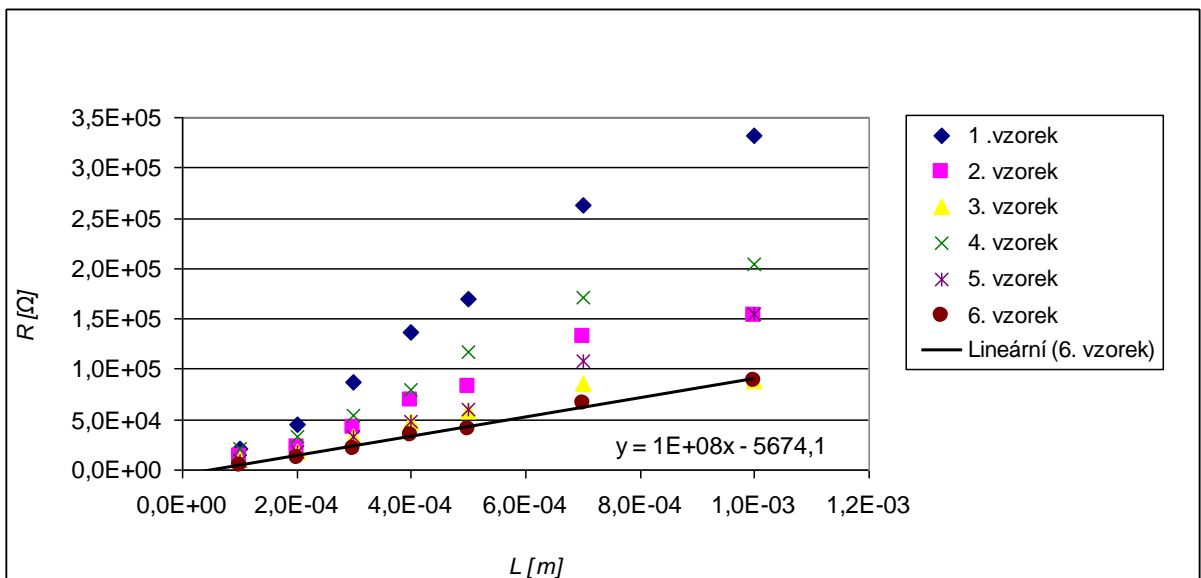
Obr. 1: Závislost změřeného odporu na vzdálenosti elektrod pro 1. sadu měřených vzorků, pro materiál M1.



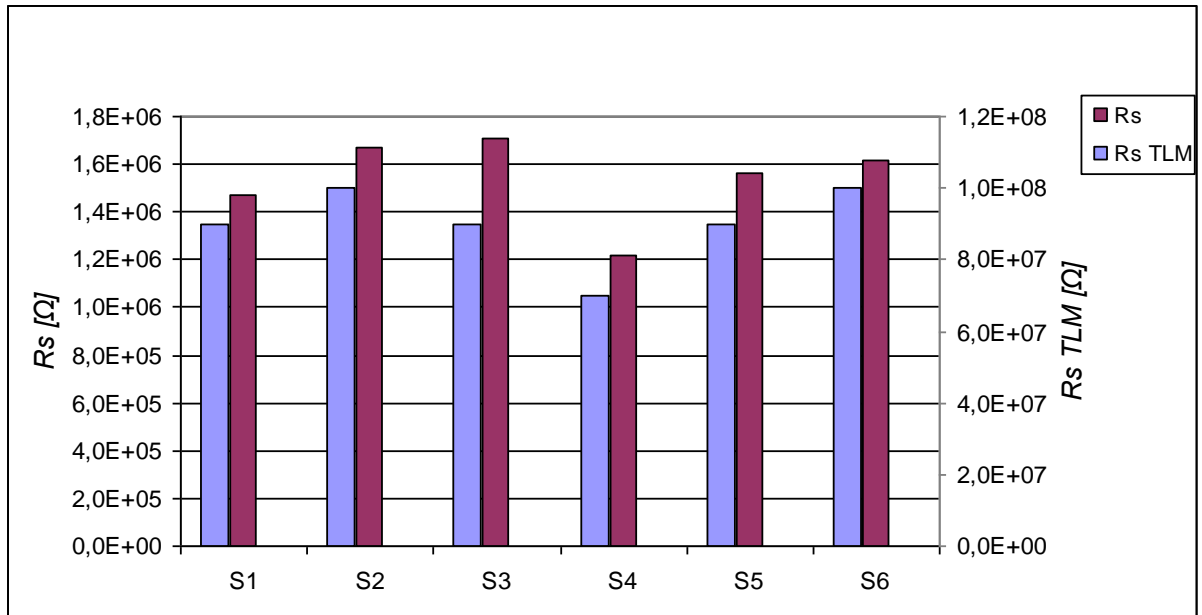
Obr. 2: Závislost změřeného odporu na vzdálenosti elektrod pro 2. sadu měřených vzorků pro materiál M2.



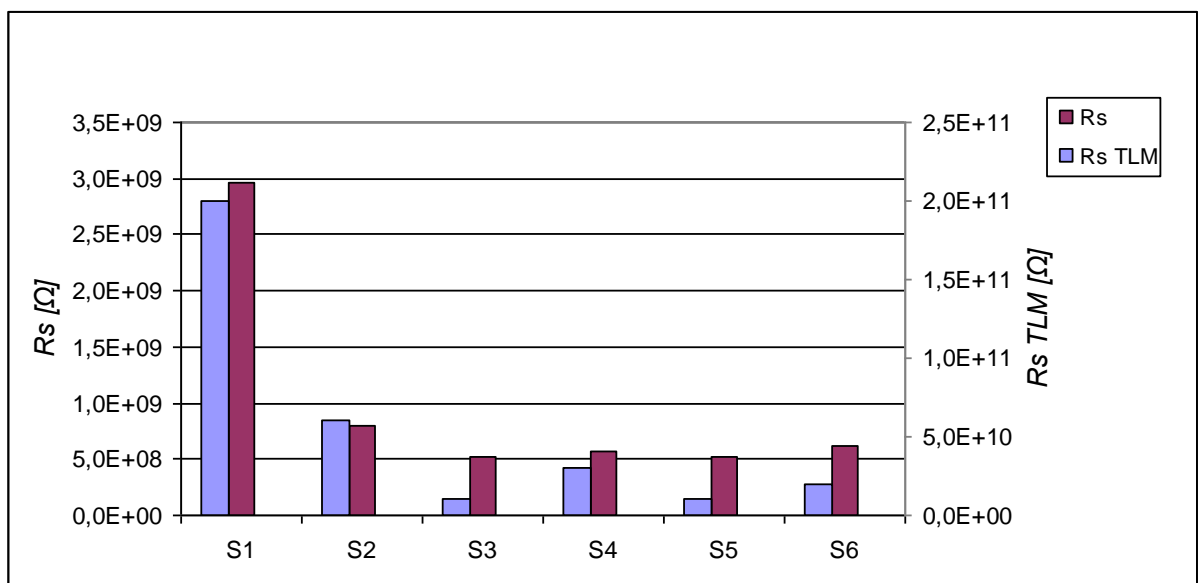
Obr. 3: Závislost změřeného odporu na vzdálenosti elektrod pro 3. sadu měřených vzorků pro materiál M3.



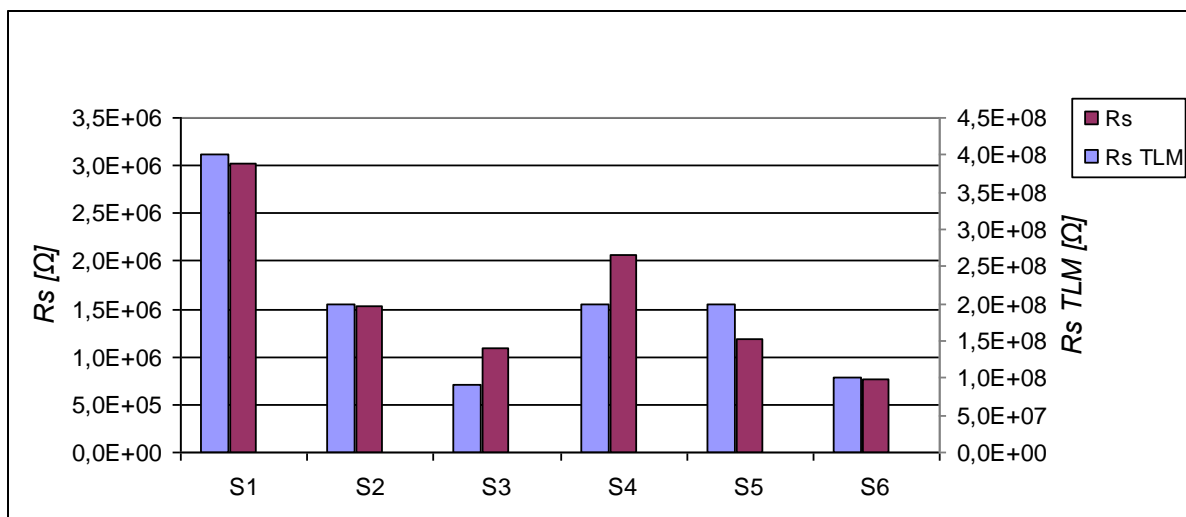
Obr. 4: Závislost změřeného odporu na vzdálenosti elektrod pro 4. sadu měřených vzorků pro materiál M4.



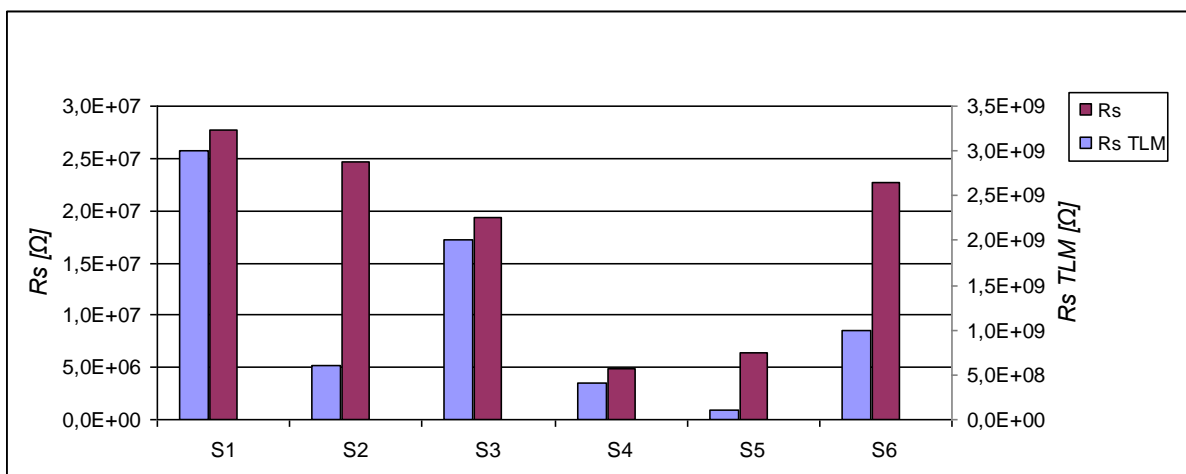
Obr. 5: Porovnání R_s dvoubodové metody a TLM u 1.sady substrátů, pro materiál M1.



Obr. 6: Porovnání R_s dvoubodové metody a TLM u 2.sady substrátů, pro materiál M2.



Obr. 7: Porovnání R_s dvoubodové metody a TLM u 4.sady substrátů, pro materiál M4.



Obr. 8: Porovnání R_s dvoubodové metody a TLM u 5.sady substrátů, pro materiál M5.