

# **Modifikace povrchu substrátů pro materiálový tisk**

Bc. Jan Mašlík

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan MAŠLÍK**  
Osobní číslo: **T11096**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Modifikace povrchu substrátů pro materiálový tisk**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše - materiálový tisk.
2. Výběr substrátů vhodných pro materiálový tisk.
3. Modifikace povrchu vybraných substrátů.
4. Charakterizace vlastností modifikovaných povrchů pomocí dostupných metod.
5. Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.
6. Formulace závěru.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Arthur A. Tracton: Coatings Technology – Fundamentals, Testing and Processing Techniques; ISBN 1-4200-4406-0.
2. H.J. Butt, K. Graf, M. Kappi: Physics and Chemistry of Interfaces; ISBN 978-3-527-40629-6.
3. S.L. Fávaro, A.F. Rubira, E.C. Muniz, E. Radovanovic: Surface Modification of HDPE, PP, and PET Films With KMnO<sub>4</sub>/HCl Solutions.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Pavel Urbánek**

Centrum polymerních materiálů

Datum zadání diplomové práce:

**8. února 2013**

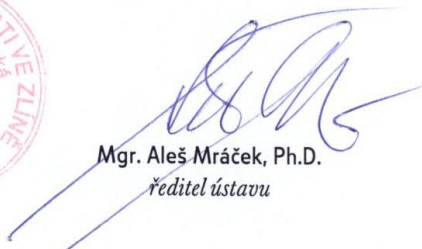
Termín odevzdání diplomové práce:

**24. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 24. 5. 2013

.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá modifikací povrchu polymerních substrátů určených pro tisk vodivých polymerů inkjetovým tiskem. Hlavní pozornost je zaměřena především na možnosti chemického ošetření polymerních substrátů s deponovanou vodivou vrstvou z oxidu india a cínu (ITO) tak, aby byla zvýšena adheze tisknutého inkoustu k substrátu při zachování vodivostních parametrů ITO vrstvy. Jsou zkoumány povrchové vlastnosti substrátů (drsnost, povrchové napětí) jednak pomocí mikroskopie atomárních sil a dále pomocí měření kontaktního úhlu, dále pak vodivost pomocí van der Pauweho metody. Je vyšetřována kvalita vrstvy tištěného materiálu na modifikovaný substrát.

Klíčová slova: ITO, PET, materiálový tisk, AFM

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the modification of polymer substrates intended for inkjet printing of polymer inks. The main attention is focused on adhesion improvement of polymer inks to substrate surface by chemical-based method, whereas the conductivity of ITO layer deposited on substrate is preserved. The surface properties are investigated in perspective of surface roughness, surface tension and contact angle, measured by AFM and by contact angle measuring equipment respectively. The conductivity of treated layers is measured by van der Pauw's method. In the last view, the quality of prepared prints is examined.

Keywords: ITO, PET, material inkjet printing, AFM

Tímto chci poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Urbánkovi za jeho vstřícnost, čas, cenné rady a informace a doc. Ivo Kuřítkovi za sdílení zkušeností. Bez jejich účasti by tato práce nemohla vzniknout. Dále chci poděkovat svým rodičům a blízkým za velkou podporu během studia.

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu IGA/FT/2013/025.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně 24. 5. 2013

.....  
Podpis studenta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 INKJETOVÝ TISK</b> .....	<b>12</b>
1.1 KONTINUÁLNÍ INKJETOVÝ TISK .....	12
1.2 TISK „DROP ON DEMAND“ .....	13
1.2.1 Termální inkjetový tisk .....	13
1.2.2 Piezoelektrický inkjetový tisk .....	14
1.2.3 „Focused acoustic beam ejection“ .....	15
1.3 MATERIÁLOVÝ TISK .....	15
1.3.1 Inkousty a formule .....	16
1.3.1.1 PEDOT .....	17
1.3.1.2 Nanočástice stříbra.....	18
1.3.1.3 Nanočástice mědi .....	19
1.3.1.4 Nanočástice zlata .....	19
1.3.2 Substráty.....	20
1.3.2.1 Poly(ethyltereftalát) .....	21
1.3.2.2 Oxid india a cínu (ITO) .....	21
1.3.2.3 Sklo .....	23
<b>2 MODIFIKACE POVRCHU SUBSTRÁTŮ</b> .....	<b>24</b>
2.1 KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ A POVRCHOVÉ NAPĚTÍ .....	24
2.2 CHEMICKÉ OŠETŘENÍ.....	25
2.3 PLAZMATICKÉ ÚPRAVY .....	26
2.3.1 Koronový výboj .....	26
2.3.2 PVD.....	26
2.3.3 CVD .....	26
<b>3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>28</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>29</b>
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>30</b>
4.1 POUŽITÉ CHEMIKÁLIE.....	30
4.2 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ.....	30
4.3 POPIS EXPERIMENTU.....	31
4.3.1 Příprava a čištění substrátů.....	31
4.3.2 Modifikace povrchu substrátů .....	31
4.3.3 Depozice vrstev .....	32
4.3.4 Měření vodivosti vrstev.....	32
4.3.5 Zkoumání topografie modifikovaných povrchů.....	33
4.3.6 Měření kontaktního úhlu smáčení .....	34
<b>5 VÝSLEDKY</b> .....	<b>35</b>



5.1	POVRCHY SUBSTRÁTŮ .....	35
5.2	KVALITA TISKU .....	37
5.3	VODIVOSTI VRSTEV .....	38
5.4	SMÁČIVOST POVRCHU .....	39
5.5	DRSNOST POVRCHU .....	40
<b>6</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>41</b>
6.1	MATERIÁLOVÝ PROJEV PO CHEMICKÉ MODIFIKACI POVRCHU.....	41
6.1.1	Smáčivost povrchu .....	41
6.2	VODIVOST/REZISTIVITA MODIFIKOVANÝCH VRSTEV .....	42
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>43</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>50</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>54</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>55</b>

## ÚVOD

Už od počátků je člověk znám svojí přirozenou vynalézavostí, schopností ale především touhou tvořit. Patrně snad pro své vlastní pohodlí ale také praktičnost v každodenním životě. Díky těmto hnacím motorům máme dnes k dispozici technologie, bez kterých si jen málokdo dokáže představit svůj život. Nechvalnou zásluhu na dosavadních technologiích mají bezpochyby válečné konflikty a vůbec investice financí do armádní techniky a zbraní. Teprve až po aplikaci ve vojenství se tyto technologie dostanou mezi konzumní společnost. Jistou brzdou ve využívání nejmodernějších technologií je také trh, který se snaží nejprve nasytit zdánlivě nejnovějšími modely produktů za účelem co největšího zisku i přes již zhotovené prototypy z kvalitnějších materiálů a s výhodnějšími vlastnostmi.

Jednou z těchto nových aplikací jsou tištěné transparentní displeje a elektronika nacházející široké uplatnění od biomateriálů přes fotovoltaiku, osvětlení až po displeje počítačů, mobilních telefonů apod.

O možnosti tisku elektroniky a elektronických součástí pojednává tato diplomová práce, která je zaměřena na studium přilnavosti používaných funkčních inkoustů k povrchu jak komerčně vyráběných substrátů bez povrchové úpravy, tak s povrchovou modifikací, především pro aplikaci v luminiscenční elektronice.

Teoretická část je rozdělena na tři kapitoly zahrnující inkjetové technologie tisku vhodné pro tisk funkčních materiálů, dále pak používané funkční materiály a vhodné substráty.

Následující kapitola obsahuje možnosti povrchových úprav syntetických materiálů a vliv těchto úprav na jejich vlastnosti.

Ve třetí kapitole jsou stanoveny hlavní cíle této diplomové práce.

Praktická část je rozdělena na tři hlavní kapitoly popisující použité materiály, zařízení a pomůcky, postup při celém experimentu a získané výsledky jednotlivých měření.

V závěru této diplomové práce jsou uvedeny, diskutovány a shrnuty dosažené výsledky.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 INKJETOVÝ TISK

I přes rozsah internetu, elektronických knih, čteček a elektronických médií vůbec, zůstává tisk nejdůležitějším komunikačním prostředkem, ať už se jedná o tisk knih, časopisů, letáků, potisky obalů a jiné tištěné materiály [1]. V souvislosti s rozšiřováním nanotechnologií rostou nároky na přesné uspořádání funkčních materiálů. Zde se nabízí inkoustové tiskárny, které dokáží tisknout struktury s komplexní topologií [2].

Inkjetový tisk je jedním ze základních digitálních tisků – obraz se do tiskového zařízení přenáší digitálně [1]. Tištěný materiál se přivádí do tiskové hlavy a odtud je poté vystřikován pomocí kapiček požadovaných rozměrů na tiskový substrát. Na substrátu poté materiál vysychá a vytváří tak tištěnou strukturu [3]. Charakteristickým prvkem pro tento druh tisku je přítomnost trysky (několika trysek), která dokáže vytvářet kapky z proudu tištěného materiálu. Inkjetový tisk lze rozdělit na:

- kontinuální tisk
- tisk „Drop On Demand“

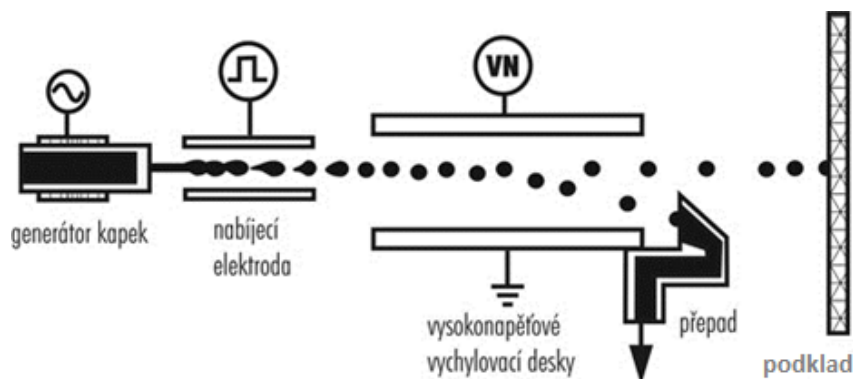
### 1.1 Kontinuální inkjetový tisk

Historie kontinuálního inkoustového tisku sahá až do 50. let 20. století. První inkoustové tiskárny byly založeny na principu galvanometru, kde ručičku nahradila tryska a ta byla vychylována magnetickým polem pomocí elektromagnetů. Tento způsob však neumožňoval tisk složitějších struktur (text, obrázky). Tato nevýhoda byla vyřešena tvorbou kapek jednotné velikosti [3].

Důležitou roli zde hraje Plateau-Rayleighova nestabilita: volně padající proud kapaliny, která vytéka z kapiláry vlivem smykového napětí mezi kapalinou, okolním vzduchem a nerovností v této kapiláře, se může rozkmitat. Tento proud se stává nestabilním a vlivem povrchového napětí kapalin vzniká nový stabilní proud – proud kapiček [5].

Dnešní tiskárny umožňují tvorbu velkého počtu kapek s přesně definovanou velikostí. Inkoust je stlačován při protékání tryskou pomocí modulovaného integrovaného piezopohonu [6]. Následně je proud kapiček a jejich výchylka řízena velikostí elektrostatického pole působící na proud kapiček létajících přes deflekční elektrody. Vychýlené kapičky jsou sbírány, filtrovány a vráceny zpět do zásobníku, což je výhodné z

hlediska úspory materiálu. Tento princip již umožňuje tisk složitějších struktur – obrázků apod. [3].



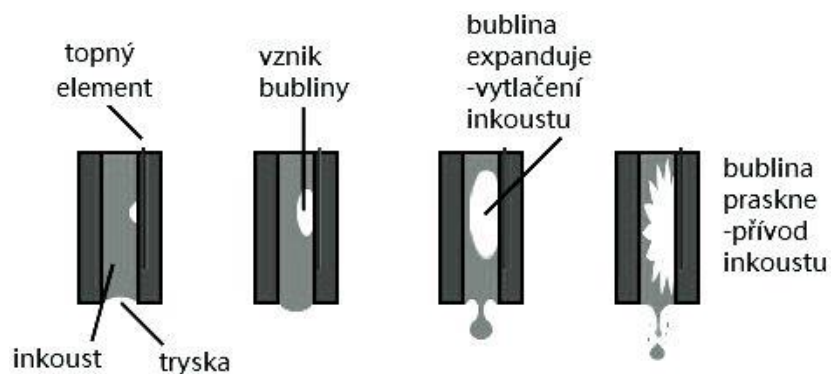
Obr.1: Kontinuální inkjetový tisk [3]

## 1.2 Tisk „Drop On Demand“

Pro tento druh tisku není proud kapek dopadající na substrát tvořen z kontinuálního proudu tištěného materiálu, ale tzv. na vyžádání, tedy z trysky vyletují pouze ty kapičky, které vytváří tištěnou strukturu. Tisk na vyžádání se dělí na dvě rozdílné technologie a to termální a piezoelektrickou [3, 4, 8].

### 1.2.1 Termální inkjetový tisk

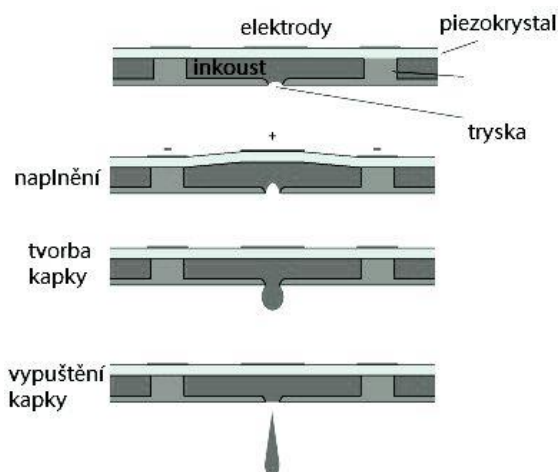
Termální inkoustové tiskárny obsahují malá odporová topná tělíska, která vytvářejí teplo. Tímto teplem je zahříván tištěný materiál (inkoust) až do bodu varu. Při varu se tvoří a následně zvětšují bubliny tištěného materiálu. Zvětšující se bublina vytlačí tištěný materiál skrze trysku na substrát a poté praskne, čímž vytvoří vakuum. Malý podtlak stačí k nasátí dalšího množství tištěného materiálu do komůrky, který ochladí topné tělísko. Proces se opakuje [3, 4, 8].



Obr. 2: Termální inkjetový tisk.

### 1.2.2 Piezoelektrický inkjetový tisk

Zde se využívá piezoelektrické deformace tryskové komůrky. Piezokrystal je umístěn nad každou tryskou. Při dodání elektrického náboje se krystal prohne směrem k trysce, tím zmenší objem komůrky a vytlačí tak tištěný materiál skrz trysku na substrát. Poté se polarita napětí obrátí, krystal se prohne ve směru od trysky, čímž zvětší objem komůrky a nasaje tak další množství tištěného materiálu. Piezoelektrické trysky jsou součástí cartridge a tato se již po spotřebování náplně nedá znovu použít [4].

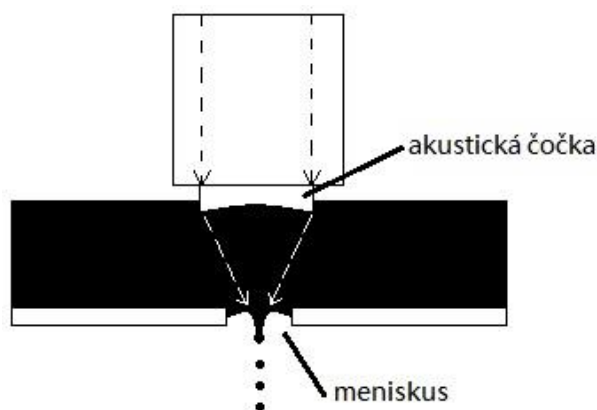


Obr. 3: Piezoelektrický inkjetový tisk.

Trysky, používané při inkjetovém tisku, jsou obvykle vyrobeny z anorganické sloučeniny „Lead zirconium titanate“ (tzv. PZT), jehož piezoelektrické vlastnosti se velmi dobře uplatní v tiskové hlavě při inkjetovém tisku [7].

### 1.2.3 „Focused acoustic beam ejection“

Použití zaměřených ultrazvukových vln pro generaci kapek je nově vyvinutá metoda společností Xerox PARC, která je držitelem více než stovky patentů týkajících se této technologie tisku „Drop On Demand“. Tato metoda pracuje tak, že pomocí akustické čočky zaměří ultrazvukové vlny na povrch menisku kapaliny a s pomocí přechodně generovaného akustického přetlaku vytlačí kapky tištěného materiálu. Tato technika má velkou praktickou výhodu v tom, že je imunní proti ucpávání otvoru a umožňuje průchod tekutin, které by jinak otvor ucpávaly [8].



Obr. 4: Focused acoustic beam ejection [8].

## 1.3 Materiálový tisk

Materiálový tisk se od inkoustového tisku liší pouze druhem použitých tištěných materiálů.

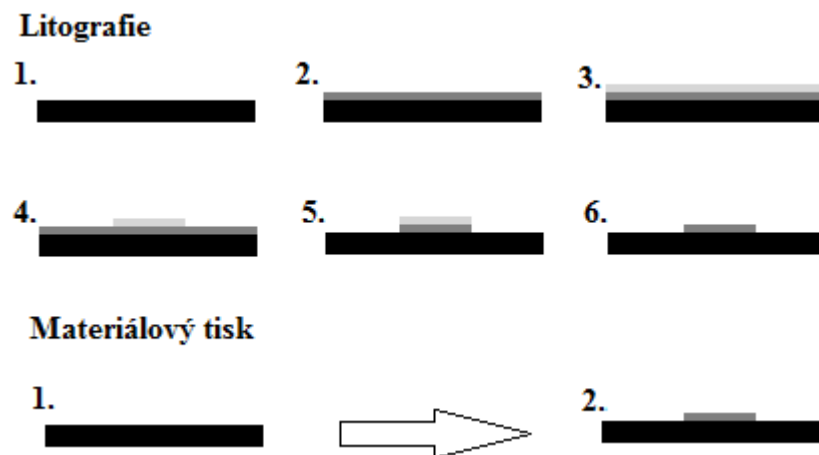
V závislosti na vlastnostech použité náplně tiskové kazety jako jsou:

- Viskozita – ovlivňuje výtok z trysky a může způsobovat jejich ucpávání. Udává velikost kapek.
- Povrchové napětí – ovlivňuje odtrhávání jednotlivých kapek a následné smáčení adhezi k substrátu.
- Hustota – obdobně jako viskozita také závisí na koncentraci inkoustu.
- Těkavost rozpouštědla – udává rychlost vypařování rozpouštědla z inkoustu. Může způsobovat zasychání inkoustu v trysce.
- Velikost částic – vliv na aglomeraci a ucpávání trysky.

- Doba použitelnosti – po jakou tištěný materiál uchovává své vlastnosti.

Je zde možnost tisku tenkých vrstev tvořící dvojrozměrné, ale formou soutisku i trojrozměrné mikrostruktury. Materiálový tisk umožňuje depozici různorodých inkoustů pro široké spektrum aplikací. S výhodou se používá pro tisk biokultur, DNA, v oblasti elektroniky, fotovoltaiky apod.

V průběhu posledního desetiletí získala především tištěná elektronika velkou pozornost kvůli potenciální aplikaci tiskařských technologií. Cílem je využití technologií tisku jako nahrazení za konvenční fotolitografii (např. při výrobě polovodičů) [20]. Oproti fotolitografii sice nedokáže vytvořit struktury v rozměrech nanometrů, ale nejpokročilejší materiálové tiskárny umožňují tisk struktur až do velikosti 1  $\mu\text{m}$ . Očekávání je především v redukcí nákladů pro realizaci jednoduchých polovodičových systémů na levných substrátech, jako jsou plastové či kovové fólie [20].



Obr. 5: Litografie vs. tisk.

A také proto se objevují požadavky na produkci polymerních funkcionalizovaných nanokompozitů právě pro aplikaci v mikroelektronice především pro jejich elektrické vlastnosti [20].

### 1.3.1 Inkousty a formule

Příprava inkoustu či tištěného materiálu je jednou ze stěžejních operací. Je nutno dbát na vhodný poměr funkčního materiálu s médiem z výše uvedených chemicko-fyzikálních



důvodů, pro nejlepší možnou kvalitu tištěné struktury a vyhnutí se tak nežádoucímu zasychání, ucpávání trysek, degradaci inkoustu či korozi tištěné struktury. Nejlepší možná kvalita zahrnuje dostatečnou optickou hustotu a s ní související kompaktnost tištěné vrstvy, ostrost hran – tedy patřičné rozlišení a kompatibilitu se substrátem [12].

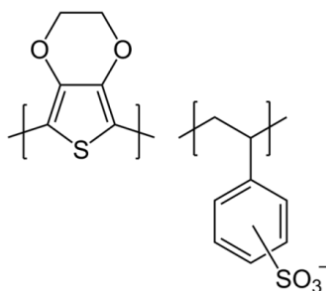
Tradiční inkousty jsou založeny na bázi vody či jiného (např. organického) rozpouštědla. Složení inkoustu zahrnuje řadu kompromisů v závislosti na typu tiskové technologie a požadavcích cílové aplikace (např. u tisku „Drop On Demand“, kde hrozí zanášení trysky, musí být optimalizován počet pevných částic v tiskařské formuli). Většina tisků vyžaduje speciálně potahované substráty, aby se zabránilo např. vzlínání tištěného materiálu. Další výzvu představuje velikost a koncentrace funkčních částic v inkoustech, což má vliv na výslednou viskozitu tištěného materiálu. Příliš vysoká viskozita může způsobovat ucpávání trysek a naopak při příliš nízkých hodnotách viskozity nedosahuje tištěná struktura potřebné optické hustoty či funkčnosti.

U starších tiskových technologií byly přednější rychlost a nezávislost na substrátu oproti kvalitě tištěné struktury (např. čárové kódy) [10].

### ***1.3.1.1 PEDOT***

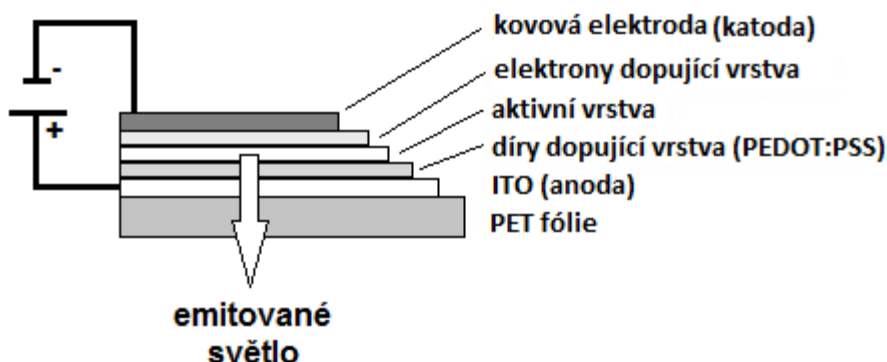
PEDOT, nebo také poly(3,4-ethylendioxythiofen) je elektricky vodivý polymer, který byl poprvé připraven v roce 1988 ve společnosti Bayer AG Leverkusen a je považován za jeden z nejlepších vodivých polymerů jak z hlediska vodivosti, zpracovatelnosti a stability, tak i schopnosti vytvářet polymerní disperze. Mimo jiné se jedná o vodivý polymer, který je vyráběn v rozsáhlém měřítku a je používán pro širokou škálu aplikací (dnes společností Heraeus, obchodní značka Clevios, Leverkusen).

PEDOT je vyráběn v různých formulacích a vodivostech přizpůsobených konkrétním průmyslovým aplikacím. V kombinaci s PSS – poly(styrensulfonová kyselina), sloužící jako protiiont, může být tento polyelektrolitický komplex připraven ve formě stabilní disperze (PEDOT:PSS). Polyelektrolitické komplexy jsou tvořeny mícháním vodných roztoků polyaniontů a polykationtů, což vede ke vzniku ve vodě rozpustného komplexu. Jednou z konkrétních aplikací PEDOT:PSS je v konstrukci organických světlo-emitujících diodách (OLED), kde slouží jednak jako díry dopující vrstva (angl. hole injection layer) mezi anodou a aktivní vrstvou a také k vyhlazení hrubého povrchu anody [9].



Obr. 6: PEDOT:PSS.

PEDOT:PSS je také díky své transparentnosti ve viditelné části spektra ideálním kandidátem pro přípravu organických fotovoltaických článků. Ačkoliv není jeho elektrická vodivost příliš vysoká, může být zlepšena smícháním s nanočásticemi ZnO [16], nebo zesílením vrstvy [21]. PEDOT:PSS také zvyšuje výkon organických fotovoltaických článků, kde usnadňuje dopravu děr mezi anodou a aktivní vrstvou [11].



Obr. 7: Vrstva PEDOT:PSS v konstrukci OLED [24].

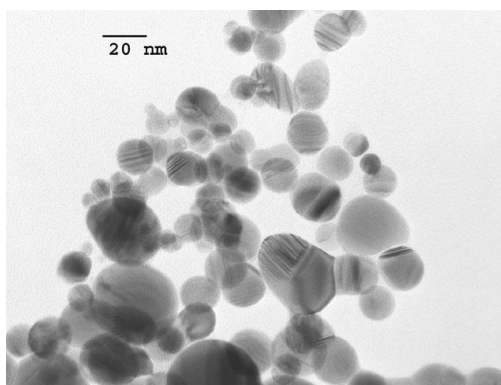
### 1.3.1.2 Nanočástice stříbra

Dnes jsou již běžně komerčně vyráběné nanočástice kovů či oxidů kovů na bázi vody či jiných rozpouštědel. Tyto nanočástice jsou vyráběny jako suché a nefunkcionalizované a jsou dodávány ve formě prášku či různě laděných disperzí. Existují jak standardizované prášky či disperze s deklarováním průměrem velikosti částic, tak i nestandardní podle potřeby aplikace. Tyto prášky jsou vyráběny pulsním elektrickým obloukovým výbojem bez vzniku aglomerátů či nečistot. Rozměrové kontroly se pohybují v rozmezí od 10 nm do

100 nm. Tímto způsobem jsou vyráběny nanočástice stříbra s deklarovaným průměrem velikostí částic 25 nm.

Nanočástice stříbra nacházejí uplatnění pro biologické účely díky jejich antimikrobiálním vlastnostem a jejich disperze slouží jako vodivý inkoust vhodný k materiálovému tisku např. elektrod nebo tištěných spojů [14]. K přípravě těchto tištěných struktur není zapotřebí nijak složitých výrobních podmínek (oproti např. litografii).

Účinným stabilizátorem stříbrných částic, v patřičném hmotnostním zastoupení, se jeví karboxymetyl celuloza. V kombinaci s vhodným smáčedlem slouží karboxymethyl celuloza zároveň jako pojivo což zaručuje dobrou přilnavost k různorodému substrátu (papír, sklo, fólie) [13].



Obr. 8: Nanočástice stříbra (TEM) [14].

### 1.3.1.3 Nanočástice mědi

Mezi další komerčně vyráběné nanočástice patří i nanočástice mědi. Tyto lze využít v mnoha oblastech díky jejich optickým, elektrickým a antimikrobiálním vlastnostem a také nízké ceně mědi. Mezi oblastmi využití patří optická a elektronická zařízení a obdobně jako nanočástice stříbra také jako elektrické obvody. Možnosti tisku elektrických obvodů či vodivých spojů závisí na přidaných surfaktantech a stabilizátorech disperze [13].

### 1.3.1.4 Nanočástice zlata

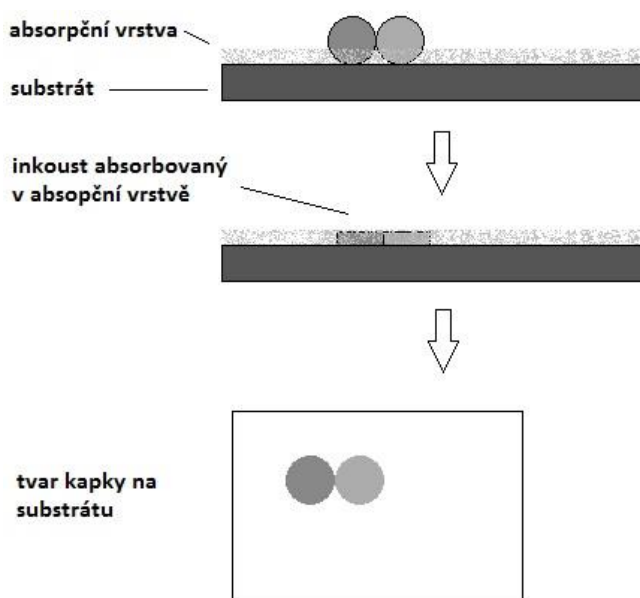
Zlaté nanočástice jsou taktéž univerzálním materiálem pro širokou škálu aplikací a jejich vlastnosti lze upravovat změnou velikosti částic, tvaru, povrchu či agregace. Slouží také

jako vodivý materiál vhodný k tisku spojů, rezistorů a jiných elektronických prvků [15]. Jejich velkou nevýhodou je vysoká cena.

### 1.3.2 Substráty

Tisk elektroniky a vodivých struktur vyžaduje spolehlivou interakci mezi tištěným materiálem a přijímaným povrchem [17]. Substráty určené pro inkjetové formule většinou obsahují speciální tenkou deponovanou vrstvu na povrchu pro dosažení vysoké kvality tisku a kompatibility s tištěným materiálem. Jakmile jsou kapky tištěného materiálu uloženy na podkladu, je nutné udržovat je za sebou bez rozmazávání a rozprostřít je ve všech směrech pro dosažení ostrých hran. Substrát musí rovněž vykazovat patřičnou drsnost (hladkost) a poskytovat tak vysokou tiskovou hustotu. Nezbytná je minimalizace roztékání a umožnění rychlé absorpce inkoustu na substrátu pro dosažení tenké vrstvy ve vysoké optické hustotě [23]. Tištěný materiál by se měl na přijímanou vrstvu rychle vstřebávat nejlépe bez sušícího procesu [17].

Některé komerčně vyráběné substráty bývají pokryty tenkou vysoce absorpční vrstvou schopnou absorbovat kapičky tištěného materiálu vypuštěné z tiskové hlavy a formovat kvalitní vrstvu [23].

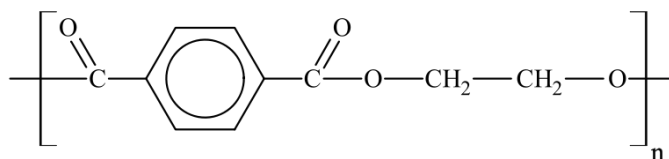


Obr. č. 9: Kapky inkoustu absorbované na substrátu [23].

Jednou z hlavních předností materiálového tisku je však možnost depozice na flexibilní a transparentní substráty jakými jsou poly(ethylenetereftalát) či poly(ethylenetereftalát) s deponovanou vrstvou oxidu india a cínu.

### 1.3.2.1 Poly(ethylenetereftalát)

PET je semikrystalický termoplast připravený polykondenzační reakcí ethylenglykolu a kyseliny tereftalové a je používán ve spotřebním, automobilovém, textilním a elektronickém průmyslu [18]. A právě v posledním zmíněném průmyslovém odvětví se jeví díky svým mechanickým a optickým vlastnostem jako vhodný nízkonákladový, lehký, flexibilní a transparentní podkladový materiál pro architekturu organických světlo-emitujících diod s použitím vrstvy oxidu india a cínu, která je popsána v následující kapitole.



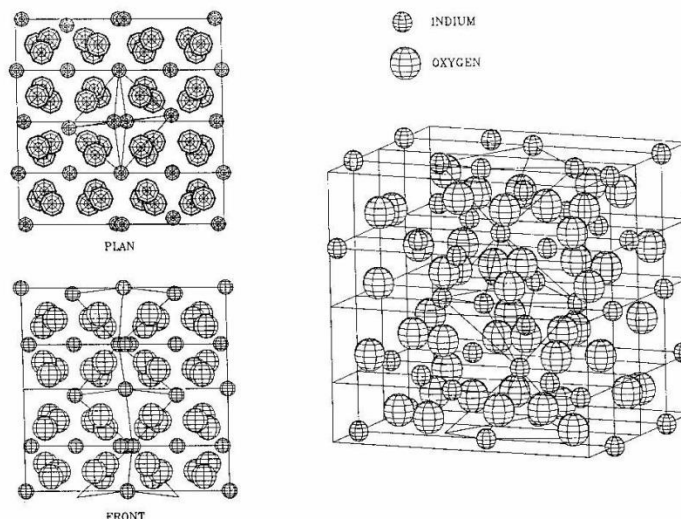
Obr. č. 10: Strukturální vzorec PET.

### 1.3.2.2 Oxid india a cínu (ITO)

ITO (z angl. indium tin oxide) je cínem dopovaný oxid india. Jedná se o pevnou sloučeninu  $\text{In}_2\text{O}_3$  a  $\text{SnO}_2$  obvykle v hmotnostním poměru 9:1. Avšak výzkum ukazuje, že optimální složení pro vysokou vodivost je 95 hm. %  $\text{In}_2\text{O}_3$  a 5 hm. %  $\text{SnO}_2$  [26]. Směs je v tenkých vrstvách zcela transparentní a bezbarvá, v hromadné vrstvě nažloutlá. V ultrafialové části spektra absorbuje (foton ultrafialového záření excituje elektron z valenčního do vodivostního pásu). Obdobně jako u všech transparentních vodivých vrstev je třeba nalézt kompromis mezi vodivostí a transparentností, neboť zvýšení tloušťky a koncentrace nosičů náboje zvýší vodivost, avšak sníží transparentnost.

Výhodné vlastnosti této směsi vychází ze struktury a složení.  $\text{In}_2\text{O}_3$  tvoří bixbyitovou strukturu (Obr. č. 11). Jedna buňka obsahuje 16 jednotek  $\text{In}_2\text{O}_3$  (80 atomů v jedné buňce). Atomy kyslíku jsou umístěny v rozích krychle až na dva diagonálně umístěné neobsazené rohy (neúplná kubicky centrovaná struktura, kde centrem je atom india). Při dopování cí-

nem dojde k nahrazení atomů india atomy cínu (dle hmotnostního poměru) bez změny struktury. Pokud je množství atomů cínu příliš vysoké, může dojít k pohybu atomů mimo krystalickou mřížku, což vede k její deformaci [27].



Obr. č. 11: Krystalická struktura  $\text{In}_2\text{O}_3$  [27].

$\text{In}_2\text{O}_3$  je samostatně polovodič. Až při nahrazení některých atomů india atomy cínu dochází ke změně elektrických vlastností. Dochází k tvorbě vazeb Sn-O a Sn-O<sub>2</sub>, kde Sn-O působí jako akceptor elektronu a Sn-O<sub>2</sub> jako dárce elektronu. Obvykle dominuje zastoupení Sn-O<sub>2</sub> a cínové atomy tedy působí jako dárce elektronu. Vodivost tohoto dopovaného oxidu umožňují atomy cínu a vakance atomů kyslíku [27].

Pro vývoj transparentní elektroniky se komerčně vyrábí polyetyltereftalátové fólie s deponovanou vrstvou ITO. Kombinace těchto dvou materiálů zaručuje jak potřebnou flexibilitu a pevnost, tak transparentnost.

Možností depozic ITO vrstvy na PET fólie je několik. Každá však přináší tenkému filmu výrazně odlišné vlastnosti:

- Tepelné odpařování (odpařování pevné látky dosedající na chladnější povrch).
- Sprejová pyrolýza (nástrik vysoce těkavých chloridů kovů, které se oxidují na nanočástice oxidů kovů).

- Pulzní laserová depozice (proces probíhá ve vakuové komoře pomocí krátkých vysokoenergetických pulzních paprsků. Povrch materiálu je paprsky odpařován a kondenzuje v tenké vrstvě na substrátu. Pro zachování potřebné krystalické mřížky je podložka zahřívána).
- Naprašování (probíhá taktéž ve vakuové komoře pomocí doutnavého výboje a pracovního plynu mezi dvěma elektrodami. Kladné částice bombardují záporný terč a svým dopadem z něj rozprašují atomy, které se usazují na substrátu) [27].

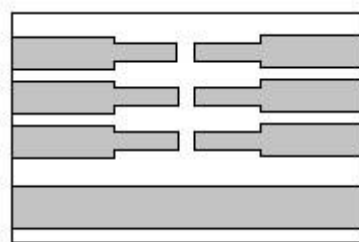
### 1.3.2.3 Sklo

Skleněné substráty se staly základním nosným podkladem pro vývoj transparentní elektroniky. Substráty jsou většinou dodávány s již deponovanou vodivou vrstvou oxidu india a cínu (ITO-glass), které nabízí vysokou optickou průhlednost. Tloušťka deponovaných vrstev ITO je od 120 nm do 160 nm a rozprostřena je buď po celé ploše substrátu, nebo tvoří vodivou strukturu vytvořenou použitím napařovací masky.

Výzkum organických světelných diod či organických fotovoltaických článků se provádí především na malých skleněných substrátech velikosti 50 x 50 mm<sup>2</sup>. Malé rozměry jsou výhodné pro laboratorní zařízení, jakými jsou např. spin coater, ultrazvukové čisticí lázně, plazmové komory a zařízení pro zkušebnictví [24].

Možnosti depozice vlastních materiálů a inkoustů jsou buď manuálně pomocí spin coaterů, nebo za pomoci materiálové tiskárny.

Typickými aplikacemi skleněných substrátů s deponovanou vrstvou ITO jsou již zmíněné organické diody, topení a rozmrazovací okna, integrované ploché antény atd. [25].



Obr. č. 12: Skleněný substrát s deponovanou vodivou strukturou ITO.

## 2 MODIFIKACE POVRCHU SUBSTRÁTŮ

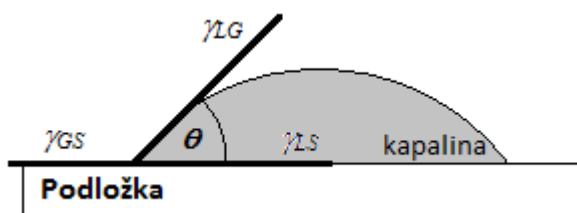
Obecně platí, že pro úspěšné aplikace je vyžadováno speciálních vlastností, jakými jsou chemické složení, drsnost povrchu, krystalinita, vodivost a další. Ať už běžné polymery nebo ve formě tenkých vrstev deponované anorganické oxidy však obvykle nevykazují povrchové vlastnosti potřebné pro tyto speciální aplikace. Techniky povrchových úprav, které mohou zdokonalit levné syntetické polymery nebo oxidy na vysoce hodnotné konečné produkty, se staly pro plastikářský průmysl velmi důležité [19].

Každý povrch má specifickou povrchovou energii, která se mění v závislosti na materiálu. Každé barvivo, inkoust či formule má své jedinečné vlastnosti, které značně ovlivňují povrchovou energii daného podkladu [31]. Optimální povrchové energie a smáčivosti (nesmáčivosti) substrátů lze dosáhnout chemickými a fyzikálními procesy, kterými se buď povrch vyčistí od adsorbovaných nežádoucích atomů či molekul, upraví polarita povrchu či dojde k vytvoření reakčních center (funkčních skupin nebo radikálů) [28].

Měřítkem efektivity povrchové úpravy jsou metody založené na měření smáčivosti povrchu kapalinou a s ní souvisejícím povrchovým napětím.

### 2.1 Kontaktní úhel smáčení a povrchové napětí

Smáčení kapaliny na pevném povrchu lze stanovit pomocí kontaktního úhlu smáčení  $\theta$ . Jedná se o úhel, který svírá rovina podložky a tečna k povrchu sedící kapky (Obr. č. 13) [30].



Obr. č. 13: Kontaktní úhel svírající kapka kapaliny s rovinným povrchem.

Při dosednutí kapaliny na povrch nerozpustné pevné látky se uplatňují tři mezifázové energie: povrchová energie kapaliny  $\gamma_{LG}$ , povrchová energie pevné látky  $\gamma_{SG}$  a mezifázová energie pevná látka – kapalina  $\gamma_{LS}$ . Tyto hodnoty ovlivňují uspořádání systému a lze je popsat pomocí Youngovy rovnice

$$\gamma_{SG} - \gamma_{LS} = \gamma_{LG} \cdot \cos \theta \quad (1)$$



V případě, že je povrchová energie pevné látky větší než mezifázová energie pevná látka – kapalina, pravá strana rovnice je kladná a  $\cos\theta < 0$ . Úhel smáčení je ostrý a kapalina povrch smáčí. Pokud je úhel smáčení  $\theta = 0^\circ$ , nastává dokonalé smáčení a povrch je označován jako lyofilní. Pokud nastane případ, že kontaktní úhel je  $90^\circ < \theta < 180^\circ$ , kapalina špatně smáčí povrch a ten je označován jako lyofobní [30].

*Poznámka k terminologii:*

*Povrchová energie a povrchové napětí popisují tentýž jev a mají stejný rozměr ( $N.m^{-1} = J.m^{-2} = kg.s^{-2}$ ). Z fyzikálního hlediska jsou tedy zaměnitelné. Termín povrchové energie se používá v případě mezifázového rozhraní, které tvoří pevná látka. Oproti tomu termín povrchové napětí je používán v případě mezifází tvořených kapalinou [32].*

Samotná smáčivost povrchu ještě nerozhoduje o adhezi kapaliny k povrchu. O adhezi kapaliny k povrchu rozhoduje velikost polární složky povrchového napětí [28].

Mezi běžné úpravy lze zařadit čištění povrchu, mechanickou abrazi, chemické ošetření (mokrý leptání), úpravy působením plazmatu či elektrických výbojů a působením vysokoenergetických paprsků (suché leptání) [19, 28].

## 2.2 Chemické ošetření

Chemické modifikace slouží k úpravě a především zlepšení povrchových vlastností materiálu pro potřebnou aplikaci. Jedná se o odstraňování nečistot, leštění, odstraňování krystalových poruch, či modifikace za účelem zvýšení či snížení přilnavosti funkčních materiálů. Jedná se o leptací procesy, které jsou hojně využívány v mikroelektronice při výrobě polovodičů. Leptací procesy se dělí na mokré a suché. Suché leptací procesy zahrnují úpravy působením plazmatu (viz Kapitola 2.3 Plazmatické úpravy).

Při mokrém tedy chemickém leptání dochází k oxidačně-redukční reakci mezi molekulami působícího činidla a molekulami povrchu leptaného substrátu. Mokrý leptání se dále dělí:

- Anizotropní leptání (rychlost leptání je různá pro každý krystalografický směr).
- Izotropní leptání (rychlost leptání je ve všech krystalografických směrech stejná) [35].

Povrchová chemická úprava ITO vrstvy má velký vliv na výkon polymerních diod i při použití mezivrstvy PEDOT:PSS [9].

## 2.3 Plazmatické úpravy

Plazmatické úpravy materiálů se také používají ke zlepšení povrchových vlastností bez změny celkových vlastností. Tyto procesy jsou prováděny implantací iontů do materiálu. Metoda se stala ekonomicky příznivou a může být použita pro kovy a slitiny, polovodiče, keramiku, izolanty a polymery [29].

### 2.3.1 Koronový výboj

Ionty, které jsou urychleny silným elektrickým polem, dopadají na povrch substrátu a způsobují přetrhání kovalentních vazeb. Proces probíhá v přítomnosti vzduchu, a proto zde vzniká nestabilní izotop ozonu  $O_3$ . Tento izotop reaguje s povrchem za vzniku polární oxidované vrstvy, což zvyšuje povrchovou energii substrátu. Tloušťka modifikované vrstvy závisí na délce expozice.

### 2.3.2 PVD

Z angl. physical vapor deposition. Je proces tvorby tenké vrstvy na substrátu fyzikální depozicí atomů, iontů nebo molekul. Existují tři hlavní metody:

- Tepelné odpařování (viz kapitola 1.3.2.2 Oxid indiumu a cínu (ITO))
- Naprašování
- Iontové pokovování

Proces probíhá v několika krocích. Prvním krokem je syntéza materiálu (reakce mezi jednotlivými složkami směsi) a převedení do plynné fáze. Následujícím krokem je transport částic od zdroje k podkladu. Posledním krokem je kondenzace par na podkladu. Vrstva je tvořena dopadajícími atomy, které se na povrchu zachytí sorpcí a vytvoří trvalou vazbu. Následuje nukleace a růst vrstvy po celém podkladu [28, 33].

Technologie PVD se vyvinula na úroveň, kdy se dokáže deponovat široké spektrum anorganických i organických materiálů (včetně kovů a jejich slitin, sloučenin a směsí) [33].

### 2.3.3 CVD

Z angl. chemical vapor deposition. Je proces chemické depozice z plynné fáze k výrobě vysoce čistého pevného materiálu. Tato depozice je využívána v polovodičovém průmyslu k tvorbě amorfních či polykrystalických tenkých vrstev (polykrystalický křemík  $SiO_2$ ).

Proces probíhá vystavením substrátu těkavému prekurzoru, který na povrchu reaguje (a nebo se rozkládá) a vytváří potřebný povlak [34].

Ošetření ITO vrstvy pomocí plazmatu s kyslíkem jako pracovním plynem dává povrchu poměrně vysokou povrchovou energii (až  $64,7 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ) a to díky vysoké hodnotě polární složky ( $35,1 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Jinak nízká povrchová energie se dá přisoudit kontaminací uhlovodíky v ITO vrstvě [36].

### 3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tato práce se zabývá modifikací povrchu substrátů pro materiálový tisk, který je popsán v teoretické části. Proto lze cíle této diplomové práce stanovit takto:

Prvním dílčím cílem je vybrat vhodné substráty pro materiálový tisk. Na tento cíl navazuje druhý cíl, modifikovat povrch vybraných substrátů tak, aby byly zlepšeny vlastnosti adheze tisknutého inkoustu k substrátu při zachování maximální vodivosti, dále aby byla zlepšena kvalita tištěné vrstvy (její kompaktnost a homogenita).

Posledním cílem je charakterizovat vlastnosti modifikovaných povrchů vybraných substrátů, vyhodnotit dosažené výsledky a provést jejich diskuzi a pokusit se formulovat patřičné závěry z dosažených výsledků.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4.1 Použité chemikálie

Tabulka 1 Použité chemikálie.

Chemikálie	Vzorec	$M_r$ (g.mol <sup>-1</sup> )
Manganistan draselný	KMnO <sub>4</sub>	158,03
Kyselina chlorovodíková	HCl	36,46
Aceton	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58,08
Deionizovaná voda	H <sub>2</sub> O	18,02

Tabulka 2 Použité materiály.

Materiál	Forma	Vodivost	Dodavatel
Plexcore® OC RG-1110 Organic conductive ink	vodní disperze	10 – 300 [ $\Omega$ .cm]	Sigma-Aldrich Co.
Indium tin oxide coated PET	fólie	60 [ $\Omega$ /sq]	Sigma-Aldrich Co.

*Pomůcky:* Pipety, mikropipeta, kádinky, PVDF filtry (0,45  $\mu$ m), stopky, analytické váhy, navažovací lodička, stříčky, pinzety.

### 4.2 Použité přístroje a zařízení

Materiálová tiskárna FUJIFILM Dimatix DMP-2800,

Ultrazvuková lázeň Elma Transsonic Digital S,

Mikroskop atomárních sil NT-MDT NTEGRA-Prima,

Přenosný laboratorní goniometr,

Soustava měřících elementů pro van der Pauweho metodu měření vodivosti vrstvy:

Scanner Keithley K7002

Spínací karta Keithley K7011-S

Programovatelný zdroj proudu Keithley K2410

Elektrometr Keithley K6517

Osobní počítač vybavený Windows XP vybavený dvěma PCI kartami (GPIB karta cec488, převodníková karta AD25PCI SE se svorkovnicí SVOR25TER).

### 4.3 Popis experimentu

Jako substrát pro materiálový tisk byla zvolena polyetylentereftalátová fólie s deponovanou vrstvou oxidu india a cínu s ideou využití materiálu Plexcore® OC RG-1110 (PEDOT:PSS), který na tomto substrátu slouží jako díry dopující mezivrstva (HIL) v architektuře organické světlo emitující diodě. Bylo provedeno chemické ošetření povrchu této fólie působením  $\text{KMnO}_4$  v kyselém prostředí  $\text{HCl}$ , při délce působení 1, 2, 3, 4 a 5 minut. Změny adheze k povrchu byly testovány depozicí zmíněné polymerní disperze materiálovou tiskárnou a nutné zachování vodivosti vrstvy oxidu india a cínu bylo ověřeno měřicí soustavou na základě metody van der Pauw. Kvalita a kompaktnost tištěných vrstev byla sledována a zaznamenána fiduciální kamerou, která je součástí materiálové tiskárny, změny morfologie ošetřených povrchů byly pozorovány metodou mikroskopie atomárních sil a pomocí softwaru byla vyhodnocena povrchová drsnost. Změna smáčivosti povrchu byla sledována přenosným laboratorním goniometrem a vyhodnocena ve speciálním softwaru pomocí počítače.

#### 4.3.1 Příprava a čištění substrátů

Polyetylentereftalátová fólie s deponovanou vrstvou oxidu india a cínu byla nastříhána na pásy o rozměrech 20 x 100 mm. Všechny připravené vzorky byly nejprve čištěny sonifikací v ultrazvukové lázni po dobu 10 minut v acetonu a následně sušeny v sušárně při 50 °C po dobu 1 hodiny. Před usazováním prachových částic na substrát, byly vzorky kryty alobalem.

#### 4.3.2 Modifikace povrchu substrátů

Po procesu čištění byl povrch vzorků modifikován roztokem 0,05M  $\text{KMnO}_4$  a 0,1M  $\text{HCl}$  v celkovém objemu 250 ml. Jednotlivé vzorky byly podrobeny modifikaci zvlášť, následně ihned opláchnuty deionizovanou vodou a acetonem a osušeny proudem vzduchu. Jako parametr povrchové úpravy byla použita doba modifikace 1, 2, 3, 4 a 5 minut.

### 4.3.3 Depozice vrstev

Polymerní disperze Plexcore® OC RG-1110 (PEDOT:PSS) byla přefiltrována přes PVDF filtr (velikost pórů 0,45 $\mu$ m) a převedena do tiskové kazety. Šablona tištěné struktury byla vytvořena pomocí softwaru obsluhujícího materiálovou tiskárnu (Obr. č. 14). Depozice vrstev byla prováděna materiálovou tiskárnou Fujifilm Dimatix DMP-2800 (Obr. č. 15) za laboratorních podmínek.

Byly pořízeny záznamy tisku pomocí fiduciální kamery, která je součástí materiálové tiskárny, jejíž optické zvětšení je 4x.



Obr. č. 14: Tvar tištěné struktury.



Obr. č. 15: Materiálová tiskárna Fujifilm Dimatix DMP-2800.

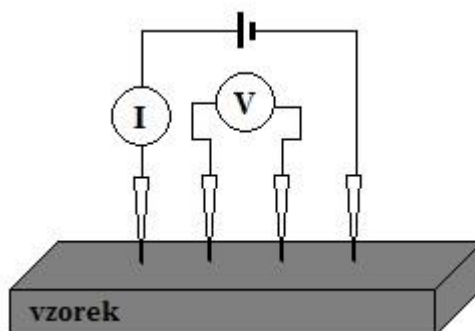
### 4.3.4 Měření vodivosti vrstev

Měření vodivosti modifikovaných vrstev bylo prováděno van der Pauweho metodou (Obr. č. 15) pomocí sestavy uvedených přístrojů (Obr. č. 16). Každý vzorek byl měřen pětikrát při konstantním napětí 1 $\times$ 10<sup>-5</sup> V a teplotě 24 °C. Průměrná hodnota rezistivity z pěti měření byla převedena na hodnotu vodivosti dle vztahu

$$\gamma = 1/\rho \quad (2)$$

kde  $\gamma$  je převedená hodnota rezistivity  $\rho$ .





Obr. č. 16: Schéma zkušebního obvodu pro měření rezistivity vzorku čtyřbodovou snímací metodou (metoda van der Pauw) [21].



Obr. č. 17: Soustava pro měření rezistivity metodou van der Pauw.

#### 4.3.5 Zkoumání topografie modifikovaných povrchů

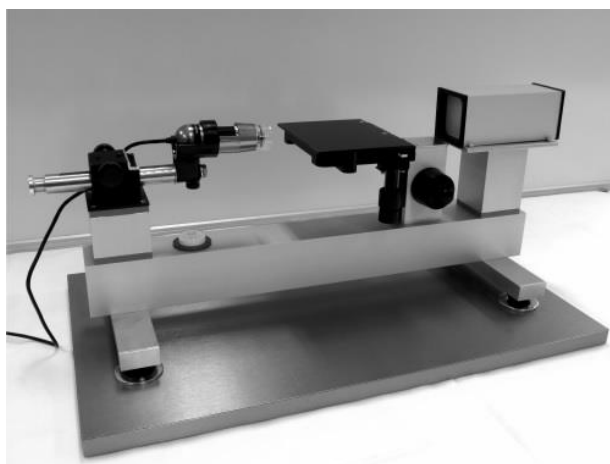
Povrch jak referenčního, tak i modifikovaných povrchů byl zkoumán metodou mikroskopie atomárních sil pomocí skenující sondy v semikontaktním módu při frekvenci skenování 0,3 Hz. Velikost skenovaných ploch je  $5 \times 5 \mu\text{m}$  při rozlišení obrázků  $512 \times 512 \text{ dpi}$ .



Obr. č. 18: Mikroskop atomárních sil NT-MDT NTEGRA-Prima.

#### 4.3.6 Měření kontaktního úhlu smáčení

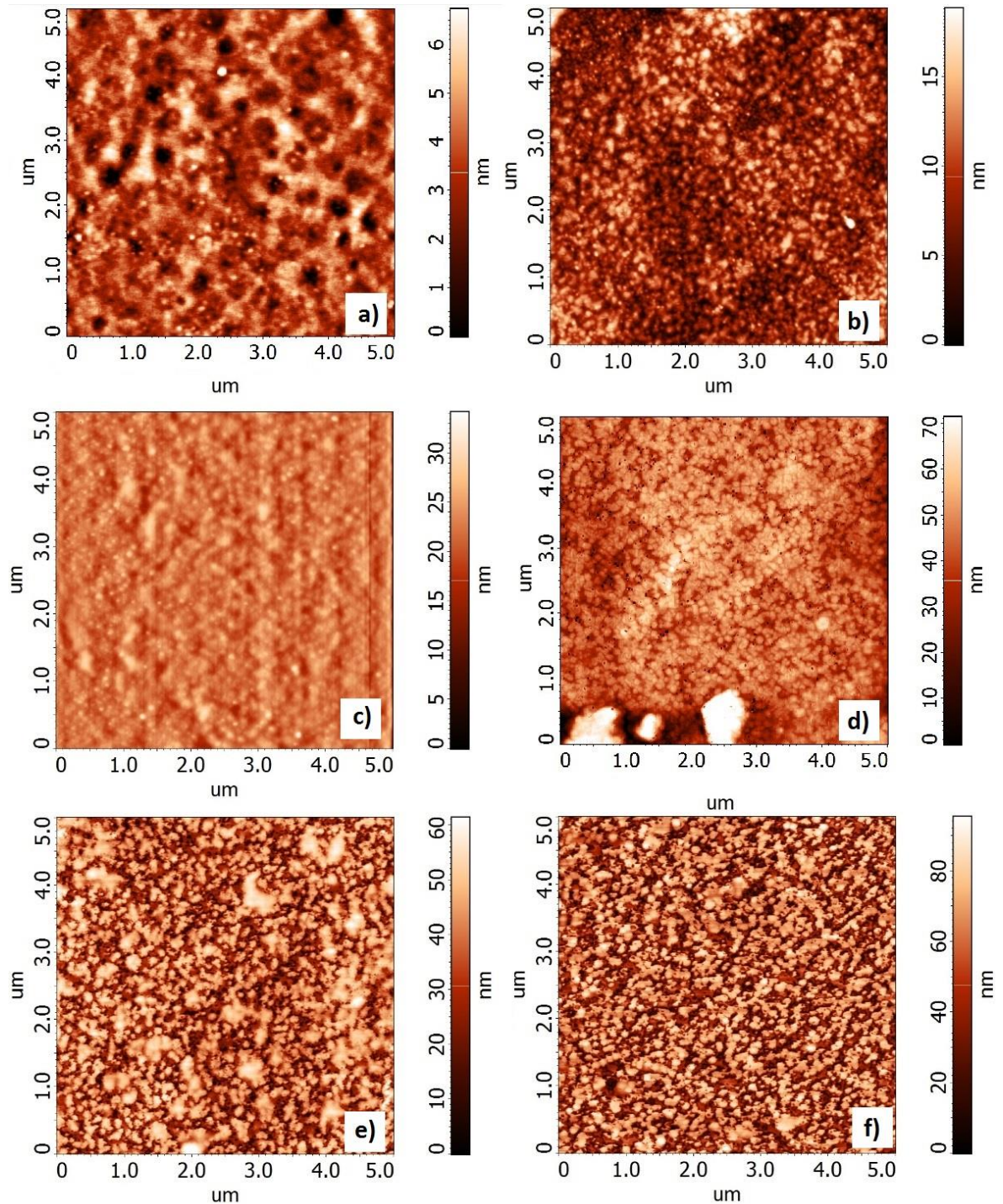
Měření kontaktního úhlu smáčení jak na referenčním nemodifikovaném, tak na modifikovaných substrátech probíhalo na základě metody sedící kapky pomocí přenosného laboratorního goniometru zkonstruovaném na ÚFMI - UTB ve Zlíně (Obr. č. 18) s následnou analýzou tvaru kapky pomocí softwaru. Měřicí kapalinou byla zvolena polymerní disperze Plexcore® OC RG-1110 (PEDOT:PSS) přefiltrována přes PVDF filtr (0,45 $\mu$ m) o objemu kapky 5  $\mu$ l. Měření probíhalo za běžných laboratorních podmínek.



Obr. č. 19: Přenosný laboratorní goniometr [22].

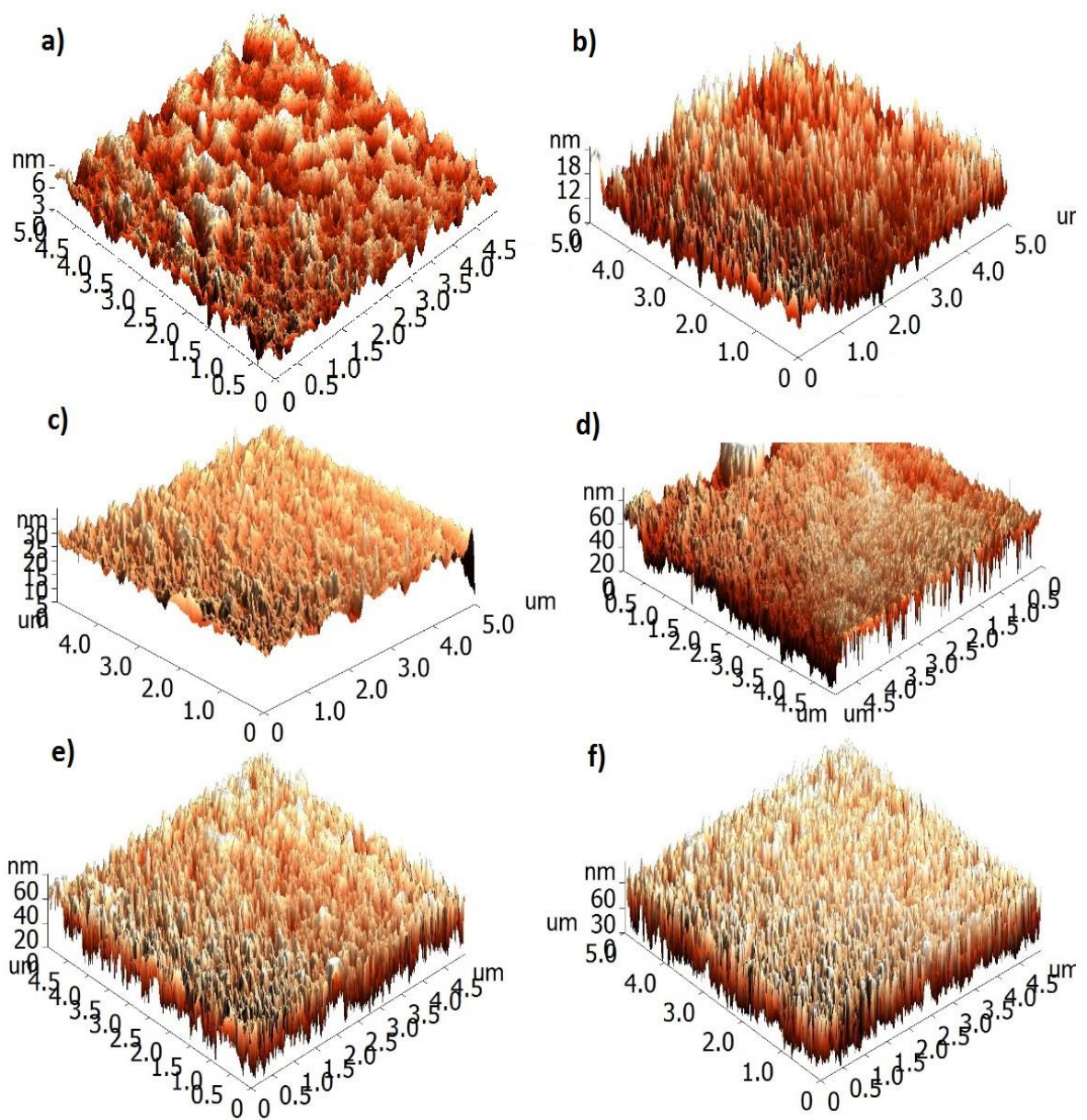
## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Povrchy substrátů



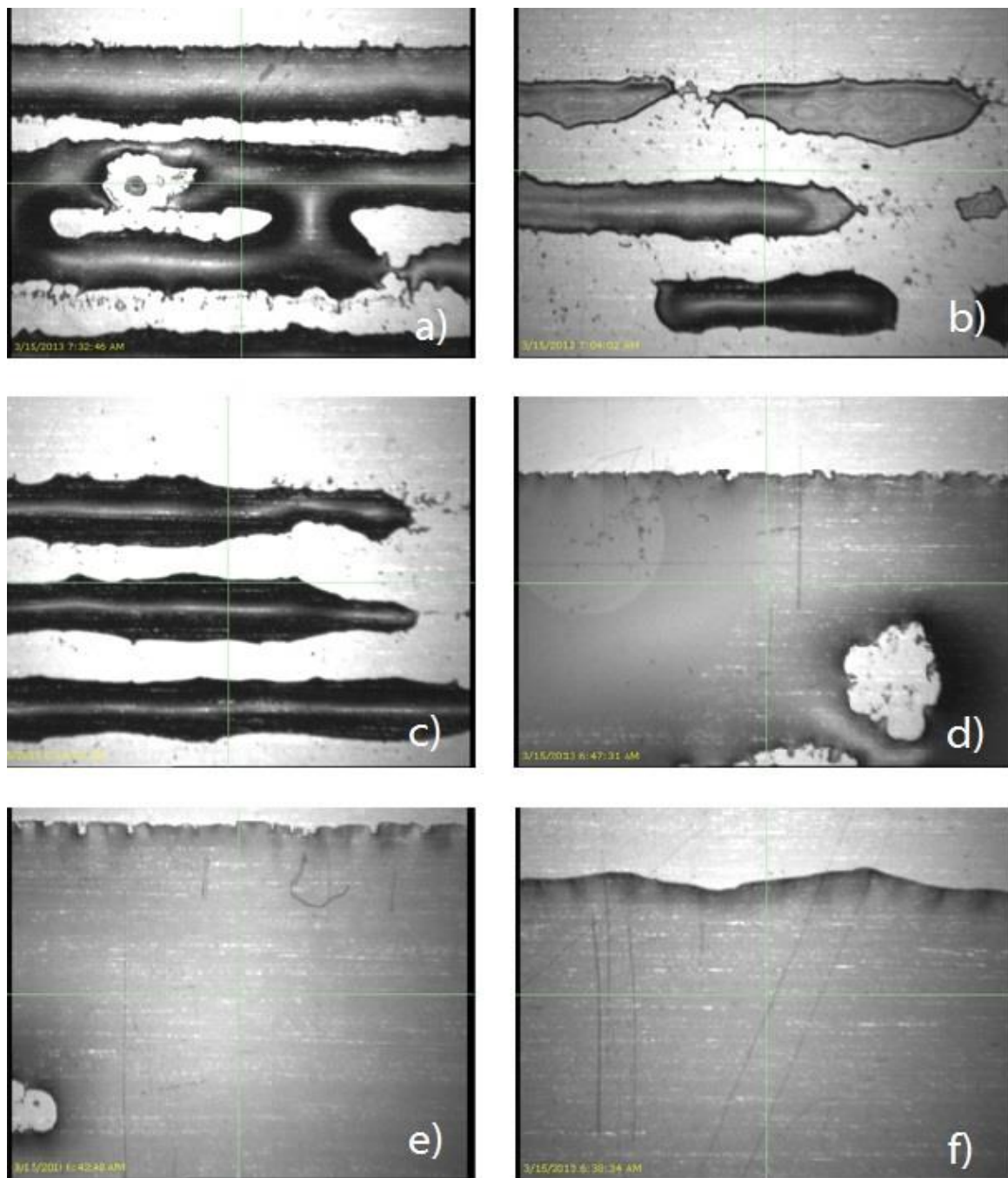
Obr. č. 20: Povrch ITO vrstvy na PET fólii získaný pomocí AFM (2D zobrazení); a) bez modifikace, modifikované b) 1 minutu, c) 2 minuty, d) 3 minuty, e) 4 minuty, f) 5 minut.





Obr. č. 21: Povrch ITO vrstvy na PET fólii získaný pomocí AFM (3D zobrazení); a) bez modifikace, modifikované b) 1 minutu, c) 2 minuty, d) 3 minuty, e) 4 minuty, f) 5 minut.

## 5.2 Kvalita tisku

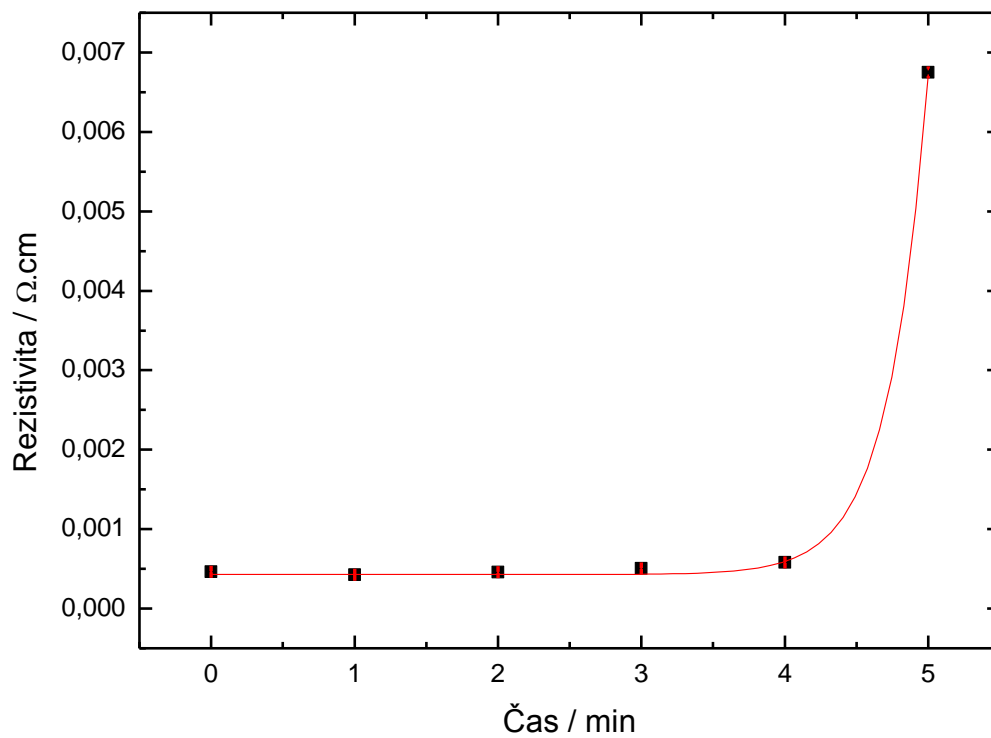


Obr. č. 22: Kvalita tisku. Použitý materiál: Plexcore® OC RG-1110 Organic conductive ink (PEDOT:PSS); a) fólie bez modifikace; fólie modifikované: b) 1 minutu, c) 2 minuty, d) 3 minuty, e) 4 minuty, f) 5 minut.

### 5.3 Vodivosti vrstev

Tabulka 3 Rezistivita modifikovaných ITO vrstev.

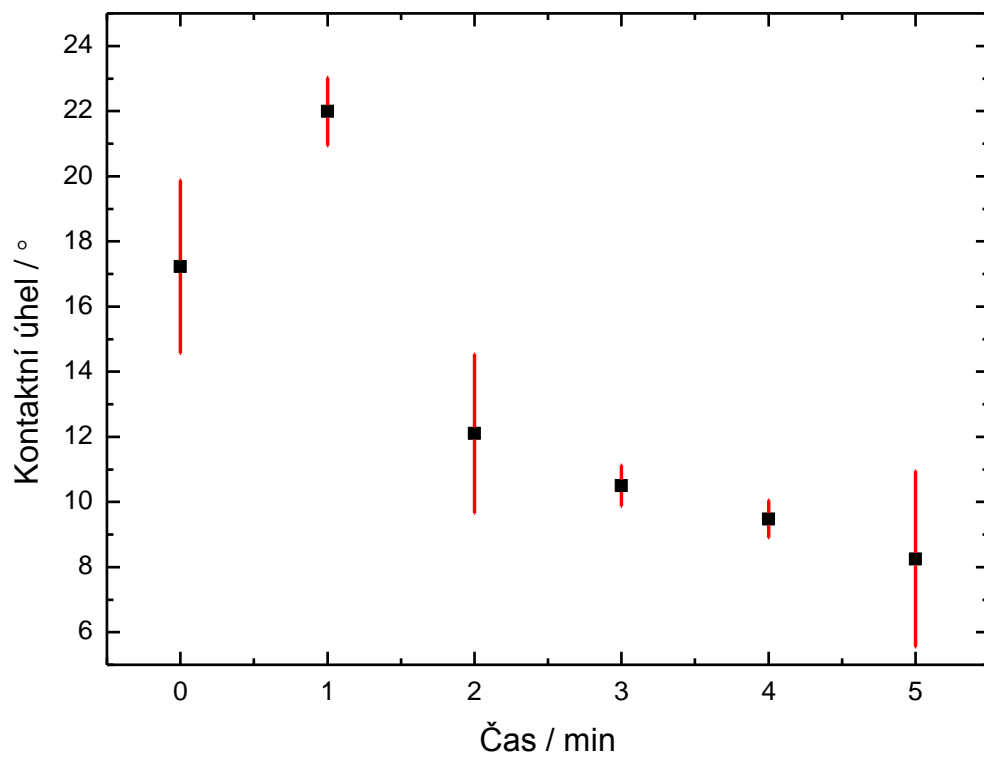
Modifikace [min]	El.proud [ $\cdot 10^{-5}$ A]	Rezistivita [ $\cdot 10^{-4}$ $\Omega$ .cm]	Odchylka [ $\cdot 10^{-4}$ $\Omega$ .cm]
0	1,00	4,643	0,059
1	1,00	4,275	0,007
2	1,00	4,557	0,068
3	1,00	5,058	0,062
4	1,00	5,801	0,041
5	1,00	67,466	0,463

*Graf 1 Závislost rezistivity ITO vrstvy na době modifikace.*

## 5.4 Smáčivost povrchu

Tabulka 4 Kontaktní úhel sedící kapky materiálu Plexcore.

Doba modifikace [min]	0	1	2	3	4	5
č. měření	kontaktní úhel $\theta$ [°]					
1	18,084	21,506	12,994	10,278	9,498	8,71
2	17,558	22,186	11,050	10,459	9,235	9,028
3	16,027	22,271	12,260	10,775	9,696	7,008
průměr:	17,223	21,988	12,101	10,504	9,477	8,249
odchylka:	2,655	1,042	2,438	0,625	0,574	2,698

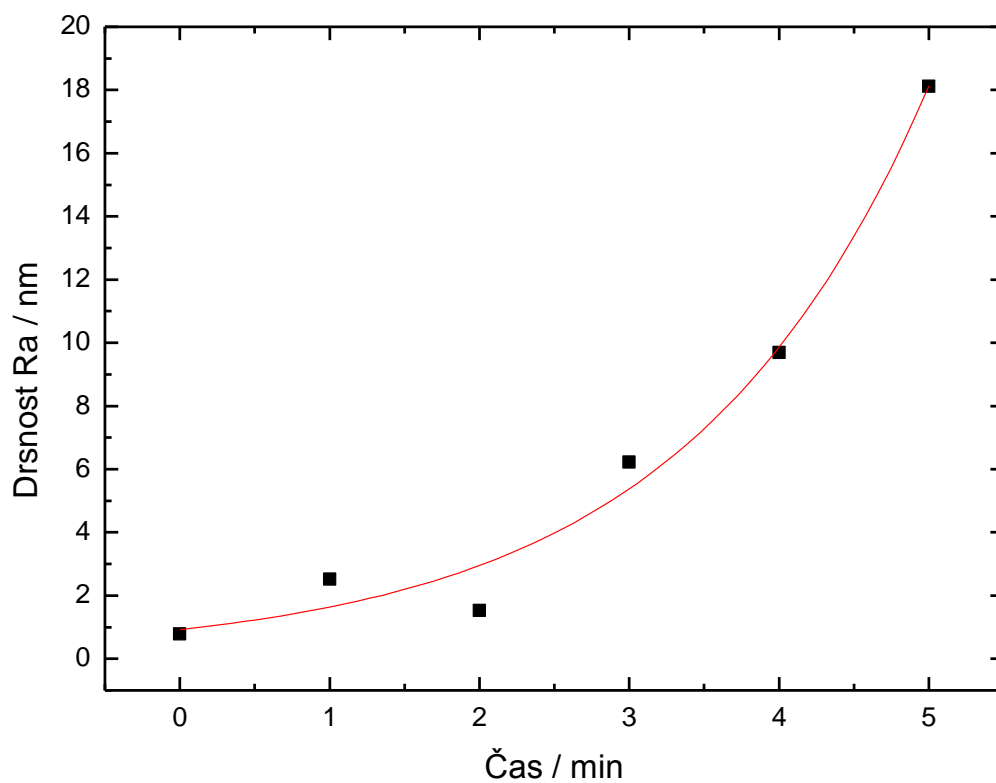


Graf 2 Závislost kontaktního úhlu ITO vrstvy na době modifikace.

## 5.5 Drsnost povrchu

Tabulka 5 Drsnosti povrchu modifikovaných ITO vrstev.

Modifikace [min ]	Povrchová drsnost $R_a$ [nm]
0	0,783
1	2,524
2	1,533
3	6,218
4	9,692
5	18,123



Graf 3 Závislost povrchové drsnosti  $R_a$  ITO vrstvy na době modifikace.



## 6 DISKUZE VÝSLEDKŮ

### 6.1 Materiálový projev po chemické modifikaci povrchu

Z dosažených výsledků vyplývá několik podstatných materiálových projevů. Prvním z nich je fakt, že vrstva ITO deponovaná na PET substrátu podléhá chemickému ošetření vybranými chemickými činidly (dá se tedy hovořit o modifikaci chemickou cestou). Na Obrázcích 20 a 21 je zřetelný vývoj struktury vrstvy ITO, přičemž doba chemické modifikace ji zásadně ovlivňuje. Při pohledu na nemodifikovanou vrstvu jsou patrné relativně široké, ale do špičky vedené píky, což je pro ITO docela typické [37]. Naproti tomu, postupem času se během modifikace tyto relativně široké píky zmenšují a povrch se zahlazuje (po 1 až 2 minutách), a až v další fázi začíná docházet k formování struktury v podobě ostrých a tenkých výstupů (4 a 5 minut). Z toho lze usoudit, že chemická úprava vrstvy ITO deponované na PET substrátu probíhá ve dvou krocích. Nejprve proběhne zahlazení původních širokých píků a poté následuje jakoby „vyžírání“ vrstvy tak, že se zformuje struktura s tenkými a ostrými hroty. Tabulka 5 tento fakt potvrzuje, neboť hodnoty drsnosti se nejprve mění v čase velmi mírně a při čase modifikace 2 minuty dokonce poklesnou. Ke zlomu v nárůstu drsnosti vrstev dochází zhruba po třech minutách chemického ošetření, kdy se začínají objevovat již ostré píky.

#### 6.1.1 Smáčivost povrchu

Dalším pozorovaným fenoménem u vrstev chemicky modifikovaných byla změna kontaktního úhlu a smáčivost povrchu kapalinou Plexcore (ten byl použit pro měření kontaktního úhlu z důvodu zamýšleného následného tisku na modifikovanou vrstvu). Čím delší byl čas modifikace, tím menší byl kontaktní úhel kapičky této kapaliny, jak je patrné z Tabulky 4. Závislost zmenšování kontaktního úhlu inkoustu Plexcore na různě modifikované vrstvě ITO je vynesena v Grafu 2. Je patrné, že inkoust Plexcore při vytvoření jehličkové struktury (doba modifikace alespoň 3 minuty) jakoby mezi tyto jehličky zatékal, a kapička tak byla rozlita do okolí, přičemž při době modifikace 5 minut již kontaktní úhel klesl až pod  $10^\circ$ . Tento fakt je z hlediska zamýšleného tisku polymerní vrstvy při konstrukci polymerní OLED zařízení velmi důležitý, protože lze říci, že polymer PEDOT:PSS po chemické modifikaci vrstvy ITO tuto vrstvu lépe smáčí, a tak je vyšší pravděpodobnost vytvoření kompaktní a homogenní vrstvy, což je nezbytný předpoklad u OLED zařízení. Lepší smáčivost a projevená vyšší kvalita tisku (homogenita a kompaktnost) jsou znázorněny na Obrá-

ku 22. Tisk inkoustu Plexcore na nemodifikovanou vrstvu Obrázek 22 a) je evidentně nekompatní, tvoří se přerušované linky a to i přes fakt, že bylo nastaveno překrytí jednotlivých trysek tiskové hlavy 25  $\mu\text{m}$ . U Obrázku 22 b) (modifikace 1 minuta), se kompaktnost vrstvy opticky ještě zhoršila a došlo i přerušování jednotlivých linek, což koreluje s výsledkem snížení smáčivosti povrchu vrstvy inkoustem a zvýšením kontaktního úhlu mezi inkoustem a modifikovanou vrstvou. Obrázek 22 c) ukazuje na zlepšení smáčivosti oproti modifikaci po dobu 1 minuty. Tvoří se alespoň nepřerušované linky, ale vrstva ve větší ploše i přes to, že trysky jsou v překryvu, se nezformuje. Po modifikaci 3 minuty, se při tisku již formuje docela kompaktní a homogenní vrstva (i přes některé neuniformity) – Obrázek 22 d). Pro časy 4 a 5 minut (Obrázek 22 e) a f)) modifikace se již při tisku vytváří kompaktní a homogenní vrstvy, v případě 5 minut modifikace je dokonce patrná ostrá hrana tisknuté vrstvy. Kvalita tisku se lišila v závislosti na době modifikace vrstev, procesní parametry tisku byly stejné ve všech případech.

## 6.2 Vodivost/rezistivita modifikovaných vrstev

Důležitá vlastnost ITO vrstvy je její vodivost, protože ITO se používá především jako transparentní elektroda. Z měření vodivosti modifikovaných vrstev vyplývá, že existuje hranice, kde se skokově mění vodivost vrstvy. Tato hranice, jak ukazuje Graf 1, leží někde mezi dobou modifikace 4 a 5 minut. Zde rezistivita narůstá řádově. Oproti tomu při modifikaci do 4 minut se rezistivita mění jen nepatrně, tzn. mírně narůstá, jak je vidět v Tabulce 3. Grafem 1 je proložena regresní exponenciální funkce. To z toho důvodu, že i ostatní závislosti se jeví jako exponenciální. Z toho se lze domnívat, že i děj vývoje struktury vrstvy ITO probíhá exponenciálně, a tak i vývoj závislosti vodivosti na struktuře, resp. na čase modifikování vrstvy, lze považovat za exponenciální.

Z technologického hlediska je toto zjištění velmi zajímavé, neboť lze modifikovat ITO vrstvu tak, aby byla dostatečně vodivá a zároveň, aby se při materiálovém tisku na ni dal tisknout polymerní inkoust PEDOT:PSS v dobré kvalitě, který v konstrukci OLED plní jednak funkci donoru děr a za druhé je podklad pro aktivní polymerní vrstvu. Takto lze stanovit procesní parametry tak, aby se kvalita tisku významně zlepšila a vodivost takřka neklesla. Z provedené práce vyplývá, že by se tato hranice dala stanovit na dobu modifikace někde v okolí 3 až 4 minut, čímž by se povrch ITO vrstvy připravil pro tisk PEDOT:PSS a zároveň by vodivost neklesla ani o čtvrt řádu, jak vyplývá z dat uvedených v Tabulce 3 a současně z pořízených obrázků jednotlivých tisků.

## ZÁVĚR

Jako substráty vhodné pro materiálový tisk byly zvoleny polyethylentereftalátové fólie s deponovanou vrstvou oxidu india a cínu, využívané v mikroelektronice a především při konstrukci organických elektroluminiscenčních diod, kde tato deponovaná vrstva slouží jako transparentní anoda. Provedla se jejich modifikace pomocí chemického ošetření oxidačními činidly a jak na modifikovaných tak i na nemodifikovaných vrstvách substrátů se provedla měření drsnosti a morfologie pomocí AFM, dále pak měření vodivosti, resp. rezistivity pomocí van der Pauweho metody a dále se provedla analýza kontaktního úhlu a smáčivosti povrchů substrátů polymerním inkoustem Plexcore. V poslední řadě byl proveden materiálový tisk polymerního inkoustu Plexcore na substráty a byla vyhodnocena jeho optická kvalita.

Z výsledků měření a materiálového tisku lze odvodit tyto poznatky:

1. Chemická modifikace vrstvy ITO deponované na PET fólii probíhá dvoufázově. Nejdříve se vyhladí původní široké píky ITO vrstvy a po dalším čase se začne formovat struktura s úzkými a ostrými píky.
2. Chemická modifikace ITO vrstvy má zásadní vliv na kvalitu materiálového tisku formulí PEDOT:PSS. Při dostatečné modifikaci se při materiálovém tisku vytváří opticky kvalitní a homogenní vrstva.
3. Existuje taková časová hranice chemické modifikace ITO vrstvy, při které se výrazně zlepšuje smáčivost vrstvy materiálem PEDOT:PSS a při tom se nezmenšuje vodivost. Tato hranice podle výsledků práce může být stanovena na 3 – 4 minuty působení modifikační lázně.

Podářilo se zvolit vhodný způsob povrchového ošetření substrátů určených pro materiálový tisk, při kterém dochází k vytvoření takové povrchové struktury, na které se kapky disperze PEDOT:PSS rozlévají a při materiálovém tisku vytváří kompaktní, opticky homogenní vrstvu, což má při konstrukci elektrických zařízení pomocí materiálového tisku zásadní vliv na kvalitu a funkčnost takových zařízení, neboť každá nehomogenita může vést ke zkratům nebo nežádoucím průrazům apod.

Pro další výzkum možných povrchových úprav substrátů by bylo vhodné věnovat pozornost právě studiu závislosti vodivosti na způsobu a délce modifikace. Např. by bylo vhodné rozšířit časovou škálu modifikace a zjistit přesnou hranici, kdy dochází k výraznému

zlepšení smáčivosti povrchu inkoustem a také zda vodivost skutečně závisí na délce modifikace (nebo-li vývoji struktury) opravdu exponenciálně.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] BANN, David. *Polygrafická příručka*. V Praze: Slovart, 2008, 224 s. ISBN 978-80-7391-029-7.

[2] PARRISH, Alton. Palm Sized Superfine Inkjet Prints Micro Circuits Using Harima NanoPaste. [online]. 2009, [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://nanopatentsandinnovations.blogspot.cz/2009/11/palm-sized-superfine-inkjet-prints.html>

[3] DZIK, Petr. Hardware inkoustových tiskáren. *Paladix.cz* [online]. 2007 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.paladix.cz/clanky/hardware-inkoustovych-tiskaren.html>

[4] Technologie tisku. Jak funguje cartridge v inkoustové tiskárně: *Tisknu za třetinu: Help center* [online]. 2010 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://help.tisknuzatretinu.cz/jak-funguje-cartridge-v-inkoustove-tiskarne/>

[5] JÍZDNÝ, Martin. *Vlastní tvary vírového proudění*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

[6] MICRODROP TECHNOLOGIES. Dropjet: Continuous drop generation. *Microdrop Technologies* [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://microdrop.de/dropjet.html>.

[7] GAUTSCHI, G. *Piezoelectric sensorics: force, strain, pressure, acceleration and acoustic emission sensors, materials and amplifiers*. New York: Springer, c2002, xiii, 264 p. ISBN 35-404-2259-5.

[8] LEE, Eric R. *Microdrop generation*. Boca Raton: CRC Press, c2003, 252 p. ISBN 08-493-1559-X.

[9] ELSCHNER, Andreas, Stephan KIRCHMEYER, Wilfried LÖVENICH, Udo MERKER a Knud REUTER. *PEDOT: Principles and applications of an intrinsically conductive polymer*. Boca Raton, FL: CRC Press, c2011, xxi, 355 p. ISBN 14-200-6911-X.

[10] TRACTON, Arthur A. *Coatings technology handbook*. 3rd ed. Boca raton, FL: Taylor, 2005, 1 v. (various pagings). ISBN 15-744-4649-5.

[11] IFTIMIE, S, A RADU, C BESLEAGA, I PANĂ, S CRACIUN, M GIRTAN, L ION a S ANTOHE. Influence of PEDOT:PSS layer on the performances of „bulk-heterojunction” photovoltaic cells based on MEH-PPV:PCBM(1:4) polymeric blends. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, Vol. 6, No. 4, 2011, s. 1631-1638.

[12] UNDERWOOD, Norman. *Chemistry And Technology Of Printing Inks*. 2012. vyd. Nabu Press. ISBN 9781279190548.

[13] PRUCEK, Robert a Martina KILIÁNOVÁ. *Cvičení ze základů nanomateriálové chemie*. Olomouc, 2012.

[14] NOVACENTRIX. *Advanced nanopowders: Nanosilver* [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.novacentrix.com/products/nanopowders>

[15] SIGMA-ALDRICH. *Gold nanoparticles: Properties and applications* [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/materialsscience/nanomaterials/gold-nanoparticles.html>

[16] A. RADU, S. IFTIMIE, V. GHENESCU, C. BESLEAGA, V. A. ANTOHE, G. BRATINA, L. ION, S. CRACIUN, MIHAELA GIRTAN, S. ANTOHE.

The influence of LiF layer and ZnO nanoparticles addings on the performances of flexible photovoltaic cells based on polymer blends, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, Vol. 6, No 3, 2011, p. 1141-1148

- [17] WU, J., L. LIU, B. JIANG, Z. HU, WANG, Y.D. HUANG, D.R. LIN a Q.H. ZHANG. A coating of silane modified silica nanoparticles on PET substrate film for inkjet printing. In: *Applied Surface Science: A journal devoted to applied physics and chemistry of surfaces and interfaces*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2013, 5131–5134. ISSN 0169-4332.
- [18] PARVINZADEH, Mazeyar, Siamak MORADIAN, Abosaeed RASHIDI a Mohamad-Esmail YAZDANSHENAS. Surface characterization of polyethylene terephthalate/silica nanocomposites. In: *Applied Surface Science: A journal devoted to applied physics and chemistry of surfaces and interfaces*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2013, 2792–2802. ISSN 0169-4332. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433209016195>
- [19] FÁVARO, S.L., A.F. RUBIRA, E.C. MUNIZ a E. RADOVANOVIC. Surface modification of HDPE, PP, and PET films with KMnO<sub>4</sub>/HCl solutions. In: *Polymer degradation and stability*. Elsevier Ltd., 2013, 1219–1226. ISSN 0141-3910. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014139100700136X>
- [20] SUBRAMANIAN, Vivek. Printed electronics. In: MAGDASSI, Shlomo. *The chemistry of inkjet inks*. London: World Scientific, 2010, s. 283-317. ISBN 978-981-281-821-8.
- [21] UMMARTYOTIN, S., J. JUNTARO, C. WU, M. SAIN a H. MANUSPIYA. Deposition of PEDOT: PSS Nanoparticles as a Conductive Microlayer Anode in OLEDs Device by Desktop Inkjet Printer. *Journal of Nanomaterials*. 2011, vol. 2011, s. 1-7. DOI: 10.1155/2011/606714. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2011/606714/>
- [22] SMOLKA, P., A. MINAŘÍK, M. RAFAJOVÁ a P. PONÍŽIL. *Přenosný laboratorní goniometr [funkční vzorek]*. 2011.
- [23] FRENKEL, Moshe. Tailoring substrates for inkjet printing. In: MAGDASSI, Shlomo. *The chemistry of inkjet inks*. Hackensack, NJ: World Scientific, c2010, s. 73-97. ISBN 978-981-281-821-8.

[24] KAFABI, Zakya H. *Organic electroluminescence*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor, c2005, xiv, 514 p., [12] p. of plates. Optical engineering (CRC Press), 94. ISBN 08-247-5906-0.

[25] PRÄZISIONS GLAS & OPTIK: ITO-Coatings on High Quality Glass Substrates. [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.pgo-online.com/intl/katalog/ito.html>

[26] KIM, H., C. M. GILMORE, A. PIQUÉ, J. S. HORWITZ, H. MATTOUSSI, MURATA, Z. H. KAFABI a CHRISEY. Electrical, optical, and structural properties of indium–tin–oxide thin films for organic light-emitting devices. *Journal of Applied Physics*. 1999, roč. 86, č. 6451, s. 1-11.

[27] ZHOU, Jianming. *Indium tin oxide (ITO) deposition, patterning, and Schottky contact fabrication*. Kvalifikační práce. New York, 2005. Rochester institute of technology.

[28] VIKOVÁ, Martina. Fyzikální úpravy povrchu textilních materiálů. In: [online]. Technická univerzita v Liberci. Liberec [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: [http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Textilni\\_Fyzika/12.Fyzik%C3%A1ln%C3%AD%20%C3%BApravy%20povrchu%20I.pdf](http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Textilni_Fyzika/12.Fyzik%C3%A1ln%C3%AD%20%C3%BApravy%20povrchu%20I.pdf).

[29] ELIEZER, Yaffa a Shalom ELIEZER. *The fourth state of matter: an introduction to plasma science*. 2nd ed. Philadelphia: Institute of Physics, 2001, ix, 224 p. ISBN 07-503-0740-4.

[30] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Vyd. 6., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010, 262 s. ISBN 978-80-7080-745-3.



[31] TAYLOR, Wesley. *Technical Synopsis of Plasma Surface Treatments*. Kvalifikační práce. University of Florida, Gainesville.2009. Dostupné z:  
<http://www.iopp.org/files/public/TaylorWesleyUFlorida.pdf>.

[32] VIKOVÁ, Martina. Povrchová energie. [online]. Technická univerzita V Liberci. Liberec [cit. 2013-05-22]. Dostupné z:  
[http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/include/osobni\\_stranky/vikova.martina/](http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/include/osobni_stranky/vikova.martina/)

[33] DAVIS, J. *Surface engineering for corrosion and wear resistance*. Materials Park, OH: IOM Communications, c2001, viii, 279 p. ISBN 978-0-87170-700-0.

[34] SILICONFAREAST.COM. Chemical Vapor Deposition (CVD).  
[www.siliconfareast.com](http://www.siliconfareast.com) [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z:  
<http://www.siliconfareast.com/cvd.htm>

[35] KRÁTKÝ, Stanislav. *Suché a mokré cesty leptání křemíku*. VUT v Brně, FEKT, Semestrální projekt. 2010. Dostupné z:  
[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=34245](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=34245).

[36] YOU, Z.Z. a J.Y. DONG. Surface modifications of ITO electrodes for polymer light-emitting devices. In: *Applied Surface Science: a journal devoted to applied physics and chemistry of surfaces and interfaces*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2102–2107. ISSN 0169-4332.

[37] YOU, Z.Z, Combined AFM, XPS, and contact angle studies on treated indium-tin-oxide films for organic light-emitting devices. In *Materials letters 61 (2007)*. p. 3809 - 3814. Elsevier.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PZT	„Lead zirkonium titanate“
PEDOT	Poly(3,4-ethylendioxythiofen)
PSS	Poly(styrensulfonová kyselina)
OLED	Z angl. organic light-emitting diode
ZnO	Oxid zinečnatý
PET	Poly(ethylentereftalát)
ITO	Z angl. indium tin oxide
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid inditý
SnO <sub>2</sub>	Oxid cíničitý
$\theta$	Kontaktní úhel smáčení
$\gamma_{SG}$	Povrchová energie na rozhraní pevná látka – plyn
$\gamma_{LS}$	Povrchová energie na rozhraní pevná látka – kapalina
$\gamma_{LG}$	Povrchová energie na rozhraní kapalina – plyn
N.m <sup>-1</sup>	Jednotka povrchové energie
J.m <sup>-2</sup>	Jednotka povrchové energie
kg.s <sup>-1</sup>	Jednotka povrchové energie
PVD	Z angl. physical vapor deposition
CVD	Z angl. chemical vapor deposition
KMnO <sub>4</sub>	Manganistan draselný
HCl	Kyselina chlorovodíková
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	Aceton
H <sub>2</sub> O	Voda
M <sub>r</sub>	Relativní molekulová hmotnost

---

$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	Jednotka molární hmotnosti
nm	nanometr
$\mu\text{m}$	mikrometr
mm	milimetr
PVDF	Poly(vinylidenfluorid)
HIL	Z angl. hole injection layer
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsia
M	Molarita (jednotka látkové koncentrace, obdobně jako $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ )
V	Volt
$\gamma$	Elektrická vodivost
$\rho$	Elektrická rezistivita
dpi	Z angl. dots per inch (jednotka rozlišení)
Hz	Hertz
AFM	Z angl. atomic force microscopy
2D	Dvoudimenzionální zobrazení
3D	Trojdimenzionální zobrazení
A	Ampér
$\Omega\cdot\text{cm}$	Jednotka elektrické rezistivity
$R_a$	Střední aritmetická hodnota drsnosti povrchu
$\Omega/\text{sq}$	Jednotka plošné rezistivity

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. č. 1</i>	<i>Kontinuální inkjetový tisk</i>	11
<i>Obr. č. 2</i>	<i>Termální inkjetový tisk</i>	12
<i>Obr. č. 3</i>	<i>Piezoelektrický inkjetový tisk</i>	12
<i>Obr. č. 4</i>	<i>Focused acoustic beam ejection</i>	13
<i>Obr. č. 5</i>	<i>Litografie vs. tisk</i>	14
<i>Obr. č. 6</i>	<i>PEDOT:PSS</i>	16
<i>Obr. č. 7</i>	<i>Vrstva PEDOT:PSS v konstrukci OLED</i>	16
<i>Obr. č. 8</i>	<i>Nanočástice stříbra (TEM)</i>	17
<i>Obr. č. 9</i>	<i>Kapky inkoustu absorbované na substrátu</i>	18
<i>Obr. č. 10</i>	<i>Strukturní vzorec PET</i>	19
<i>Obr. č. 11</i>	<i>Krystalická struktura <math>In_2O_3</math></i>	20
<i>Obr. č. 12</i>	<i>Skleněný substrát s deponovanou vodivou strukturou</i>	21
<i>Obr. č. 13</i>	<i>Kontaktní úhel svírající kapka kapaliny s rovinným povrchem</i>	22
<i>Obr. č. 14</i>	<i>Tvar tištěné struktury</i>	30
<i>Obr. č. 15</i>	<i>Materiálová tiskárna Fujifilm Dimatix DMP-2800</i>	30
<i>Obr. č. 16</i>	<i>Schéma zkušebního obvodu pro měření rezistivity vzorku čtyřbodovou snímací metodou (metoda van der Pauw)</i>	31
<i>Obr. č. 17</i>	<i>Soustava pro měření rezistivity metodou van der Pauw</i>	31
<i>Obr. č. 18</i>	<i>Mirkoskop atomárních sil NT-MDT NTEGRA-Prima</i>	32
<i>Obr. č. 19</i>	<i>Přenosný laboratorní goniometr</i>	32
<i>Obr. č. 20</i>	<i>Povrch ITO vrstvy na PET fólii získaný pomocí AFM (2D zobrazení); a) bez modifikace, a modifikované b) 1 minutu, c) 2 minuty, d) 3 minuty, e) 4 minuty, f) 5 minut</i>	33

*Obr. č. 21*      *Povrch ITO vrstvy na PET fólii získaný pomocí AFM (3D zobrazení); a) bez modifikace, a modifikované b) 1 minutu, c) 2 minuty, d) 3 minuty, e) 4 minuty, f) 5 minut.*

34

*Obr. č. 22*      *Kvalita tisku. Použitý materiál: Plexcore® OC RG-1110 Organic conductive ink (PEDOT:PSS); a) fólie bez modifikace; fólie modifikované: b) 1 minutu, c) 2 minuty, d) 3 minuty, e) 4 minuty, f) 5 minut*

35

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1</i>	<i>Použité chemikálie</i>	28
<i>Tabulka 2</i>	<i>Použité materiály</i>	28
<i>Tabulka 3</i>	<i>Rezistivita modifikovaných ITO vrstev</i>	36
<i>Tabulka 4</i>	<i>Kontaktní úhel sedící kapky materiálu Plexcore</i>	37
<i>Tabulka 5</i>	<i>Drsnosti povrchu modifikovaných ITO vrstev</i>	37

**SEZNAM GRAFŮ**

<i>Graf 1</i>	<i>Závislost rezistivity ITO vrstvy na době modifikace</i>	<i>38</i>
<i>Graf 2</i>	<i>Závislost kontaktního úhlu ITO vrstvy na době modifikace</i>	<i>39</i>
<i>Graf 3</i>	<i>Závislost povrchové drsnosti Ra ITO vrstvy na době modifikace</i>	<i>40</i>