

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Výrobní technologie pro tištěnou a flexibilní elektroniku**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bohuslav MELICHAR**  
Osobní číslo: **E10B0474P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Výrobní technologie pro tištěnou a flexibilní elektroniku**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Seznamte se s problematikou tištěné, flexibilní, plastové elektroniky a charakterizujte současný stav tohoto odvětví.
2. Zpracujte přehled nejrozšířenějších výrobních a depozičních technik využitelných pro tištěnou flexibilní elektroniku.
3. Charakterizujte hlavní problémy a úskalí v rozvoji hromadné průmyslové výroby tištěné elektroniky.
4. Popište trendy vývoje v odvětví tištěné elektroniky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Wong, W. S.; Salleo, A. **Flexible Electronics: Materials and Applications**. Springer, 2009.
2. White Paper - OE-A Roadmap for Organic and Printed Electronics, 4th edition. Organic Electronics Association, 2011.
3. Organic and Printed Electronics, 4th edition. Organic Electronics Association, 2011.
4. Elektronické informační zdroje.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Silvan Pretl**

Regionální inovační centrum elektrotechniky

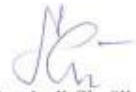
Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

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

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na technologické postupy výrobních technologií pro tištěnou a flexibilní elektroniku ...

## **Klíčová slova**

Flexibilní elektronika, tištěná elektronika, organická elektronika, výrobní technologie ...

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on technological processes of production technologies for printed and flexible electronics ...

## **Key words**

Flexible electronics, printed electronics, organics electronics, manufacturing technology ...

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Bohuslav Melichar

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Silvanu Pretlovi za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a velmi přátelský přístup.

## Obsah

<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>1 FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA .....</b>	<b>13</b>
1.1 HISTORIE A POČÁTKY FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKY .....	13
1.2 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY PRO FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKU .....	14
1.2.1 Materiály pro elektricky aktivní součástky .....	14
1.2.2 Materiály pro flexibilní substráty.....	18
1.3 FLEXIBILNÍ A TIŠTĚNÉ SOUČÁTKY .....	20
1.3.1 Organická světlo-emitující dioda .....	20
1.3.2 Displeje s tekutými krystali .....	21
1.3.3 Elektroforetické displeje .....	21
1.3.4 Organický tranzistor řízený elektrickým polem .....	22
1.3.5 Křemíkový tenkovrstvý tranzistor .....	23
1.3.6 Organický fotovoltaický článek.....	23
1.3.7 Flexibilní baterie .....	24
<b>2 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE PRO TIŠTĚNOU A FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKU.....</b>	<b>26</b>
2.1 MATERIÁLY V PLYNNÉM SKUPENSTVÍ .....	27
2.1.1 Technologie vakuové metalizace.....	27
2.1.2 Plynná epitaxe organických sloučenin.....	31
2.2 MATERIÁLY V KAPALNÉM SKUPENSTVÍ.....	32
2.2.1 Metoda Langmuir – Blodgett.....	32
2.2.2 Rotační nanášení .....	33
2.2.3 Nanášení ponorem.....	34
2.2.4 Nanášení sprejem .....	35
2.2.5 Elektropolymerace .....	36
2.2.6 Metoda Layer-by-layer .....	36
2.2.7 Mikrokontaktní tisk.....	37
2.2.8 Inkoustový tisk.....	38
2.2.9 Flexografický tisk .....	40
2.2.10 Ofsetový tisk .....	41
2.2.11 Tampónový tisk .....	43
2.3.12 Metoda sítotisku.....	44
2.3 NANOLITOGRAFICKÉ METODY.....	45
2.3.1 Nanotisková litografie.....	46
2.3.2 Litografie elektronovým svazkem .....	46
2.3.3 Litografie zaostřeným iointovým svazkem.....	47
2.3.4 Extrémní ultrafialová litografie.....	47
2.3.5 Rentgenová litografie.....	48



<b>3</b>	<b>VÝVOJ V OBLASTI TIŠTĚNÉ A FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKY .....</b>	<b>49</b>
3.1	Problémy při hromadné výrobě flexibilní elektroniky.....	49
3.2	Trendy a vývoj flexibilní a tištěné elektroniky .....	49
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>51</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>52</b>

## Seznam zkratk

AMLCD .....	Displej z tekutých krystalů s aktivní maticí
AMOLED .....	Organický světlo-emitující displej s aktivní maticí
CIJ .....	Kontinuální tisk
CTE .....	Koeficient tepelné roztažnosti
DOD .....	Tisk na požádání
ENAS .....	Fraunhoferova ústav pro elektrické nanosystémy
EUV .....	Extrémní ultrafialová litografie (Extreme ultraviolet lithography)
FET .....	Unipolární tranzistor řízený elektrickým polem
HVOF.....	Metoda sprejování za pomoci explodujícího kyslíku
ITO.....	Vrstva cínu dotovaného oxidem india
LCD .....	Displej z tekutých krystalů (Liquid crystal display)
NIL.....	Nanotisková litografie
PDI.....	Perylen diimidu
PDP .....	Plazmové zobrazovací zařízení
PTCDI.....	Perylen tetrakarboxylového diimidu
OFET .....	Organický unipolární tranzistor řízený elektrickým polem
OLED.....	Organická světlo-emitující dioda (Organic light-emitting diode)
OPVC.....	Organický fotovoltaický článek (Organic photovoltaics cells)
OVPD.....	Plynná epitaxe organických sloučenin (Organic vapor phase deposition)
TFT .....	Tenkovrstvý tranzistor (Thin-film transistor)
XRL .....	Rentgenová litografie (X-ray lithography)

## Seznam symbolů

a-Si:H.....	Hydrogenovaný amorfnní křemík
μc-Si:H.....	Hydrogenovaný mikrokrystalický křemík
D.....	Tuhost substrátu
E.....	Youngův modul
t .....	Tloušťka substrátu [m]
v .....	Poissonovo číslo
Ca.....	Chemická značka vápníku
PPV .....	Polyfenyl vinyl
P <sub>3</sub> HT.....	Poly 3-hexylthiofen

---

MnO <sub>2</sub> .....	Oxid mangančitý
TiB <sub>2</sub> .....	Borid titaničitý
BN.....	Nitrid bóru
AlN.....	Nitrid hlinitý
Ni.....	Chemická značka niklu
Fe.....	Chemická značka železa
Al.....	Chemická značka hliníku
SiH <sub>4</sub> .....	Silan
SiCl <sub>4</sub> .....	Chlorid křemičitý
Co.....	Chemická značka kobaltu
B.....	Chemická značka bóru
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	Oxid hlinitý
SiH <sub>3</sub> Cl.....	Monochloridsilan
SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> .....	Dichlorsilan
SiO <sub>2</sub> .....	Oxid křemičitý
T <sub>g</sub> .....	Teplota změny fyzikální struktury skla [°C]
T <sub>max</sub> .....	Maximální teplota [°C]

## Úvod

Cílem této bakalářské práce je kompletní seznámení s technologiemi flexibilní elektroniky. Flexibilní elektronika může mít spoustu synonym jako například polytronika, tištěná elektronika, organická elektronika, plastová elektronika či polymerní elektronika. Předmětem této práce bude seznámení s historií a počátky vývoje této technologie, dále o používaných materiálech a jeho funkcích, o flexibilních a tištěných součástkách, o možnostech uplatnění v praxi, možnostech hromadné výroby, o vývoji a možnostech uplatnění v budoucnu, ale především bude tato práce o výrobních technologiích, metodách, možnostech zpracování a vývoji pro tuto specifickou část elektroniky.

Flexibilní elektronika vzbudila velkou pozornost na trhu s elektronikou, kdy ve srovnání s nynější křemíkovou technologií, má nižší finanční nároky na výrobu (např. využití výrobní technologie „*Roll-to-roll tisku*“ nebo „*Inkoustového tisku*“), dále díky svým vlastnostem je vysoce flexibilní (ohebná, pružná), a nároky na výrobu jsou jednodušší. Díky tomu je flexibilní elektronika atraktivní kandidát na příští generaci spotřební elektroniky, která vyžaduje lehkou, ohebnou, přenosnou, a nízkonákladovou elektroniku. [1]

Přesněji vyjádřeno slovo flexibilní může mít spoustu společných vlastností, například ohebný, elastický, nerozbitelný, tištěný, nebo také velkoplošný. Flexibilní elektronika má dnes na trhu otevřené pole působnosti. [8]

# 1 Flexibilní elektronika

## 1.1 Historie a počátky flexibilní elektroniky

Prvopočátky a vývoj tištěné a flexibilní elektroniky sahají až do roku 1960, kdy byly vyrobeny první solární články z monokrystalického křemíku ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ) na flexibilním (pružném) podkladu. Kolem roku 1980 se začínají vyrábět solární články na flexibilním podkladu pomocí kontinuální technologie vakuového napařování a roll-to-roll metody (v kapitole výrobní technologie přesněji vysvětleno). První pružný TFT (Křemíkový tenkovrstvý tranzistor) byl poprvé sestaven v roce 1968. V polovině roku 1980 byl v Japonsku poprvé sestaven první displej na bázi tekutých krystalů s aktivní maticí (Active-matrix liquid-crystal display – AMLCD). Roku 1996 byly sestaveny první TFT na bázi hydrogenovaného amorfního křemíku (a-Si:H), které se nanášely na flexibilní substrát. V roce 1997 byly TFT na bázi polykrystalického křemíku nanášeny na flexibilní, polymerní substrát pomocí technologie laserového žíhání. Například v roce 2005 firma Philips oznámila prototyp rolovacího elektroforetického displeje a ve stejném roce firma Samsung zhotovila první 7“ palcový flexibilní LCD. Studie fotoelektrické vodivosti na bázi organických molekul sahá až do počátků 20. století. američané A. J. Heegerov a A. Diarmidov a japonec H. Širakawa jsou považováni za zakladatele oboru vodivých polymerů a roku 1977 popsali kovovou vodivost polyacethylenu dopovaného jodem, za což v roce 2000 získali Nobelovu cenu za chemii. Například v roce 2006 výzkumné centrum Universal Display Corporation and the Palo Alto Research Center představilo prototyp flexibilní OLED, vyrobené z polykrystalického křemíku osazeného na ocelové fólii. [2] [8]

Jako prvním elektronickým produktem, vyrobeným na základě organických flexibilních polovodičů byly na přelomu roku 2005/2006 pasivní identifikační karty. Tyto karty se využívaly například k nakupování a byly hromadně tisknuty na papír. Jako další výrobek, který byl velkým přínosem pro rozvoj flexibilní elektroniky byly ohebné, lithiové, polymerové baterie. V následném rozvoji přispěly i organické fotovoltaické články, které se využívali v mobilních zařízeních. V témže roce byly také předvedeny například velkoplošné tlakové snímače nebo tištěné elektrody pro testování hladiny glukózy. [3]

## 1.2 Používané materiály pro flexibilní elektroniku

Tato kapitola bude shrnovat základní používané materiály ve flexibilní a tištěné elektronice. V první části to budou materiály, které se podílejí na elektricky aktivní části zařízení a v další části pak materiály, které se používají při výrobě substrátů a jiných částí zařízení. Výběr materiálů je velmi důležitý pro správnou funkci celého zařízení.

### 1.2.1 Materiály pro elektricky aktivní součástky

#### Organické materiály

Organické materiály, které se dnes v elektrotechnice využívají jsou známy již řadu let. V dřívějších dobách, kdy organické materiály nebyly doposud známy jako látky, které vedou elektrický proud se spíše využívaly jako dobré tepelné nebo elektrické izolanty a to díky jejich velmi dobrým mechanickým a elektroizolačním vlastnostem. Až okolo roku 1980 se teprve dostávají do popředí organické materiály, které jsou již schopny vést elektrický proud. Veškeré organické materiály si můžeme dělit dle jejich charakteru na vodiče, polovodiče, luminescenty, dielektrika, elektrochromní a zapouzdřovací materiály. Dále je můžeme dělit do 2 větších skupin. Jednou z nich jsou nízkomolekulární látky, a tou druhou jsou polymery. Polymery se většinou vyskytují jako čistě amorfní látky, naproti tomu nízkomolekulární látky se vyskytují především v krystalických uspořádání. [3] [4]

Jak již bylo v předchozí kapitole uvedeno, nízkomolekulární látky se hlavně vyskytují v krystalickém uspořádání. Tyto látky mají velmi malou, ale přesně vymezenou molekulovou hmotnost. V této skupině jsou zastoupeny monomery a oligomery. [4]

- *Oligoaceny*

Využití tohoto materiálu bylo především v počátcích výroby prvních organických elektronických součástek. Získává se prostřednictvím extrakce z fosilních paliv a uhlí. Hlavní vlastností oligoacenu jsou jejich dobré elektroluminiscenční vlastnosti, díky kterým se využívali jako transportní a světlo emitující vrstvy a nebo také jako dopanty. Jeden z nejznámějších oligoacenu je Pentacen. [4]

- ***Oligothiofeny***

Na rozdíl od oligoacenu jsou některé oligothiofeny dobře rozpustné a díky tomu jsou lépe zpracovatelné. Při jejich výrobě se využívá vakuových technik. Používají se v mnoha high-tech aplikacích jako jsou OLED, OFET, OPVC. [4] [7]

- ***Triarylaminy***

Hlavní využití těchto materiálů je především v organických světlo-emitujících diodách (OLED). Ve srovnání s ostatními oligomery jsou tyto látky schopny produkovat bikation-radikály, tzv. bipolarony, což jsou velmi kvalitní nosiče kladného náboje. Výroba těchto materiálů probíhá pomocí vakuových technik. [4]

- ***Oligo-paraphenyleny***

Jejich využití v elektronice je velmi nízké, protože dostupnost v syntetické podobě je složitá, mají horší rozpustnost a nižší vodivost. Dají se například využít pro výrobu nízkomolekulární OLED. [4]

- ***Oligomery a nízkomolekulární látky s vodivostí typu N***

Vyznačují se elektronovou vodivostí, a díky tomu lépe přijímají elektron a stabilizují ho do formy negativního polaronu. Příkladem těchto látek jsou například deriváty perylen tetrakarboxylového diimidu PTCDI nebo PDI, které díky svým vlastnostem a příznivé ceně jsou nejrozšířenější oligomery s vodivostí typu N. [4]

- ***Fullereny***

Typický tvar pro fullereny je uhlíkový elipsoid. V tomto elipsoidu dochází k zachytávání elektronů. Vzhledem k této struktuře je velmi odolný vůči fyzikálním vlivům. Nejčastěji se fullery připravují uměle, pyrolýzou organických sloučenin, laserem. Jejich nejlepší vlastností je jejich supravodivost. [4] [5]

- ***Oligomery a nízkomolekulární látky – ambipolární***

Tyto látky jsou svými vlastnostmi velmi populární, neboť jejich elektrickou vodivost mohou zprostředkovávat jako elektrony tak i díry. Značnou výhodou mají oproti anorganickým polovodičům, neboť jeden druh organického materiálu může ke svému přenosu využívat oba

tyto typy nosičů. U těchto látek je velmi obtížné docílit spolehlivého transportu elektronů, neboť jsou velmi nestabilní a na vzduchu rychle oxidují. [4]

- **Organo-metalické komplexy**

Tyto sloučeniny se skládají z centrálního kovu, ke kterému jsou koordinačně-kovalentní vazbou připojeny ligandy. Kovové komplexy jsou z větší části polovodiče typu N. Jejich největší využití můžeme hledat v luminiscenčních dopantech, ve fotovoltaice a ve vysoké míře se využívají v OLED. Můžeme je také hledat pod názvem ftalocyaniny. [4]

- **Tetrathiafulvaleny**

Ve flexibilní elektronice patří tato skupina látek k velmi často používaným materiálům. Mají jednu velmi zajímavou schopnost, kdy vedle dobré schopnosti přenášet elektrický náboj mají též velmi dobré feromagnetické vlastnosti. Elektrická vodivost těchto látek je vysoká, srovnatelná s vodivostí kovů (Fe, Al). [4]

- **Polyacetyleny (PAy)**

Jedná se o jednu z prvotně objevených látek, která se v organické elektronice využívá. Jejich vodivost je se srovnatelná s vodivostí klasických polovodičů. Ke zlepšení těchto vlastností jsou polyacetyleny dopovány párami jódu, čímž se zvyšuje jejich vodivost až na hodnoty kolem  $10^5 \text{ S.cm}^{-1}$ . Nevýhodou těchto druhů polymerů je jejich nestálost na vzduchu, a proto jsou v organické elektronice jen zřídka využívány. [4]

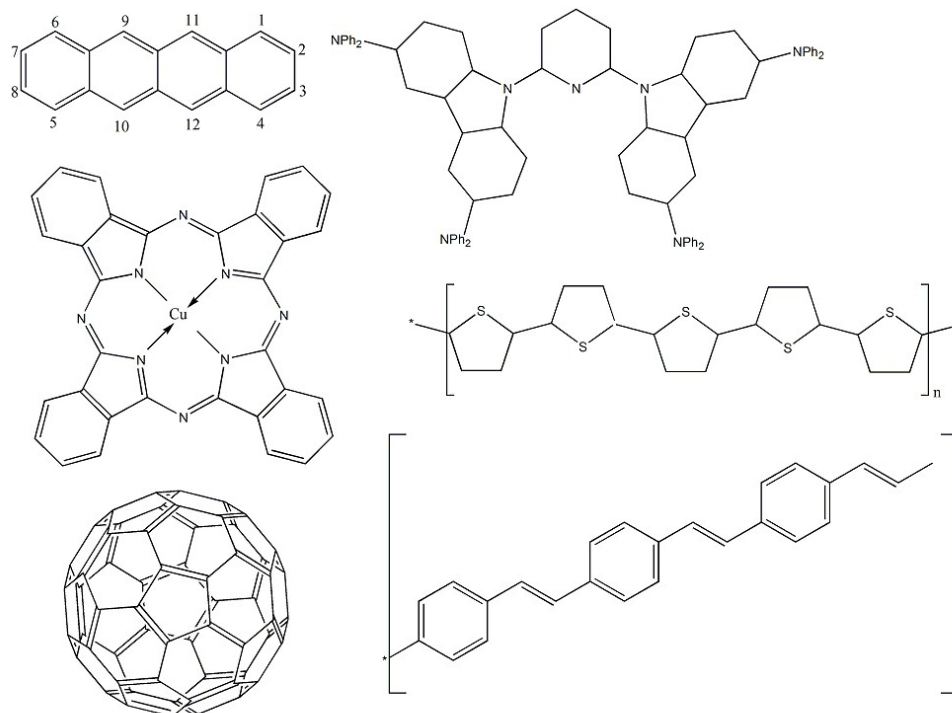
- **Polyaniliny (PANIy)**

Co se týče historie objevení organických vodivých polymerů, patří polyaniliny právě mezi ty nejstarší. Tyto polymery mají také dobrou stálost při jejich skladování. Odebírání nebo dodáváním elektronů elektrochemickou oxidací či redukcí, získáme formy polyanilinu s rozdílnou chemickou strukturou, zbarvením a elektrickými vlastnostmi. [4] [6]

- **Polythiofeny (PTy)**

Pro svoje schopnosti patří polythiofeny mezi velmi kvalitní skupinu polymerů, díky jejich výborným fyzikálním vlastnostem. Avšak jejich vodivost nedosahuje tak dobrých vlastností jako jiné organické sloučeniny. Především se využívají jako polovodiče, a nejčastěji je můžeme nalézt ve fotovoltaických článcích, nebo OLED displejích. [4]





Obr. 1 Molekulární struktura organických látek (převzato z [4])

## Anorganické materiály

- **Mikrokrytalický křemík**

Tenké vrstvy křemíku a oxidu křemičitého se připravují pyrolytickým rozkládáním silanu ( $\text{SiH}_4$ ) nebo jeho chlorovaných derivátů ( $\text{SiH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{SiCl}_4$ ). Jestliže tento proces probíhá v inertní atmosféře (kde hlavní složka je dusík) je produktem rozkladné reakce křemík (teploty zde dosahují hodnot nad  $600^\circ\text{C}$ ). V přítomnosti kyslíku je konečným produktem oxid křemičitý. Depozice  $\text{SiO}_2$  se provádějí při teplotách nad  $250^\circ\text{C}$  a rychlosti růstu vrstvy jsou řádově ve stovkách nanometrů. [16]

Změnou amorfnní struktury křemíku ( $\text{a-Si:H}$ ) docílíme struktury uspořádané – mikrokrytalické ( $\mu\text{-Si:H}$ ) tepelným zpracováním (žiháním) amorfnního křemíku za stále teploty, kdy dochází k dodání tepelné energie materiálu, rozptylu atomů křemíku v materiálu a k tvorbě neúplné mikrokrytalické struktury. Defekty, které se vyskytují v amorfnní struktuře jsou tzv. vyžihány a tento proces můžeme také nazvat rekrystalizací křemíkové struktury. Při krystalizaci amorfnního křemíku dochází k seskupování atomů do krystalické mřížky, a z vrstvy s neuspořádanou strukturou se tak stává struktura

mikrokrystalická s malým podílem zbytkové amorfnní fáze. Krystalizace při různých teplotách má vliv na velikost krystalitů [17]

- **Transparentní vodivé oxidy**

Typické materiály, které se využívají pro kontakty jsou kovy. Pro výrobu displejů nebo solárních článků jsou potřeba materiály, které jsou elektricky aktivní a zároveň průhledné. Nejvíce používané materiály jsou oxidy kovů. Nejrozšířenější transparentní (průhledný) vodivý oxid je cín dotovaný oxidem indium (ITO), který byl původně používán jako materiál pro rozmrazování skel u letadel. Nové transparentní vodivé oxidy na bázi oxidů zinku a oxidů cínu jsou teprve ve vývoji. [8]

### 1.2.2 Flexibilní substráty

Flexibilita substrátu je dána jeho tuhostí v ohybu, kterou popisuje vzorec  $D = (E \cdot t^3) / [12(1 - \nu^2)]$ , kde „E“ je Youngův modul, „t“ je tloušťka substrátu a „ν“ je Poissonovo číslo. Flexibilní substráty by měli sloužit jako náhrada za pevné a neohebné substráty, a proto by měli splňovat řadu požadavků. [8]

1. **Optické vlastnosti** – elektroluminiscenční displeje potřebují opticky velmi jasné substráty, navíc tyto substráty musí mít nízký dvojlom (optická vlastnost materiálu, kde index lomu je závislý na polarizaci a směru šíření světla) pro LCD technologii. [8]
2. **Drsnost a nerovnost povrchu** – Nerovnost povrchu tenkovrstvých zařízení ovlivňuje jejich elektrické vlastnosti. Nerovnostem na krátkých vzdálenostech je třeba se vyhnout, proto je třeba obzvlášť brát ohled na kvalitu malých a tenkovrstvých flexibilních zařízení. [8]
3. **Tepelné a termomechanické vlastnosti** – Pracovní teplota substrátu při maximálním zatížení, například teplota skelného přechodu ( $T_g$ ) musí být odpovídající maximální výrobní teplotě ( $T_{max}$ ). Pokud by došlo k rozdílu hodnot mezi teplotou filmu a podkladu může během tepelného procesu docházet k degradaci filmu. Přípustné hodnoty jsou popsány vzorcem  $|\Delta CTE \cdot \Delta T| \leq 0.1-0.3\%$ , kde  $\Delta CTE$  je rozdíl koeficientu tepelné roztažnosti substrátu a filmu a  $\Delta T$  je teplotní odchylka během zpracování. Vysoká tepelná vodivost je velmi důležitá pro chlazení celého obvodu. [8]

4. **Chemické vlastnosti** – Flexibilní substrát by neměl samovolně uvolňovat nečistoty a měl by být chemicky neutrální. Nejvyšší jsou substráty, které brání pronikání atmosférickým plynům. Substráty, které se používají pro OLED aplikace musí mít hodnoty vnikání vodních par pod  $10^{-6}$  g/m<sup>2</sup>/den a rychlost vnikání kyslíku  $10^{-3}$  až  $10^{-5}$  cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/den. [8]
5. **Mechanické vlastnosti** – Vysoký modul pružnosti dělá substrát pevný a tvrdý povrch naopak zlepšuje schopnosti, pokud dojde k nárazu nebo jinému mechanickému poškození. [8]
6. **Elektrické a magnetické vlastnosti** – Vodivost substrátů může sloužit jako jednotný uzel nebo jako elektromagnetické stínění. Magnetické substráty mohou sloužit jako dočasné upevnění při výrobě nebo opracování zařízení.

- **Materiály pro flexibilní substráty**

Flexibilní substráty můžeme dělit do 3 větších skupin: Tenkovrstvý skelný substrát, Polymerní substrát a tenkovrstvý kovový substrát.

Sklo je nejpoužívanější materiál pro substráty u panelů zobrazovacích technologií. Skelný substrát se stává flexibilní pokud je jeho tloušťka pod 100 μm. Výhodou skelného substrátu je vysoká optická propustnost, která je větší než 90%, nízký dvojlom, nízký součinitel tepelné roztažnosti (CTE)  $\sim 4 \cdot 10^{-6}$  °C, je nepropustný vůči vodě a kyslíku, odolný proti mnoha chemikáliím, kvalitní elektrický izolant, a jeho teplotní odolnost může být až 600 °C. [8]

Dalším materiálem pro výrobu substrátů je plast. Jeho největšími výhodami je vysoká flexibilita, nízká výrobní cena, vysoká optická propustnost, a dá se zpracovávat pomocí technologie **Roll-to-roll**. Oproti skelným substrátům má nižší koeficient tepelné a rozměrové stálosti, je méně odolný proti pronikání vody a kyslíku. [8] [36]

Kov patří k dalším materiálům, který se dá ve flexibilní elektronice použít. Abychom docílili pružnosti kovového substrátu, musí být jeho tloušťka menší než 125 μm. Nejběžněji používaný materiál ve výzkumu je nerezová ocel díky svým vynikajícím vlastnostem jako je vysoká odolnost proti korozi a pronikání chemikálií, rozměrově a teplotně stálá, vysoká teplotní houževnatost, která se pohybuje kolem 1000 °C, nebo využitelnost jako pro magnetické stínění. Dalším z řady používaných kovových materiálů je oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Oxid hlinitý jako substrát je nejpoužívanější keramický substrát, s vynikající tepelnou odolností, vysokou mechanickou pevností, odolností proti otěru a malé

dielektrické ztráty. Povrch substrátu z oxidu hlinitého je zcela hladký a má nízkou pórovitost. Jako další kovový substrát se také používá oxid zirkoničitý ( $ZrO_2$ ). Oproti substrátu z oxidu hlinitého má vyšší mechanickou pevnost, lomovou houževnatost a poskytuje dobrou odolnost proti otěru. [8] [36]

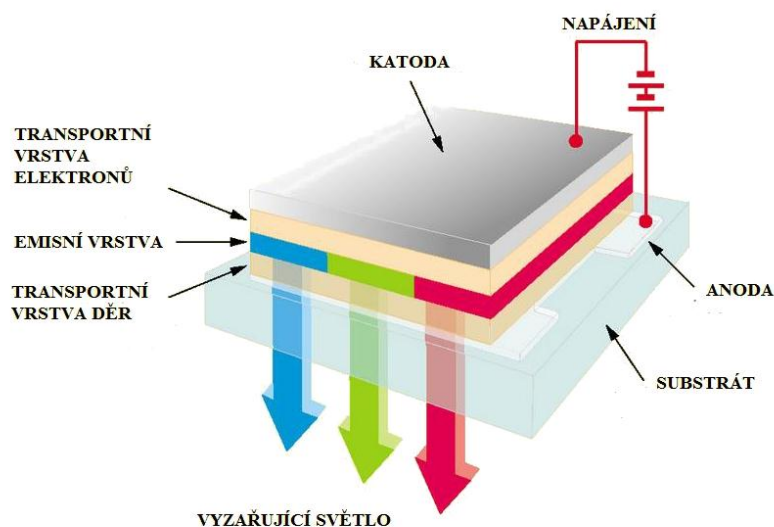
## 1.3 Flexibilní součástky

Tato část kapitoly se bude zabývat již samotnými součástkami vyráběnými pomocí technik pro tištěnou elektroniku. Trendem dnešní doby je výroba nízkoenergetických zařízení s vysokou integrací součástek. Je tedy potřeba, aby tyto součástky měly co nejmenší možnou velikost a zároveň byly výkonné a spolehlivé.

### 1.3.1 Organická světlo-emitující dioda

OLED, nebo-li také Organická světlo emitující dioda je elektronická součástka, která po připojení k elektrické energii, vyzařuje světlo. První tenkovrstvá elektroluminiscence byla objevena roku 1970 a tvořila základ nové generace plochých zobrazovacích panelů. Tento objev byl základem pro organické elektroluminiscenční diody (OLED). Díky rychlému vývoji se později a především dnes OLED staly nedílnou součástí zobrazovacích aparátů (mobilní zařízení, přenosné přehrávače). Postupem času začaly OLED, především OLED s aktivní maticí (AMOLED) pronikat na trh ve velkém množství a aby mohly konkurovat již velmi kvalitní technologii LCD nebo PDP, musely jejich vlastnosti jako je účinnost, životnost, barevný gamut, rozlišení, jas nebo kontrast na vysoké úrovni. To vyžadovalo kvalitní výběr materiálů, výrobní technologie a postupy na vysoké úrovni. [9]

Samotná OLED se skládá ze skleněného nebo ohebného plastového substrátu, transparentní anody tvořené ITO (tenkovrstvá technologie pro elektroniku - směsný oxid india a cínu  $In_2O_3.SnO_2$ ) vrstvou, jedné či více vrstev organického polovodiče nebo jejich směsi a z kovové katody, například Ca nebo Al. Tloušťka diody je od 50 až do 200 nm. [3]



Obr. 2 Struktura OLED

### 1.3.2 Displeje s tekutými krystaly

Displej s tekutými krystaly, spíše známý pod zkratkou LCD z anglického slova Liquid crystal display. LCD je tenké zobrazovací zařízení, fungující na principu tekutých krystalů. Každý obrazový bod (pixel) je ovládán jedním TFT tranzistorem. Aby bylo možné reprodukovat obraz, je zapotřebí 2 základních složek, které jsou světlo a barva. Světlo je zde vytvořeno pomocí podsvětlujících katod (v dnešní době také LED diodami), které zprostředkovávají jasně bílé světlo. Barvu dále vytvářejí už samotné tekuté krystaly. Každý obrazový bod (pixel) se skládá ze 3 sub-pixelů (RGB – červená, zelená, modrá) a každý sub-pixel je zvlášť ovládán TFT tranzistorem. Tekuté krystaly jsou materiály, které působením elektrického pole mění svojí molekulární strukturu a díky tomu jsou schopny určovat množství procházeného světla. Každý pixel je zde ohraničen 2 polarizačními filtry. Tranzistor náležící ke každému obrazovému bodu hlídá napětí, které prochází vyrovnávacími vrstvami a elektrické pole pak způsobí změnu struktury tekutého krystalu a ovlivní natočení jeho částic. [26]

### 1.3.3 Elektroforetické displeje

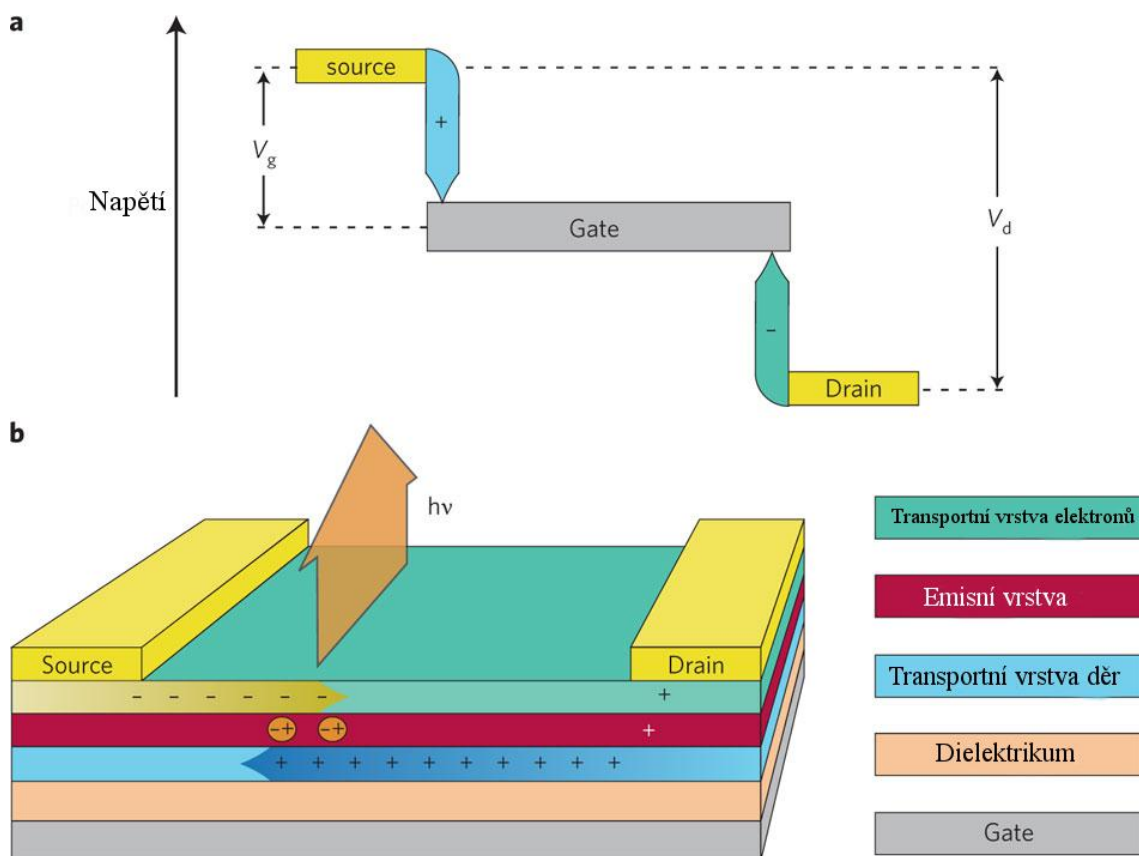
Elektroforetický displej, nebo také elektronický papír (E-papír) je zařízení, které dokáže udržet obraz neomezeně dlouhou dobu, energii spotřebovává pouze při změně obrazu. E-papír

nemá svůj vlastní zdroj světla, pouze odráží sluneční světlo jako klasické papíry. Je zhotoven na ohebném substrátu a jeho tloušťka se blíží velikosti klasického papíru.

### 1.3.4 Organický tranzistor řízený elektrickým polem

Organický tranzistor řízení elektrickým polem, nebo také ve zkratce nazývaný OFET. Posledních 20. let výzkumu v oblasti OFET, má velmi rychlý vzestup. Ačkoli pohyblivost elektronů je mnohem nižší, než u klasických anorganických křemíkových polovodičů, tak nám tato technologie poskytuje mnohem vyšší flexibilitu, šetrnost k životnímu prostředí, nižší ekonomické nároky a nižší hmotnost. Organický tranzistor v porovnání s klasickým FET se vyznačuje tím, že jedna z jeho funkčních částí je zhotovena z organického materiálu, avšak dnešním trendem je výroba plně organického tranzistoru. [11] [13]

Organický tranzistor se skládá z dielektrika, polovodiče, substrátu a dalších 3 elektrod (DRAIN, SOURCE, GATE). Aktivní polovodivá vrstva, která se v OFETech využívá jsou mnoho-aromatické a konjugované materiály včetně malých molekul jako je rubren, tetracen, pentacen a dále pak polymery jako jsou například polythiofen (obzvláště poly 3-hexylthiofen (P<sub>3</sub>HT)), polyfluoren, polydiacetylen, poly p-fenylen vinylen (PPV). [12] [13]



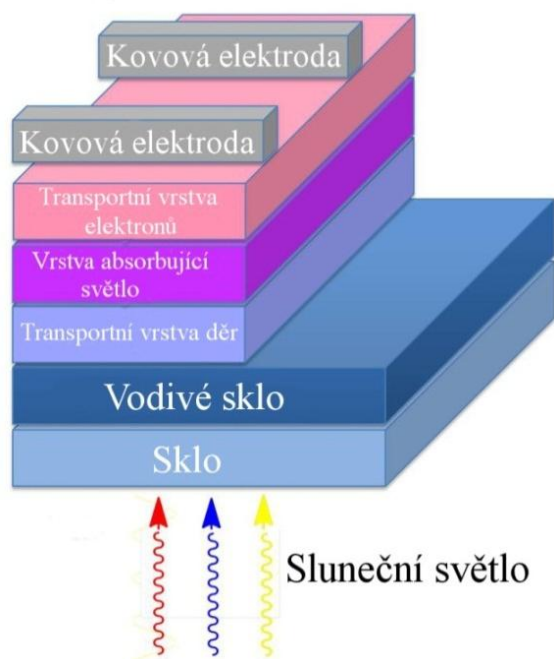
Obr. 3 Struktura OFET (převzato z [29])

### 1.3.5 Tenkovrstvý tranzistor

Tenkovrstvý tranzistor, z anglického překladu Thin-film transistor (TFT) je součástka nejvíce používaná v integrovaných obvodech, v dnešní době především u zobrazovacích LCD, jako řídicí tranzistory tekutých krystalů. Nejčastěji používaným substrátem je sklo nebo plast. Napařované elektrody jsou nejčastěji ze zlata, kvůli jeho výborné vodivosti a elektroda hradla je hliníková. Izolační vrstva je zhotovena z oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nebo z oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ).

### 1.3.6 Organický fotovoltaický článek

Ve zkratce také OPVC. Organické fotovoltaické články jsou složeny z fotodiod. Tyto články jsou schopny v sobě akumulovat sluneční energii a tu poté převádět na energii elektrickou. Oproti klasickému anorganickému solárnímu článku mají tyto organické výhody v nižší hmotnosti, levnější výrobě a vysoké flexibilitě. Bohužel využitelnost těchto solárních článků je stále velmi malá, kvůli jejich nízké účinnosti. Zatím nejlepších výsledků se podařilo dosáhnout profesoru Alanu Heegerovi z Kalifornské univerzity v Santa Barbaře, kdy účinnost organického solárního článku dosahovala 6,5% (dle nových studií se účinnost již pohybuje kolem 9 %). V klasickém provedení se OPVC vyrábí s použitím skleněného substrátu opářeného tenkou průhlednou vrstvou směsného oxidu india a cínu ( $\text{In}_2\text{O}_3\text{Sn}$ ), tzv. vrstvu ITO. Bohužel indium je velmi drahé a vzácné, avšak pracovníkům z výzkumného ústavu ISE se podařilo vyvinout nový organický fotovoltaický článek, kde vrstvu ITO nahrazuje průhledná polymerová elektroda v kombinaci se strukturovanými kovovými elektrodami. Přehledná struktura fotovoltaického článku je na obr. 4. [12] [14] [15]

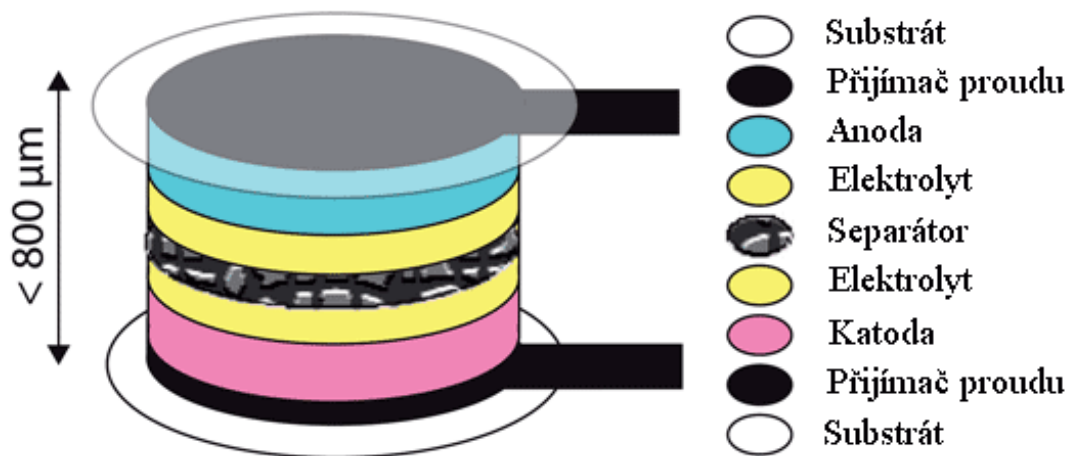


Obr. 4 Struktura OPVC

### 1.3.7 Flexibilní baterie

Tištěné elektronické články, které byly vyvinuty pracovníky Fraunhoferova ústavu pro elektrické nanosystémy (ENAS), jsou velmi zajímavý objev v oblasti flexibilní elektroniky. Tištění elektronický článek má velmi nízkou hmotnost, která je nižší než 1 g. Tloušťka článku je okolo 1 mm. Jelikož neobsahuje žádnou rtuť, je také velmi šetrný k životnímu prostředí. Základní článek je vyráběn na napětí 1,5 V. Baterii lze vytvořit zapojením čtyř těchto článků do série. Článek se skládá ze zinkové anody, která je od katody vyrobené z oxidu manganičitého ( $\text{MnO}_2$ ), oddělena vrstvami elektrolytu a tenkou vrstvou separátoru. Mangan a zinek spolu reagují a tím vytvářejí elektrický proud. Při této reakci se anodová a katodová vrstva spotřebovávají, tím pádem má článek pouze omezenou životnost a nelze ho opakovaně dobíjet. Články se vyrábí metodou síťotisku, která umožňuje nanášet velké množství o velmi malé tloušťce. Odborníci z ústavu ENAS odhadují, že v budoucnu při hromadné výrobě, by cena článku měla být jen velmi malá. Struktura tištěné baterie je dobře zobrazena na obr. 5. [15]





Obr. 5 Struktura flexibilní baterie

## 2 Výrobní technologie pro tištěnou a flexibilní elektroniku

Přesné zařazení výrobních technologií do speciálních kategorií by bylo jen stěží možné. Každá technologie má svoje specifika a navíc jsou procesy, které by se daly zařadit do více skupin nebo některé technologie využívají více směrů a technik. Na začátku by bylo správné si uvést metody, které se při výrobě flexibilní a tištěné elektroniky používají. Jsou to metody postupu nanášení materiálu na daný substrát, jedná se především o metody, kdy je substrát nepřetržitě odvíjen a zpětně navíjen, nebo metoda kdy je každý substrát osazován a zpracováván jednotlivě. Dále pak se výrobní technologie dají rozdělit do skupin, zda využívají při nanášení na substrát materiál, který má svou strukturu v kapalném či plynném skupenství.

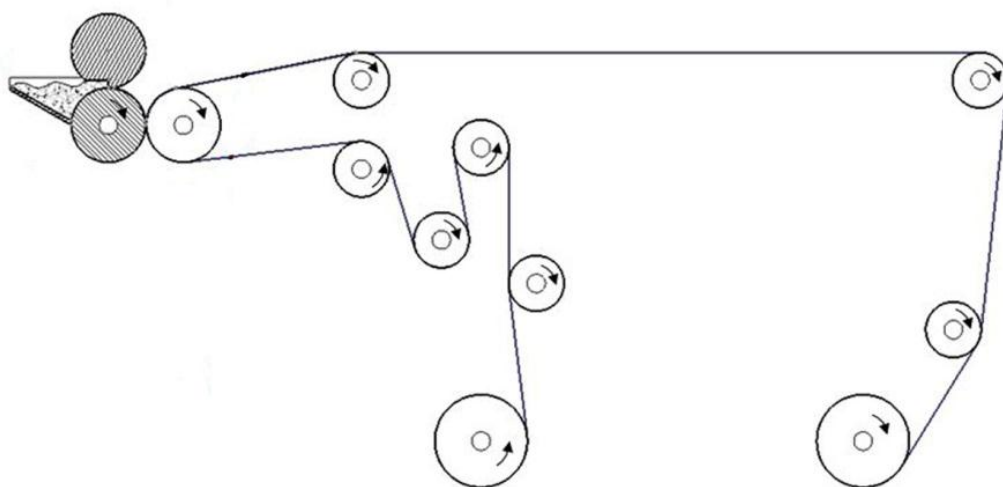
- **Metoda Sheets by Batch (Metoda dávkového zpracování)**

Veškerá elektronická zařízení, jako jsou například zobrazovací panely, se vyrábějí převážně metodou dávkového zpracování. Substráty jsou předem „nařezané“ na tenké, flexibilní desky, které jsou nahrazeny za pevné a neohebné substráty. Během zpracování mohou být desky ovládány mnoha způsoby. [8]

- 1) Na pevném podkladu, směrem nahoru a volně.
- 2) Na pevném podkladu, směrem nahoru nebo dolů, zajištěné v nosiči po celou dobu zpracování.
- 3) Směrem nahoru nebo dolů, usazené v napínacím rámu.
- 4) V pevném rámu, směrem dolů a volně.
- 5) Elektrostaticky připojené k pevnému nosiči.
- 6) Magneticky připojené k pevnému nosiči.

- **Metoda Web by Roll-to-roll (Metoda navíjeného substrátu na válec)**

Flexibilní elektronika je pochopitelně spojována s touto metodou zpracování. Metoda „**Roll-to-roll**“ se především používá pro výrobu velkoplošných zařízení nebo pro výrobu ohebných solárních článků (účinnost až 10000 m<sup>2</sup>/h). Při této technice je substrát nepřetržitě z jednoho válce odvíjen, poté je na něj nanese vrstva materiálu a nakonec je navíjen na druhý válec. Grafické znázornění tohoto procesu je na obr. 6. [8]



Obr. 6 Grafické znázornění techniky Roll-to-roll

## 2.1 Materiály v plynném skupenství

V této části práce se zaměříme na metody a technologie, kdy nanášený materiál je v plynném skupenství. Jedná se především o technologie pro nanášení organických materiálů.

### 2.1.1 Technologie vakuové metalizace

Vakuová metalizace (pokovování) je proces potahování substrátu velmi tenkou kovovou vrstvou při ultra-vysokém vakuu (tlak  $< 5 \cdot 10^{-7}$  bar). Tento proces se často nazývá jednoduše jen „metalizace“. První vakuová metalizace „rotačního papíru“ (flexibilní substrát je připraven na navíjecím zařízení) polymeru s hliníkem byla uskutečněna před 25 lety. Dříve se polymery využívali spíše jako dekorativní nebo izolační prvky, ale v dnešní době se syntetická metalizace využívá především pro funkční nátěry. Během posledních několika let získaly kovy, jiné než hliník rostoucí význam při metalizaci „Reel-to-reel“ polymeru. Při

vývoji technologie vakuové metalizace je kladen velký důraz na 2 hlavní aspekty, na vysokou kvalitu a nízkou výrobní cenu. [18]

Vyšší kvalita znamená:

- **Vyšší vodivost**
- **Hladší povrch**
- **Lepší stejnorodost kovového filmu**
- **Menší vady v kovové vrstvě**
- **Menší vady cívek při navíjecím procesu**

Nižší cena znamená:

- **Větší délka cívek**
- **Kratší odstávky**
- **Větší šíře substrátu**

### **Proces metalizace**

Při této technologii napařování je potřeba kov či jinou nanášenou látku změnit na plynou strukturu (pára), a nanášet ho na substrát. Při tomto procesu je potřeba dosažení extrémně vysokého vakua, kdy musí být tlak nižší než  $2 \cdot 10^{-3}$  Pa. K dosažení dobrých podmínek, musí být celý substrát, který chceme pokovovat, umístěn ve vakuové komoře. Proto velikost výrobních vakuových komor je až 20 m<sup>3</sup>. Pro dosažení takto vysokého vakua se využívá vysokoúčinných vývěv s difuzními čerpadly. Je také velmi důležité rychle dosáhnout ideálních a konstantních vakuových podmínek, aby zde nedocházelo k reakci kovových par se vzduchem. Reakce mezi kovem a kyslíkem by mohla způsobit kontaminaci (znečištění) napařované vrstvy, což by mohlo zapříčinit špatnou přilnavost, nedostatek kovové vrstvy nebo vysoký elektrický odpor. [18]

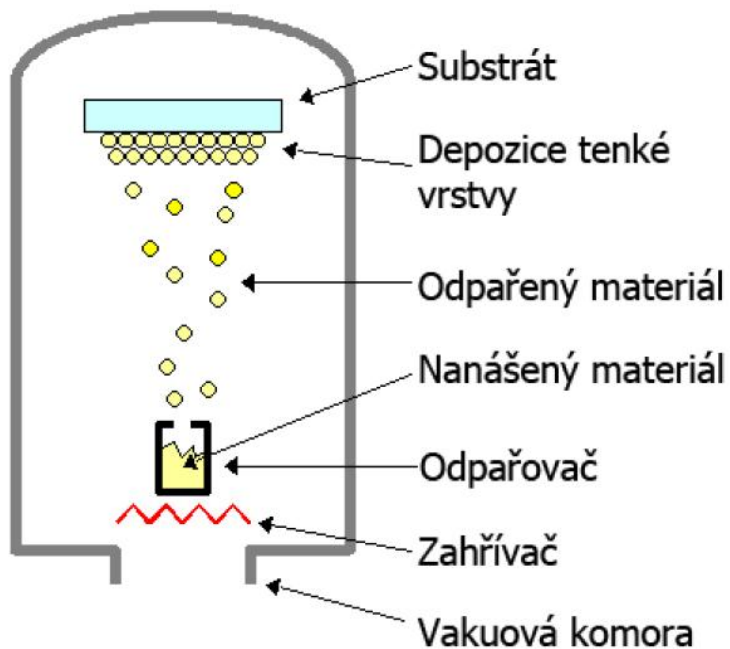
## **Zdroje napařování**

### **1) Metoda tepelného (odporového) napařování (Thermal Evaporation)**

Nejjednodušší způsob napařování kovu, dielektrik či polovodičů je pomocí odporových napařovačů, což je tzv. metoda „boat“ ( napařovací lodičky). „Boat“ jsou vyrobeny ze slinuté keramiky nebo materiálů, které mají vysoký bod tání (Wolfram, Molybden) a umístěny ve

vzdálenosti 10 cm od sebe v celé šířce. Jako elektricky vodivý materiál se používá Borid titaničitý ( $TiB_2$ ) s nitridem bóru (BN), který je zde jako dvousložkový napařovač nebo nitridu hlinitého (AlN), který se používá jako izolátor. Kombinací vodivých a izolačních materiálů se upravují elektrické vlastnosti napařované látky. [18]

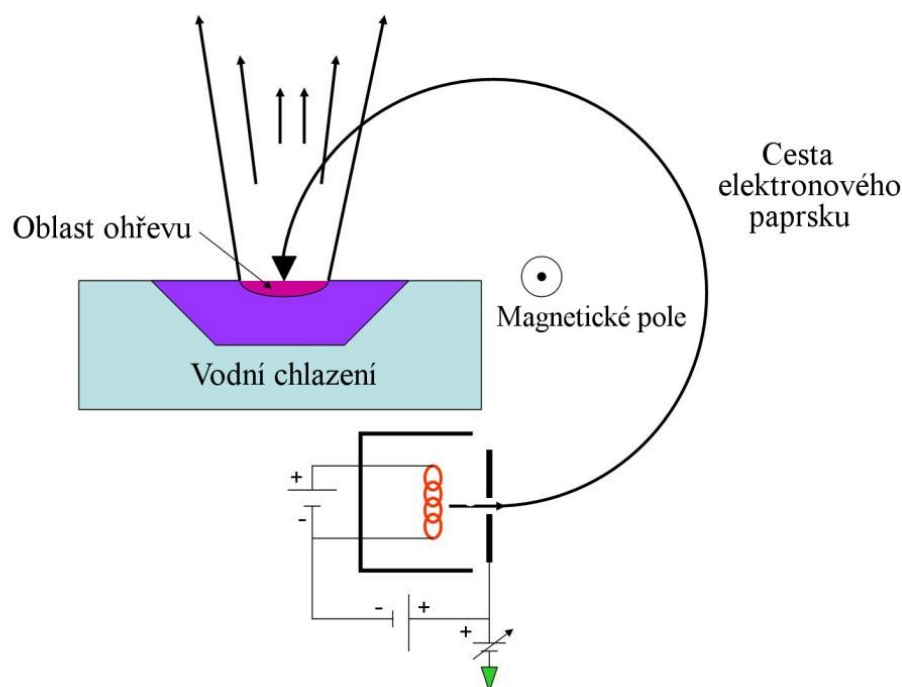
Napařovaná látka je odporově ohřívána až na teplotu 1500 °C. Pokud se napařovaný materiál dostane do styku s „lodí“ okamžitě se rozpouští a mění se na páru. Páry kovu ihned kondenzují na chlazeném povrchu substrátu a vytvoří tenký film. Při tomto procesu dochází k přímočarému pohybu napařovaných molekul. Tato metoda napařování je jedna z nejčastěji používaných. [18]



Obr. 7 Tepelné napařování (převzato z [20])

## 2) Metoda napařování pomocí elektronového paprsku (Electron beam physical vapor deposition)

Tato metoda využívá zahřívání napařované látky pomocí elektronového paprsku. Při této technologii je elektronový paprsek zaměřen na odpařovanou látku, která je vysoce zahřívána a odpařuje se. Elektronové paprskové odpařovače mají oproti odporovým odpařovačům výhodu vyšší teploty při vypařování, čímž se dokáží využívat i materiály jako je Nikl (Ni), Kobalt (Co) nebo Bor (B), které by při použití odporové technologie mohli chemicky reagovat. Nevýhodou této techniky je, že tyto přístroje jsou velmi drahé. Princip procesu je zřejmý z obr. 8. [18]



Obr. 8 Elektronové napařování (převzato z [39])

## 3) Metoda katodového napařování (Sputtering)

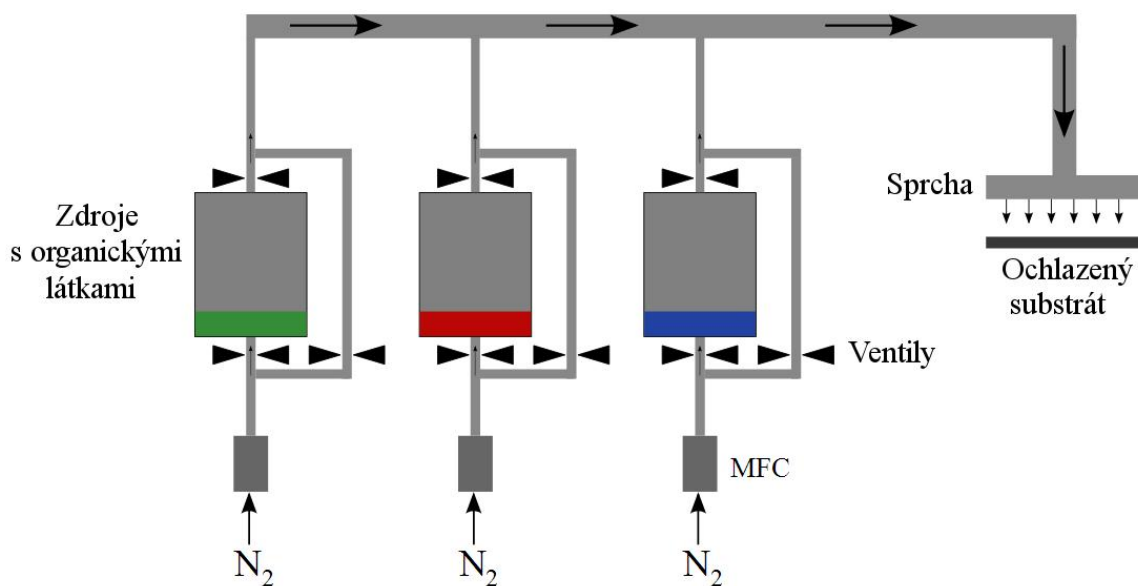
Další známou a používanou metodou je tzv. metoda katodového napařování (sputtering). Při této technologii je napařovaná látka tzv. bombardována iontovými částicemi, poté se uvolňuje a ve velmi malých částicích se „rozprašuje“ na připravený substrát. Rychlost procesu se dá dobře řídit pomocí proudu nebo napětí. Velká pozornost je dbána na přesnost procesu, aby se zabránilo kontaminaci (znečištění) napařovaného materiálu. Pro materiály, které jdou těžko zpracovat předchozími metodami, jako například vrstva cínu dotovaného oxidem india (ITO) se právě využívá metoda katodového napařování. [18]

## 2.1.2 Plynná epitaxe organických sloučenin

Název této metody pochází z anglického slova **Organic vapor phase deposition**. Výzkum posledních let v oblasti organické elektroniky jakou jsou například OLED, OPVC, OFET, organické tenkovrstvé tranzistory, senzory, aktuátory aj. je velmi intenzivní. Především OLED displeje dosáhly na trhu velkého potenciálu ve využívání například v mobilních telefonech, mp3 přehrávačích, protože o jejich výborné vlastnosti jako jsou vysoký jas a kontrast, vysoké rozlišení, nízká spotřeba energie, dobré pozorovací úhly je velký zájem. Předmětem dalšího výzkumu je zlepšení vlastností OLED displejů, OPVC, organických TFT nebo vytvoření plně organického OLED s aktivním maticí. Dnes jsou OLED a OTFT vyráběny především technologií vakuového tepelného napařování. Ovšem tyto vakuové technologie mají omezení v procesním řízení, flexibilitě či vyšší výrobní nákladovosti. Metoda nanášení organických částic napařováním v plynném skupenství (OPVD) byla vynalezena S. Forretem na univerzitě v Princetonu. Tato technologie by měla v budoucnu nahradit již známé technologie vakuového napařování. [18]

### Princip OPVD

Odpařování organického materiálu dochází jednotlivě v oddělených křemíkových potrubí. Při této technologii je v každé z těchto trubek přesné množství nosného plynu, například dusíku. Organické molekuly jsou pomocí nosného plynu doprovázeny do horké komory, kde se mohou smísit 2 a více organických látek a současně se odpařují. V posledním kroku se tyto organické látky, které jsou v plynném skupenství, rozptýlí přes mezní vrstvu a kondenzují na ochlazeném substrátu. Použití nosného plynu při této technologii je za účelem depozice materiálu (nanášení na substrát), kdy vše probíhá při tlaku  $0.13 - 10^3$  Pa. Průběžné očištění nosného plynu zabraňuje znečišťování organických molekul, což zvyšuje kvalitu nanášeného filmu. Viz. celého procesu na obr. 9. [18]



Obr. 9 Grafické znázornění OPVD

## 2.2 Materiály v kapalném skupenství

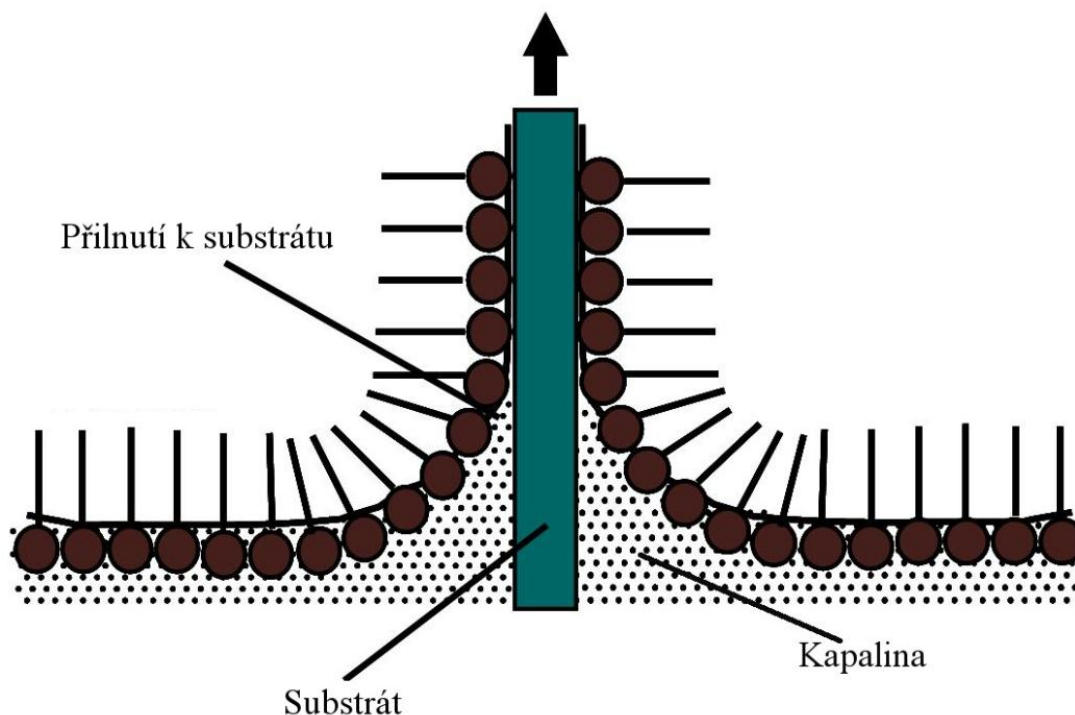
Tato kapitola bude zaměřena na technologie, kdy nanášený materiál je v kapalném skupenství. Převážně se jedná o aditivní metody.

### 2.2.1 Metoda Langmuir - Blodgett

Tato technologie nám umožňuje vyrábět ultra tenké, vysoce uspořádané organické struktury. V této metodě se jedna monomolekulová (Langmuirova) vrstva (tloušťka vrstvy o velikosti jedné molekuly) rozprostře na rozhraní vody a vzduchu a je dále přenášena na pevný substrát. Tento proces může být opakován a tím nám poskytuje možnost nanášení více vrstev na jeden substrát, čímž docílíme vytvoření vícevrstvého filmu. Nanášení tenké vrstvy na substrát probíhá pomocí postupného vnořování a vynořování substrátu do kapaliny přes Langmuirovu vrstvu. Pro správné nanesení vrstvy je velmi důležité udržovat konstantní povrchový tlak. Ten je řízen pomocí počítače systémem zpětné vazby, který udržuje konstantní povrchový tlak a zároveň posouvá bariéru kolem povrchu, aby tloušťka nanášeného materiálu byla všude stejná. U hydrofilních substrátů (schopný vázat vodu nebo rozpouštět se v ní) jako je například sklo nebo oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ) se nejdříve první vrstva



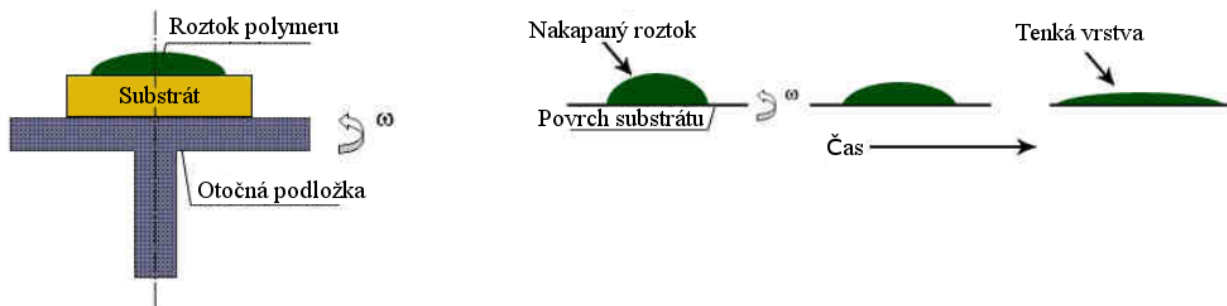
nanáší vnořením, naopak u hydrofobních substrátů (odpuzující vodu) jakou je například silanizovaný oxid křemičitý se první vrstva nanáší vnořením. [19] [20] [21]



Obr. 10 Znárodnění metody Langmuir - Blodgett

### 2.2.2 Rotační nanášení

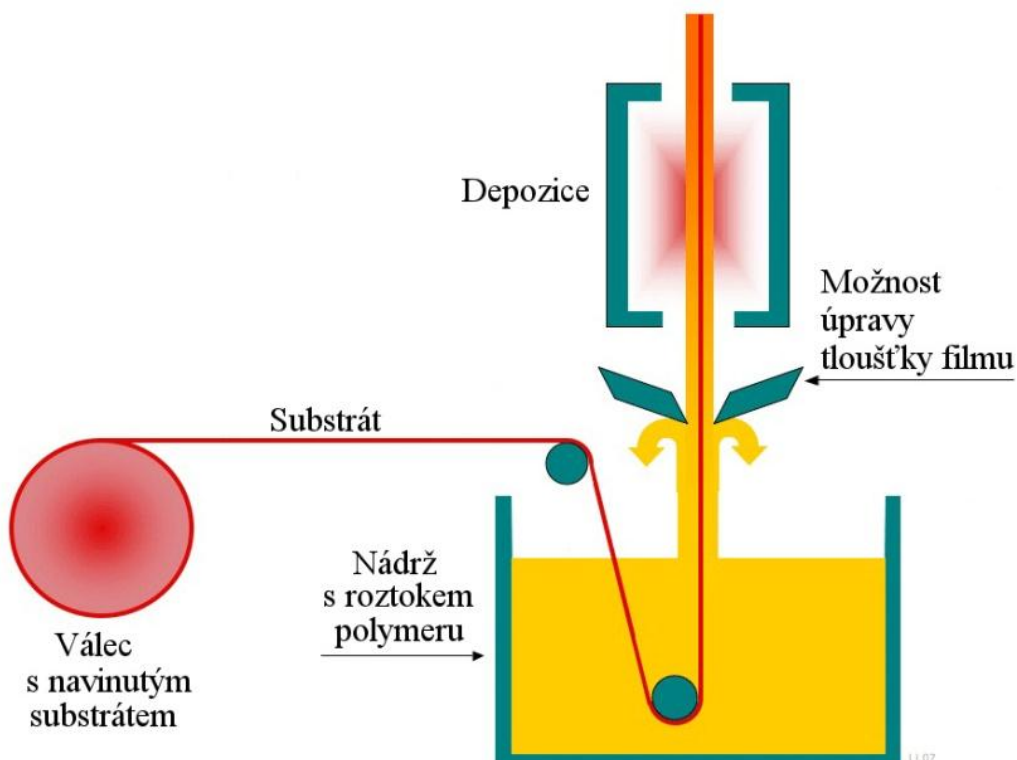
V anglických textech je technologie popsána jako **Spin coating**. Tato metoda využívá rotačního nanášení materiálu na substrát ve velmi tenkých a rovných vrstvách. Princip této technologie je v tom, že na substrát připevnění k rotační podložce se nakápne větší množství roztoku polymeru, poté je substrát roztočen a díky odstředivé síle se vrstva polymeru začne ztenčovat a rozpínat do stran. Roztok je nestálý a začne se odpařovat a stékat po okraji, a ve chvíli kdy dosáhneme požadovaného množství a tloušťky se proces zastaví. Rychlost otáčení rotační podložky se pohybuje kolem 3000 otáček/min, ale dá se velmi dobře regulovat. Tloušťka vrstvy se dá regulovat množstvím nakapaného roztoku nebo úhlovou rychlostí otáčení. Pomocí této metody můžeme vytvářet i vícevrstvé filmy. Princip metody zobrazen na obr. 11. [20]



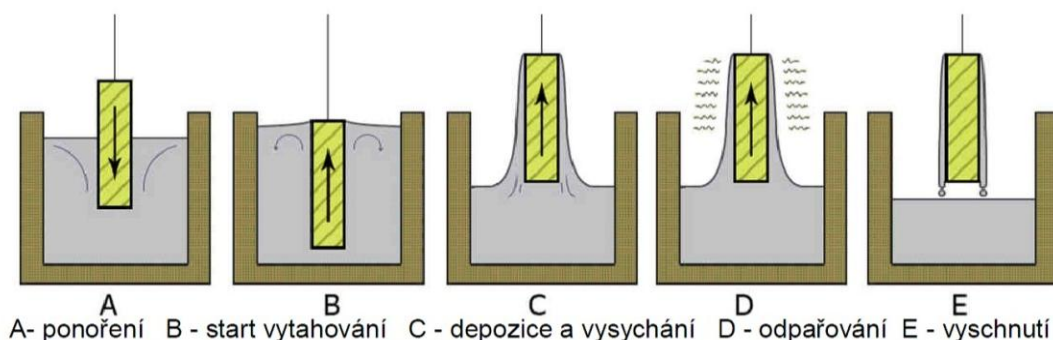
Obr. 11 Grafický popis metody rotačního nanášení (převzato z [20]).

### 2.2.3 Nanášení ponorem

Nanášení ponorem je překlad z anglického **Dip coating**. Princip této metody spočívá v ponořování substrátu do chemicky polarizovaného roztoku, kdy u některých materiálů dochází k přilnutí na substrát. Při ponoření substrátu do roztoku monomeru a oxidantu se monomer přichycuje na substrát, zpolymerizuje a vytvoří tenkou vrstvu. Tuto metodu můžeme opakovat, a tím vytvářet silnější vrstvy či vícevrstvé filmy. Tloušťka vrstvy je ovlivněna dobou, jakou je substrát v roztoku ponořen. Při této metodě můžeme využít postup dávkového obr. 12 nebo kontinuálního zpracování obr. 13. [20] [23]



Obr. 12 Grafické znázornění technologie Dip coating za použití metody Roll-to-roll



Obr. 13 Grafické znázornění technologie Dip coating za použití metody Sheets by batch (převzato z [20]).

## 2.2.4 Nanášení sprejem

Označení této technologie vychází z anglického slova **Spray coating**. U této metody máme 4 možné techniky nanášení sprejem. Jednou z nich je studený nástřik. Při tomto procesu probíhá urychlování práškových částic nebo roztoku dopovaného materiálu stlačeným plynným médiem v trysce a dochází k rozstříkování nanášeného materiálu na povrch. Hnací plynné médium je zde použit vzduch a celý proces probíhá za pokojové teploty. Touto technologií jsou nanášeny povlaky z mědi nebo hliníku. [16]

Další možností je termický (teplý) nástřik. Materiál je zde nástřikován v ohřátém nebo roztaveném stavu. Využívá se hlavně pro větší šířky nanášeného materiálu (od 20 mm až po jednotky milimetrů). Jako nanášený materiál se nejvíce používají slitiny kovů, plasty, keramiky nebo kompozitní materiály. [16]

Třetí možností je HVOF sprejování (High velocity oxygen fuel spraying). Jde o metodu, kdy dochází ke směšování acetylenu a kyslíku jako reakčních plynů s dusíkem, který je zde jako transportní plyn a nanášeného materiálu. V další fázi procesu je tato směs zapálena a dochází k detonaci. V tuto chvíli jsou prachové částice nanášeného materiálu urychleny až na rychlost  $750 \text{ ms}^{-1}$  a dochází k uchycení na připravený povrch. Vzdálenost mezi povrchem zařízení a výtokem z trysky je 100-120 mm. Po každém výbuchu je spalovací komora pročištěna dusíkem. Topný plyn zde dosahuje teploty až  $4000 \text{ }^\circ\text{C}$ . [16]

Poslední možností je plasmové sprejové nanášení. Nanášený materiál ve formě prášku je injektován do vysokoteplotního plasmového oblaku, kde dojde k jeho ohřevu na velmi vysokou teplotu a k urychlení směrem k nanášenému povrchu. [16]

## 2.2.5 Elektropolymerace

Počátky této metody sahají až do roku 1983, kdy Jean-Francois Fauvarque uvádí syntézu polyfenolu elektro-redukční asistovanou katalýzou Niklu (Ni). Tato metoda funguje na principu rozpouštění monomeru v roztoku, v kterém je ponořena pomocná elektroda a také substrát s elektrodami na kterém se bude vytvářet vrstva. V následujícím kroku se na obě elektrody připojí zdroj napětí, čímž začne obvodem protékat elektrický proud a na elektrodách senzoru se začne vytvářet tenká vrstva. Tloušťku této vrstvy můžeme ovlivnit velikostí připojeného napětí, neboli množstvím protékaného náboje. Tímto způsobem lze vytvářet velmi tenké vrstvy na vodivých elektrodách. [20] [22]

### Metoda konstantního napětí

Tento druh elektropolymerace spočívá v udržování konstantního napětí mezi elektrodami po celou dobu procesu. Tloušťka vytvořené vrstvy je závislá na velikosti přiloženého napětí a také na čase, po kterém jsou elektrody vnořeny v roztoku. [20]

### Metoda konstantního proudu

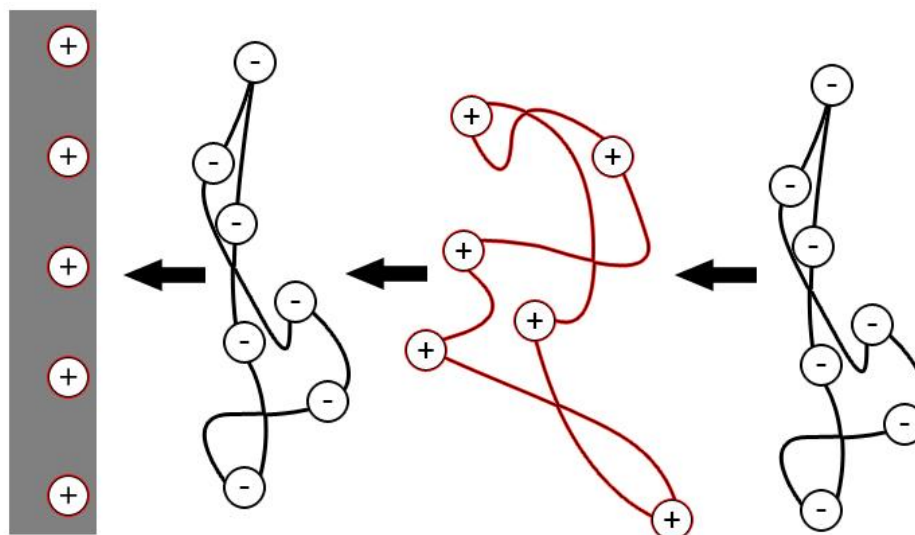
Při této metodě je po celou dobu procesu udržován konstantní proud. Tato metoda se ukázala jako velmi neuspokojivá, protože regulace tloušťky nanášené vrstvy pomocí proudu jde jen velmi složitě. [20]

### Pulzně signální metoda

Při této metodě se nahrazuje stejnosměrný zdroj, zdrojem harmonických signálů. Tloušťku a vzhled vrstvy regulujeme pomocí velikosti amplitudy harmonického signálu, poměrem délky pulzů a dobou mezi nimi nebo také střední hodnotou signálu. I když je tato metoda dobře regulovatelná je stále velmi komplikovaná, proto nejvíce používaná je metoda konstantního napětí. [20]

## 2.2.6 Metoda Layer-by-layer

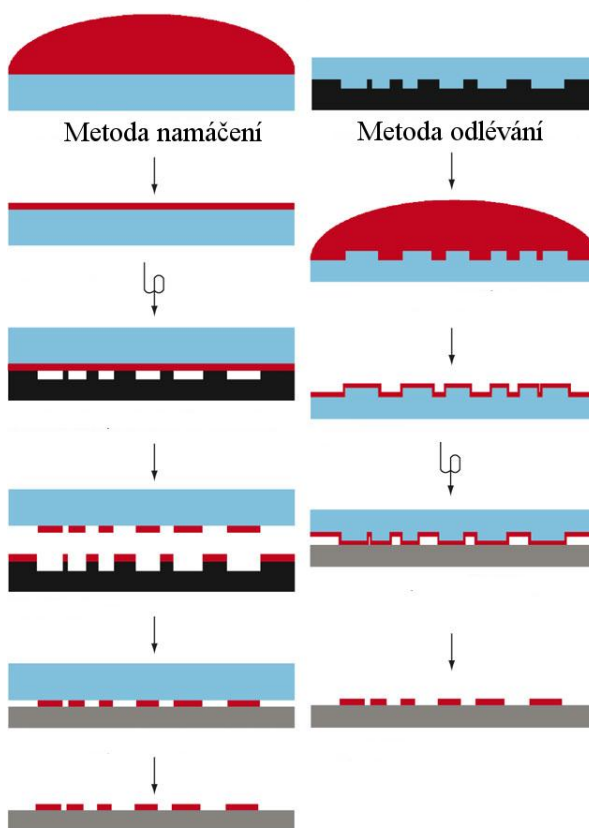
V překladu se tato technologie dá nazvat jako **Vrstva na vrstvě**. Metoda založená na střídavém namáčení substrátu v kationtovém a aniontovém (kladném a záporném) roztoku. Při této metodě se postupně mění vrstvy s opačnou polarizací obr.14. Šíře vrstvy závisí na počtu opakování. [20]



Obr. 14 Detailní popis metody Layer-by-layer (převzato z [20]).

### 2.2.7 Mikrokontaktní tisk

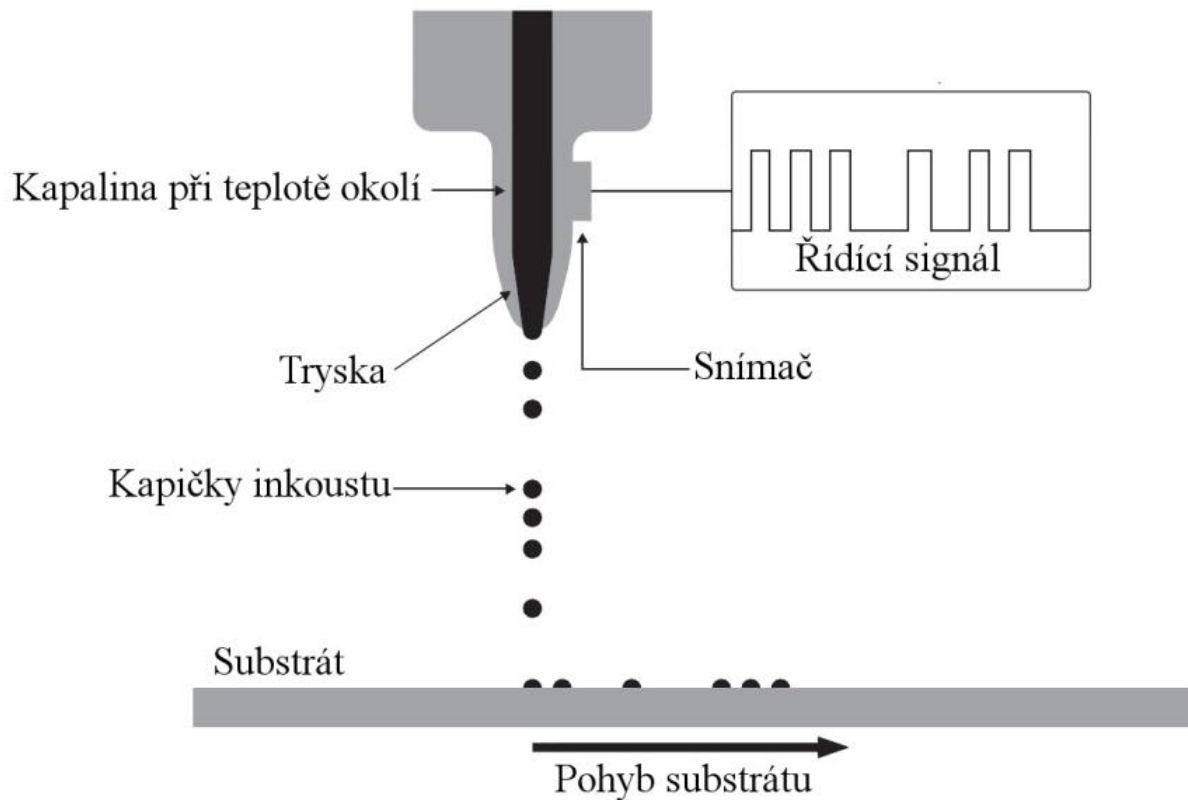
Z anglického **Microcontact printing**. Hlavní součástí této technologie jsou polydimethylsiloxanová (organický polymer na křemíkové bázi, jedná se o bezbarvou a průhlednou látku, která je netoxická chemicky inertní) razítka. Tato razítka se používají k povrchovým depozicím molekul. Postup této metody spočívá v tom, že razítka jsou nejprve obarvena molekulovým roztokem, nejčastěji thioly, které vytvoří vrstvu, nebo v případě velmi malých molekul se do polydimethylsiloxanu absorbují v podobě pevného roztoku. Poté jsou razítka kompletně vysušena a lisována na připravený povrch. Jelikož jsou razítka velmi měkká vytvoří shodný kontakt s povrchem a molekulami, které jsou z razítka na povrch převedena. Tato metoda je velmi efektivní pro povrchové strukturování. Vzory se dají vytvářet na různých materiálech a dokonce i na nerovných površích. Pokud je povrch vzorovaný z více jak jednoho druhu molekul, je možno použít opakované tisknutí. [27]



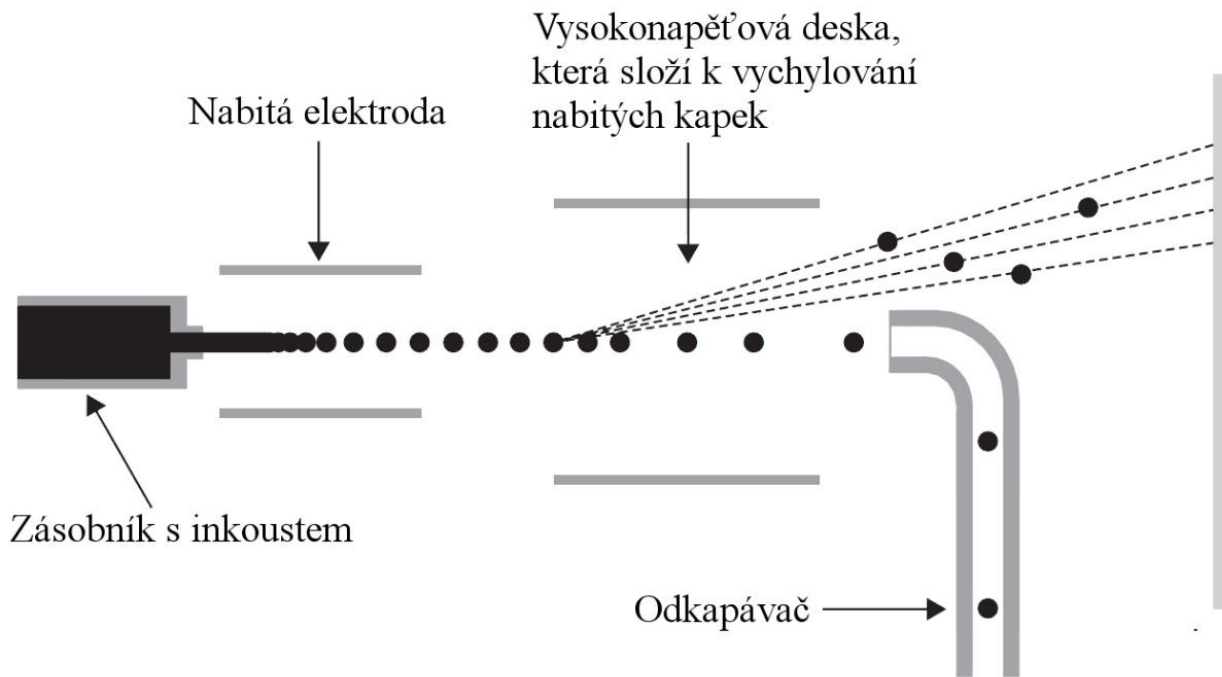
Obr. 15 Graficky znázorněné dvě metody mikrokontaktního tisku

## 2.2.8 Inkoustový tisk

Inkoustový tisk patří do třídy přímo zapisovacích procesů. Díky své jednoduchosti a všestrannosti: možnost tisku na jakýkoli substrát, libovolné velikosti, s rozlišením až 200 linek na 1 cm, patří mezi velmi používané metody, především v oblasti jakou jsou elektroluminiscenční zobrazovací zařízení nebo organické tranzistory. Podobně jako u klasické domácí tiskárny, jsou zde malé kapičky inkoustu funkčního materiálu opakovaně dávkovány na připravený povrch. Kapky o průměru 15-200  $\mu\text{m}$  a objemu několik pikolitřů jsou deponovány na povrch frekvencí od několika kHz až do 1 MHz v závislosti na kvalitě zařízení. Pro tuto technologii existují 2 různé přístupy. Jedním z nich je *Continuous inkjet* (CIJ) neboli *kontinuální inkoustový tisk* zobrazený na obr. 16a, druhým je tzv. *Drop on demand* (DOD) v doslovném překladu *tisk na požádání* na obr. 16b. [32]



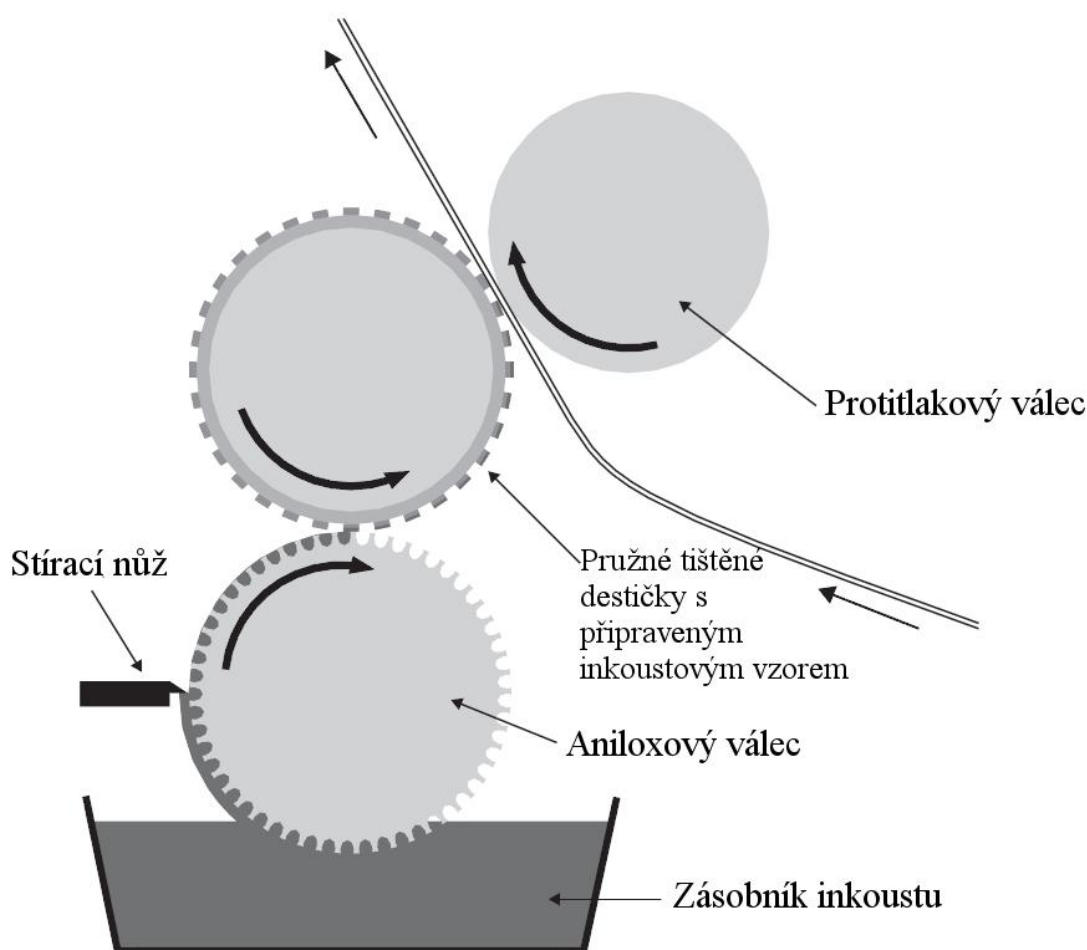
Obr. 16 Grafické znázornění metody Countinuous injekt (převzato z [32])



Obr. 17 Grafické znázornění metody Drop on demand (převzato z [32])

## 2.2.9 Flexografický tisk

Flexografický tisk, nebo jednoduše nazváno gumotisk je metoda, která používá gumové nebo polymerní válcové tiskové desky, které mají na svém povrch požadovaný vzor. Tyto válcové desky jsou namáčeny v roztoku polymeru a jsou nanášeny na připravený substrát. Inkoust uložený v zásobníku je v kontaktu s dávkovacím válcem. Tento válec se odborně nazývá aniloxový válec a je složen z buněk určených velikostí a tvarů, které jsou schopné absorbovat inkoust. Stírací nůž poté setře přebytečný inkoust z povrchu dávkovacího válce. V následujícím kroku dojde k přenosu inkoustu z dávkovacího válce na válec s pružnými destičkami s připraveným vzorem. Tyto destičky vytvoří na připraveném substrátu definovaný vzor. Pro tuto technologii se využívá techniky Roll-to-roll. Celý proces je zřetelný z obr. 18. Flexotiskové barvy mají nízkou viskozitu, a mohou být vyrobeny z funkčních organických materiálů nebo suspenzních částic. Rozlišení vzorů může dosahovat až 75 řádků na centimetr [32]



Obr. 18 Princip metody Flexografického tisku

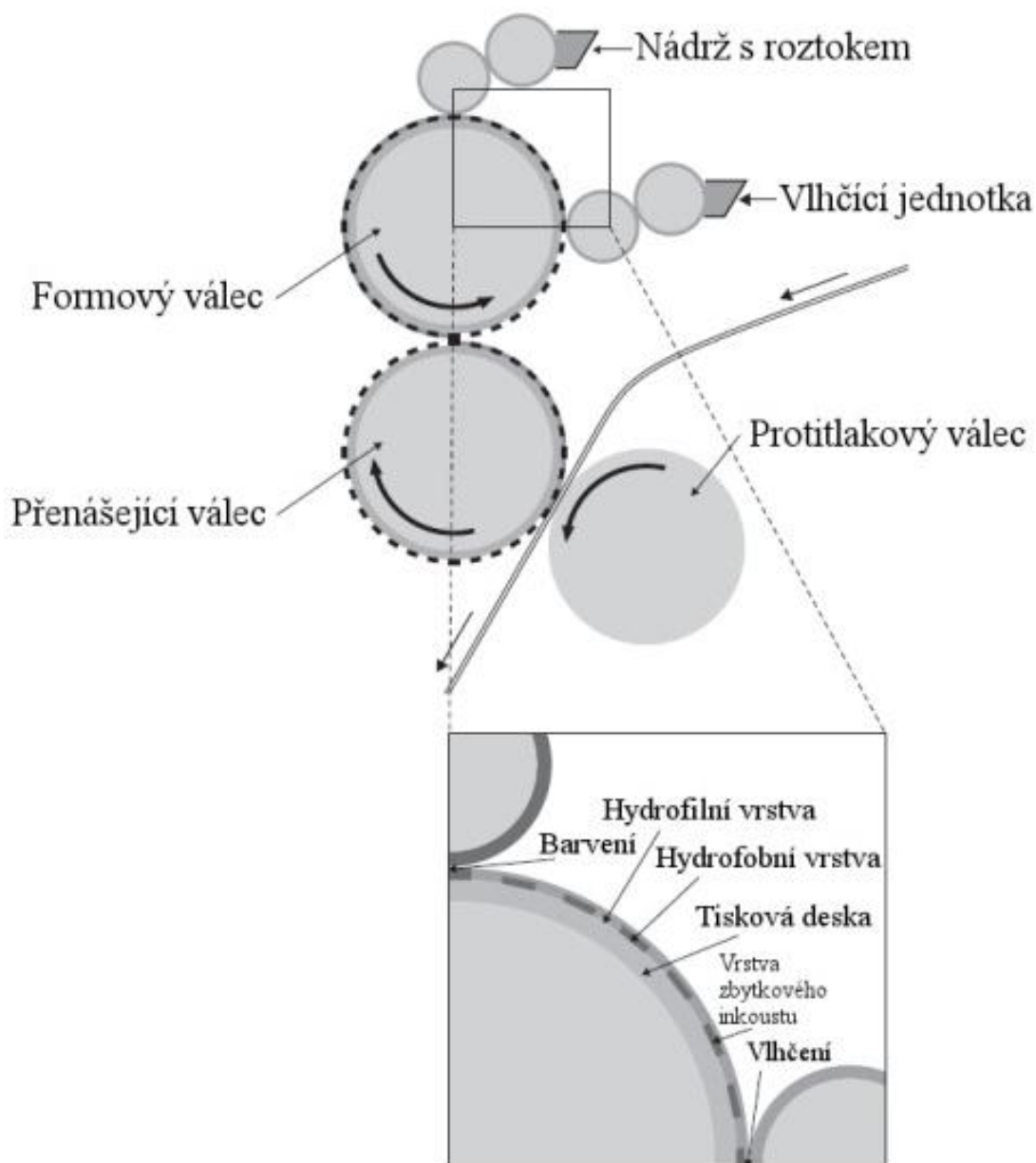


## 2.2.10 Ofsetový tisk

Další z tiskových metod je tzv. ofsetový tisk. Patří mezi z jednu nejvíce používaných metod tisku. Podrobnější popis této metody je potřeba rozebrat na dvě rozdílné techniky. Jednou z nich je mokrá (klasický) ofsetový tisk a druhou je bezvodý (suchý) ofset. [32] [33]

### Mokrá ofset

Smysl tohoto tisku je založen na odlišných fyzikálně-chemických vlastnostech tiskové formy obepínající formový válec. Tisková forma je hliníková deska, na jejíž jedné straně jsou nanášeny 2 rozdílné vrstvy. Vrchní vrstva je hydrofobní (odpužující vodu) a spodní vrstva je hydrofilní (přitahující vodu). Nanášení dat na formový válec se provádí pomocí laseru, který naruší hydrofobní vrstvu v místech, kde nemá tisknout. V místech kde má forma tisknout se vrstva nechá nenarušena. Tato tisková forma projede tzv. vývojkou, která z netisknoucích míst vyplaví laserem narušenou hydrofobní vrstvu. Tisková forma se poté napne do stroje na formový válec. Jak se válec točí, rolují po něm shora většinou 4 válce s připraveným roztokem a jeden s vodou. To znamená, že tisková forma je stále ve styku s vodou i roztokem a záleží pouze na vlastnostech tiskové formy, kam se barva nanese a kde bude prázdné místo. Zároveň se s formovým válcem točí další přenášečící válec, na který se každé otočení přenáší barva z tiskové formy. Na tomto válci je už roztok bez vody, a zde je také přenášen vzor na připravený substrát. Aby měl dotyk substrátu a válce přenášečícího tlak je pod ním protitlakový válec. Na obr.18 je kompletně zobrazena tato metoda. [32] [33]



Obr. 19 Princip metody mokrého ofsetu (převzato z [32])

## Suchý ofset

Tisková forma je potažena vrstvou na které barva neдрží. Voda je zde nahrazena povrchovými vlastnostmi dvou rozdílných vrstev nanesených na tiskové formě. Je to krycí silikonová vrstva a polymerová vrstva. Silikonová vrstva tvoří netisknoucí část, tj. ta která barvu odpuzuje a naopak polymerová část tvoří tu vrstvu, která barvu přijímá. Při expozici se horní silikonová vrstva odstraní a to nejčastěji vypálením laserovým paprskem. Tím se odhalí spodní polymerová vrstva, která barvu přijímá. Tato metoda dále vyžaduje vlastní termoregulační systém, který udržuje stálou teplotu tiskových válců. Kdyby byla teplota příliš

vysoká, mohl by roztok přilnout na netisknouce místa, a tím by mohlo dojít ke špatnému nanesení, a naopak pokud by byla teplota nízká, bylo by složité roztok nanést. Nevýhodou suchého ofsetu po dokončení tisku, je vznik malých prachových částic, které se olupují z tiskové desky na pomezí tisknoucích i netisknoucích prvků. Projevují se malými bílými místy v tištěném obrazu. Proto se suchý ofset používá především pro nízkonákladové aplikace. [32] [33]

## 2.2.11 Tampónový tisk

Tampónový tisk patří mezi specifickou část nepřímého hlubotisku, při kterém nanesený kapalný roztok na povrch vyleptané formy je přenášen na povrch tampónu a dále při jeho deformaci podle tvaru potiskovaného předmětu tlakem na potiskovaný předmět. Podle tvaru tiskové formy se odlišují dva různé typy tampónových tisků. První metodou je tampónový tisk s plochou tiskovou formou a druhá metoda je rotační tampónový tisk, kdy tisková forma (klišé) má podobu hlubotiskového válce. Tiskovou formou je deska nebo válec. Do povrchu tiskové formy je pomocí speciální technologie vyleptán motiv s pravidelnou hlubotiskovou sítí, která slouží jako podpora pro stěrač. Dle charakteru tiskových prvků můžeme hlubotisk rozdělit na:

**Klasický hlubotisk:** má tiskové body konstantní v ploše, ale variabilní v hloubce.

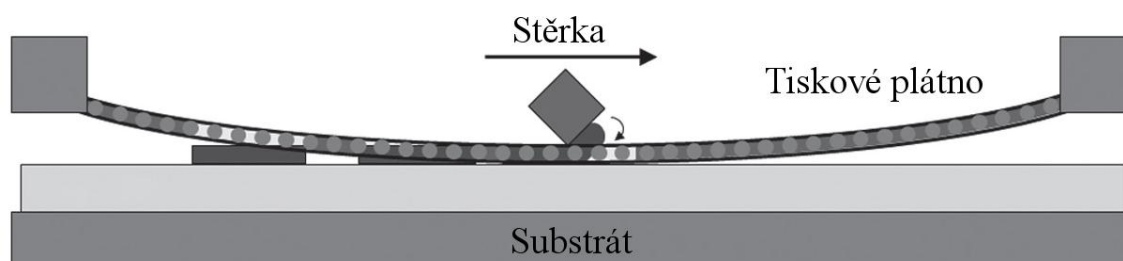
**Autotypický hlubotisk:** má naopak tiskové jamky variabilní v ploše, ale konstantní v hloubce.

**Poloautotypický hlubotisk:** tato metoda má tiskové jamky variabilní jak ploše, tak i v hloubce.

Přenosovým prostředkem, především polymerního roztoku, je tzv. prostorový tampon, který je vyroben ze speciálního elastického materiálu. Tisková forma (klišé) spolu s tamponem mají rozhodující význam pro kvalitu tisku. Podle požadavků jaký je kladen na tisk, se používají různé druhy tiskových forem jako například: ocelová, měděná, plechová nebo plastová forma. [36] [37]

## 2.2.12 Metoda sítotisku

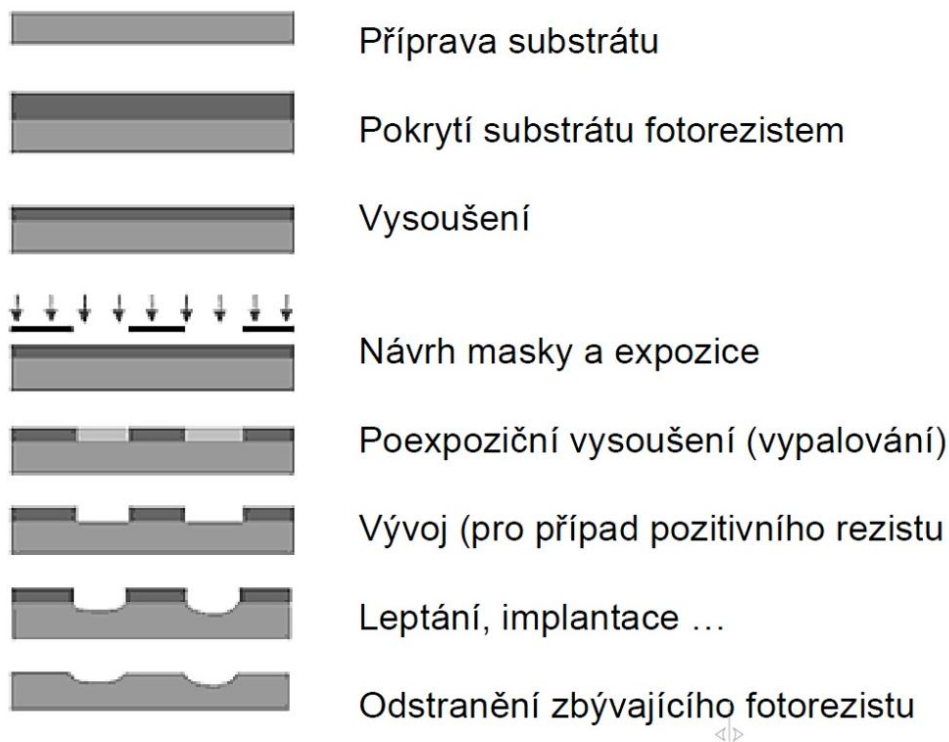
Ve výrobním procesu elektroniky se sítotisk stal nepostradatelnou technologií. Pro tisk mikroelektronických zařízení je sítotisk nejjednodušší a nejlevnější technologie. S rozvojem moderní elektroniky, která vyžaduje miniaturizaci a velkou integraci součástek je potřeba rozvíjet rozlišení tiskových řádků a mezer. Hlavní součástí je síto, kdy vlákna jsou nejčastěji vyrobené z nerezové oceli, nebo plastové (polyester). Přes toto síto je protlačována pasta na připravenou izolační podložku, jedná se tedy o aditivní metodu. Pasta je protlačována pomocí tzv. flexibilního nože. Různým nastavením síta se dá snadno regulovat množství nanášené pasty nebo tloušťka nanesené pasty. V sítotisku se při nanášení využívá různých druhů past, které mají tixotropní kompozici a skládají se ze 4 složek: dočasněho pojiva, permanentního pojiva, funkční složky a rozpouštědla. Pasty mohou být vodivé, nevodivé nebo dielektrické. V další fázi procesu se nanášená pasta vysušuje. Nevýhodou této technologie je její nízká rozlišovací schopnost, která se pohybuje okolo 100  $\mu\text{m}$ . Přímé využití má tato metoda spíše pro výrobu tlustovrstvých zařízení. [31] [32]



Obr. 18 Grafické znázornění metody sítotisku (převzato z [32])

## 2.3 Nanolitografické metody

Litografie je technologický proces sloužící pro vytváření velmi jemných struktur, především mikrostruktur a nanostruktur. Princip litografie je přesně popsán na obr. 20. [30]

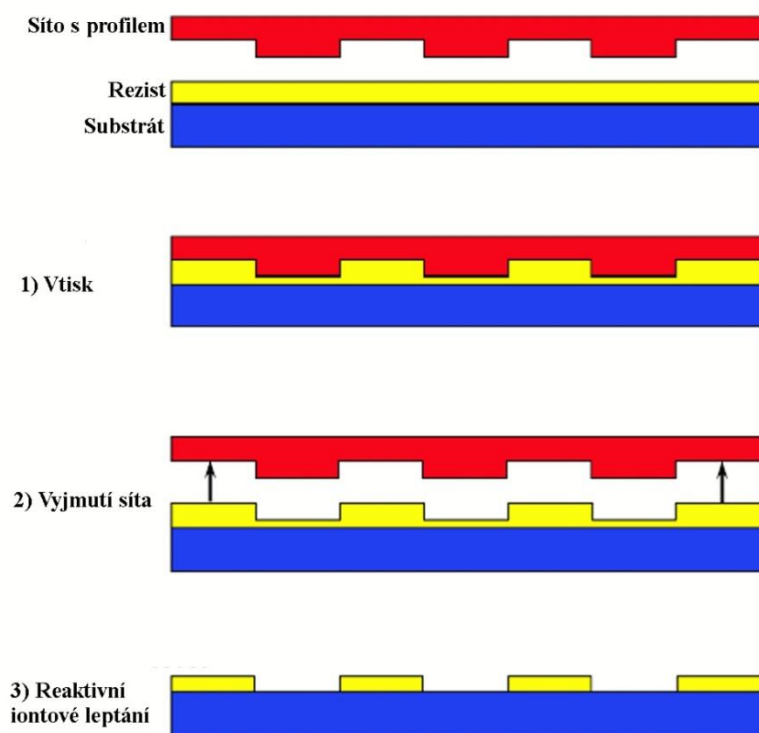


Obr. 21 Grafický princip litografie (převzato z [32])

V prvním kroku se nejdříve připravený substrát vyčistí od všech nečistot. V další části procesu se na připravený a čistý substrát nanese tenká vrstva rezistu, který se dále vysuší a vytvrdí. Poté se na takto připravený substrát s rezistem nanese maska se vzorem. Následuje tzv. expozice, tj. vlastní ozáření fotosenzitivního povlaku přes masku s požadovaným vzorem. Dalším krokem je odstranění rezistu, a to pomocí chemického procesu, tj. odleptání, a nebo fyzikálním procesem, kdy je použita metoda odpařování. Rezist v obou případech může být dvojího charakteru, a to pozitivního, kdy se odstraňuje přímo exponovaná část, a nebo negativního, kdy je naopak odstraněna neexponovaná část. Po dokončené expozici a odleptání (nebo odpaření), se odstraní i přebývajících rezist.

### 2.3.1 Nanotisková litografie

Nanotisková litografie (anglicky: Nanoimprinting lithography – NIL) je speciální druh litografie s vysokou propustností vzorkování polymerních nanostruktur. Tato technologie je vysoce přesná ale zároveň s nízkými náklady na výrobu. Ve srovnání s ostatními litografickými metodami při práci s rezistem, používá nanotisková litografie přímých, mechanických deformací. Tvrdá forma, která má profil v jednotkách nanometrů je vtačována do polymerního substrátu s naneseným rezistem a tím vytváří rozdílný profil (otisk) v substrátu. Kvalita otisku závisí na tloušťce rezistu. Dalším krokem je zpracování (vytvrzení) rezistu pomocí reaktivního iontového leptání. Celý proces probíhá při řízené teplotě a tlaku. Minimální velikost motivu může být stejně velká jako velikost molekuly rezistu. Hlavní využití této technologie je pro optické, fotonické a biologické aplikace. [24] [25]



Obr. 22 Graficky zobrazený princip nanotiskové litografie

### 2.3.2 Litografie elektronovým svazkem (Electron beam lithography)

Podobně jako u nanotiskové litografie, tak i litografie elektronovým paprskem vytváří do připravené substrátu, na kterém je nanesený rezist, vzor. Princip této metody spočívá v ozařování pomocí elektronového paprsku, který vytváří vzory na ploše pokryté velmi tenkou vrstvou elektronového rezistu. Šířka těchto paprsků se dnes pohybuje okolo 10 nm, při

použití urychlovacího napětí až 30kV. Při tomto procesu je povrch značně ohříván, proto se musí dbát na dobré chlazení, aby vlivem vysokého tepla nedošlo k degradaci zařízení. Tento proces je sekvenční (metoda Sheets by Batch). Výhodou této technologie je možnost difrakčního omezení světla (to je jev, u kterého se vlnění dostává do oblasti geometrického stínu. Tento proces lze sledovat, když prochází světlo štěrbinou, jejíž šířka je srovnatelná s vlnovou délkou světla) a tím vytvářet velmi malé vzory v jednotkách nanometů. Při této technologii je také důležité vytvoření vysokého vakua. Největší využití má tato technologie v oblasti integrovaných obvodů nebo pro vytváření velmi jemných struktur pro nanotechnologii. Problémy však nastávají pokud metoda není přesná nebo není dosaženo potřebných podmínek při procesu a může docházet k vychylování paprsku a tím i k degradaci celého zařízení. [26] [27] [28]

Jednou z modifikací této technologie je *Projekční elektronová litografie*. Jedná se o metodu, která se od klasické elektronové litografie liší tím, že zvyšuje výkonnost celého procesu a odstraňuje dlouhé svazkové skenování. Princip této metody spočívá v průchodu svazku elektronů skrz křemíkovou masku a následného soustředění za pomoci čoček na povrch podložky. [27]

### 2.3.3 Litografie zaostřeným iontovým svazem

V litografii iontovým svazkem je vysoce zaměřený iontový svazek, který je zaměřen na cílový substrát s rezistem. Iontový svazek skenuje povrch připravené vzorku, a díky tomu dostáváme zvětšený obraz, a můžeme nahlížet na jeho mikroskopické vlastnosti a dále s tímto obrazem pracovat a upravovat ho. Ve srovnání s elektronovou litografií mají ionty mnohem větší energii než elektrony a také mnohem nižší rozptyl v rezistu, díky tomu dosahují vyšší přesnosti. Zdrojem energie jsou zde kapalné kovové ionty. [27]

### 2.3.4 Extrémní ultrafialová litografie

Jedna z fotolitografických metod, odvozená z anglického názvu *Extreme ultraviolet lithography* (EUV). Jde o výrobní technologii, která využívá ultrafialového záření s velmi krátkou vlnovou délkou, která se blíží až k měkkému rentgenovému záření. Vlnová délka ultrafialových paprsků je až 14 nm. Nároky na výrobu jsou u této technologie vysoké, je třeba dbát na extrémní čistotu, protože je potřeba wafery (základní disk z polovodiče používaný jako substrát, na kterém se vytvářejí mikroobvody) zpracovávat při ultra vysokém vakuu.

Vakuum, je zde potřeba vytvářet kvůli ultrafialovému záření, které je za normálních okolností pohlcováno okolními plyny. Vysoká čistota je také nutná u optické soustavy, proto se místo klasických optických čoček používá tzv. reflexní optika. EUV je stále ve vývoji, ale její využití například praktikuje firma INTEL, která u 22 nm technologie pomocí EUV chce vyrábět procesory až o frekvenci 10 GHz. [27] [30]

### 2.3.5 Rentgenová litografie

Další z řady fotolitografických metod. Její název vychází z anglického *X-ray lithography* (XRL). Jedná se o jednu z nejdokonalejších technologií pro výrobu nanostruktur. Krátké vlnové délky okolo 0,8 nm překonávají difrakční limity v rozlišení mnohem lépe než ostatní technologie. U XRL rentgenové paprsky ozařují stínící masku, která je umístěna v blízkosti podložky, která je pokryta rezistem. Oproti ultrafialové litografii, se zde nepoužívají žádné čočky, pouze kolimační zrcadla. Hluboká rentgenová litografie používá ještě kratší vlnové délky, které se blíží až k 0,1 nm. [27] [30]



## 3 Vývoj v oblasti tištěné a flexibilní elektroniky

### 3.1 Problémy při hromadné výrobě flexibilní elektroniky

Flexibilní obvody se nyní dají vyrábět s použitím konvenčních anorganických a organických materiálů. Ukládání elektricky aktivních materiálů na flexibilní substráty se musí do budoucna optimalizovat. V dnešní době se převážná část elektronických zařízení vyrábí metodou postupného zpracování a jednou z možných výhod flexibilních substrátů je kontinuální výroba, což by dramaticky změnilo způsob výroby. Vakuová depozice pomocí metody kontinuálního zpracování již byla vyzkoušena při výrobě organických solárních článků. Díky tomu by se výroba zrychlila a snížily by se celkové náklady. Tato metoda má ale úskalí ve složitosti a náročnosti, protože kombinuje náročné mechanické konstrukce s materiálovými procesy. [8]

Jedním z hlavních problémů je vytvoření kontinuální výroby, která by byla levná, rychlá a efektivní. Například výroba zařízení metodou roll to roll a technologií vakuové depozice je velmi náročná na vysokou čistotu prostředí, aby se při nanášení do depozitovaného materiálu nedostaly nečistoty. Při stejném procesu je také velmi nutné dodržení konstantního vakua, a to by bylo možné jen v případě, kdyby celý proces byl uzavřený. Tím by však vznikla vysoká náročnost na výrobní stroje, které by byly vystaveny extrémně nízkému tlaku a od toho by se odvíjela i nemalá velikost výrobních hal. [38]

Dalším problémovým faktorem je využití flexibilních zařízení pro komerční účely. Aby toto bylo možné, je důležité dodržování určitých norem. Výhody těchto norem zahrnují budování důvěry koncového uživatele, vytvoření společného jazyka mezi ostatními výrobci a uživateli, propagace výrobků, společnou kompatibilitu a interoperabilitu, odstranění obchodních překážek mezi výrobci pro společné otevření trhů a na podporu šíření a zavádění inovativních technologií. Standardy jsou nezbytné pro zavádění procesů na integrovanou výrobu proudu. [38]

### 3.2 Trendy a vývoj flexibilní a tištěné elektroniky

Elektronika je jednou z nejrychleji a nejdynamičtěji rostoucí oblastí v dnešním obchodu a průmyslu. Cílem jsou lehké, levné, ergonomické, nízkonákladové a často i ekologické výrobky. Dalším krokem ve vývoji je zvýšení flexibility, snížení její velikost a zvýšení její

využitelnosti. Klíčovým prvkem ve funkci elektronických zařízení, včetně displejů a fotovoltaických článků, jsou opticky průhledné a elektricky vodivé elektrody. V současné době to jsou transparentní vodivé elektrody z ITO vrstev a jsou uloženy na skelných nebo polymerních substrátech. Výroba se provádí pomocí fyzikální depozice napařováním, nebo chemickou depozicí z plynné fáze, a to jsou velmi drahé procesy. Navíc, tato ITO vrstva nevyhovuje flexibilním požadavkům, protože při velmi malém napínání vrstva praská a ztrácí schopnost vést elektrický proud, a tudíž není vhodná pro flexibilní elektronické zařízení. Je tedy potřeba vyvíjet nové substráty, které jsou plně flexibilní a budou svými vlastnostmi vyhovovat daným parametrům. K výrobě vodivých transparentních vrstev se vyvíjí metody hybridní elektrospintroniky (obor elektroniky využívající spinu elektronů například k uchování, zpracování a přenosu informace) a možnost jeho řešení. Do budoucna se například počítá s vývojem substrátů a vrstev, kdy bude možno je zcela deformovat bez ztráty jejich elektrické funkce. [35]

Do budoucna se předpokládá, že flexibilní elektronika se výrazně zapojí například do běžného života lidí. Zařízení v podobě náramku nebo elektronické textilie na bázi polymerní tištěné elektroniky pro monitorování a sledování důležitých lidských tělesných funkcí bude patřit mezi důležité součásti vývoje této technologie. Tyto zařízení by například byly schopny hlídat a dlouhodobě monitorovat tělesnou teplotu, vlhkost pokožky, tep, krevní tlak či jiné důležité faktory a v případě náhlého problému by byly schopny dávat okamžitou odezvu. Pracovníci Fraunhoferova ústavu vyvíjejí zařízení, které by bylo schopno samo odebírat krevní vzorky, diagnostikovat je, a informovat o možných rizikových faktorech. [15]

## Závěr

Cílem této práce bylo kompletní seznámení s odvětvím flexibilní a tištěné elektroniky. Začátek první kapitoly byl zaměřen na historii a vývoj této oblasti elektroniky. Zde je dobře vidět, že flexibilní a tištěná elektronika jsou relativně nové technologie a jejich vývoj je na začátku. V další části je seznámení s používanými materiály, kde je podrobnější rozdělení používaných organických a anorganických materiálů. Organické materiály, zaujímají ve flexibilní elektronice podstatnou část a do budoucna se jejich využití rozšíří do velké řady zařízení a procesů. Vývoj v oblasti organických i anorganických materiálů probíhá především v jejich postupném zmenšování, a vytvoření flexibilních součástí. Zde je také možné menší srovnání, kdy výhodou anorganických materiálů oproti organickým je vyšší stabilita a životnost či lepší vedení elektrického náboje, ale nevýhodou je jejich horší zpracovatelnost, nižší flexibilita a v neposlední řadě horší šetrnost k životnímu prostředí.

Další kapitola byla zaměřena na vybrané flexibilní a tištěné zařízení. Tyto součástky se velmi rychle vyvíjejí a jejich využití v dnešních elektronických zařízeních je velmi vysoké. Velký výzkum probíhá například v oblasti zobrazovacích zařízení. Dnešní doba vyžaduje především levné součástky s vysokou integrací a právě vývoj v oblasti flexibilní a tištěné elektroniky je ten správný směr jak toho dosáhnout.

Následující, ale především nejobsáhlejší kapitola je zaměřena již přímo na výrobní technologie a procesy, pro výrobu flexibilních a tištěných zařízení. Všechny základní výrobní procesy jsou rozděleny do dvou základních kategorií, a to zda je používaný materiál v plynném nebo kapalném skupenství. Zde mají největší zastoupení výrobní procesy, které pracují s materiálem v kapalném skupenství. Právě v kapalném skupenství se materiál nejlépe zpracovává a dává výrobním technologiím velké možnosti při zpracování. Většinou se jedná o polymerní organické roztoky nebo v menší míře mohou být anorganické materiály rozptýleny pomocí speciálních rozpouštědel. V této části je také seznámení s nanolitografickými metodami, pro konstrukci, výrobu jemných tištěných zařízení.

Třetí a poslední část této práce se zabývá budoucností, a možnostmi vývoje flexibilní a tištěné elektroniky. Jsou, zde uvedeny možné cesty vývoje, kam se bude flexibilní elektronika ubírat. Tato část se dále zabývá problémy, které nastávají při hromadné výrobě flexibilní elektroniky.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TSUNG-CHING, Huang. *What is flexible electronic* [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.eetimes.com/news/semi/showArticle.jhtml?articleID=216200358>.
- [2] SLADOVNÍK, Tomáš. *Organické materiály pro unipolární tranzistory*. Plzeň 2010. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. [cit. 2013-05-18].
- [3] SVOBODA, Václav. *Současný stav vývoje v oblasti organické elektroniky*. Plzeň 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. [cit. 2013-04-29].
- [4] DŽUGAN, Tomáš. *Senzory par a plynů na bázi ftalocyaninů*. Plzeň 2012. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. [cit. 2013-06-01].
- [5] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Fullereny*. [online]. [cit. 2013-05-06].
- [6] STEJSKAL, Jaroslav. *Polyanilin: vodivý polymer*. Ústav makromolekulární chemie Akademie věd ČR. [cit. 2013-05-15].
- [7] KANTH, Josyula.; MITESH Patel. KAUSHIK, Patel. SCOTT, Batcheller. *Synthetic Strategy for Large Scale Production of Oligothiophenes*. [cit. 2013-05-12].
- [8] WONG, William S.; SALLES, Alberto. *Flexible Electronics: Materials and Applications*. 2009. Stanford University. Department of Materials Science & Engineering. [cit. 2013-05-12].
- [9] SO, Franky. *Materials, processing devices and applications*. 2010. [cit. 2013-05-12].
- [10] SMITH, Peter. *OLED displays: Better than Plasma or LCD*. Dostupné z: <http://blog.naver.com/sedolius/40010922966>. [cit. 2013-05-12].
- [11] PERKINSON, J. *Organic field-effect transistor*. [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/joyp/Public/OFET%20Term%20Paper.pdf>. [cit. 2013-05-13].
- [12] KOZÁK, Ondřej. *Organické materiály v elektrotechnice*. Plzeň 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. [cit. 2013-05-13].
- [13] PRETL, Silvan. *Návrh organického FET tranzistoru*. Plzeň 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. [cit. 2013-05-27].
- [14] ALDEBARAN, Buletin. Týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie: *Organické polymery jako zdroj energie* [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2007\\_30\\_org.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2007_30_org.php).
- [15] KABEŠ, Karel. *Organická a tištěná elektronika dobývají svět*. 1. vyd. Automa 2011. [cit. 2013-05-14].
- [16] EKRT, Ondřej. *Technologie a vlastnosti tenkých vrstev, tenkovrstvé senzor*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. [cit. 2013-04-27].
- [17] BUBLÍKOVÁ, Petra. *Tvorba polykrystalických křemíkových struktur rekrytalizací amorfního křemíku dopovaného metodami PVD a CVD*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. [cit. 2013-06-02].

- [18] KLAUK, Hagen. *Organic Electronics: Materials, Manufacturing and Applications*. 2006. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. [cit. 2013-05-12].
- [19] OSVALDO, N.; OLIVIERA, Jr. *Langmuir-Blodgett Films - Properties and Possible Applications*. [cit. 1990-6-2]. Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. [cit. 2013-05-22].
- [20] ZIGLER, Martin. *Senzory na bázi organických látek*. Plzeň 2010. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. [cit. 2013-05-23].
- [21] MOTSCGMANN, Hubert.; MOHWALD, Helmuth. *Langmuir-Blodgett Films*. Max-Planck-Institute of Colloids and Interfaces, Golm, Germany. [cit. 2013-05-23].
- [22] COSNIER, Serge.; KARYAKIN, Arkady. *Electro-polymerization: Concepts, materials and applications*. 2010. Université Joseph Fourier D'epartment de Chimie Moléculaire. [cit. 2013-05-25].
- [23] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Dip-coating*. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Dip-coating>. [cit. 2013-05-28].
- [24] GUO JAZ, L. *Nanoimprinting lithography: Methods and material requirements*. Department of Electrical Engineering and Computer Science. The University of Michigan. [cit. 2013-05-12].
- [25] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Nanoimprint lithography*. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Nanoimprint\\_lithography](http://en.wikipedia.org/wiki/Nanoimprint_lithography). [cit. 2013-05-24].
- [26] KABÁT, Zdeněk. *Technologie TFT LCD displeje*. Dostupné z: <http://www.svethardware.cz/technologie-tft-lcd-displeje/7555>. [cit. 2013-05-12].
- [27] KADAVÝ, Tomáš. *Nanotechnologie v polovodičové elektornice*. Turnov 2009. [cit. 2013-05-08].
- [28] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Elektronová litografie*. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronov%C3%A1\\_litografie](http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronov%C3%A1_litografie). [cit. 2013-05-10].
- [29] MELZER, Christian.; von SEGGERN, Heinz. *Organic electronics: Enlightened organic transistor*. Dostupné z: [http://www.nature.com/nmat/journal/v9/n6/fig\\_tab/nmat2775\\_F2.html](http://www.nature.com/nmat/journal/v9/n6/fig_tab/nmat2775_F2.html). [cit. 2013-05-11].
- [30] PEASE FABIAN, R.; CHOU, Stephen. *Lithography and other patterning technique for future electronic*. [cit. 2013-05-01].
- [31] TRNKA, Pavel.; BUJALOBOKOVÁ, Magdaléna. *Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích*. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=36505](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36505). [cit. 2013-05-02].
- [32] HORMADALY, Jacob.; PRUDENYIATI, Maria. *Printed films: Materials science and applications in sensors, electronics and photonics*. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 26. [cit. 2013-06-03].
- [33] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Offset*. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Offset>. [cit. 2013-05-18].
- [34] ZHAO, Wei. *Flexible transparent electrically conductive polymer films for future electronics*. The Graduate Faculty of The University of Akron. A Dissertation work. [cit. 2013-05-19].

- [35] SCHWARTZ, Evan. *Roll to roll processing for flexible electronics*. Březen 2006. Cornell University. [cit. 2013-05-20].
- [36] THOMA, Patrik. *Zajímavá technika - tampónový tisk*. Dostupné z: [http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=744](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=744). [cit. 2013-05-01].
- [37] THORMAN, Sven.; PREU, Ralph. *Pad printed front contacts for c-Si solar cells - A technological and economical evaluation*. [cit. 2013-05-03].
- [38] MORSE, Jeffrey. *Nanofabrication technologies for Roll-to-roll processing*. Report from the NIST-NNN Workshop. [cit. 2013-06-05].
- [39] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Electron beam physical vapor deposition*. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_beam\\_physical\\_vapor\\_deposition](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_physical_vapor_deposition). [cit. 2013-05-17].