

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tištěné tranzistory

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku tištěných tranzistorů. V práci jsou popsány různé druhy organických tranzistorů, které se liší svým výrobním postupem a principem funkce. V následující kapitole jsou uvedeny typy flexibilních substrátů, které se pro tisk flexibilních organických tranzistorů používají. Pro tisk organických tranzistorů jsou zapotřebí určité polovodičové materiály, jako jsou polymery a nízkomolekulární látky, které jsou zde také uvedeny. V závěru práce jsou uvedeny výrobní technologie pro tisk organických tranzistorů a zhodnocena nejpoužívanější metoda tisku.

Klíčová slova

Tištěné tranzistory, flexibilita, výrobní technologie, OTFT, OFET, OECT, sítotisk, hlubotisk, Roll to Roll, PEDOT:PSS, Pentacen...

Abstract

This bachelor thesis is focused on printed transistors. In this work are described different kinds of organic transistors, which vary in their manufacturing process and function principle. In following chapter are listed types of flexible substrates, which are used for printing of flexible organic transistors. For printing of organic transistors are required certain semiconductor materials as polymers and small molecules materials, which are mentioned in this work. At the end of the thesis are presented the production technologies for printing of organic transistors and evaluated the most used printing method.

Key words

Printed transistors, flexibility, production technology, OTFT, OFET, OECT, Screen printing, Gravure printing, Roll to Roll, PEDOT:PSS, Pentacene...

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 7.6.2017

Pavel Němec

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Mračkovi za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce, ochotu a trpělivost.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 TIŠTĚNÉ TRANZISTORY	12
1.1 TRANZISTOR.....	12
1.2 OFET.....	13
1.3 OECT.....	17
1.4 DALŠÍ TYPY TRANZISTORŮ.....	20
1.4.1 EGOFET (Electrolyte Gated OFET).....	20
1.4.2 EDLT (Electric Double-Layer Transistor).....	21
2 TRANZISTORY TIŠTĚNÉ NA FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTECH	22
2.1 FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTY.....	22
2.1.1 Kovy.....	23
2.1.2 Organické polymery (plasty).....	24
2.1.3 Tenké sklo.....	24
2.2 MATERIÁLY NA VÝROBU ORGANICKÝCH TRANZISTORŮ.....	25
2.2.1 Nízkomolekulární materiály.....	25
2.2.2 Polymerní materiály.....	26
3 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE PRO TIŠTĚNÉ TRANZISTORY	32
3.1 SPIN COATING.....	33
3.2 DIP COATING.....	33
3.3 CASTING.....	34
3.4 INKJET PRINTING.....	35
3.5 ELEKTROCHEMICKÁ DEPOZICE.....	36
3.6 VACUUM EVAPORATION (VAKUOVÉ NAPAŘOVÁNÍ).....	36
3.7 VACUUM SPUTTERING (VAKUOVÉ NAPRAŠOVÁNÍ).....	37
3.8 AEROSOL JET PRINTING.....	38
3.9 ROLL TO ROLL (R2R).....	39
3.10 HLUBOTISK.....	39
3.11 SÍTOTISK.....	40
4 NEJČASTĚJI POUŽÍVANÁ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	42
ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	44

Seznam symbolů a zkratek

μ	Pohyblivost pod vlivem el. Pole
a:Si	amorfní křemík
BC/BG	Bottom contact/Bottom gate
BC/TG	Bottom contact/Top gate
Ci	Plošná kapacita dielektrika
D	Drain
EDLT	Electric Double Layer Transistor
EGOFET	Electrogated Organic Field Effect Transistor
F8T2	Poly (9,9'-dioctyl-fluorene-co-bithiophene)
FET	Field Effect Transistor
G	Gate
HH	Head to head
HOMO	Highest occupied molecular orbital
HT	Head to tail
I_{DS}	Proud mezi elektrodami Drain a Source
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ISFET	Ion Sensitive Field Effect Transistor
ITO	Indium Tin Oxide
JFET	Junction Gate Field Effect Transistor
L	Délka kanálu
LCD	Liquid Crystal Display
LUMO	Lowest unoccupied molecular orbital
MOSFET	Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor
OEET	Organic Electrochemical Transistor
OFET	Organic Field Effect Transistor
OSC	Organic Semiconductor
OTFT	Organic Thin Film Transistor
P3HT	Poly(3-hexylthiophene)
PA	Polyacetylene
PANI	Polyaniline
PBTTT	Poly (2,5-bis(3-alkylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene)
PC	Polycarbon
PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophenu) s polystyren-sulfonátem
PEN	Polyethylennaftalát
PES	Polyethersulfon
PET	Polyethylentereftalát
PMMA	Polymethylmetakrylát
PPy	Polypyrrole

PQT	Poly(3,3"-dialkyl-quaterthiophene)
PTh	Polythioephene
PVD	Psychical Vapor Deposition
R2R	Roll to Roll
RR	Regioregular
S.....	Source
TC/BG	Top contact/Bottom gate
TC/TG	Top contact/Top gate
TFT.....	Thin Film Transistor
U_{DS}	Napětí mezi elektrodami Drain a Source
U_g	Napětí na hradle
U_T	Prahové napětí
W.....	Šířka kanálu

Úvod

Organické tištěné tranzistory jsou v poslední době na vzestupu. Důvodů, proč se jimi zabývat, je hned několik. Nízká výrobní cena, šetrnost k životnímu prostředí nebo rychlost výroby. Všechny tyto parametry jsou více než dostačují a na takové úrovni, že se organické tranzistory dostávají do popředí před klasické křemíkové tranzistory. Tato bakalářská práce je rešerší různých druhů organických tranzistorů, metod jejich výroby a také dostupných materiálů, ze kterých jsou tranzistory vyrobeny.

První kapitola této bakalářské práce je zaměřena na rozdělení tranzistorů dle jejich výrobního postupu a principu funkce. Konkrétně jsou zde popsány dva nejrozšířenější organické tranzistory OFET a OECT. Další druhy možných tranzistorů a klasické konvenční tranzistory jsou zmíněny jen ve zkratce.

Druhá kapitola je zaměřena na materiály pro výrobu flexibilních substrátů pro tištěné tranzistory. Jsou tam popsány podmínky pro flexibilní substrát, jaké musí mít vlastnosti, aby je splňoval. Rozdělují se na základní 3 druhy. Dále tam jsou rozebrány určité materiály pro výrobu tištěných tranzistorů. Tyto materiály se rozlišují na polymerní materiály a nízkomolekulární materiály. Hlavní rozdíl mezi nimi je rozpustnost.

Třetí kapitola se soustředí na určité výrobní technologie pro výrobu tištěných tranzistorů a jejich vlastnosti. Nejprve jsou určeny výrobní technologie pro základní dva druhy materiálů. Polymery a nízkomolekulární materiály. Každý materiál se nanáší jinou metodou, ačkoliv mohou být v dané skupině materiálů lehce obdobné.

Poslední čtvrtá kapitola je pouze výběr nejvhodnější metody pro výrobu tištěných tranzistorů. Je zde popsána daná metoda a její výhody nevýhody.

Cílem této práce bylo shrnutí základních informací o tištěných organických tranzistorech, metodách výroby a materiálech, které se pro výrobu organických tranzistorů používají.

1 Tištěné tranzistory

Pro elektroniku je tranzistor jeden ze základních stavebních prvků. Tištěné tranzistory se začaly používat a vyvíjet z důvodu miniaturizace. Elektronika jako taková může využívat části flexibilní elektroniky, která byla vyrobena za pomoci tiskových technik. K výrobě tištěných tranzistorů se využívá kovových nanočástic ve spojení s různými tištěnými polovodiči a dielektriky. To vedlo k tomu, že bylo možné vyrobit tranzistor jako flexibilní celek. OTFT (*Organic thin film transistor*) se tedy staly přirozeným doplňkem pro flexibilní elektroniku. Jsou vyráběny za pokojové teploty a díky tomu jsme schopni vyrobit plnohodnotný elektrický obvod na plastickém filmu.

1.1 Tranzistor

Tranzistor, z důvodu jeho funkce spínání, je v elektrotechnice nezastupitelná součástka. Je to aktivní, nelineární, polovodičová součástka schopná zesilovat napětí nebo proud. Řadí se mezi nejdůležitější polovodičové součástky. Základní tranzistory se dělí na bipolární tranzistory, unipolární tranzistory a IGBT tranzistory, které jsou kombinací obou předešlých tranzistorů. Bipolární tranzistory se dále dělí na NPN a PNP tranzistory. Vývody těchto tranzistorů se nazývají E - emitor, C - kolektor, B - báze. Tento tranzistor může být použit jako zesilovač vstupního napěťového nebo proudového signálu a nebo jako tranzistorový spínač (v uzavřeném nebo otevřeném stavu). Unipolární tranzistory jsou rozděleny na JFET, MOSFET (MISFET) a TFT tranzistory, které mají vývody v podobě elektrod G - gate (řídící), S - source (jako emitor) a D - drain (kolektor). Hlavní výhodou unipolárních tranzistorů je, že jsou řízeny elektrickým polem, oproti bipolárním, které jsou řízeny elektrickým proudem do báze. To umožňuje miniaturizaci v integrovaných obvodech díky menším ztrátám. Jako poslední zbývají IGBT tranzistory, které kombinují bipolární a unipolární tranzistory dohromady. Podobnost s unipolárními tranzistory lze nalézt na vstupu těchto tranzistorů, kde mají také izolované hradlo. A podobnost s bipolárními tranzistory je v jejich typu, které jsou buď NPN nebo PNP. Kombinace těchto dvou prvků jim zajišťuje vysokou rychlost spínání a tím pádem je možné je využívat ve výkonové elektronice pro spínání velkých proudů. [1]

S vývojem elektroniky jako celku, a konkrétně tištěných tranzistorů, se začala řešit otázka životního prostředí, nižších nákladů na výrobu a výroby ve větším množství. Tento

problém měla vyřešit technologie tištěné elektroniky. Měla ovšem několik nedostatků na rozdíl od klasické výroby (Tab.1).

V tištěné elektronice se často objevují i prvky z organických materiálů. Taková elektronika se pak nazývá organická elektronika. Tištěná elektronika, ať už celá sestava nebo jen daná součástka, je vyrobena úplně nebo alespoň z velké části tiskem. Zde se místo klasických tiskařských barev používají materiály s různou viskozitou. Konstrukčně i funkčně jsou částečně tyto součástky odlišné od konvenčních elektronických součástek. Proto je velice důležitá optimalizace součástek i obvodů. U této tištěné elektroniky se využívá zpravidla inkoustového tisku a sítotisku, kterými se potiskují tuhé podložky, jako jsou sklo nebo křemík. Existují také postupy velkoobjemového tisku, které se ale zpravidla používají k tisku elektroniky na papír nebo folii, kvůli rotačnímu principu tisku. [2]

Tab. 1: Porovnání klasické a tištěné elektroniky

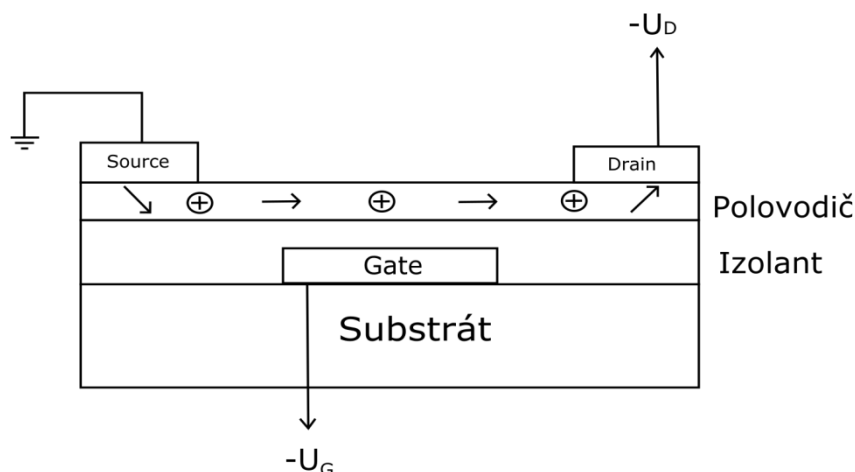
Tištěná elektronika	Konvenční elektronika
dlouhé doby spínání	velmi krátké doby spínání
malá hustota integrace	velmi vysoká hustota integrace
velké plochy	malé plošky
ohebné substráty	neohebné substráty
jednoduchá výroba	složitá výroba
velmi nízké výrobní náklady	vysoké výrobní náklady
levný výrobek	drahý výrobek

Následující kapitoly se zabývají tištěnými tranzistory a jejich rozdělením dle principu funkce a výrobního procesu. Tranzistory rozdělujeme na tzv. OECT (Organic electrochemical transistor), OFET (Organic field effect transistor), EGOFET (Electrolyte Gated Organic Field Effect Transistor), EDLT (Electric Double Layer Transistor) a ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor). Rozdíl mezi těmito tranzistory je jak v principu funkce, tak i v jejich struktuře. [3]

1.2 OFET

OFET (*Organic field-effect transistor*) tranzistor je založený, jak už název napovídá, na elektrostatickém ovlivňování vodivosti prostřednictvím kapacitní vazby mezi řídicí elektrodou a polovodičovým kanálem. OFET tranzistor obecně využívá organického polovodiče v jeho kanálu. Takovéto tranzistory se mohou připravovat buď vakuovým

napařováním nízkomolekulárních látek, odlitím polymerů nebo mechanickým přemísťováním loupané jedno-krystalické organické vrstvy na substrát. Jak bylo již zmíněno, tato technologie pro tranzistory se začala používat z důvodu snížení nákladů na výrobu, realizaci velkých elektronických produktů a biologicky odbouratelných elektronických zařízení.



Obr. 1: Obecný náskres OFET

Tyto tranzistory stejně jako klasické FET tranzistory disponují 3 výstupy, a to konkrétně Gate - brána, Source - zdrojová elektroda a Drain - odtoková elektroda (Obr. 1). Používá se jejich různá geometrie, ale nejčastěji používanou je spodní gate a horní source s drain. Geometrie byla vybrána z jednoduchého důvodu. Je podobná tenkovrstvému křemíkovému tranzistoru (TFT). A jelikož tato technologie využívá tepelného růstu SiO_2 jako bariérového dielektrika, může být použita i u OFET tranzistorů. Pro toto dielektrikum je možné použít organické polymery, jako je polymethylmethakrylát (PMMA). [4]

Tranzistory na struktuře OFET se snaží o dvě důležité vlastnosti, a to mobilitu nosiče a proudový spínací poměr zapnutí/vypnutí. Výkon zařízení záleží na vodivosti polovodiče, která je úzce spjata s mobilitou nosiče amorfního křemíku (a-Si), který má maximální hodnotu $1\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Pohyblivost nosičů, respektive jejich mobilitu, určíme z V-A charakteristik a ideálně by měla být co nejvyšší. V porovnání s amorfním křemíkem má monokrystalický křemík pohyblivost okolo $1300\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. U nejlepších organických polovodičů se jejich mobilita může pohybovat řádově okolo $1\text{-}10\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Ovšem skutečnost je taková, že mobilita nosičů náboje nepřesahuje hodnotu $1\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Mezi sepnutým a rozepnutým stavem (on/off) je proudový spínací poměr, který indikuje schopnost spínání tranzistorů. Současná generace OFET tranzistorů dosahuje spínacích

poměrů $10^6 \div 10^8$. Ve vypnutém stavu je požadován minimální zbytkový proud, kvůli eliminaci nežádoucích ztrát. [3]

OFET konstrukčně nabízejí 4 základní modely, z nichž se využívají nejčastěji typy TC/BG a BC/BG (Obr.2).

TC/BG – Horní kontakty, spodní gate (Top-Contact, Bottom-Gate)

Tento typ nabízí vyšší pohyblivost vodičů a budící proud díky efektivně využitému polovodiči a způsobu nanášení kontaktů, které mají tím pádem minimální kontaktní odpor.[3]

BC/BG – Spodní kontakty, spodní gate (Bottom-Contact, Bottom-Gate)

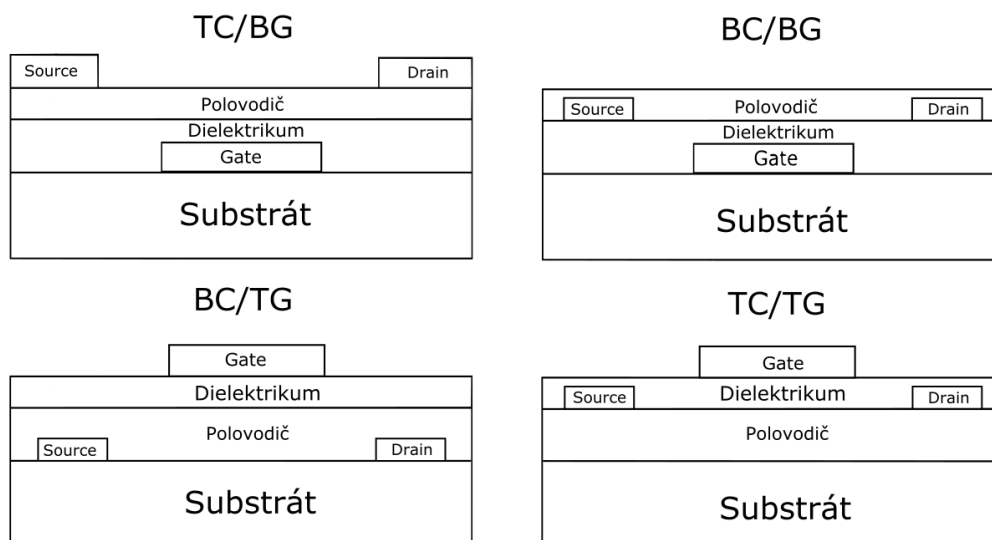
Hlavní výhodou tohoto modelu je přímé vstřikování náboje do kanálu v těsné blízkosti řídicí elektrody. Proto je tento model užitečný v určitých aplikacích a umožňuje menší rozměry součástky. Navíc je tato metoda ne příliš nákladná a umožňuje i použití litografické metody. Hlavní nevýhodou tohoto modelu je horší přenos náboje. [3]

BC/TG – Spodní kontakty, horní gate (Bottom-Contact, Top-Gate)

Ambipolární režim činnosti OFET využívající elektronovou i děrovou vodivost. To je hlavní výhoda tohoto zapojení. [3]

TC/TG – Horní kontakty, horní gate (Top-Contact, Top-Gate)

U ostatních metod se nanáší aktivní polovodičová vrstva na dielektrikum a pak teprve na substrát. Tento model umožňuje přímé nanášení polovodiče na ohebný nebo pevný substrát.[3] Z tohoto vyplývá, že pro výrobu jsou výhodnější tranzistory s horními kontakty, které dosahují lepších výsledků. Předpokladem pro to, jsou nižší odpory mezi elektrodami a organickým polovodičem. To je dáno větší plochou kontaktů, a tudíž zde může probíhat větší injekce nosičů a morfologie polovodiče v tomto uspořádání.



Obr. 2: Uspořádání OFET dle vzájemné vrstvy elektrod a polovodiče

OFET součástka využívá napětí U_g na řídicí elektrodě gate, pomocí kterého ovlivňuje proud tekoucí v polovodičovém kanálu mezi elektrodami source a drain pod přiloženým napětím U_{DS} a využívajícího proudu I_{DS} [3]. Proud kanálem se dá vyjádřit podle následujících vztahů (1, 2), za předpokladu, že mezi polovodičem a elektrodou je ohmický kontakt. V tomto případě se daný proud $I_{DS,lin}$ a $I_{DS,sat}$ nechá spočítat jako:

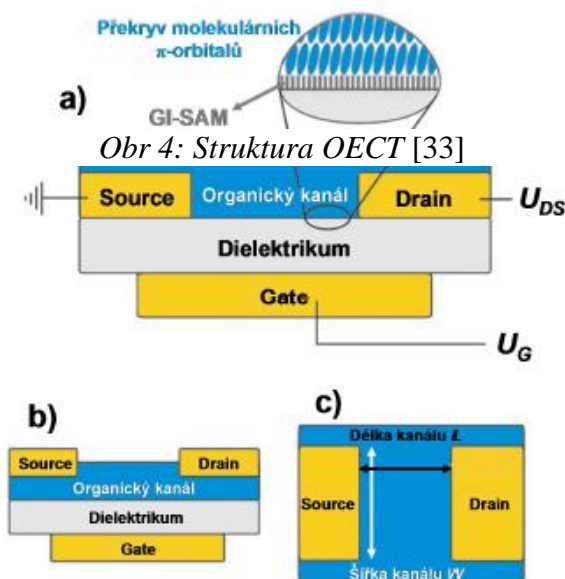
$$I_{DS,lin} = \frac{W}{L} \cdot C_i \cdot \mu \left(U_{GS} - U_T - \frac{U_{DS}}{2} \right) \cdot U_{DS} \quad (1)$$

$$I_{DS,sat} = \frac{W}{2L} \cdot C_i \cdot \mu \cdot (U_{GS} - U_T)^2 \quad (2)$$

kde W je šířka kanálu, L délka kanálu, C_i plošná kapacita dielektrika, μ pohyblivost pod vlivem elektrického pole a U_T prahové napětí.[3] Tyto hodnoty, a jejich zjištění, je znázorněno na (Obr. 3).

Tranzistor OFET pracuje v lineárním režimu, pokud je napětí U_{DS} mnohem menší než $(U_g - U_T)$, v tomto případě je proud I_{DS} přímo úměrný napětí U_{DS} mezi elektrodami S, D. Zvyšováním napětí mezi S, D dochází k nerovnoměrnému rozložení koncentrace nosičů náboje, což má za následek odchýlení výstupní charakteristiky od lineárního průběhu. Pokud se napětí U_{DS} vyrovná rozdílovému napětí $(U_g - U_T)$, kanál se tzv. zaškrtní. Při zvyšování U_{DS} se proud I_{DS} dále nezvyšuje (saturační oblast). [3]

Organic Thin Film Transistor (Organický tenkovrstvý tranzistor) neboli OTFT jsou tranzistory obdobné OFET, které jsou složeny z tenkých vrstev, jak už napovídá název, tvořících aktivní kanál, dielektrika a elektrod source, drain a gate. Řídící obvody LCD displejů využívají klasické TFT na bázi amorfního křemíku. OTFT má však několik výhod jako jsou průhlednost, ohebnost a hlavně nízká cena díky jejich jednoduché výrobě.



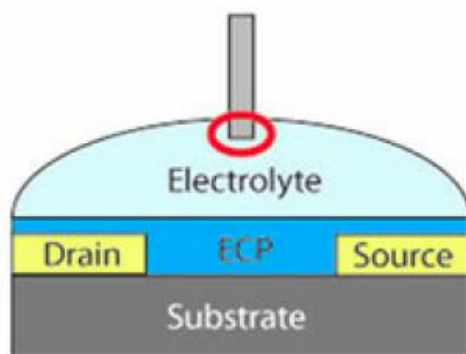
Obr 4: Struktura OECT [33]

Obr. 3: Struktura OFET s vyznačeným pracovním napětím a jeho rozměry [3]

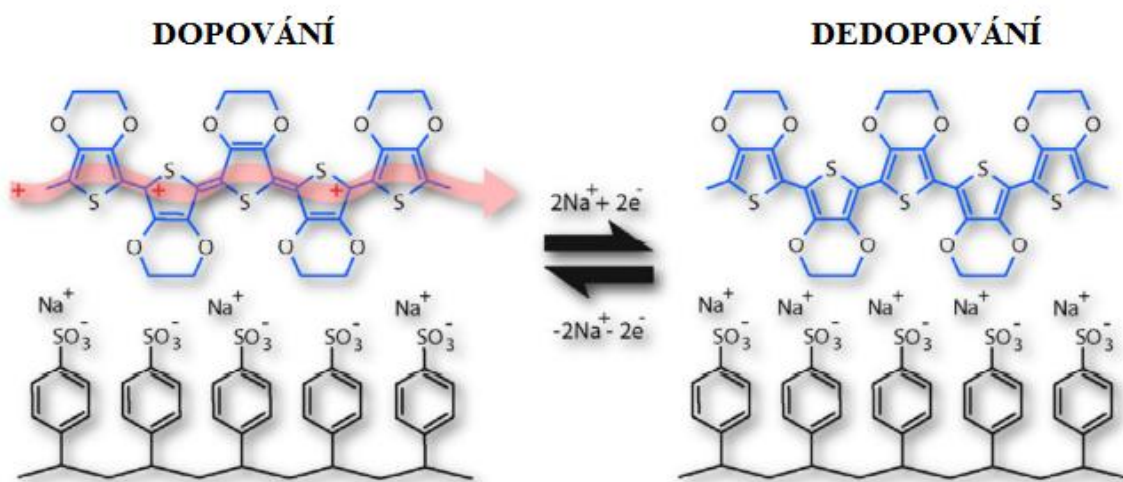
Zatímco OECT (*Organic electrochemical transistor*) je založený na elektrickém proudu, který se mění ve vodivém kanálu, a tím způsobuje dopování a dedopování nosičů v závislosti na napětí na řídicí elektrodě (G). [5]

1.3 OECT

OECT (*Organic electrochemical transistor*) je organický tranzistor založený na elektrochemickém principu, kde je řízeno dopování/dedopování polovodičového kanálu v přímém kontaktu s elektrolytem (Obr. 5). Rok 1984 [3] byl velice významný pro tento typ tranzistorů. Pomocí jeho elektrochemického principu byl prezentován možný spínací efekt tohoto tranzistoru. Uspořádání OECT je znázorněno na obrázku (Obr. 4). [3]



Obr. 4: Uspořádání OEET tranzistoru [33]

Obr. 5: Znázorněné de/dopování OEET pomocí kationtů Na^+ [3]

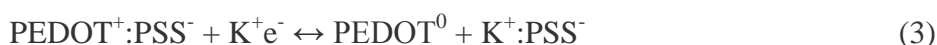
Je to tříelektroodový tranzistor založený na obdobné struktuře jako je jeho příbuzný, konvenční MOSFET tranzistor. Tranzistor má také dvě elektrody source a drain, kde výplň mezi těmito elektrodami tvoří objemová vrstva elektrochemického aktivního materiálu. Tento kanál je v tzv. iontovém (přímém) kontaktu s vrstvou elektrolytu tranzistoru, která ho odděluje od řídicí elektrody gate. U OFET tranzistorů tvoří aktivní část kanálu pouze jeho povrch, kdežto u těchto elektrochemických tranzistorů je tomu naopak a tvoří ji celý objem vrstvy polovodiče v kontaktu s elektrolytem. Elektrochemická redoxní reakce nastane tehdy, proběhne-li iontová výměna mezi kanálem a elektrolytem. Tím se změní oxidační stav aktivní vrstvy. Zde se pak rozlišují dva základní stavy, vypnutý nebo sepnutý režim. Pro vypnutý režim platí nízká vodivost, a to znamená pouze jeden oxidační stav aktivní vrstvy. Naopak pro sepnutý režim platí vysoká vodivost. Rozdíl dvou napětí neboli elektrický potenciál, je důvod migrace iontů na elektrodě gate, a to způsobuje fyzický

přenos iontů, tzv. iontů podílejících se na elektrochemické reakci při spínání kanálu, mezi elektrolytem a objemovou vrstvou kanálu.[3]

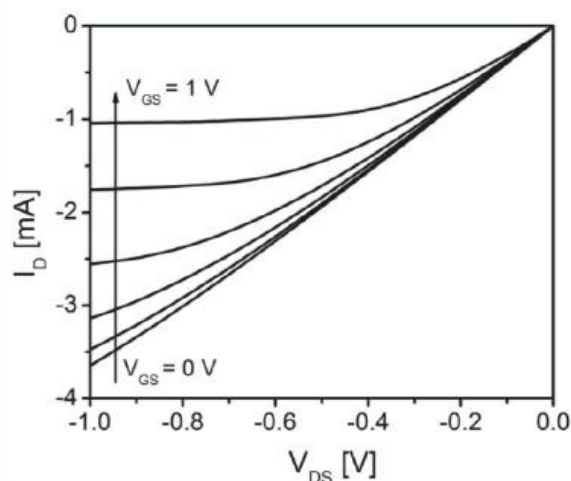
Poly(3,4-ethylenedioxythiophenu) s polystyren-sulfonátem (PEDOT:PSS) je základem pro většinu dnešních OECT. Zároveň to je nejrozšířenější vodivý polymer, který je možné v dnešní době použít. Z tohoto vyplývá, že se jedná o vysoce dopovaný polovodič, který má vysokou koncentraci kladných nosičů nábojů (děr), a tudíž jde o polovodič typu P. Tyto nosiče náboje jsou na oxidovaných PEDOT⁺ molekulách kompenzovány sulfoanionty na PSS⁻ makromolekulárních řetězcích. [3]

Funkce OECT

Organický elektrochemický tranzistor funguje na podobném principu jako MOSFET tranzistor jak již bylo zmíněno. Proto bez řídicího napětí na řídicím hradle gate se tranzistor nachází ve výchozím (vodivém) stavu. To znamená, že mezi elektrodami source a drain prochází proud I_{DS} daný napětím U_{DS} , které je mezi těmito elektrodami a odporem kanálů. K injekci kationtů z elektrolytu do organické vrstvy dochází po přivedení kladného napětí na řídicí elektrodu. Tímto se kompenzuje záporný náboj sulfoaniontů a dedopují tak molekuly PEDOT do neutrálního stavu viz rovnice:



Tento proces se označuje jako ochuzovací režim. Výsledná výstupní charakteristika v ochuzovacím režimu je znázorněna na obrázku (Obr. 6). [3]



Obr. 6: Výsledná výstupní charakteristika v ochuzovacím režimu [3]

Iontová vodivost a vzdálenost mezi řídicí elektrodou a polymerem je velice důležitá z hlediska rychlosti chemické reakce (dopování/dedopování). Rychlost této chemické reakce je potom závislá na transportu iontů mezi oběma elektrodami. [3] Ačkoliv se toto zdá důležité, tak celkovou elektronovou vodivost polymeru zajišťuje elektrický potenciál na hradle (Gate). Různé experimenty s uspořádáním vrstev v OECT ukázaly, že vzdálenost mezi elektrodou gate a polymerem, přemostěným pomocí elektrolytu, se může pohybovat okolo jednotek mm až cm. Tato oddělovací vrstva mezi řídicí elektrodou a polovodičem není při silné koncentraci iontů tak kritická jako u OFET tranzistorů. U OFET tranzistorů je tloušťka dielektrika velice důležitý parametr, který ovlivňuje intenzitu elektrického pole, která má velký vliv na přerozdělování nosičů náboje, a tedy vodivost kanálu. Protože OECT tranzistory nejsou citlivé na přesnou oddělovací tloušťku, je jejich výroba levnější. S postupem času bylo a je možné vyrobit OECT, kde elektrody i kanál jsou v jedné vrstvě PEDOT:PSS, a to je vzhledem k hromadné výrobě velká výhoda. Tranzistor je poté v tomto případě tvořen pouze vrstvou PEDOT:PSS a vrstvou elektrolytu.[3]

Nespornou výhodou OECT proti OFET je velmi malý přechodový odpor na kontaktech elektrod source a drain. Také ovšem záleží, z jakého materiálu jsou kontakty vyrobeny. Mnohem nižší rychlost spínání OECT je naopak hlavní nevýhodou těchto tranzistorů. Tato rychlost se liší řádově jednotky až desítky sekund a brání ve fyzickém přenosu iontů mezi řídicí elektrodou a kanálem. Velmi důležitým parametrem těchto tranzistorů je topologie. Rozlišuje se například velikost elektrody gate a kanálu, v jejich vzájemném poměru. Tento poměr je vhodné maximalizovat pro zrychlení dynamické odezvy, kterou je možné měnit vrstvou elektrolytu [3]

1.4 Další typy tranzistorů

Kromě hlavních dvou skupin tranzistorů (OFET, OECT) existují i jiné tranzistory. Tyto tranzistory zde jen zmíním.

1.4.1 EGOFET (Electrolyte Gated OFET)

EGOFET tranzistor se skládá ze substrátu, tří elektrod (Source, Drain a Gate), organické vrstvy a elektrolytu. Hlavním rozdílem mezi EGOFET a OFET je přímý kontakt organické vrstvy s elektrolytem u EGOFET. U OFET je organická vrstva v přímém kontaktu s dielektrikem. V tomto směru se jistým způsobem EGOFET tranzistory podobají

OECT tranzistorům. Ovšem je zde určitý rozdíl mezi těmito tranzistory, a to v jejich funkci. OECT fungují na principu *on/off* spínání, který je tvořen přenosem nosičů náboje z elektrolytu a polovodiče (dopování/dedopování). Naproti tomu EGOFET nevyužívají přenosu náboje, ale využívají pouze kapacitních procesů. Tranzistory typu EGOFET jsou vhodnými kandidáty na budoucí výrobu tranzistorů pro biosenzory. Bohužel při jejich použití může nastat elektrochemický doping a rapidně se tím sníží polovodičové vlastnosti, a tím se dramaticky sníží jejich životnost. Tento problém se řeší vyvinutím vysoce hydrofobního polymerního OSC (*Organic semiconductor*). [6]

1.4.2 EDLT (Electric Double-Layer Transistor)

Postupným vývojem elektroniky a miniaturizací se muselo zajistit vyšší hustoty nosičů náboje a nižšího provozního napětí FET. Bohužel u konvenčních FET tranzistorů je toto nemožné. Důvod je prostý, tyto konvenční tranzistory nedisponují vysokou kapacitou a docházelo k průrazu dielektrika a hradla Gate. Základem EDLT je vytvoření elektrických dvojitéch vrstev založených na elektrolytech. Mohou jimi být iontové kapaliny a polymerní elektrolyty s mobilními náboji. Díky tomu je umožněna vysoká hustota přenosu nosičů náboje. [7]

2 Tranzistory tištěné na flexibilních substrátech

Následující kapitola je zaměřená na tranzistory tištěné na flexibilních substrátech. Tato technologie umožňuje tisknout elektroniku, konkrétně tranzistory, na flexibilní neboli pružné substráty, a tudíž se může elektronika využívat ve více směrech a podle potřeb zákazníka. Pod názvem flexibilita se dá představit více pojmů. Důležité však je, že daná elektronika je ve výsledku ohebná. Velice důležitou roli zde hraje substrát, na který je tranzistor natištěn. Jsou tři základní možnosti flexibility. [8]

- **Ohýbatelná nebo protržitelná**
- **Trvale tvarovaná**
- **Elasticky roztažitelná**

Tvarování probíhá v procesu výroby jako poslední, jak je to jen možné. [8]

2.1 Flexibilní substráty

Substrát pro tištěnou elektroniku je základní stavební prvek, na který se tiskne organická elektronika. Substrát musí splnit širokou škálu podmínek, aby mohl být použit jako vhodný flexibilní podklad.

Optické vlastnosti

Optická vlastnost substrátu je důležitá, pokud je substrát použitý v LCD displejích. Pak je vyžadováno, aby byl velice čistý a jasný. Tato vlastnost se musí dodržovat z hlediska LCD displejů, které vyžadují velice čistý a jasný substrát.[8]

Drsnost povrchu

Drsností povrchu mohou být ovlivněny elektrické vlastnosti obvodu. Čím tenčí filtr se použije, tím bude obvod na drsnost povrchu citlivější. [8]

Tepelné a termomechanické vlastnosti

U této vlastnosti substrátu je velmi důležité dodržet, aby se rozdíl pracovních teplot podkladu a procesu výroby rovnal nule. Jakmile by tomu tak nebylo, došlo by k poškození substrátu.[8]

Chemické vlastnosti

Další důležitá vlastnost substrátu je, že by neměl uvolňovat kontaminující látky a neměl by reagovat při kontaktu s jinými chemickými prvky. Mezi nejkvalitnější substráty se řadí ty, které nepropouští atmosférické plyny.[8]

Mechanické vlastnosti

Jako u každého výrobku se i zde hodnotí tuhost, pevnost a pružnost substrátu. Tyto vlastnostmi určují jeho pevnost při nárazu nebo jiném mechanickém poškození.[8]

Elektrické a magnetické vlastnosti

Zde se využívá elektromagnetického stínění nebo při magnetickém podkladu mohou být použity pro upevnění při výrobě elektrických zařízení.[8]

Vhodné materiály

Pro výrobu flexibilních substrátů se používají tři základní druhy materiálu. Kovy, organické polymery (plasty) a ohebné sklo.

2.1.1 Kovy

Kov jako substrát musí mít tloušťku menší než 125 μm . Pokud je splněna tato podmínka, stává se potom flexibilní a zároveň vhodný pro reflexní displeje, které nepotřebují průhledné substráty. Tento druh substrátu je možné zahřívat až na 1000 $^{\circ}\text{C}$ procesní teploty bez poškození. Je rozměrově stabilní a má dokonalou permeační ochranu proti vlhkosti a kyslíku. Kovy jako substrát můžou sloužit k odvodu tepla nebo poskytovat

magnetické stínění. Nejčastěji se vyrábí z nerezové oceli, o které obecně platí, že je odolnější než plastové nebo skleněné folie. [8]

2.1.2 Organické polymery (plasty)

Tento typ substrátu se využívá nejčastěji jako podklad pro materiály na bázi křemíku. Největší výhodou polymerního substrátu je jeho vysoká flexibilita, nízká cena a optická propustnost. Jsou odolné proti atmosférickým vlivům, jako je kyslík a voda. Organické polymery mají menší teplotní stabilitu než skleněné substráty a rozměrově jsou též méně stabilní. Typické polymerní folie se zkracují ohřívacím a chladícím cyklem. Mezi základní dvě skupiny plastů patří: [8]

Termoplastické, krystalické polymery

Mezi krystalické termoplastické polymery řadíme PET (*Polyethylentereftalát*) a PEN (*Polyethylenafthalát*).

Termoplastické, nekrystalické polymery

Mezi nekrystalické termoplastické polymery řadíme PC (*Polykarbonát*) a PES (*Polyethersulfon*).

2.1.3 Tenké sklo

Tenčené sklo je přirozený prvek jako substrát pro ploché panely. U skla je to podobné jako u kovů, i zde se musí dodržet určitá hranice, aby skleněný substrát byl stále pružný. Tato tloušťka nesmí přesáhnout 100 μm , což je ještě o 25 μm tenčí než kovový substrát. Využívá se tzv. "Downdraw" metody, když je požadavek na tloušťku substrátu pouze 30 μm . Tenké sklo má mnoho výhod. Například vysokou optickou propustnost, odolnost vůči chemikáliím, vodě a vzduchu, odolnost proti poškrábání a v neposlední řadě vysokou rozměrovou stabilitu. Hlavní nevýhoda substrátu vyrobeného ze skla je jeho křehkost a obtížná manipulovatelnost. Rozbití skla při manipulaci se dá předejít pomocí laminace plastovou folií, aplikace tenké tvrdé vrstvy nebo aplikace polykrystalické vrstvy.[8]

2.2 Materiály na výrobu organických tranzistorů

Organické polovodičové materiály mohou být děleny na tři hlavní druhy. Nízkomolekulární, oligomery a polymery. Nízkomolekulární materiály jsou charakterizovány nízkou molekulární hmotností, kratšími molekulárními řetězci a obsahují méně uhlíkových atomů než polymery. Přestože polymery mají vyšší hmotnost, delší molekulární řetězce a obsahují více uhlíkových atomů, jsou lépe rozpustné. Vlastnosti oligomerů jsou někde na rozmezí nízkomolekulárních a polymerních materiálů. Co se týče zpracovatelnosti, tak nízkomolekulární látky a oligomery mají oproti polymerům horší rozpustnost a proto se obvykle nanášejí pomocí vakuového napařování. Další metody nanášení, což jsou spin-coating a inkjet printing se využívají pro polymery právě kvůli jejich vysoké rozpustnosti. Tyto metody jsou jednodušší a méně nákladné než vakuové napařování. [9]

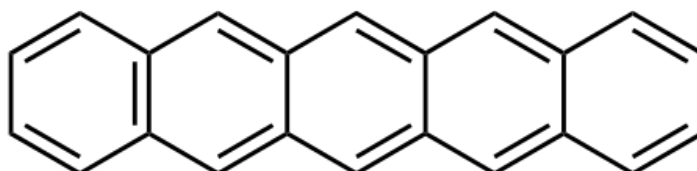
2.2.1 Nízkomolekulární materiály

Nízkomolekulární materiály se vyznačují vyšší mobilitou nosičů a lepšími polovodičovými vlastnostmi než polymerní polovodiče. To je dáno vyšším molekulárním uspořádáním a schopností vytvářet lepší uspořádanost struktury filmu. Nejčastěji využívaným p-typem nízkomolekulárním materiálem je "*Pentacen*".

Pentacen

Jeho struktura je znázorněna na *Obr. 7*. Tuto pozici, nejvyužívanějšího materiálu, si vysloužil díky jeho vynikajícím vlastnostem oproti ostatním materiálům, jako je mobilita nosičů a chemická a tepelná stabilita. Díky schopnosti vytvářet monokrystalické a polykrystalické filmy pomocí vakuového napařování na zahřátý substrát (okolo 80 °C), dosahuje tranzistor na bázi pentacenu vysokého výkonu. Poměr zapnutí/vypnutí (on/off) u těchto tranzistorů se pohybuje v řádu 10^5 - 10^8 . Mobilita nosičů OTFT založeného na pentacenu se pohybuje v rozmezí $0,5 - 1,5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$, nejvýše pak $5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Tato nejvyšší hodnota je pak u OTFT víceméně srovnatelná s hodnotou pro klasický TFT, který je založený na polovodičovém materiálu a-Si:H. Mobilita nosičů silně závisí na morfologii filmu tranzistoru. Tu určují podmínky zpracování, jako například složení rozpouštědla, teplota substrátu, koncentrace roztoku a v neposlední řadě podmínky v době sušení. Jak již

bylo zmíněno, nízkomolekulární materiály jsou nanášeny pomocí vakuového napařování, což je ovšem, vzhledem k požadované nízké výrobní ceně a určité šetrnosti vůči životnímu prostředí, nežádoucí. Kvůli těmto požadavkům, je potřeba takových technik výroby, které dokážou vyrobit tranzistor při pokojové teplotě a za normálních podmínek. OTFT založený na polymerním materiálu, který je vyráběný technologií spin-on, drop-casting nebo technikou tisku, tyto požadavky splňuje. [9]



Obr. 7: Chemická struktura Pentacenu [9]

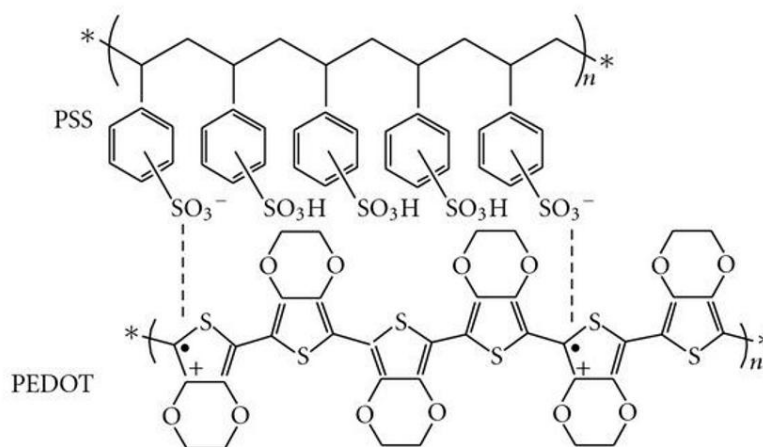
2.2.2 Polymerní materiály

Polymerní polovodiče se vyznačují strukturální stabilitou, rozpustností a možností ladit jejich elektrické vlastnosti. To umožňují polymerní řetězové struktury, které díky svému navržení a tvaru dokážou ovlivnit elektrické vlastnosti. Rozpustnost polymeru je závislá na alkylových postranních řetězcích. Mobilita nosičů je zhruba o jeden řád nižší než u nízkomolekulárních materiálů, což je dáno chudším molekulárním uspořádáním. [9] Mezi tři nejrozšířenější prvky patří polyacetylen, polyanilin a polypyrrol. Samozřejmě nesmí být opomenut další důležitý polymerní materiál a to PEDOT:PSS, který se vyznačuje vysokou tažností, možností měnit jeho vodivost o několik řádů, stabilita v prostředí a dobré chování při vytváření filmu.

PEDOT:PSS

PEDOT:PSS je polymerní směs dvou ionomerů neboli poly (3,4-ethylen-dioxythiofen) dopovaný poly (styren sulfonátem) (Obr. 8). Běžně se používá pro OECT, kde tvoří vysoce dopovaný p-typ organického polymeru. Využívání PEDOT:PSS má mnoho výhod. Největší z nich je možnost měnit jeho vodivost až o několik řádů. Vodivost může být významně změněna pomocí určitých látek, jako jsou etylenglykol, dimethylsulfoxid (DMSO), kyseliny, alkoholy a jiné. [10] Nesmí být ovšem opomenuty jeho další kladné vlastnosti jako jsou stabilita v prostředí a dobré chování při vytváření filmu. Dále je možné využívat elektrochromického efektu, který se používá např. v jednoduchém

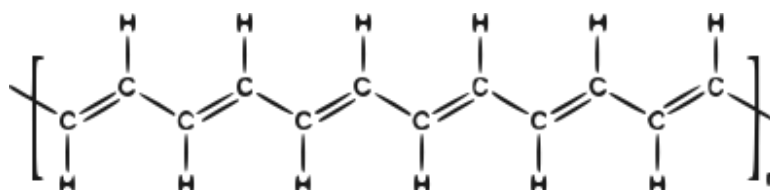
elektrochemickém displeji. PEDOT:PSS je ve svém původním oxidačním stavu téměř průhledný. [11]



Obr. 8: Chemická struktura PEDOT a PSS [34]

Polyacetylen (PA)

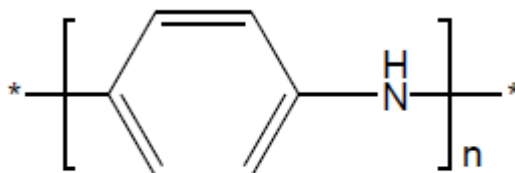
Polyacetylen vzbuzuje zájem, protože se jedná o jednoduchý konjugovaný organický polymer.[12] Je to první vynalezený vodivý polymer a zprávy o prvním acetylovém polymeru se datují do minulého století. Příkladem acetylenové polymerace je Cuprén, který je charakteristický svojí nepravidelností a vysoce síťovitou strukturou. Prvotní úsilí o polyacetylen probíhalo pomocí právě zmíněného Cuprénu, který byl v přímém kontaktu s katalyzátory obsahujícími měď. Polyacetylen je v lineární podobě vysoce citlivý na vzduch, tekutý, nezpracovatelný a vyznačuje se černou barvou. [13] V podstatě se jedná o sudý počet methylových (=CH-) skupin, který je vázán kovalentně tak, že tvoří lineární uhlíkový řetězec nesoucí jeden π -elektron na každém atomu uhlíku (Obr. 9). Rozlišují se dva druhy polyacetylenů (trans a cis). [14]



Obr. 9: Chemická struktura polyacetylenů [14]

Polyanilin (PANI)

Polyanilin se rozděluje do více forem, které se od sebe navzájem liší stupněm oxidace či protonace. Odebíráním nebo dodáváním elektronů chemickou nebo elektrochemickou oxidací a redukcí lze získat formy s různou chemickou strukturou, stabilitou, zbarvením a elektrickými vlastnostmi. Vodivost polyanilinu velmi záleží na dopování (protonaci). Pro zvyšování vodivosti tímto způsobem se využívá protonu z anorganické nebo organické kyseliny. To zaručí zvýšení měrné vodivosti v rozmezí osmi až deseti řádů. Dále vyniká svojí snadnou syntézou a vysokou environmentální stabilitou. [15] PANI, založený na emeraldinové bázi, je považován za nejužitečnější formu PANI, vzhledem k jeho vysoké stabilitě při pokojové teplotě. Skládá se ze dvou jednotek benzenu a z jedné chinoidní jednotky, které se mezi sebou střídají (*Obr. 10*). [16]



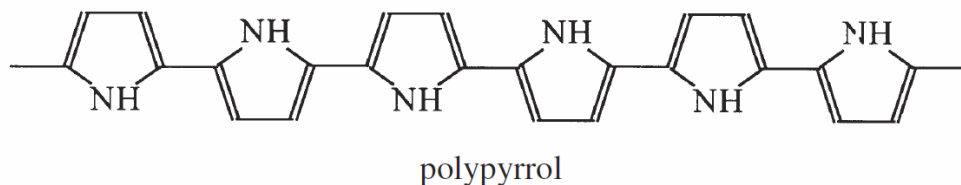
Polyaniline

Obr. 10: Chemická struktura polyanilinu [16]

Polypyrrol (PPy)

PPy je polymer vykazující určité elektrické vlastnosti, konkrétně vodivost. Této skutečnosti dosahuje při určitém dopování jinou látkou.[17] Pyrrol, jako látka taková, polymerizuje v kyselém prostředí při oxidaci peroxidem vodíku za vzniku nerozpustné "pyrrolové černi". Základní chemická struktura polypyrrolu je založená na jednom kladném náboji na každé třetí pyrrolové jednotce. Tento náboj kompenzuje aniont dopující soli. U PPy rozlišují se dva druhy polymerizace. Elektrochemická a chemická. Při chemické polymerizaci je možné použít více oxidačních činidel. Tyto činidla mají určitý vliv na měrnou vodivost PPy. V tomto případě se dává přednost chloridu železitému, který měrnou vodivost zvyšuje. Polypyrrol je za normálních podmínek nevodivý, konkrétně když je π -pás zvaný HOMO (Highest occupied molecular orbital) zcela zaplněn a π -pás zvaný LUMO (Lowest unoccupied molecular orbital) zcela vyprázdněn. K docílení jeho vodivosti je potřeba určitého dotování danou látkou, jak je již zmíněno výše. Skutečné

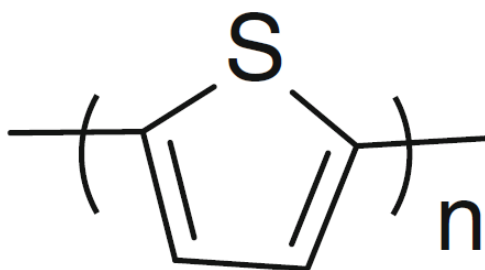
vlastnosti PPy jsou dány stupněm neuspořádání, který určuje mobilitu nosičů náboje. Chemická struktura základního PPy je znázorněna na (Obr. 11). [15]



Obr. 11: Chemická struktura polypyrrolu [15]

Polythiofen (PTh)

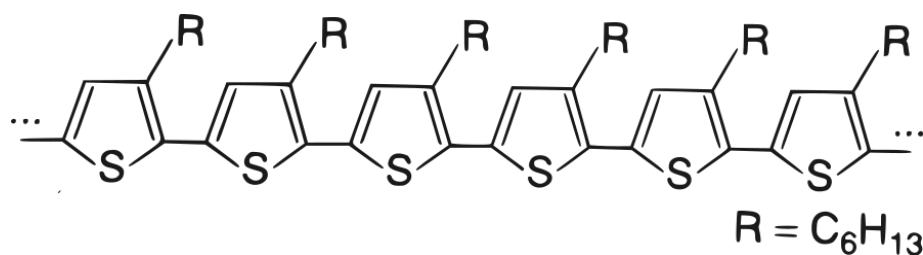
Polythiofen našel uplatnění ve více odvětvích elektroniky, jako jsou např. chemické a optické senzory, světelné diody nebo displeje. Mají ovšem uplatnění i jako polymerní materiál ve struktuře tranzistorů. Takto se začal využívat zhruba od roku 1980. Základem PTh je “thiofen“ a pomocí polymerizace vzniká polythiofen. Existují tři různé druhy polymerizace, jak tohoto lze dosáhnout. Elektropolymerizace, kovem katalyzované vazebné reakce a jako třetí, chemická oxidační polymerizace. [18] PTh jako takový má velmi špatnou rozpustnost, a proto je omezován jen pro komerční výrobu. Další nevýhoda PTh je, že obsahuje inertní atom síry, který zvyšuje oxidační potenciál a tím ztěžuje přípravu. [19] Při porovnávání polyanilinu a polypyrrolu s polythiofenem, má polythiofen užší zakázané pásmo a vyšší oxidační dopovací potenciál. To umožňuje p-dopování oxidací a n-dopování redukcí. [20] Chemická struktura PTh je znázorněna na (Obr. 12).



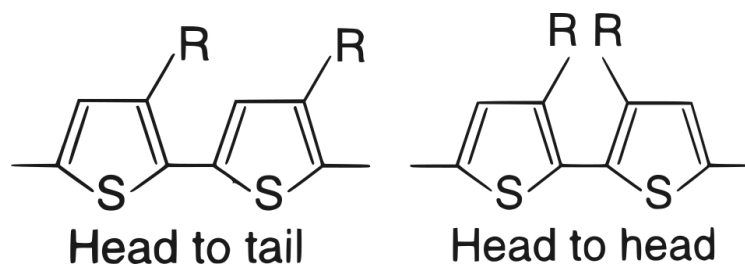
Obr. 12: Chemická struktura PTh [20]

P3HT

Jednou možností výroby P3HT je regioregulární poly(3-hexylthiophene) (RR-P3HT), který má pohyblivost nosičů v rozmezí 10^{-5} do 10^{-2} $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Pohyblivost je ovšem závislá na podmínkách prostředí (např. prostředí bez vzduchu a kyslíku) a na zpracování. Byla změřena i nejvyšší mobilita nosičů $0,1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ z rozpustného RR-P3HT s vazbami více než 98,5% od počáteční po koncovou vazbu, tzv. head-to-tail (HT). Základní chemická struktura HT RR-P3HT je znázorněna na *Obr. 12*. Head-to-tail (HT) je jeden ze dvou možných uspořádání pro 3-alkylové substituenty. Druhé uspořádání je známé jako Head-to-head (HH), tento rozdíl je znázorněn na *Obr. 13*. [9] [21]



Obr. 12: Chemická struktura regioregulární HT RR-P3HT [9]



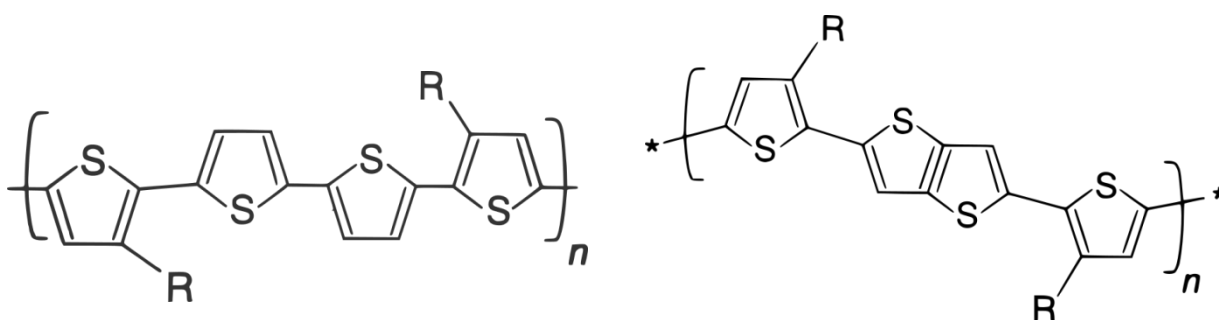
Obr. 13: Rozdíl mezi chemickými strukturami Head-to-tail a Head-to-head. [9]

Pokud je struktura P3HT složená pouze z jednoho z prvků (buď HH nebo HT), hovoříme o tzv. "regioregular" uspořádání. Naopak pokud je struktura P3HT složená z kombinací HH a HT, nazývá se tato struktura jako "regiorandom". Zde nastává důležitý bod a to jeho velikost regioregularity. Čím větší regioregularita bude, tím větší bude molekulární uspořádání v polymerních polovodičích. Naproti tomu u struktury regiorandom mohou nastat v průběhu různé chyby, čímž se mobilita snižuje. Toto vedlo k nalezení dalších možností zvýšení mobility nosičů v P3HT OTFT. Například optimalizace rozpouštědla, tepelného žíhání, optimalizace délky řetězce a chemické zpracování povrchu substrátu před nanesením polymerního polovodičového filmu. Poly (9,9'-dioctyl-fluorene-co-bithiophene) (F8T2) je další polymer, který má relativní vzdušnou stabilitu po speciální

přípravě a žíhání při vysokých teplotách. Jeho hodnoty mobility se pohybují v rozmezí $0,01-0,02 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. [9]

PQT

XRCC Xerox Research Centre of Canada je výzkumné centrum, které stojí za vznikem poly(3,3''-dialkyl-quaterthiophene)s (PQTs), které se řadí mezi materiály se zvýšenou odolností proti kyslíku a lepší zpracovatelností. Mobilita u tohoto materiálu se pohybuje mezi $0,07-0,12 \text{ cm}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$ a proudový poměr zapnutí/vypnutí je 10^6 . Mezi novější polymerní materiály na bázi roztoku se řadí poly (2,5-bis(3-alkylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene) (PBTTT). Jedná se o kapalný krystalický polymer. Tranzistory na této bázi vykazují dobrou pohyblivost i stabilitu v rozmezí $0,2-0,6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Chemické struktury prvků jsou znázorněny na (Obr. 14). [9] [21]



Obr. 14: Chemická struktura polymeru PQT(vlevo) a PBTTT (vpravo) [9]

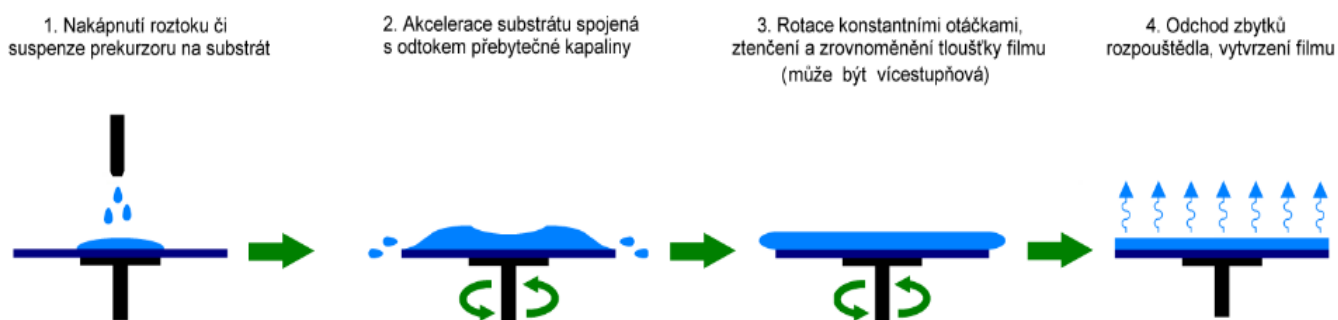
3 Výrobní technologie pro tištěné tranzistory

Tato kapitola se zaměřuje na různé typy výrobních technologií pro tištěné tranzistory. Ve výrobních technologiích se používá rozpuštěného polymeru jako "elektronického inkoustu" s vodivými, polovodičovými nebo izolačními vlastnostmi. Výroba tištěných tranzistorů je velmi důležitý krok, ať už z ekonomického, ekologického pohledu nebo z pohledu širšího využití. Vlastností polymerů zaostávají za nízkomolekulárními materiály, až na jejich rozpustnost, která je u polymerních materiálů lepší, jak je vidět například u Pentacenu, který se řadí mezi nízkomolekulární materiály a má horší rozpustnost. Pro nanesení polymerního materiálu se využívá zpracovaný roztok a nízkomolekulární materiály se nanášejí buď za "sucha" nebo za "mokra". Díky vlastnostem Pentacenu vítězí nízkomolekulární materiály nad polymery, a to konkrétně vyráběné za "sucha". U těch byly naměřeny nejlepší hodnoty, jako např. tepelná parní depozice organických látek (napařování). [22]

Pro nanášení roztoku je velmi důležité, že vodivé polymery mají velkou molekulovou hmotnost a jejich dlouhé alkylové řetězce jsou připojené na hlavní chemickou strukturu. Díky tomu jsou velmi dobře rozpustné v běžných organických rozpouštědlech. [22] Naproti tomu nízkomolekulární materiály byly široce studovány pro jejich vysoký potenciál, využití jako polovodičů organických tranzistorů. V dnešní době vyhrávají pomyslný souboj s vodivými polymery o vyšší mobilitu nosiče náboje. Jak již bylo zmíněno, pro nízkomolekulární materiály není vhodné nanášení za mokra, kvůli jejich složení. Použijí-li se ovšem vhodné substituce dlouhých alkylových řetězců, mohly by se rozpouštět lépe. Následek této substituce je ale špatné uspořádání filmu a tím pádem zhoršení mobility nosičů náboje. Nejvyšší mobilita nosiče náboje je připisována pentacenu. [22]

3.1 Spin Coating

Jak už název napovídá, jedná se o rotační nanášení tenkého filmu roztoku na rovinný substrát. Princip spin coatingu spočívá v kápnutí roztoku na rovinný substrát, který se rotačním pohybem rovnoměrně rozprostře po celé ploše substrátu a přebytečný roztok jednoduše odteče přes okraj substrátu. V posledním kroku roztok postupně vysychá. Celý postup je znázorněn na (Obr. 15).



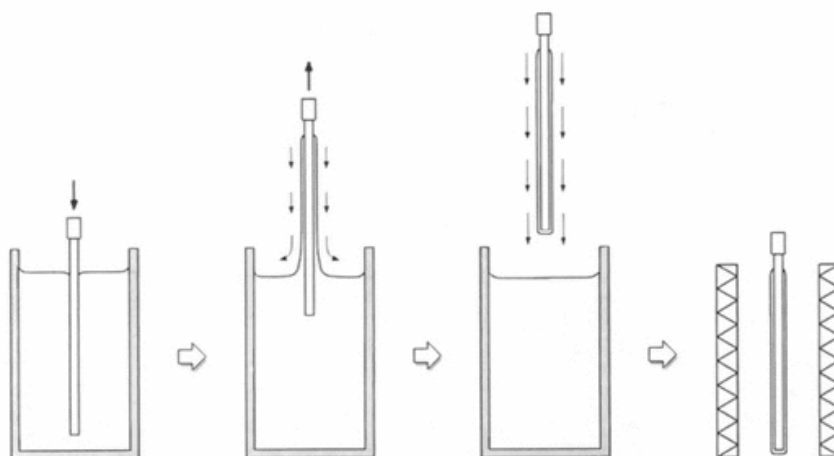
Obr. 15: Postup nanášení roztoku pomocí metody Spin Coating [23]

Důležitá vlastnost roztoku je, že obsažený polymer musí být dobře rozpustný. Největší výhoda této metody je její nízká technologická náročnost. Dále se jedná o laboratorně adoptovatelnou metodu. Její největší mínus je, že musí být zachována rovinná plocha substrátu, a středová symetrie. Navíc s rostoucí velikostí substrátu klesá homogenita tloušťky filmu. [23]

3.2 Dip Coating

Dip coating spočívá v nanášení pomocí ponoření substrátu do nádrže s nanášecím materiálem. Tento způsob společně se Spin Coatingem jsou dvě oblíbené metody, jak nanášet materiál na substrát. Tento proces se dále rozděluje do tří základních postupů. **Ponoření:** V tomto kroku se substrát s konstantní rychlostí ponoří do nádoby s nanášecím materiálem, nejlépe bez vibrací. Druhý krok **doba setrvání:** Substrát je stále nehybně ponořený v nádobě, aby se materiál dokázal aplikovat. Třetím a zároveň posledním krokem je **vytažení**, kdy se substrát opět pomocí konstantní rychlosti vytáhne z nádoby, aby nedošlo k porušení nanášeného filmu. OFET, vyrobené technologií Dip Coating, mají

řádově vyšší mobilitu nosičů než OFET vyrobené metodou Spin Coating. Tého skutečnosti je dosaženo pomocí jejich morfologie, která vyplývá z uspořádaných mikrokrystalických oblastí s lamelární strukturou vytvořenou vlastní organizací makromolekul (polymer přechází z kapalného do pevného skupenství). Proces Dip Coating je znázorněn na (Obr. 16). [22]

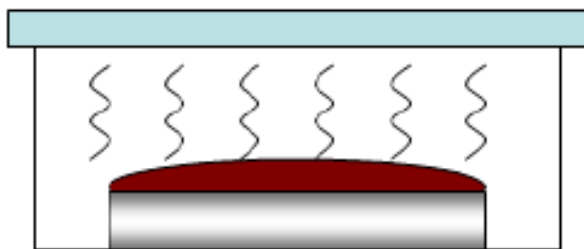


Obr. 16: Postup nanášení roztoku pomocí metody Dip Coatingu (převzato z [35])

Hlavní výhodou této metody spočívá v nanášení povlaku na substrát. Vrstva nanášeného materiálu je z obou stran stejně tlustá. Mezi další výhody se řadí odolnost vůči poškrábání a indexová shoda laku a substrátu. Nevýhodou je, že kvalitní nátěrové zařízení je drahé a při nanášení se vyžaduje velmi čisté pracoviště. [24]

3.3 Casting

U tohoto výrobního procesu se využívá forma s přesně vytvarovanou dutinou. Do této formy se vlije kapalný materiál a nechá se ztuhnout. Následně se nechá roztok samovolně odpařit. Nejčastěji tato operace probíhá za pokojové teploty a může se provádět dvěma způsoby. První je vysychání v přirozené atmosféře a druhý způsob je založený na vysychání pomocí nasycených par, které jsou řízeny tlakem. Dále tato metoda zajišťuje lepší skládané struktury. Proces Castingu je znázorněn na (Obr 17).

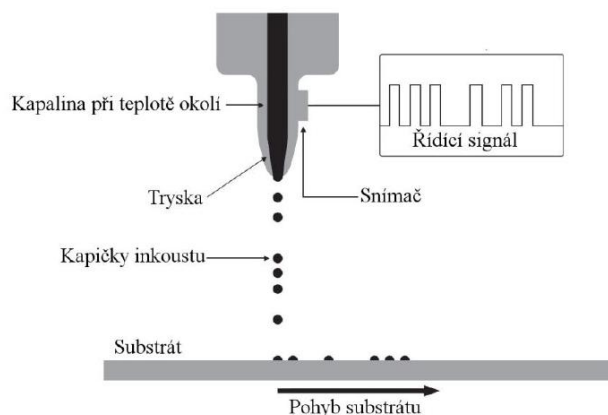


Obr. 17: Znáornění metody Casting

Výhoda této metody je její snadné zpracování. Mezi nevýhody se řadí například to, že se spotřebuje mnohem více materiálu než u Spin Coatingu. Metoda Castingu vyžaduje desetinasobek síly, než je tomu u Spin Coatingu. To má za následek mnohem větší plýtvání materiálu a také to, že filmy mohou dosahovat tloušťky až několik μm . Tento fakt značně ovlivňuje využití této techniky při výrobě OFET, kde je potřeba tloušťka filmu jen několik nm. [22]

3.4 Inkjet Printing

Metoda inkjet printing je považována za aditivní technologii. Pro ukládání vodících roztoků na přesná místa se používá mnoho piezoelektrických tiskových hlav. Touto metodou je možné dosáhnout rozlišení až 120 bodů na palec, kde každá kapička má objem zhruba 10-80 pikolitru. Rychlost tiskárny dosahuje až 200mm za sekundu. Celý systém nanášení je monitorován vysokorychlostními kamerami, které zaručují správně nanesení roztoku. Bohužel tato metoda disponuje chybou umístování kapek na požadované místo. Má svojí určitou chybovost cca $\pm 1 \mu\text{m}$ [25]. Tato chyba se dá částečně eliminovat speciálními úpravami před nanesením. Konkrétně se jedná o předběžné vzorování hydrofilních a hydrofobních oblastí. [26] Celý postup nanášení materiálu pomocí metody inkjet printing je znázorněn na (Obr. 18)



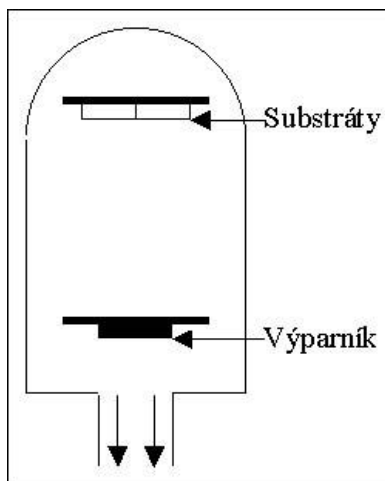
Obr 18: Postup nanášení polymerního materiálu pomocí inkjet metody. [36]

3.5 Elektrochemická depozice

Elektrochemická depozice se využívá jako přední metoda pro syntézu vodivých polymerů. Zprávy o této metodě se datují k osmdesátým létům minulého století. Nejpřednější výhodou využívání této metody je přímá syntéza polymeru rovnou ve formě tenkého filmu. Tímto však výhody končí a nastávají pouze nevýhody, kterých je více. Jedna z nich je, že se elektropolymerizace vyskytuje pouze na vodivých substrátech. To má za následek špatné uspořádání filmu a zhoršení kvality izolačního polovodičového rozhraní. Za další nevýhodu se dá považovat jeho oxidační stav, kdy je polymer vodivý a musí proto být elektrochemicky redukován, aby se stal polovodivým. To představuje další zdroj poruch a hlavní důvod, proč již se tato technika nyní nevyužívá. [22]

3.6 Vacuum evaporation (Vakuové napařování)

Metoda napařování není vhodná pro vodivé polymery, protože mají tendenci k rozkladu praskáním při vysokých teplotách. Proces se provádí ve vysoké, vakuově uzavřené komoře. Prvotně je uložen organický materiál do kovové nádoby ve tvaru lodičky, která je ohřívána pomocí elektronové pistole nebo Jouleovými efekty. Substrát, na který má být organický materiál přenesen, se nachází několik centimetrů nad vaničkou. Obecný náčrt této metody je znázorněn na (Obr. 19)



Obr 19: Metoda Vakuového napařování [37]

Mezi hlavní výhody této metody patří například snadné ovládání tloušťky a čistoty folie a skutečnost, že výborné uspořádání struktury filmu je možné dosáhnout jemným laděním rychlosti nanášení a teplotou substrátu. Bohužel tato metoda vyžaduje

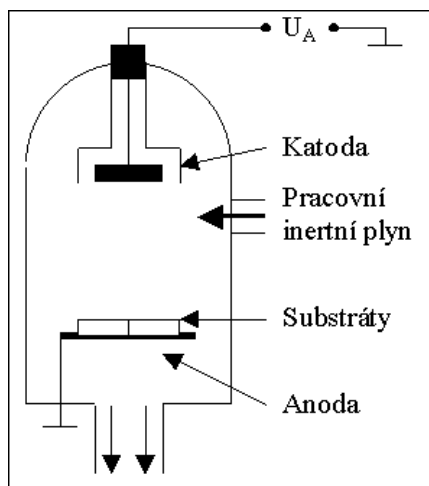
sofistikované zařízení, které je složité a drahé. Proto tato metoda není výhodnější než nanášení materiálu za mokra (jednoduchost, nízká cena).

Metoda PVD

PVD (Physical Vapor Deposition) je metoda určená k depozici tenkých vrstev (filmů) pomocí kondenzace odpařeného materiálu na různé povrchy. Zahrnuje i čistě fyzikální procesy jako je vakuové napařování. Tato metoda je výhodnější než metoda naprašování. Pomocí této metody lze dosáhnout ostře vymezených okrajů, a proto je vhodné tuto metodu využívat pro ukládání elektrod pro různé organické elektronické součástky (např. OFET). [22]

3.7 Vacuum sputtering (Vakuové naprašování)

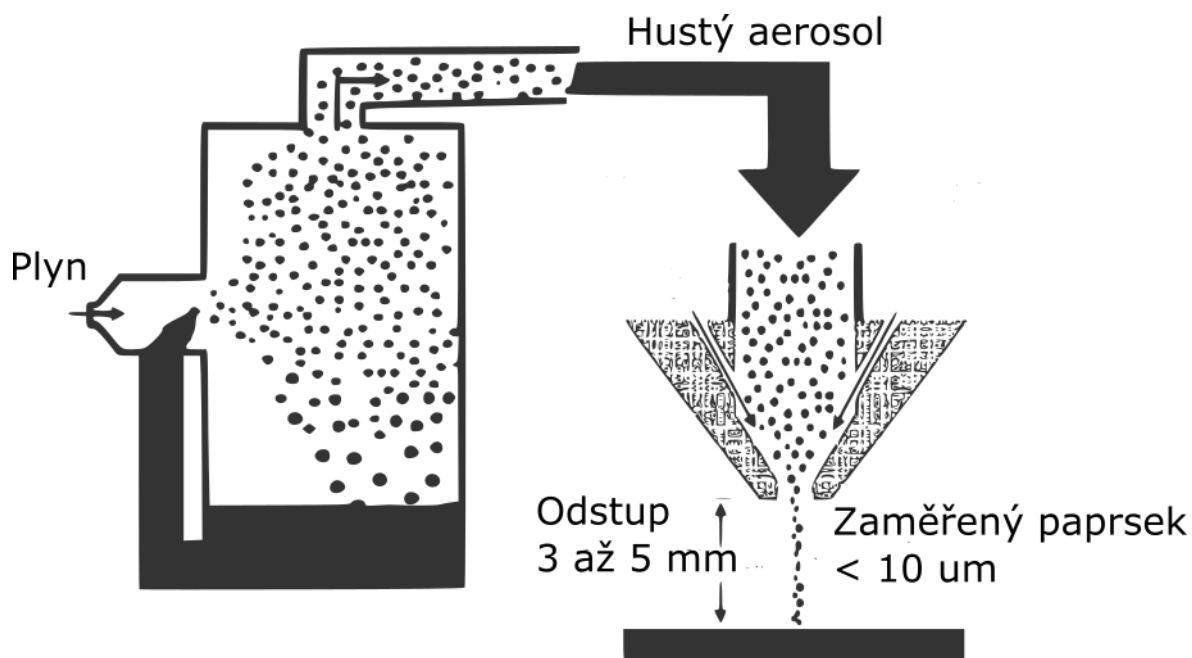
Tato metoda probíhá v uzavřené komoře za sníženého tlaku 10^{-1} Pa. Nanášený materiál tvoří katodu elektrodového systému a anodu tvoří substráty, na něž má být vrstva nanášena. V pracovním prostoru je vytvořen doutnavý výboj, jehož důsledkem je nerovnoměrné rozložení potenciálu v prostoru a tzv. katodový spád v oblasti katody. Kladné ionty, vznikající ve výboji, jsou unášeny směrem ke katodě a v oblasti katodového spádu urychleny tak, že po dopadu na katodu z ní vyrážejí částice naprašovaného materiálu. Částice se šíří prostorem a usazují se na okolních tělesech, tedy i na anodě se shodně umístěnými substráty, na nichž vzniká tenká vrstva. [22] Obecný náčrt této metody je na (Obr. 20).



Obr. 20: Metoda vakuového naprašování [37]

3.8 Aerosol Jet Printing

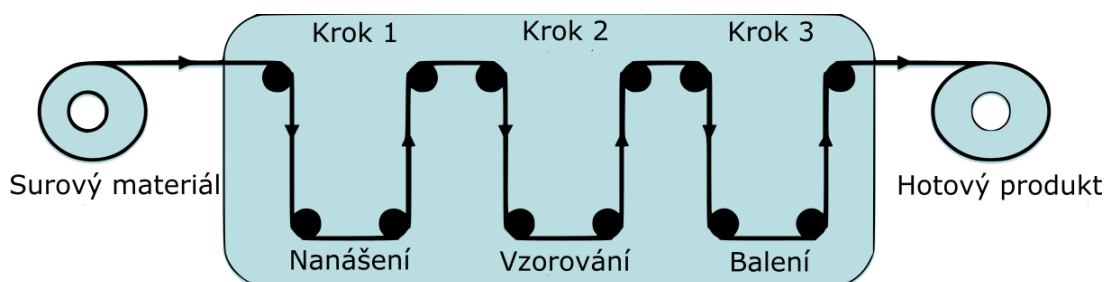
Aerosol Jet Printing neboli tisk pomocí trysky je další využívaná metoda tisku. Postup metody začíná u tzv. atomizace inkoustu, čímž vznikají kapky o průměru 1-2 μm . Tyto kapičky jsou proudem plynu unášeny do tiskové hlavy, kde jsou míseny s čistým plynem. Plyn zacílí kapky do velmi úzkého paprsku. Z tiskové hlavy proudí paprsek skrz trysku, která stlačí aerosolový paprsek až na průměr kolem 10 μm . Paprsek opouští ústí trysky vysokou rychlostí okolo 50 m/sec a dopadá na substrát. Díky vysoké rychlosti kapiček je možná relativně velká vzdálenost tryskové hlavy od substrátu, a to 3-5 mm. Celý postup výroby je znázorněn na *Obr. 21*. Pro vytvoření elektrických spojů, pasivních, ale i aktivních součástí je zde mechanická uzávěrka pro ovládání proudu kapek formou start/stop. Metoda je schopná vytvářet šířku spojů od 10 μm až do řádu stovek μm . Jednou z mnoha výhod této metody je, že není zapotřebí speciálních vakuových nebo tlakových komor a celý tisk probíhá za pokojové teploty. Navzdory vysoké rychlosti tisku je proces jemnou záležitostí a nedochází k roztříkávání kapek do okolí. K dosažení konečných elektrických a mechanických vlastností je potřeba udělat dodatečnou povrchovou úpravu. [27] [28] [29]



Obr. 21: Princip metody Aerosol Jet Printing. [27]

3.9 Roll to Roll (R2R)

Metoda roll to roll spočívá ve vytvoření elektrického zařízení na flexibilním substrátu, tvořeného buď z pružného plastu, nebo kovové folie. Proces nanášení se rozděluje do tří základních částí výroby, a to nanášení, vzorování a obalování, jak je vidět na (Obr 22). Například při výrobě OTFT se spodními kontakty (viz. kapitola výše) se nanese na substrát průhledný vodivý oxidový film, který působí jako vstupní elektroda gate. Indium Tin Oxide (ITO) se využívá k této části procesu z jednoduchých tří důvodů. Environmentální stabilita, nízký kontaktní odpor ($1-3 \cdot 10^{-4} \Omega/cm$) a vysoká propustnost viditelného světla ($> 90\%$ při tloušťce filmu 100 nm). Následně je vytvořen tenký izolační dielektrický film, pomocí SiO_2 , a kovové zdrojové (source) a odtokové (drain) elektrody. Pro nanášení se využívají spíše metody Large Area Display než klasické fotolitografické metody jako laserová ablace, inkjet printing nebo soft lithography. Jako poslední krok se musí celé zařízení zabalit do bariérové vrstvy, aby se zabránilo možné kontaminaci s kyslíkem nebo vlhkostí. [26]



Obr. 22: Proces metody Roll-to-roll [26]

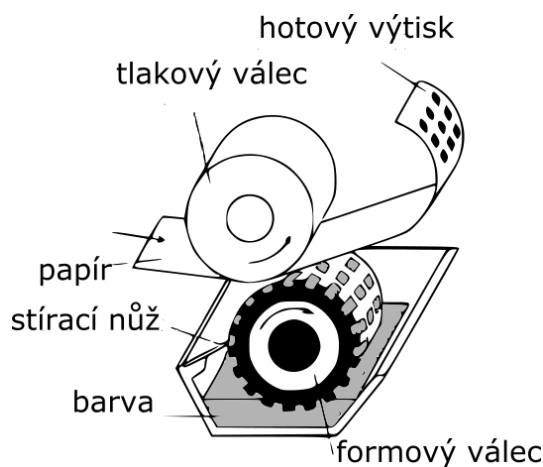
3.10 Hlubotisk

Hlubotisk, jak už název napovídá, je založen na tisku z hloubky. Forma pro tisk je reliéfní a tiskové prvky jsou zahlobeny pod úroveň prvků netisknoucích (naopak než u tisku z výšky).

Proces hlubotisku

Nejprve je reliéfní forma ovrstvena inkoustem a následně je pomocí třerky setřen nadbytečný inkoust. Barva tak zůstane v hloubce reliéfu. Následně je přiložen substrát, například ve formě papíru, a je pomocí pogumovaného válce přitiskován k matici s daným

vzorem. Předem nanesený inkoust se obtiskne na daný substrát. Proces je znázorněn na (Obr. 23). Touto metodou lze dosáhnout velmi jemných motivů, řádově na úrovni jednotek



μm. [3]

Výhody této metody spočívají v relativní jednoduchosti procesu. Dále je možné díky určité hloubce reliéfu nastavit danou tloušťku naneseného materiálu na substrát. To umožňuje dosáhnout rozdílného elektrického odporu nebo optických vlastností v daném místě vrstvy. Pro tuto metodu se používají materiály s nižší viskozitou. Díky vysoké životnosti válce (10^6 rotací válce) je ve vývoji hlubotiskových zařízení pro tištěnou elektroniku věnována velká pozornost. [3]

3.11 Sítotisk

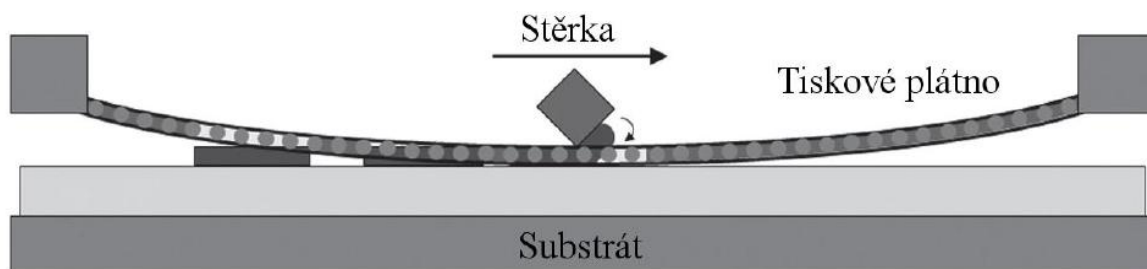
Obr. 23: Princip metody hlubotisku

U metody sítotisku se jedná o tisk přes předem danou šablonu. Jedná se o nejběžněji používanou metodu s dokonalým způsobem tisku skrz šablonu. Síla této techniky spočívá v jednoduchosti a kompatibilitě s různými materiály a povrchy substrátů. Do větší míry byla tato metoda používána pro tisk pasivních materiálů. [3] [30]

Princip sítotisku

Nejprve se na jemné síťovině vytvoří maska s tiskovým motivem, který selektivně odkrývá části síta určené pro tisk. Poté se pomocí třerky do daných odkrytých částí síta určených pro tisk protlačí tisková formulace, která ulpí na substrátu pod sítem a tím vytváří funkční motiv. Jednou z možností této metody je opakovatelný přetisk, díky kterému je možné dosáhnout relativně velmi tlusté vrstvy v rozsahu $1\div 300$ μm. Je možné využívat

širokou škálu přípustných viskozit tiskové formulace, a to $0,1 \div 150$ Pa·s. [3] Postup sítotisku je znázorněn na (Obr 24).



Obr. 24: Princip metody sítotisku. [38]

Jediný problém u této metody je v nejmenším možném rozlišení tisku. Když je požadována velká přesnost tisku, musí být jemnější síťovina. Při klasické výrobě sítotiskem se využívá $100 \mu\text{m}$ rozlišení, není to ale minimální hodnota, které lze dosáhnout. Při určitém dodržení daných zásad je možné dosáhnout rozlišení $20 \mu\text{m}$. Ovšem na úkor rychlosti tisku. [3]

4 Nejčastěji používaná výrobní technologie

S požadavkem na velmi nízkou cenu a extrémně rychlou výrobu tenkých vrstev se v poslední době nejvíce upřednostňuje metoda výroby Roll to roll (R2R). Tato metoda umožňuje tisk vysokou rychlostí tenkých vrstev na v podstatě nekonečný pás substrátu, který je navíjen pomocí rotačních válců. Výhodou technologie výroby R2R je kompatibilita s mnoha tiskovými metodami. Jako například sítotisk, hlubotisk, inkjet a aerosol-jet. Další nespornou výhodou je, že metody používané v R2R, lze relativně snadno převést z laboratoře do velkého výrobního měřítka. Toto nelze například říci o Spin Coatingu, který je spíše vhodný pro menší výrobní plochy, kvůli jeho principu nanášení materiálu na substrát a zbytečně plýtvání materiálem při výrobě. Dalším příkladem je vakuová depozice, která kvůli tomu, že vyžaduje vakuum, je velmi časově náročná a nákladná je pro R2R nevýhodná. [31] [32]

Závěr

Rozdíl mezi anorganickými a organickými tranzistory je v jejich zpracovatelnosti. Zatímco organické polovodiče pro organické tranzistory jsou mnohem snáze rozpustitelné tak anorganické polovodiče pro anorganické tranzistory mohou být rozptýleny v rozpouštědle za použití správných aditiv. Díky tomuto jevu mohou být tištěny na tenkých vrstvách jako organické tranzistory. Anorganické materiály ale mají za těchto podmínek velmi sníženou vodivost materiálu. Mezi největší výhody organických tranzistorů a celkově materiálů patří mechanické a optické vlastnosti, zpracovatelnost a cena výroby. Ovšem nesou s sebou i několik záporů a to životnost a stálost. Celkově se organické materiály dostávají pomalu ale jistě do popředí elektroniky, nicméně na plnohodnotný a hlavně kvalitní polovodič si musí ještě počkat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BEŠTA, Ing. M. *Bipolární tranzistory* [online]. 2012. Dostupné z: chrome-extension://oemmnrcblldboiebfnladdacbfmadadm/http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/T1.5-Tranzistor.pdf
- [2] KLAUZ, Milan. Jak se vyrábí tištěná elektronika. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2013 [vid. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:3140/jak-se-vyrabi-tistena-elektronika>
- [3] PRETL, Silvan. *Heterostruktury na bázi organických vodivých materiálů*. Plzeň, 2015. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] PERKINSON, Joy C. Organic field-effect transistors. *Opto-Electronics Review* [online]. 2007, 121–136 [vid. 2017-05-10]. ISSN 1230-3402. Dostupné z: [http://www.unm.edu/~solgel/Course Stuff/Horowitz Adv Mater 1998.pdf](http://www.unm.edu/~solgel/Course%20Stuff/Horowitz%20Adv%20Mater%201998.pdf)
- [5] LIN, Peng a Feng YAN. Organic thin-film transistors for chemical and biological sensing. *Advanced Materials*. 2012, 34–51. ISSN 09359648.
- [6] WANG, Denjung, Vincent NOËL a Benoît PIRO. Electrolytic Gated Organic Field-Effect Transistors for Application in Biosensors—A Review. *Electronics* [online]. 2016, 9 [vid. 2017-05-13]. ISSN 2079-9292. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2079-9292/5/1/9>
- [7] DU, Haiwei, Xi LIN, Zhemi XU a Dewei CHU. *Electric double-layer transistors: a review of recent progress*. B.m.: Springer US, 2015. ISBN 1085301591.
- [8] WONG, William S. a Alberto SALLEO. *Flexible Electronics* [online]. 2009. ISBN 978-0-387-74362-2. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-74363-9>
- [9] LI, Flora M, Arokia NATHAN, Yiliang WU a Beng S. ONG. *Organic Thin Film Transistor Integration* [online]. 2011. ISBN 9783527634446. Dostupné

- z: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84891575564&partnerID=40&md5=d4c3e5c0720667638dc4854cbdfae052%0Ahttp://doi.wiley.com/10.1002/9783527634446>
- [10] OUYANG, Jianyong, Chi -Wei CHU, Fang- Chung CHEN, Qianfei XU a Yang YANG. Polymer Optoelectronic Devices with High- Conductivity Poly(3,4- Ethylenedioxythiophene) Anodes. *Journal of Macromolecular Science, Part A* [online]. 2004, 1497–1511 [vid. 2017-05-13]. ISSN 1060-1325. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/MA-200035426>
- [11] MRACEK, Lukas, Tomas SYROVY, Silvan PRETL, Stanislav NESPUREK a Ales HAMACEK. Comparison of quasi-solid state and liquid electrolytes for organic electrochemical transistor. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*. 2016, 66–70. ISSN 21612536.
- [12] HEEGER, A J a A G MACDIARMID. Progress in conducting polymers: Studies of polyacetylene (1980). In: *2013 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. B.m.: IEEE, 1980, s. 782–783. ISBN 9781467363747.
- [13] DAI, Liming. Conducting Polymers. *Intelligent Macromolecules for Smart Devices* [online]. 2004, 41–80 [vid. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/b97517>
- [14] SHIRAKAWA, Hideki. The discovery of polyacetylene film - The dawning of an era of conducting polymers. *Current Applied Physics*. 2001, 281–286. ISSN 15671739.
- [15] PROKEŠ, Jan, Jaroslav STEJSKAL a Mária OMASTOVÁ. Polyanilin a polypyrrol - dva představitelé vodivých polymerů. *Chemické listy*. 2001, 484–492.
- [16] MOLAPO, Kerileng M., Peter M. NDANGILI, Rachel F. AJAYI, Gcineka MBAMBISA, Stephen M. MAILU, Njagi NJOMO, Milua MASIKINI, Priscilla BAKER a Emmanuel I. IWUOHA. Electronics of conjugated polymers (I): Polyaniline. *International Journal of Electrochemical Science*. 2012, 11859–11875.

ISSN 14523981.

- [17] ATEH, D.D, H.A NAVSARIA a P VADGAMA. Polypyrrole-based conducting polymers and interactions with biological tissues. *Journal of The Royal Society Interface* [online]. 2006, 741–752 [vid. 2017-05-15]. ISSN 1742-5689. Dostupné z: <http://rsif.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rsif.2006.0141>
- [18] LIU, Ruochen a Zhengping LIU. Polythiophene: Synthesis in aqueous medium and controllable morphology. *Chinese Science Bulletin*. 2009, 2028–2032. ISSN 10016538.
- [19] KAMAT, S. V., S. H. TAMBOLI, Vijaya PURI, R. K. PURI, J. B. YADAV a Oh Shom JOO. Optical and electrical properties of polythiophene thin films: Effect of post deposition heating. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2010, 2301–2305. ISSN 14544164.
- [20] LI, Yongfang. *Organic Optoelectronic Materials*. Springer [online]. 2015 [vid. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-16862-3>
- [21] ZHENAN BAO, Jason Locklin. *Organic Field-Effect Transistor*. B.m.: Taylor & Francis Group, LLC, 2007. ISBN 978-0-8493-8080-8.
- [22] VIPUL SINGH. *Optoelectronic Study of Interface and Its Related Effects in Organic Electronic Devices*. Wakamatsu, 2009. Kyushu Institute of Technology 2-4 Hibikino.
- [23] M, Test No. Spin coating. *Materials Today* [online]. 2002, 62 [vid. 2017-05-16]. ISSN 13697021. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702102012671>
- [24] POTÉ, Marcello a D Project MANAGER. *Dip Coating vs . Spin Coating* [online]. 2016 [vid. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.satisloh.com>
- [25] SINGH, Madhusudan, Hanna M. HAVERINEN, Parul DHAGAT a Ghassan E.

- JABBOUR. Inkjet printing-process and its applications. *Advanced Materials* [online]. 2010, **22**(6), 673–685. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.200901141
- [26] SCHWARTZ, Evan. Roll to Roll Processing for Flexible Electronics. *Roll to Roll Processing for Flexible Electronics* [online]. 2006, 1–24 [vid. 2017-05-17]. Dostupné z: [http://people.ccmr.cornell.edu/~cober/mse542/page2/files/SchwartzR2R Processing.pdf](http://people.ccmr.cornell.edu/~cober/mse542/page2/files/SchwartzR2RProcessing.pdf)
- [27] ROSCHER, Frank. Aerosol jet printing 1 2. nedatováno, 1–2.
- [28] HEDGES, Martin a Aaron Borrás MARIN. 3D Aerosol Jet® Printing - Adding Electronics Functionality to RP/RM. *WHITEPAPER - Optomec*. 2012, 14–15. ISSN 09359648.
- [29] KOPPENS, Arjen. Jak může elektronický průmysl využít tisk plošných spojů ve 3D. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2015 [vid. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:23513/jak-muze-elektronicky-prumysl-vyuzit-tisk-plosnych-spoju-ve-3d>
- [30] RICHARD MANNERBRO AND MARTIN RANLÖF. Institutionen för systemteknik Inkjet and Screen Printed Electrochemical Organic Electronics. *Electrical Engineering* [online]. 2007, 91 [vid. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.bk.isy.liu.se/%5Cnhttp://www.ep.liu.se/2007/3876>
- [31] LEVORA, Jakub. *Tištěné senzory plynů*. Plzeň, 2015. Západočeská univerzita.
- [32] SØNDERGAARD, Roar R., Markus HÖSEL a Frederik C. KREBS. Roll-to-Roll fabrication of large area functional organic materials. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*. 2013, 16–34. ISSN 08876266.
- [33] KERGOAT, Loïg, Benoît PIRO, Magnus BERGGREN, Gilles HOROWITZ a Minh Chau PHAM. Advances in organic transistor-based biosensors: From organic electrochemical transistors to electrolyte-gated organic field-effect transistors.

- Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2012, 1813–1826. ISSN 16182642.
- [34] CHOU, Tsu-Ruey, Szu-Hua CHEN, Yen-Te CHIANG, Yi-Ting LIN a Chih-Yu CHAO. Highly conductive PEDOT:PSS films by post-treatment with dimethyl sulfoxide for ITO-free liquid crystal display. *J. Mater. Chem. C* [online]. 2015, 3760–3766 [vid. 2017-05-14]. ISSN 2050-7526. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5TC00276A>
- [35] AEGERTER, Michel A. *Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users* [online]. 2004. ISBN 978-1-4419-5455-8. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-88953-5>
- [36] TSENG, Huai Yuan a Vivek SUBRAMANIAN. All inkjet printed self-aligned transistors and circuits applications. *Technical Digest - International Electron Devices Meeting, IEDM*. 2009, 391–394. ISSN 01631918.
- [37] ADÁMEK. *Technologie výroby a používané materiály* [online]. [vid. 2017-05-26]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_2_3_2.htm
- [38] MELICHAR, Bohuslav. *Výrobní technologie pro tištěnou a flexibilní elektroniku*. 2013.