

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh a simulace vodivých motivů na flexibilních
substrátech**

Bc. Martin Šístek

Plzeň 2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2013/2014**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin ŠÍSTEK**
Osobní číslo: **E12N0040P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh a simulace vodivých motivů na flexibilních substrátech**
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 návrhu vodivých motivů na flexibilních substrátech.
2. Navrhněte vodivé motivy k propojení sensorových modulů na flexibilních substrátech.
3. Proveďte výpočty a simulace elektrických parametrů navržených vodivých motivů na flexibilních substrátech.
4. Navrhněte vhodné kontaktování flexibilních substrátů.
5. Navrhněte optimalizaci vodivých motivů s ohledem na dostupné výrobní technologie.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

- 1. Hoffmann K.: Planární mikrovlnné obvody**
- 2. Záhlava V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů**
- 3. Internetové zdroje**


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil,
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne

podpis

Martin Šístek

"Tento příspěvek vznikl s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094."

Anotace

Cílem této diplomové práce je podat teoretický přehled o flexibilních substrátech používaných v elektrotechnickém odvětví. Dále se práce zabývá výrobními postupy a způsoby vytváření elektronických struktur na ohebné substráty a vytvoření funkčních vrstev. Praktická část této práce je věnován výpočtům, simulacím a měřením vodivých motivů na těchto substrátech. Výsledky z naměřených a teoretických hodnot jsou zhodnoceny a porovnány v závěru této práce.

Klíčová slova

Flexibilní elektronika, flexibilní substrát, ohebnost, PET folie, tiskové metody, vodivý motiv, mikropáskové vedení

Annotation

The purpose of this diploma thesis is a theoretical overview of flexible substrates used in the electronics industry. This thesis also discusses the manufacturing processes and methods of creating electronic structures on flexible substrates and the creation of functional layers. The practical part of this work is devoted to the calculations, simulations and measurements of conductive themes on these substrates. The results of the measured and theoretical values are evaluated and compared at the end of this work.

Keywords

Flexible electronics, flexible substrate, flexibility, PET foil, printing methods, conductive theme, micro-strip line

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Tomáši Blechovy, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky při jejím zpracování a v neposlední řadě za přátelský přístup.

Dále bych chtěl poděkovat svým nejbližším za morální podporu při psaní této práce, i v průběhu studia.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 VLASTNOSTI FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTŮ	12
1.1 ROZMĚROVÁ STABILITA	12
1.2 FLEXIBILITA	13
1.3 TEPLOTNÍ ODOLNOST	13
1.4 ODOLNOST PROTI ROZTRŽENÍ	14
1.5 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI	14
1.6 ABSORPCE VLHKOSTI	14
1.7 CHEMICKÁ ODOLNOST	15
2 ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY PRO VÝROBU FLEXIBILNÍCH OBVODŮ	16
3 FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTY	19
3.1 PLASTOVÉ SUBSTRÁTY	20
3.2 SKELNÝ SUBSTRÁT	26
3.3 TEXTILNÍ SUBSTRÁT	26
3.4 PRUŽNÝ KOVOVÝ SUBSTRÁT	27
3.5 SROVNÁNÍ FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTŮ	28
4 MATERIÁLY PRO FUNKČNÍ VRSTVY FLEXIBILNÍCH SYSTÉMŮ	30
4.1 VODIVÉ MATERIÁLY	30
4.2 POLOVODIVÉ MATERIÁLY	30
4.3 DIELEKTRICKÉ MATERIÁLY	31
4.4 ZALÉVACÍ HMOTY	32
5 VÝROBNÍ POSTUPY A ZPŮSOBY NANÁŠENÍ ORGANICKÉ ELEKTRONIKY NA FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTY	33
5.1 METODA ROLL – TO – ROLL (METODA NAVÍJENÉHO SUBSTRÁTU NA VÁLEC)	33
5.2 METODA SHEETS BY BATCH (METODA DÁVKOVÉHO ZPRACOVÁNÍ)	34
5.3 MATERIÁLY NANÁŠENÉ V KAPALNÉM SKUPENSTVÍ	34
5.4 MATERIÁLY NANÁŠENÉ V PLYNNÉM SKUPENSTVÍ	48
5.5 SHRNUTÍ TISKOVÝCH METOD	51
6 MĚŘENÍ A VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ VODIVÝCH MOTIVŮ NA FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTECH	52
6.1 TEORETICKÝ VÝPOČET	53
6.2 SIMULACE	54
6.3 MĚŘENÍ FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTŮ	55
6.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTŮ	58
7 ZÁVĚR	64
8 SEZNAM LITERATURY	66

Seznam symbolů a zkratek

C_p	Paralelní elektrická kapacita [F]
CVD.....	Chemical Vapour Deposition – Chemická depozice z plynné fáze
D	Flexibilita substrátu
DOD.....	Metoda tisku Drop On Demand
E	Youngův modul pružnosti [MPa]
EBL.....	Electron beam lithography – Elektronová litografie
EPL.....	Electron projection lithography – Projekční elektronová litografie
EUV.....	Extreme ultraviolet lithography – Extrémní ultrafialová litografie
FIB.....	Focused Ion Beam – Litografie zaostřeným iontovým svazkem
FR-4.....	Izolační deska z nealkalické skelné tkaniny
h	Tloušťka desky [mm]
LCD.....	Liquid crystal display – Displej z tekutých krystalů
LCP.....	Liquid crystal polymer – Polymery tekutých krystalů
L_s	Sériová indukčnost [H]
MEK.....	Methylethylketon
OLED.....	Organic light-emitting diode – Typ displeje využívající technologii organických elektroluminiscenčních diod
P – NIL.....	Photo nanoimprint lithography – Foto – nanotisková litografie
PAR.....	Polyarylát
PC.....	Polykarbonát
PE.....	Polyethylen
PEEK.....	Polyetherketonové vlákno
PEN.....	Polyetylenaftalát
PES.....	Aromatické polyethersulfony
PET.....	Polyetylentereftalát
PI.....	Polyimid
PMMA.....	Poly(hexafluorobutylmetakrylát)
PP.....	Polypropylen
PPS.....	Polyfenylsulfidové vlákno
PVC.....	Polyvinylchlorid

PVD.....	Physical Vapour Deposition – Nanášení odpařením z pevné fáze
R2R.....	Roll-to-Roll metoda
R_{DC}	Stejnoseměrný odpor [Ω]
T – NIL.....	Thermal nanoimprint lithography – Termoplastická nanotisková technologie
t	Tloušťka měděné folie [μm]
T_g	Teplota skelného přechodu [$^{\circ}C$]
T_{max}	Maximální výrobní teplota [$^{\circ}C$]
ν	Poissonovo číslo
W	Šířka vodivé cesty [mm]
XRL.....	X-Ray lithography – Rentgenová litografie
Z_0	Charakteristická impedance [Ω]
Z_k	Impedance nakrátko [Ω]
Z_p	Impedance naprázdno [Ω]
ΔCTE	Rozdíl koeficientu tepelné roztažnosti folie a substrátu
ΔT	Teplotní odchylka během zpracování
ε	Vnitřní poloměr ohnutého materiálu
ε_r	Relativní permitivita [-]
ω	Úhlová rychlost [$rad.s^{-1}$]

Úvod

Dříve byla elektronika postavena především na pevných substrátech. V současné době se rychle rozvíjí tzv. flexibilní elektronika, která je založena na ohebných elektronických obvodech. Tyto elektronické ohebné systémy mohou být vhodnou náhradou pro budoucí spotřební elektroniku, namísto dnešních elektronických obvodů na pevných či nosných materiálech. Mezi výhody flexibilní elektroniky patří, oproti klasické elektronice na pevných substrátech, například ohebnost, menší hmotnost nebo nízké výrobní náklady. Pro výrobu ohebné elektroniky se používají speciální materiály většinou na bázi plastických substrátů, jako jsou polyamidy, polyetherketonová vlákna (PEEK) nebo průhledné vodivé polyestery.[1]

Diplomová práce je členěna na 3 části. V první, teoretické části, jsou uvedeny důležité vlastnosti flexibilních substrátů, základní konstrukční prvky a přehled těchto ohebných substrátů, používaných v elektrotechnickém odvětví. Druhá obsáhlá část pojednává o výrobních postupech a způsobu nanášení organické elektroniky na tyto substráty. Praktická část je zaměřena na problematiku vodivých motivů na ohebných substrátech. Zabývá se především měřením a simulací důležitých elektrických parametrů (RLC a Z_0), které mají zásadní vliv na funkčnost testovacích vzorků. V závěru této diplomové práce jsou zhodnoceny a porovnány výsledky z naměřených a teoretických hodnot.

Při vyslovení pojmu flexibilita jistě každého napadne český význam pro toto slovo - pružnost nebo ohebnost. Dále tento pojem může charakterizovat také schopnost určitého systému a materiálu přizpůsobovat své chování v závislosti na vnějších podmínkách, požadavcích nebo změnách.

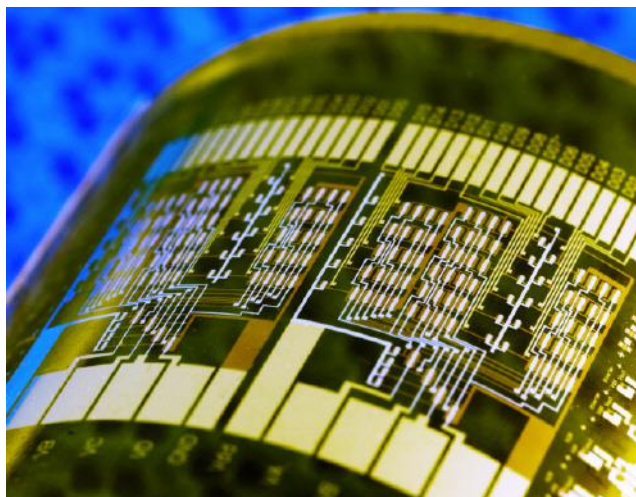
Nosné materiály, které tvoří základní stavební prvky elektronických systémů, lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou klasické, mechanicky tuhé nosné materiály. Nejčastěji se jedná o laminát ze skelné tkaniny, který je sycený epoxidovou pryskyřicí (deska typu FR - 4). Druhou skupinou, na kterou je zaměřena tato diplomová práce, jsou flexibilní, resp. ohebné substráty.

1 Vlastnosti flexibilních substrátů

Existuje řada materiálů, které lze použít pro výrobu flexibilních obvodů. Tyto materiály musí splňovat určitá kritéria, která jsou popsána níže. Je zde ale řada kritérií, díky kterým lze vybrat správný substrát s důležitými a žádoucími vlastnostmi k vytvoření flexibilního obvodu.[1]

Stále se vyvíjí nové kombinace materiálů s foliemi, filmy, lepidly, stejně tak se zlepšují výrobní procesy a vyvíjí se nové speciální vybavení. Díky tomu lze uspokojit rostoucí poptávku po menších, lehčích, energeticky méně náročných a rychlejších elektrických obvodech pro budoucí zařízení, která vyžadují nové funkce a možnosti. Jedním z takových příkladů je smartphone.

Typický flexibilní obvod se dnes skládá z tenké základny, kterou tvoří například dielektrická polyimidová folie (PI) o tloušťce 50 až 125 μm . [1]



Obr. 1.1 Flexibilní obvod [2]

1.1 Rozměrová stabilita

Flexibilní laminát musí být tvarově stabilní. Expanze nebo smršťování základního materiálu je při zpracování problémem jak pro výrobce, tak pro uživatele. Těmto vlivům je potřeba se vyvarovat, protože pokud není změna předvídatelná, může ovlivnit celý proces výroby obvodu a jeho montáž.[1]

1.2 Flexibilita

Flexibilita substrátu je dána tuhostí v ohybu, kterou popisuje následující vzorec:

$$D = \frac{(E \cdot t^3)}{[12 \cdot (1 - \nu^2)]} \quad (1.1)$$

Kde E je Youngův modul pružnosti, t je tloušťka substrátu a ν je Poissonovo číslo.[3]

Pružnost materiálu je velmi často kritickým atributem. Flexibilní obvody mohou být vystaveny extrémnímu rozsahu teplot. Velmi důležité je zajistit zejména pružnost při nízkých teplotách, kdy má materiál tendenci křehnout a následně se může rozlomit. Mnoho materiálů může být pružných, pokud jsou dostatečně tenké. Například i křemík, pokud je jeho vrstva extrémně tenká, v rozmezí několika mikrometrů, může být poměrně flexibilní.[1]

Požadavky na flexibilitu mohou být také odlišné v závislosti na tom, v jaké aplikaci budou materiály použity. Ve skutečnosti mohou být substráty používány v odlišných oblastech, než v kterých byly výrobcem testovány. Rozsah použití a to, v jaké oblasti budou nainstalovány, mohou být rozhodujícím kritériem při výběru materiálu.[1]

Podle míry flexibility můžeme materiály rozdělit na tři základní kategorie: *flexibilní*, *permanently tvarované* a *pružně roztahitelné*. Veškeré výrobní postupy jsou v současné době aplikovány na rovný kus obrobku, který je poté tvarován do požadovaného tvaru až ve finální fázi výrobního procesu. Tento přístup se používá na základě širokých znalostí z planárních integrovaných obvodů a zobrazovací techniky.[3]

Pokud je mechanicky homogenní plech o tloušťce d ohnut do válcového poloměru r , kolmo k ose ohybu, jeho vnější povrch se rozšiřuje a vnitřní poloměr je deformován jako:

$$\varepsilon = \frac{d}{2r} \quad (1.2)$$

1.3 Teplotní odolnost

Protože při montáži elektronických částí se používají procesy se zvýšenou teplotou (jako je např. pájení přetavením), musí být pro flexibilní obvod zvolen takový materiál, který bude spolehlivě odolávat těmto výrobním teplotám a nebude docházet k žádnému narušení. To nutí uživatele, aby vybíraly dražší materiály, nebo pájky s nižším bodem tání.[1]

Při maximálním zatížení substrátu pracovní teplotou, například teplotou skelného přechodu (T_g), musí tato teplota odpovídat maximální výrobní teplotě (T_{max}). Vysoká tepelná vodivost je velmi důležitá z hlediska chlazení celého obvodu. Během tepelného zpracování je důležité,

aby rozdíl hodnot mezi teplotou nanesené folie a substrátu nebyl příliš velký. V takovém případě může docházet k degradaci celého substrátu. Přípustné toleranční hodnoty jsou charakterizovány následujícím vzorcem:

$$|\Delta CTE \cdot \Delta T| \leq 0,1 - 0,3 \% \quad (1.3)$$

kde ΔCTE je rozdíl koeficientu tepelné roztažnosti folie a substrátu a ΔT je teplotní odchylka během zpracování.[3]

1.4 Odolnost proti roztržení

Při konstrukci flexibilních obvodů se používají tenké nevyztužené základní materiály, které jsou náchylné na protržení. Preferovaným základním materiálem při výrobě flexibilních obvodů je takový materiál, který bude vysoce odolný proti jakémukoliv protržení. Odolnost proti roztržení je u těchto substrátů cenná vlastnost vzhledem k jejich tenké a jemné struktuře.[1]

1.5 Elektrické vlastnosti

Na elektrické vlastnosti jsou kladeny velmi vysoké nároky a jsou jedním z důležitých parametrů, na které se zaměřuje pozornost. Elektrické vlastnosti se stanou nezbytnými pro nové produkty. Bude potřeba nadále zvyšovat jejich kvalitu a parametry kvůli růstu rychlostí analogových i digitálních signálů. Materiály určené pro flexibilní obvodové aplikace musí mít elektrické vlastnosti přizpůsobené výkonu a potřebám výrobku. Se zvyšující se přenosovou rychlostí by měl být ztrátový činitel a dielektrická konstanta použitého materiálu nízká. Další žádoucí vlastností v oblasti velmi vysokého napětí je izolační odpor. Nicméně u některých aplikací mohou být požadavky různé - jako například u aplikací, u kterých je vysoká dielektrická konstanta a zároveň tedy velká kapacita. Naštěstí existuje mnoho potenciálních materiálů, které splňují rozdílné potřeby.[1]

1.6 Absorpce vlhkosti

Míra vlhkosti negativně ovlivňuje materiál již při výrobě. Může například způsobit separaci vzájemně propojených vrstev a degradaci vlastností hotového produktu. Vlastnosti, které mohou být narušeny, jsou například dielektrická konstanta a zvýšení ztráty signálu. Vlhkost prostředí je v různých částech světa odlišná. Je důležité přizpůsobit návrh a výrobu požadovaného materiálu tak, aby se mohl materiál se svými vlastnostmi správně přizpůsobit v určitém prostředí. Řízení vlhkosti je obtížný a drahý proces, proto je potřeba pochopit aspekty materiálů.[1]

1.7 Chemická odolnost

Schopnost flexibilního substrátu odolávat různým chemickým látkám je nesmírně důležitá jak pro výrobce, tak pro koncové uživatele. Materiál musí být odolný vůči různým chemickým látkám a rozpouštědlům, které jsou používány při montážích a čištění.[1]

Flexibilní substráty by neměly dále uvolňovat do prostředí nečistoty. Za opravdu kvalitní substráty se považují ty, které brání pronikání atmosférických plynů a jsou vůči nim stabilně odolné. Substráty používané pro OLED aplikace musí mít hodnoty vnikání vodních par menší než 10^{-6} g/m²/den a rychlost vnikání kyslíku 10^{-3} až 10^{-5} cm³/m²/den.[3]



Obr. 1.2 Flexibilní OLED displej [4]

Pro větší ochranu životního prostředí a bezpečnost pracovníků bylo mnoho materiálů a chemických procesů nahrazeno novějšími a více bezpečnými. Například při leptání rezistu se používají leptavé vodné roztoky, které jsou bezpečnější než dříve používané chemikálie, jako jsou dichlormethan a Butanon, též známý jako methylethylketon (MEK), které byly běžně používány pro čištění obvodů. V současné době jsou zaváděna více benigní rozpouštědla nebo čisticí prostředky šetrná k životnímu prostředí a kompatibilita jejich chemického složení musí být chápána s ohledem na materiály pro výrobu flexibilních obvodů. Další metody, jako je čištění plazmou a čištění bez použití rozpouštědel, se staly běžným způsobem k odstraňování lepidel z povrchu pájecích plošek bez vystavení obvodů působení nebezpečných rozpouštědel a vyřešení problémů chemické adsorpce. V konečném použití je nyní možné vzít více v úvahu chemickou odolnost při výběru lepidla, krycí folie a krycího nátěru.[3]

2 Základní konstrukční prvky pro výrobu flexibilních obvodů

Protože existuje jen málo základních prvků pro konstrukci flexibilních substrátů, každý z nich má svoji důležitost. Každý prvek konstrukce flexibilního substrátu musí trvale splňovat požadavky kladené na životnost tohoto produktu. Navíc materiál se musí chovat spolehlivě v souladu s ostatními materiálovými prvky konstrukce flexibilního obvodu, aby byla usnadněna jeho výroba a zajištěna jeho spolehlivost.[1]

2.1.1 Základní materiál

Základním materiálem je flexibilní polymerový film, který vytváří základ pro laminát. Za normálních okolností základní materiál flexibilních obvodů zajišťuje, že flexibilní obvod má většinu svých hlavních fyzikálních a elektrických vlastností.[1]

Tloušťka nejvíce ohebných filmů se pohybuje v relativně úzkém rozsahu od $12 \mu\text{m}$ do $125 \mu\text{m}$, ale tloušťka běžného základního materiálu se může pohybovat v daleko širším rozmezí. Zatímco zkušenosti dokazují, že tenčí materiály jsou více flexibilní, nesmí se zapomínat na to, že u většiny materiálů je tuhost úměrná třetí mocnině tloušťky, což znamená, že jestliže se tloušťka materiálu zdvojnásobí, materiál se stane osmkrát tužším a velikost ohybu bude pouze osminová při stejném zatížení. Díky neustále novému chemickému složení filmů a nově vyvíjeným postupům jsou vyráběny stále menší a menší obvody s vyšším výkonem a nižšími náklady.[1]

2.1.2 Lepidla (tenkovrstvé lepení)

Lepidla jsou používána jako spojovací medium pro výrobu laminátů, ale jsou také důležitou částí dielektrického systému obvodu. Je důležité upozornit, že v tomto průmyslu je laminát všeobecně používané slovo, které popisuje vrstvu s kovovým pláštěm, která vytváří flexibilní obvod. Při řešení teplotní odolnosti jsou lepidla typickým limitujícím faktorem laminátu obzvláště v případě, kdy základním materiálem je polyimid. Polyimid je více vhodný do náročnějších teplotních podmínek, a proto je potřeba zvolit takové lepidlo, které je nejvíce podobné svými teplotními vlastnostmi polyimidu. Kvůli dřívějším problémům spojeným s polyimidovými lepidly využívá v současné době mnoho polyamidových flexibilních obvodů systémy lepení jiných polymerních druhů. Avšak v současné době začínají hrát důležitou roli nová termoplastická polyimidová lepidla. I když termoplastické polyimidy obecně nabízejí vyšší teplotní odolnost než většina lepidel, mnoho z nich stále změkne při působení vysokých teplot a

při zatížení, kterým je například vytváření spojů, při kterém může dojít k posunu podložky. Nejlepšími novými materiály jsou termoplastické polyimidy, které jsou odolné proti pohybu. I když jsou to lepidla v pravém slova smyslu, lamináty jsou často označovány za nepřilnavé, ale jejich lepší označení jsou celopolymidové systémy. Stejně jako základní filmy, lepidla jsou také aplikována v různých tloušťkách. Volba tloušťky záleží na funkci aplikace. Například při tvorbě krycích vrstev jsou běžně užívány různé tloušťky lepidla, aby byly splněny požadavky na vyplnění různých tlouštěk měděných folií, které by se mohli dostat do kontaktu. Mnoho dodavatelů používá standardní tloušťku lepidel, která se může měnit v závislosti na požadavcích zákazníka (např. různá impedance). Nanesením tenčí vrstvy lepidla se dosáhne snížení výrobních nákladů a lepší pružnosti, čímž se měď nanese blíže k základní folii.[1]

2.1.3 Kovová folie

Kovové fólie se nejčastěji používají jako vodivé prvky ve flexibilním laminátu. Jedná se o materiál, z něhož jsou obvykle leptány obvodové cesty. Typické flexibilní vrstvené materiály jsou vyrobeny pomocí válcování a žíhání mědi. Mezi nejvíce používané druhy mědi určené pro flexibilní obvody je slitina C110, která je více tvárná díky nízkému obsahu oxidu mědi. Je dobře pájitelná a odolná proti korozi.[1]

Přehled mechanických fyzikálních vlastností a chemického složení slitiny C110 je znázorněn následující tabulkou:

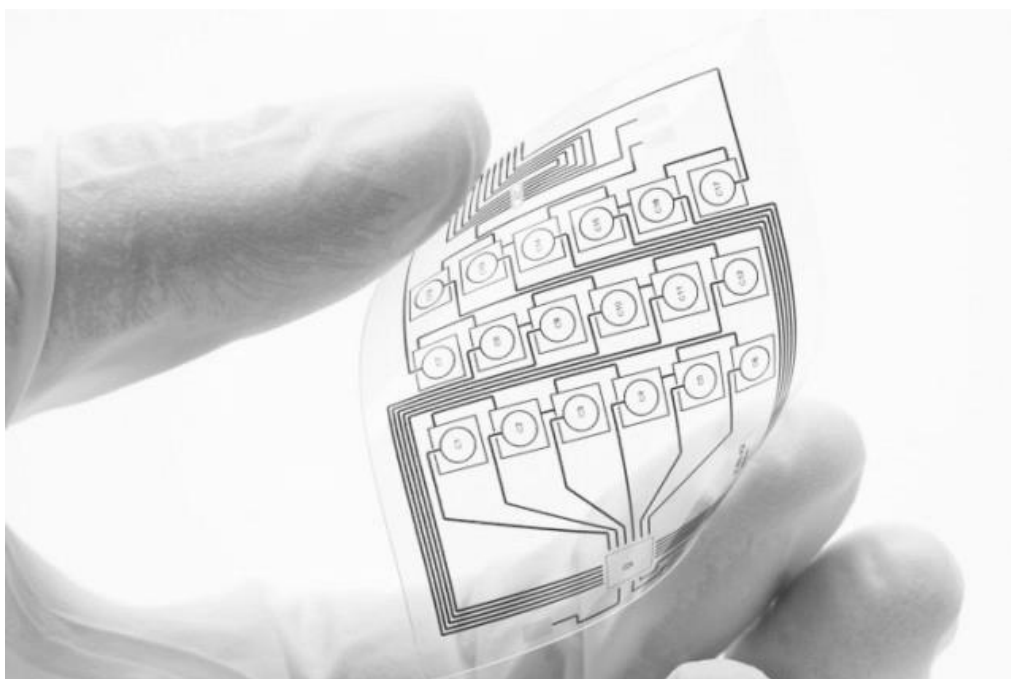
Tab. 2.1 Mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny C110 [5][6]

Mechanické vlastnosti			
Plochý válcový profil			
	Pevnost v tahu [MPa]		
	Min	Max	
Žíhaná slitina	180	260	Tloušťka [mm]: 0,2540 – 1,905 Šířka [mm]: 0,3810 – 6,350
$\frac{1}{4}$ Tvrdost	235	290	
$\frac{1}{2}$ Tvrdost	255	315	
Tvrdá	295	360	
Pružina	345	400	
Fyzikální vlastnosti			
Bod tání (kapaliny) [°C]	1083		
Bod tání (pevné látky) [°C]	1065		
Tepelná vodivost [W/cm.°C]	3,88		
Tepelná kapacita [J/g.°C]	0,385		
Hustota [kg/dm ³]	8,89		
Elektrický odpor [$\Omega \cdot mm^2/m$]	1,724		
Elektrická vodivost [$\Omega \cdot mm^2/m$]	0,58 – 0,59		
Koeficient teplotní roztažnosti [°C]	0,00001764		
Modul pružnosti [MPa]	117 200		
Modul tuhosti [MPa]	44 100		

Měď, válcována za tepla a v pozdější části procesu při vytvrzování lepidla laminátu ještě žíhána, je méně náchylná proti celkovému poškození.[5]

3 Flexibilní substráty

Jak mechanicky pevné, tak i flexibilní polymerní materiály, se používají v elektronice jako materiálové substráty, na které se připojují různé elektrické součástky a čipy. Různé druhy organických materiálů, jako je papír impregnovaný fenolovou pryskyřicí, tkané nebo netkané skelné tkaniny, polyester nebo například polyamid, mohou být použity jako základní podkladový materiál ve flexibilní elektronice. Jaký materiál bude použit v určité aplikaci či zařízení, závisí na konkrétních fyzikálních vlastnostech určitého materiálu, jako je provozní teplota, pracovní frekvence nebo mechanická pevnost daného materiálu.



Obr. 3.1 Elektrický obvod na flexibilním substrátu - PI folie [7]

Nízké náklady, jednoduchost výroby a snadná opravitelnost patří rovněž mezi parametry, které jsou zohledněny při volbě materiálu.[8]

3.1 Plastové substráty

3.1.1 PI folie

Polyimidové folie (Kapton®) jsou jedním z nejčastěji používaných materiálů pro flexibilní elektroniku.

Obecně se vyrábějí polykondenzací z aromatického dianhydridu a aromatického diaminu. Vzniklý prepolymer se buď rozpustí v určitém rozpouštědle a získá se tak lak či lepidlo, nebo se vytvrdí při vyšší teplotě, čímž vznikne folie.[9]

Mají vynikající tepelnou stabilitu (netaví se, splňují nejvyšší třídu samozhašitelnosti - UL94 - V0), vysokou tvarovou stálost, jsou odolné proti různým rozpouštědlům a olejům. Své fyzikální a mechanické vlastnosti si udržují v širokém rozmezí teplot (-269 °C až +400 °C).[9]

Díky své tepelné stabilitě se používají v aplikacích, kde jsou jiné organické polymery nepoužitelné. Jsou vysoce odolné vůči záření alfa, beta, gama a ultrafialovému záření. Slouží jako ochrana polovodičových systémů před zářením alfa, jako flexibilní plošné spoje, jako ochranné desky při pájení desek plošných spojů, při vinutí magnetů, jako ochrana optických kabelů a další.[9]

Hlavními nevýhodami PI folie jsou její vysoké výrobní náklady a složitá výroba.



Obr. 3.2 Polyimidová folie Kapton® [9]

Tab. 3-1 zobrazuje základní parametry PI folie.

Tab. 3.1 Základní parametry PI folie [9]

Základní parametry PI folie	
Dielektrická pevnost [kV/mm]	cca 200 kV
Ztrátový činitel	0,0025
Relativní permitivita	3,5
Rezistivita [$\Omega.m$]	10^{15}
Teplota skelného přechodu (Tg)	360°C až 410°C
Pevnost v tahu [MPa]	172

3.1.2 Fenolové pryskyřice

Fenolové pryskyřice se rovněž používají jako základní materiál v elektronice. Vyrábí se polykondenzací fenolu (m-kresol) s metanolem (formaldehyd). Mají vysokou tepelnou a chemickou odolnost (vůči kyselinám) a jsou dobře odolné vůči mechanickému poškození. Fenolytické pryskyřice jsou poměrně snadno zpracovatelné a jejich výrobní náklady jsou malé.[8]

Hlavní nevýhodou fenolových pryskyřic je jejich špatná odolnost proti zásaditým látkám, oxidům. Na rozdíl od termoplastů také není možné je po ochlazení opětovným zahřátím znovu tvarovat.[8]

3.1.3 PET folie

Polyethylentereftalát byl vyvinut v roce 1941. Jedná se o silný, průhledný termoplast s nízkou hmotností patřící do skupiny polyesterů. PET se uplatnil především ve výrobě syntetických vláken pod obchodními názvy Dacron® a Etylén®. V závislosti na postupu výroby a následném zpracování je možno připravit průhledný (amorfní) nebo mléčně zakalený (polokrystalický) PET.

Tenké folie jsou často používány pod obchodním názvem Mylar®. Jedná se o biaxiálně orientované PET folie s povrchovou úpravou, potahované tenkou kovovou vrstvou hliníku

pomocí technologie odpařování. Jsou transparentní, pružné a s přibývajícím tloušťkou působí mléčně, zakaleně.[10]

Díky vyváženosti elektrických, chemických a mechanických vlastností nabízí elektrotechnickému průmyslu jedinečné konstrukční možnosti. Jsou odolné vůči běžným rozpouštědlům a vlhkosti. Lze je používat v rozsahu teplot od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. PET folie neobsahuje žádná změkčovadla, tudíž se nedrolí při stárnutí za běžných podmínek.

Současné způsoby použití těchto PET folií jsou např. izolace jádra v transformátorech, tlumivkách a relé, jako krycí, drážková nebo fázová izolace.

Folie se vyrábějí v tloušťkách od $19\text{ }\mu\text{m}$ do $500\text{ }\mu\text{m}$ v rolích do šířky 1600 mm .

V následující tabulce (*Tab. 3-2*) jsou zobrazeny mechanické a elektrické vlastnosti PET folií o vybraných tloušťkách.[11]

Tab. 3.2 Mechanické a elektrické vlastnosti PET folie [11]

Mechanické vlastnosti			
	Celková tloušťka [μm]		
	19	125	500
Plošná hmotnost [g/m^2]	27	175	670
Pevnost v tahu na délku [N/mm^2]	210	180	150
Elektrické vlastnosti			
Dielektrická pevnost [kV]	3	13	20
Dielektrická konstanta (AC 50 Hz, 25 °C) [-]	3,3	3,3	3,3
Dielektrický koeficient ztrát (AC 50 Hz, 25 °C) [-]	0,0025	0,025	0,0025
Objemový odpor (25 °C) [Ω/m]	10^{18}	10^{18}	10^{18}
Povrchový odpor [Ω/m]	10^{16}	10^{16}	10^{16}

3.1.4 PEN folie

Jedná se o polyester s dobrými bariérovými vlastnostmi (lepšími než PET), zejména s kyslíkovou bariérou. Svoji tuhostí a pevností předčí klasická polymerní vlákna polyamidová a polyesterová. Používají se jako levnější náhrada aramidových vláken například pro výztuž pneumatik nebo pro plachty plachetnic.[12]

PEN folie mají oproti PET lepší rozměrovou stálost a jsou určeny jako náhrada, zejména pokud jsou použity jako substrát pro flexibilní integrované obvody. Obchodní označení PEN folií je Teonex® a vyrábí je firma Teijin DuPonts Films, která mimo jiné vyrábí také PET folie pod obchodním názvem Mylar®.

Tyto folie mají vynikající pevnost, tepelnou odolnost a rozměrovou stálost. Používají se například pro flexibilní obvody v automobilových aplikacích. Dále se používají jako elektrické izolace a pro optické účely.[13]

Následující tabulka *Tab. 3-3* porovnává základní parametry výše zmíněných hlavních polymerních substrátů:

Tab. 3.3 Tabulka srovnání nejpoužívanějších polymerních substrátů [10]

Vlastnost	PEN	PI	PET
Pevnost v tahu [MPa]	280	280	230
Prodloužení [%]	90	80	120
Max. dlouhodobá teplota [°C]	180	240	105
Teplota skelného přechodu [°C]	155	-	110
Bod tání [°C]	269	-	258
Průrazné napětí [kV/mm]	300	280	280
Dielektrická konstanta [-]	2,9	3,3	3,3
Nasákavost [%]	0,3	1,3	0,4
Hustota [g/mm ³]	1 360	1 430	1 400

3.1.5 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát je amorfní polymer, syntetizovaný pomocí polykondenzace bisfenolu A a fosgenu. Jeho teplota tání je přibližně 225 °C a teplota skelného přechodu 150 °C. Polykarbonát je vynikajícím substrátem z hlediska pevnosti, odolnosti proti nárazu a elektroizolačních vlastností. Jeho nevýhodou je špatná chemická odolnost.[14]

Vzhledem k tomu, že PC je amorfní polymer, jeho optické vlastnosti jsou mnohem lepší než u krystalických polymerů, jako je PET. Z tohoto důvodu je polykarbonát často používán zejména v LCD substrátech. Nicméně má poměrně velký součinitel fotoelasticimetrie a často vykazuje nerovnoměrné zkreslení.[14]

3.1.6 Polyarylát (PAR)

Polyarylát s 50ti procentním podílem kopolymerů má teplotu skelného přechodu 193 °C a je více tepelně odolný než polykarbonát, který má podobnou strukturu. Stejně jako polykarbonát, i polyarylát je vynikajícím polymerem z hlediska pevnosti, odolnosti proti nárazu, elektroizolačních vlastností, rozměrové stability a odolnosti proti hoření.[14]

3.1.7 Aromatická polyetherketonová vlákna (PEEK)

Teplota tání PEEK je 334 °C, teplota skelného přechodu je 143 °C a vykazuje nejvyšší tepelnou odolnost mezi aromatickými polyethery. PEEK jsou velmi tvrdá a jsou výborná z hlediska chemické, teplotní odolnosti a odolnosti proti hoření. Tyto polyetherketonová vlákna jsou používána především ve vícevrstvých deskách s plošnými spoji. Vzhledem k tomu, že PEEK se řadí do skupiny termoplastů, je možné vyrábět vícevrstvé desky plošného spoje pouze pomocí tepelného lisu.[14]

3.1.8 Aromatické polyethersulfony (PES)

Polyethersulfon vykazuje největší tepelnou odolnost ($T_g = 223$ °C) mezi ne-polyamidovými pryskyřicemi. Jeho další vlastnosti jsou rovněž vynikající, zejména odolnost vůči hoření a rozměrová stálost. S aromatickým polyethersulfonem se lze setkat v poměrně náročných aplikacích. Stejně jako polykarbonát je tento polymer také amorfní a používá se rovněž v LCD substrátech v kombinaci s výše zmíněným polykarbonátem. Vzhledem k poměrně vysokému součiniteli fotoelasticimetrie trpí rovněž nerovnoměrným zkreslením.[14]

Mezi další polymerní substráty používané v tištěné a flexibilní elektronice patří například *cyklické olefinové polymery* jako jsou ARTON, APEL nebo ZEONEX, *plně aromatické*

polyketony a LCP (liquid crystal polymer). Nicméně nejvíce používané polymerní substráty jsou stále PET, PEN folie a v případě náročnějších aplikací, kde je nutná vyšší teplotní odolnost, jsou to PI folie.

3.2 Skelný substrát

Skleněné desky jsou bezpochyby nejběžnějšími používanými substráty u panelů v zobrazovací technice. Podmínkou toho, aby skelný substrát byl flexibilní, je dosažení tloušťky pod $100 \mu\text{m}$. Mezi výhody skelného flexibilního substrátu patří vysoká optická propustnost větší než 90 %, nízký součinitel tepelné roztažnosti (ΔCTE) $\sim 4 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$, nepropustnost vůči vodě a kyslíku a chemická odolnost. Jedná se také o kvalitní elektrický izolant a jeho teplotní odolnost je až $600 \text{ }^\circ\text{C}$. [3]

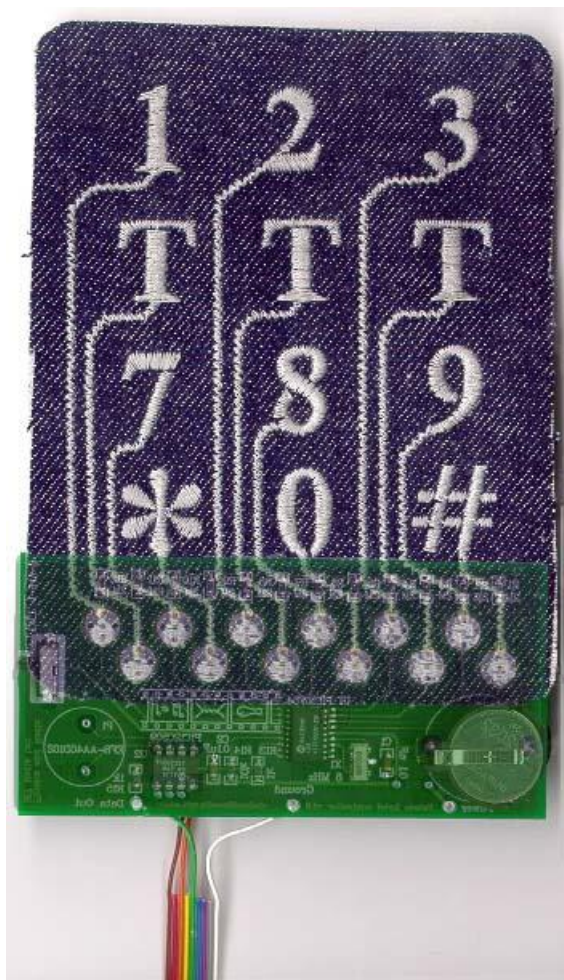
Nicméně, nevýhodou flexibilního skla je jeho křehkost a obtížná manipulace. Pro zvýšení pevnosti a snížení rizika poškození při manipulaci a možného šíření trhlin můžou být tyto skelné folie obohaceny jedním ze třech způsobů:

- *Laminací s plastovou folií*
- *Nanesením tenké tvrdé vrstvy*
- *Nanesením tlusté polymerní vrstvy.* [3]

3.3 Textilní substrát

Textilní substráty a textilní kompozity jsou zajímavou alternativou pro nahrazení plastových a kovových součástí, které jsou používány v elektrotechnice, automotive průmyslu, strojírenství nebo stavebnictví. V současné době jsou tyto textilní substráty základním prvkem tzv. „SMART“ textilií. Jedná se o textilní vlákna, která jsou díky zabudovaným elektronickým zařízením citlivá na vnější podmínky a okolí. [15] V závislosti na těchto podmínkách dokáží vyvolat vratné reakce jako například změnu tvaru nebo změnu barvy. Vnějšími podněty mohou být působení magnetického a elektrického pole, kyselost prostředí nebo například různé druhy záření. [16]

Tyto inteligentní neboli „SMART“ textilie nabízejí rozsáhlé využití v mnoha oborech. Hlavními oblastmi užití, těchto textilií, jsou například vojenské aplikace, medicína, technické textilie, nanomateriály, elektroaktivní polymery, flexibilní displeje atd. [16]



Obr. 3.3 Textilní substrát [17]

3.4 Pružný kovový substrát

I kovové materiály naleznou ve flexibilní elektronice své uplatnění jako substráty. Podmínkou pro docílení pružnosti kovového substrátu je tloušťka menší než $125 \mu\text{m}$. Díky výborným vlastnostem, jako je vysoká odolnost proti korozi a pronikání chemikálií, rozměrová a teplotní stabilita a vysoká teplotní houževnatost ($\sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$), jsou vhodnými substráty pro emisní nebo reflexní displeje, které nepotřebují průhledný substrát.[3]

Mezi nejběžněji používaný kovový materiál pro účely výzkumu je nerezová ocel. Obecně lze zaručeně říci, že nerezové ocelové substráty jsou mnohem odolnější než skelné folie a plastové substráty. Naproti tomu nevýhodou je jejich povrchová drsnost. Ta je u nejpečlivěji válcované oceli přibližně 100 nm , narozdíl od skelného substrátu s povrchovou drsností menší než 1 nm .[3]

Kovové substráty jsou elektricky vodivé. V některých aplikacích musí být kov potažen izolační vrstvou, aby se docílilo galvanického oddělení, v jiných aplikacích může posloužit jako

kontakt (například jak je tomu u solárních článků). Elektrická izolace funguje také jako adhezivní vrstva a zároveň poskytuje ochranu před chemikáliemi. Šíře bariérové vrstvy o velikosti $0,2 - 0,4 \mu\text{m}$ je dostačující tloušťka pro elektrickou izolaci, neboť snižuje svodový proud při rozdílu potenciálu 50 V na 1 nA/cm^2 . [3]

3.5 Srovnání flexibilních substrátů

PET folie je nejčastěji používána vzhledem k její nízké ceně a vyšší teplotní stabilitě. PEEK je bezbarvý termoplastický polymer používaný v technických aplikacích. Další alternativou je PI folie, která se díky své tepelné stabilitě používá v aplikacích, kde jsou jiné organické polymery nepoužitelné. Papír je zajímavým substrátem vzhledem k nízkým nákladům a všestrannému použití. Nicméně vzhledem k velké povrchové drsnosti a vysoké absorpci není příliš použitelný v oblasti flexibilní elektroniky. [1]

Mnoho produktů využívá k ochraně aktivních vrstev nejčastěji sklo. Aby bylo možné vyměnit sklo za flexibilní substráty, musí být dostatečně pevné a odolné vůči změnám klimatických podmínek. Dále musí být odolné proti roztržení, a pokud slouží jako krycí vrstva, musí být také transparentní pro viditelné světlo. Mnoho plastových materiálů jako například Mylar® (PET folie) a polyamid veškeré tyto vlastnosti splňují. [1]

V následujícím přehledu jsou znázorněny a hodnoceny charakteristické vlastnosti substrátů a jejich adekvátní použití:

Tab. 3.4 Přehled flexibilních substrátů a jejich vlastností [1]

Vlastnosti / Substrát	Skelný substrát	Kov. substrát	Papír	PET	PEN	PC	PI
Hladkost	++	++	0	+	+	+	0
Teplotní odolnost	++	++	0	+	+	0	++
Flexibilita	--	++	++	++	++	++	++
Optická propustnost	++	+	--	+	+	+	+
Cena	--	+	++	+	0	0	--
Hodnocení	Nejméně vyhovující: -- - 0 + ++ :Nejvíce vyhovující						

Tab. 3.5 Přehled flexibilních substrátů a jejich použití [1]

Použití / Substrát	Skelný substrát	Kov. substrát	Papír	PET	PEN	PC	PI
RFID (pouze anténa)			+	+	(+)	(+)	
RFID (včetně obvodů)				+	(+)	(+)	
Tištěná paměť				+	(+)		
oTFT/Displej	+	+		+	+		+
OLED/Displej	+		(+)	+	+	+	
OLED/Dioda	+		(+)	(+)			
Tištěná baterie		+		(+)	(+)		
Organický solární článek	(+)	(+)		+	+		
Sensory			+	+	(+)	(+)	+
Oblečení				+	(+)		
Hodnocení	„(+)" preferované, „+" vhodné, „prázdné místo" není doporučeno						

4 Materiály pro funkční vrstvy flexibilních systémů

Tato kapitola pojednává o materiálech pro vytváření funkčních celků na flexibilních substrátech.

Jedná se obecně o vodivé, dielektrické a polovodivé materiály. Tyto materiály se nanášejí na substráty různými technologiemi, které jsou popsány v kapitole č. 5.

Při nanášení těchto materiálů na substrát se využívá aditivního procesu. Tímto způsobem lze kombinovat různé materiály s odlišnými vlastnostmi a vytvořit tak kombinace izolačních, vodivých a polovodivých vrstev.

4.1 Vodivé materiály

Většina materiálů používaných ve flexibilní a organické elektronice jsou polymerní materiály. V dřívějších dobách se tyto materiály používaly spíše jako tepelné, zvukové a elektrické izolanty díky jejich výborným mechanickým a elektroizolačním vlastnostem. Organické materiály, které jsou schopné vést elektrický proud, se dostaly do centra pozornosti až okolo roku 1980.[18]

Obecně lze organické vodivé látky, používané pro vodivé motivy, dělit na dvě základní skupiny:

- *Nízkomolekulární látky*
- *Polymerní látky*

Polymery jsou látky o vysoké molární hmotnosti a mohou vykazovat různé mechanické, elektrické a optické vlastnosti v závislosti na jejich struktuře a chemických vlastnostech řetězce. Elektrická vodivost těchto polymerních látek je okolo $10^7 S/m$. [8]

4.2 Polovodivé materiály

Polymery citlivé na záření hrají významnou roli v polovodičovém průmyslu. Při ozáření dojde u těchto polymerů ke změně uspořádání molekul a následně k degradaci nebo vzniku příčných vazeb. Tyto polymery mohou být následně použity pro přenos dvojrozměrných elektrických obvodů z jedné vrstvy na druhou, spodní vrstvu.[8]

Existuje mnoho komerčně dostupných polymerů citlivých na záření. Některé z nich jsou například Riston® DuPont, SU-8 3000, PMMA Poly(hexafluorobutylmethacrylate). Každý z těchto materiálů je jinak citlivý na světlo.[8]



Obr. 4.1 Riston® DuPont [19]

Některé polymery, jako je polychloromethylstyren, jsou vysoce citlivé na energetické záření. Je-li polymer vystaven UV záření, změní se v této ozářené oblasti jeho chemické vlastnosti, jako je například rozpustnost. Tento postup je používán při fotolitografii, což je velmi dobře známý proces výroby v elektrotechnice pro selektivní opracování částí tenkých vrstev nebo materiálu podložky.[8]

4.3 Dielektrické materiály

V elektrotechnice se používají polymery také jako izolanty a přechodná dielektrika. Jedná se o pasivní materiály, které se aktivně nepodílí na fungování určitého přístroje. Hlavními vlastnostmi jsou velký elektrický odpor a dobré mechanické vlastnosti. Elektrická vodivost izolačních polymerů je okolo $10^{-18} S/m$. [8]

Klasické anorganické izolátory, jako je oxid křemičitý a nitrid křemíku, jsou limitovány svými mechanickými vlastnostmi. Je velice obtížné z těchto anorganických materiálů vytvořit silné vrstvy bez mechanických defektů. Hlavním důvodem, proč nelze používat tyto materiály pro flexibilní elektroniku, je právě jejich pevnost a neohebnost.

Polyimidy jsou velmi lákavým materiálem pro vícevrstvé zpracování díky své schopnosti odolávat vysokým teplotám a pro svou dobrou elektrickou a chemickou odolnost. Dále mají vysokou mechanickou pevnost, nízký ztrátový činitel a malou dielektrickou konstantu (při frekvenci $1 MHz = 3.5$). [8]

Paryleny jsou další skupinou polymerů používaných jako propojitelná dielektrika. Mají nízkou dielektrickou konstantu, nízkou absorpci vlhkosti a velkou odolnost proti oděru. Hlavní nevýhodou je jejich špatná tepelná stabilita na vzduchu. Paryleny navíc vyžadují speciální vakuové uložení.[8]

Následující tabulka (Tab. 4-1) sumarizuje fyzikální a chemické vlastnosti běžně používaných polymerů propojitelných dielektrik. Pro srovnání je v tabulce uveden také oxid křemičitý.

Tab. 4.1 Fyzikální a chemické vlastnosti používaných dielektrických materiálů [8]

Vlastnosti	SiO ₂	Polyimid	Parylen	Polyfenylsulfidová vlákna (PPS)
Provozní teplota [°C]	350 - 450	300 - 350	80	>315*
Dielektrická Konstanta [-]	3,5 - 4,0	3,2 - 3,8	2,65 - 3,15	3,0 - 4,4
Ztrátový činitel [-]	0,001	0,01 - 0,02	0,0002 - 0,02	0,01 - 0,068
Tepelná vodivost [W/cm.C]	0,021	0,0017	0,36	0,8
Hustota [kg/m ³]	2200	1420	1110 - 1420	1350 - 1400

*Teplota při tlakovém lisování.

4.4 Zalévací hmoty

Hlavním účelem zalévacích hmot je zvýšení životnosti zařízení prostřednictvím ochrany před zářením a vlhkostí v drsných klimatických podmínkách a před mechanickými vlivy. Se zvětšující se integrací komponent na substrát, se zvyšuje také spotřeba energie a tím dochází i k větší produkci tepla. Dále pak dochází ke zvýšení operační rychlosti. Proto jsou zapouzdřené obvody stále náročnější na výrobu.[8]

Zapouzdřené polymery mají vysoký elektrický odpor, dobrou přilnavost, odolnost proti tepelným a mechanickým nárazům a také odolnost proti vlhkosti a rozpouštědlům.

5 Výrobní postupy a způsoby nanášení organické elektroniky na flexibilní substráty

Předchozí část diplomové práce pojednává o materiálech, kterými se vytváří funkční vrstvy na flexibilních substrátech. Tato kapitola reprezentuje přehled výrobních postupů a metod nanášení funkčních vrstev na substráty.

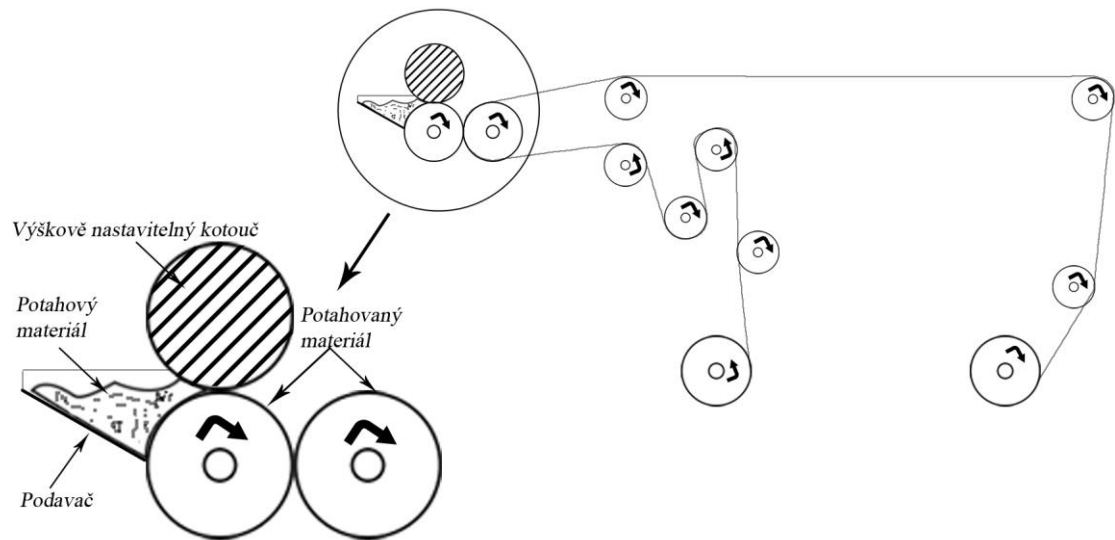
Díky těmto metodám můžete přetvořit zmíněné polymery na užitečná zařízení. Pro výrobu organických elektronických zařízení je možné použít také klasické metody jako je litografie nebo vakuové napařování. Nicméně klasické výrobní metody obsahují určité kroky, které jsou finančně nákladné a obvykle vyžadují vysoké teploty a vakuové prostředí. Jsou to například CVD a PVD technologie, plazmové leptání atd.[8]

Metody používané pro výrobu flexibilní elektroniky jsou méně finančně nákladné než klasické metody a relativně šetrné k životnímu prostředí. Příprava materiálů se provádí při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku. Není potřeba žádného speciálního prostředí.

5.1 Metoda Roll – to – Roll (metoda navíjeného substrátu na válec)

Roll-to-Roll metoda, známá také jako reel-to-reel zpracování (zkráceně R2R), je proces vytváření elektronických zařízení na role pružného plastu (především na PI folie) nebo pružné kovové folie. Touto metodou jsou vyráběny amorfní křemíkové solární články a velkoplošná zařízení. Při této technice je substrát, na který má být nanášena vrstva požadovaného materiálu, stále odvíjen z jednoho válce a nakonec je navíjen na druhý válec, nebo je rozřezán na konečné velikosti.[3][20] Velké obvody s tenkovrstvými tranzistory a další zařízení mohou být snadno nanášeny na tyto substráty, které mohou být až několik metrů široké a až 50 km dlouhé. Některá zařízení mohou být vyrobena přímým nanášením na substrát, nicméně většina polovodičů musí být nanášena pomocí fotolitografické techniky. Tato technologie je stále ve vývoji. Pokud se ovšem podaří vyrábět veškeré polovodiče touto metodou, většina zařízení by mohla být vyráběna za zlomek ceny klasických výrobních metod.[20]

Přehledné grafické znázornění tohoto procesu je na obrázku *Obr. 5-1.*:



Obr. 5.1 Princip metody Roll to Roll (překresleno z [59])

5.2 Metoda Sheets by Batch (metoda dávkového zpracování)

Metodou dávkového zpracování jsou vyráběna elektronická zařízení, jako jsou zobrazovací panely, a obvody. V tomto případě jsou substráty již předem „nařezané“ na tenké flexibilní desky požadovaných velikostí a tvarů.[3]

Tyto desky jsou během zpracování ovládány následujícími způsoby:

- *Na pevném podkladu, volně umístěné, směrem nahoru*
- *Na pevném podkladu, vázané na nosič po celou dobu dávkového zpracování, umístěné směrem nahoru nebo dolů*
- *Směrem nahoru nebo dolů, umístěné v napínacím rámu*
- *Volně v rámu, směrem dolů*
- *Elektrostaticky vázané k pevnému nosiči*
- *Magneticky vázané k pevnému nosiči*[3]

5.3 Materiály nanášené v kapalném skupenství

5.3.1 Inkjet printing

Této technice se v poslední době dostává stále více a více pozornosti díky jejím jedinečným vlastnostem. Je to především jednoduchost výroby, schopnost tisknout funkční vrstvy, kompatibilita s různými substráty, nízké náklady a neimpaktní systém tisku. Inkoustový tisk a

tiskárny jsou používány po celém světě. Stejná technologie s jednoduchou modifikací se používá pro tisk inkoustových nanočástic na různé podklady, kterými jsou například sklo, polovodičové materiály, průhledné folie či dokonce papír.[1]

Obecně lze inkoustové tiskárny rozdělit do dvou skupin:

- ***Kontinuální***
- ***DOD tiskárny***

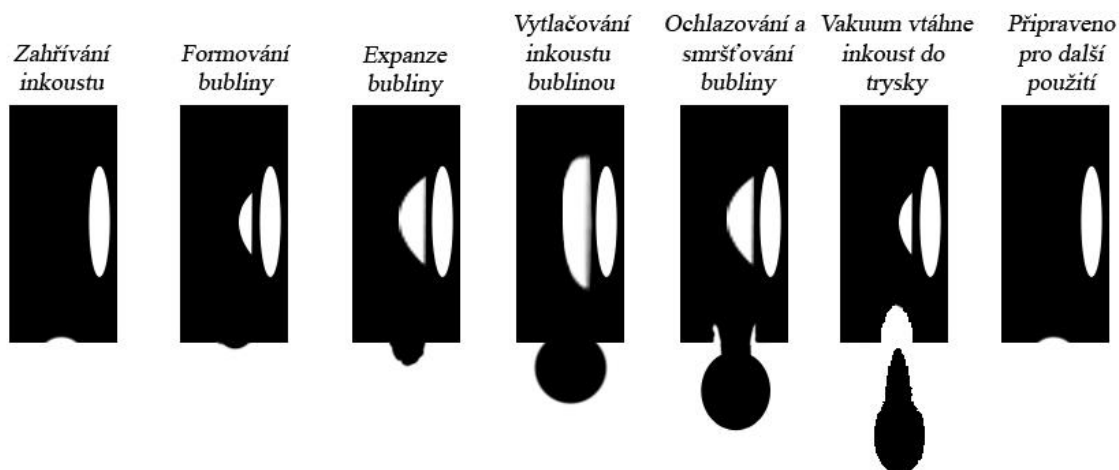
Kontinuální inkoustové tiskárny vytvářejí nepřetržitý proud inkoustových kapek, kdy kapičky, kterými má být daný bod vytisknut, jsou vychýleny elektrostatickými deskami tak, aby dopadly na potiskované médium nebo do zásobníku pro případnou recirkulaci.[1]

V současné době se technologie DOD uchytila hlavně pro použití v domácnostech a malých až středních podnicích. Vyznačuje se tím, že kapky jsou z tiskové hlavy “vystřeleny” pouze tehdy, mají-li na potiskované médium opravdu dopadnout. Oproti předchozímu způsobu se vyznačuje vyšší přesností.[1]

Podle impulzu, který vytvoří inkoustovou kapku, se metoda Drop On Demand dělí ještě na následující dvě kategorie:

- ***Termální inkoustový tisk***
- ***Piezelektrický inkoustový tisk***

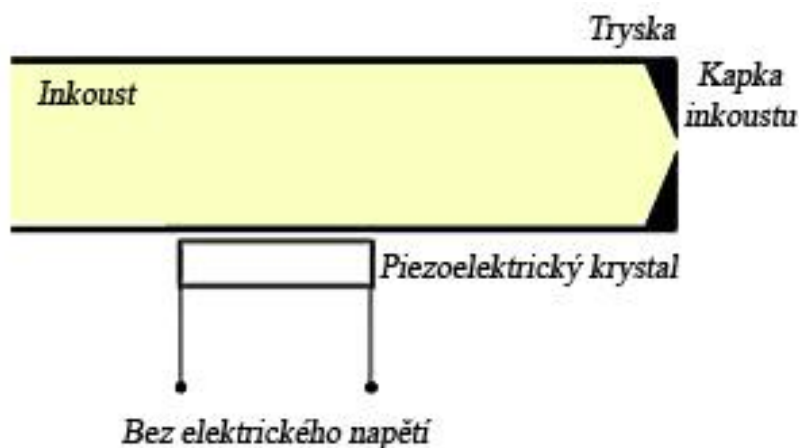
Na následujícím obrázku (*Obr. 5-2*) je vidět proces termálního tisku. Pro vystřelení inkoustové kapky z trysky jsou používána malá tepelná tělíska. Tryska je uvedena do chodu zahříváním inkoustu, což vytváří bublinu. Ta expanduje a vytlačí inkoust z trysky. Bublina se poté zhroutí při ochlazení topného rezistoru, což zapříčiní vznik podtlaku, který vtáhne do trysky novou dávku inkoustu a celý proces se znovu opakuje.[1]



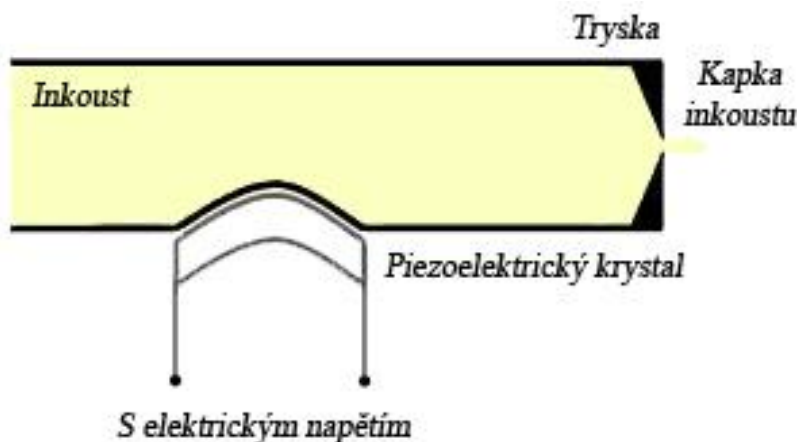
Obr. 5.2 DOD termální tisk (překresleno z [8])

Celková doba vypuzení inkoustu je řádově v mikrosekundách a teplota desky může stoupnout až o $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. [8]

Piezelektrická inkoustová tiskárna používá piezokrystal, který je uložen v inkoustových kanálech tiskových hlav. Technologie je patentována firmou Epson. Při připojení napětí na piezoelektrický materiál se boční stěny komůrky před tiskem rozšíří. Při změně polarity se napětí otočí a dochází ke zmenšení tryskové komůrky a následnému vytlačení inkoustové kapky. [1] Tlak ve vnitřní části komory dosahuje své maximální hodnoty do 5ti mikrosekund. Po dalších 5 mikrosekundách se dostává opět na nulu.



Obr. 5.3 Princip piezoelektrického tisku - bez napětí (překresleno z [21])



Obr. 5.4 Princip piezoelektrického tisku - s přiloženým napětím (překresleno z [21])

Piezoelektrický tisk má několik výhod oproti termálnímu tisku. Proces zajišťuje lepší kontrolu nad tvarem a velikostí kapky. Inkoust nemusí být zahříván a zchlazován mezi každým cyklem, jak tomu je u termální technologie. Tím se šetří čas a při výrobě inkoustu se mohou výrobci více zaměřit na absorpční vlastnosti než na odolnost proti vysokým teplotám.

5.3.2 Hlubotisk

Jedná se o výrobní metodu tisku z hloubky. Tisková forma je vystouplá a tiskové prvky jsou vyryty nebo vyleptány pod úroveň povrchu tiskové formy. Prohloubená místa se zaplní rychle zasychající barvou, která se následně z ostatních ploch tiskové formy setře. Tlakem tiskového stroje je potiskovaný materiál (nejčastěji papír) vmáčknut do tiskových míst formy, odkud přejímá barvu. Inkoust vytvoří plastický efekt. Barvy se poté fixují na papíru za přítomnosti působení těkavých látek, které se dále odpařují a tím dochází k fixaci.[1]

Základní tisková forma je vyrobena z ocelového válce, na který se galvanicky nanáší vrstvy dalších kovů, zpravidla niklu, mědi a po vyhotovení celkového obrazu ještě chrom. Kovy jsou na ocelový válec nanášeny v tekutém elektrolytu, kde katodou je zmíněný pokovovaný válec a anodou jsou například granule z mědi.[22]

Hlubotiskem lze vytvářet motivy na papírové substráty a plastové folie, obzvláště na PET, PE a PP folie.[23]

5.3.3 Flexografický tisk

Flexografický tisk, neboli flexotisk je metoda tisku z výšky. Při této metodě se používá jako nanášecí medium flexotisková forma. Jedná se o speciální gumu, nebo polymerní látku na válci,

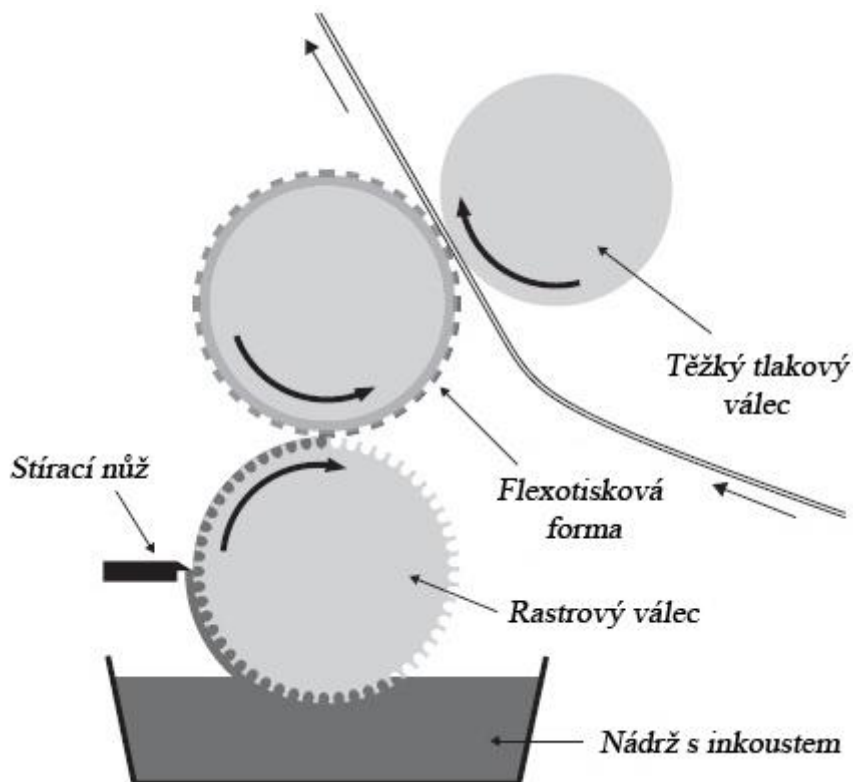
kteřá má na svém povrchu požadovaný tisknutelný vzor. Proto se také tato metoda nazývá někdy zjednodušeně gumotisk. Inkoust, uložený v zásobovací nádrži, je v kontaktu s dávkovacím válcem, nazývaným „rastrový“ neboli „aniloxový“. Tento válec obsahuje buňky běžných velikostí a tvarů, schopné absorbovat a přenášet inkoust na další válec obsahující pružné flexotiskové formy s připraveným vzorem. Tyto formy vytvoří na připraveném substrátu předem definovaný vzor.[24] Aby byl substrát pevně v kontaktu s tiskovou formou, působí na opačnou stranu substrátu ještě tlakový válec.

Mezi těmito válci se ještě nachází stírací nůž. Funkce je patrná již z názvu. Odstraňuje přebytečný inkoust z povrchu dávkovacího válce.[24]

Flexografické tiskové barvy mají poměrně nízkou viskozitu (obvykle $0,01$ až $0,5 Pa\cdot s$) a mohou být vytvořeny z funkčních organických materiálů nebo suspenzí částic. Touto metodou lze natisknout požadované vzory na pružné, pevné, rovné, vlnité, kovové nebo na skelné substráty a další. Tloušťka takto potištěných folií se zvětší o 6 až $8 \mu m$ a rozlišení může dosáhnout 60 až 75 řádků na centimetr za předpokladu použití tenčích pevných desek.[24]

Tento proces je konformní a poměrně tolerantní k nepravidlostem u substrátů. Mezi výhody tohoto postupu patří, ve srovnání s litografií, například vhodnější tloušťka potištěné folie. Dalšími výhodami jsou například dlouhá životnost polymerových forem, jednoduchá výroba a například lehká automatizovatelnost.

Princip metody flexografického tisku je zobrazen na obrázku *Obr. 5-5*:



Obr. 5.5 Princip flexografického tisku (převzato z [24])

5.3.4 Ofsetový tisk

Jedná se o tisk nepřímý z plochy, protože z tiskové formy se nejprve tiskne na přenosový válec a z něho až poté na připravený substrát. Přenosový válec je obvykle vyroben z pružného materiálu, jako je například pryž, díky kterému lze zachovat lepší kontakt s povrchem cílového materiálu. V důsledku toho je tiskový výstup více kvalitní a více konzistentní.

Tuto metodu lze rozdělit ještě na dvě podkategorie. *Klasický ofset* (vlhčený) a *suchý ofset* (nevlhčený, bezvodý).

Základní schéma ofsetového tisku ukazuje *Obr. 5-6*.

Klasický ofset

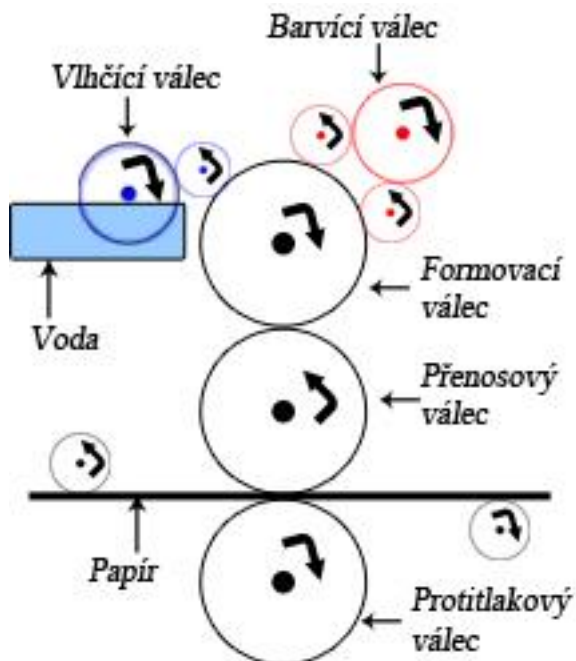
Povrch tiskové formy je založen na odlišných fyzikálně-chemických vlastnostech. Hydrofobní oblast tiskové formy odpuzuje vodu a přitahuje inkoustové barvy na bázi oleje, zatímco hydrofilní oblast vodu přitahuje. Obraz je pak přenesen na povrch substrátu prostřednictvím přenosového válce. Tímto způsobem lze dosáhnout tisku s velmi vysokým rozlišením, protože minimální velikost tiskového prvku může být až $10\ \mu\text{m}$. [24][25]

Mezi výhody této tiskové techniky patří, jak bylo řečeno, vynikající rozlišení, vysoká výrobní rychlost a nízký dopad na životní prostředí. Bohužel značnou nevýhodou v oblasti tištěné elektroniky je tloušťka inkoustového filmu. Ta je velice malá (1 až 2 μm), takže je velmi obtížné dosáhnout u těchto tištěných obvodů elektrické vodivosti. Řešením, jak zvýšit elektrickou vodivost, je celý proces několikrát opakovat. Další omezující vlastností v této technice může být přítomnost vody. Ta může ovlivnit jednak chování funkčních materiálů, tak elektrických vlastností dané folie. Tuto nevýhodu však lze snadno eliminovat a to použitím bezvodého, tzv. *suchého offsetu*. [24]

Suchý offset

Tisková forma je potažena vrstvou, na které barva nedrží a voda je nahrazena povrchovými vlastnostmi dvou rozdílných vrstev nanesených na tiskové formě. Jedná se o silikonovou vrstvu, která barvu odpuzuje a polymerovou vrstvu, která barvu přijímá. Při expozici se vrchní silikonová vrstva odstraní, nejčastěji laserovým paprskem, aby se odhalila spodní polymerová vrstva, která na sebe barvu přijme. [24][25]

Nepřítomnost vodného roztoku umožňuje tisknout přesnější rastry. Nevýhodou suchého offsetu je vznik malých prachových částic. Projevují se bílými místy v tištěném obrazu.



Obr. 5.6 Princip offsetového tisku (překresleno z [25])

5.3.5 Tampónový tisk

Tampónový tisk je nepřímá metoda tisku z hloubky. Jedná se o kombinaci hlubotisku s ofsetovým tiskem. Tento tiskový proces umožňuje přenést 2-D obraz na 3-D objekt. Obraz je převeden z tiskové desky nazývané klišé přes tampónový nosič na požadovaný substrát. Pro výrobu tiskové formy je do povrchu klišé vyleptán fotochemicky požadovaný motiv s pravidelnou hlubotiskovou sítí. Naplněné klišé se stírá ocelovou stěrkou, aby barva zůstala pouze na vyleptaných místech. Tato barva je poté obtisknuta na tampón, kterým se přenesou na požadovaný potiskovaný materiál. Tampón je vyroben ze silikonového kaučuku a díky jeho přizpůsobivosti je možné přenést motiv na povrch jakéhokoliv materiálu (kulový, plochý, válcový, vypouklý aj...).[26][27]

Tampónový tisk lze aplikovat na plastové substráty (PE, PP, PVC, polyamid), skelné substráty, kovové substráty nebo na papír.

5.3.6 Metoda sítotisku

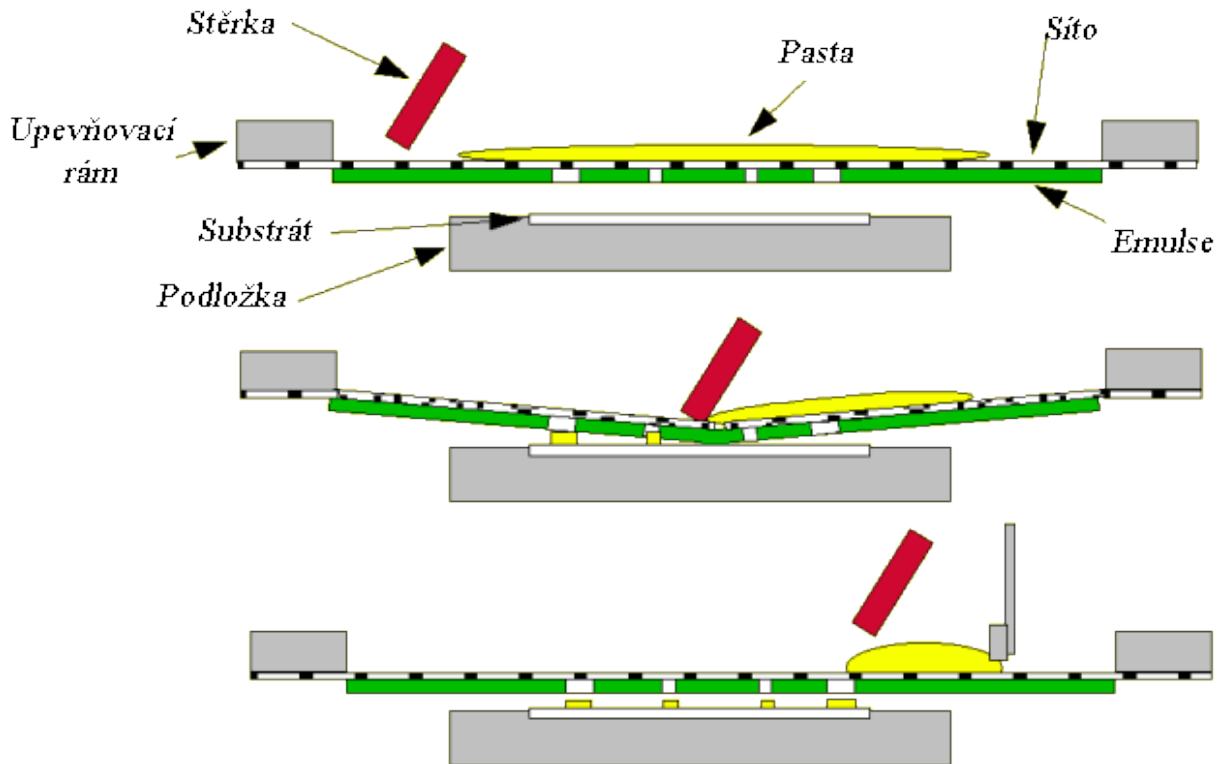
Sítotisk je šablonová technika, která patří ke klasickým výrobním technologiím a je nepostradatelná ve výrobním procesu elektroniky. Pro tisk mikroelektroniky a elektronických systémů s nimi souvisejících se jedná o nejjednodušší a nejlevnější tiskovou techniku. Princip sítotisku je velice jednoduchý. Jedná se o protlačování barvy nebo pájecí pasty pomocí pružné stěrky (tzv. flexibilního nože) skrze sítotiskovou šablonu. Síto je nejčastěji vyrobeno z nerezové oceli nebo plastu (polyesteru). Je potřeba sledovat při sítotisku jednotlivá nastavení, která ovlivňují celkovou výslednou kvalitu, jako je například odskok sítky od základního substrátu, tlak stěrky na sítku nebo viskozitu pasty.[24][28]

Vazký inkoust (resp. pastu) lze protlačovat mechanicky (pružnou stěrkou), magneticky (fixovaným válečkem), elektrostatickou či magnetickou silou nebo například kapalinou či vzduchem. Sítotisk je bezkontaktní technika, protože při správném postupu se nesmí tisková šablona dotýkat podkladu.[24][29]

Při nanášení se používají různé druhy past, které jsou složené ze 4 složek: dočasného pojiva, permanentního pojiva, funkční složky a rozpouštědla.[28]

Tloušťka takto nanášené pasty je větší než $2,5 \mu\text{m}$. Obvyklé hodnoty jsou 20 až $30 \mu\text{m}$ při použití standardních pájecích past užívaných pro elektrické součástky. Nevýhodou této technologie je poměrně malá rozlišovací schopnost, která se pohybuje okolo $100 \mu\text{m}$. Mezi hlavní

výhody této konvenční technologie patří schopnost vytvářet silné vodivé vrstvy, jednoduchost výrobního procesu, dobrá průchodnost (cca. $50 \text{ m}^2/\text{h}$), snadná automatizace, univerzálnost při výběru materiálu a pájecích past a rychlost výroby. Síťotisk umožňuje vyrábět vodivé motivy o dostatečně silných tloušťkách pro požadované vodivosti na jedné vrstvě. Síťotiskem lze vytvořit určitou část elektronické součástky či obvodu. Touto metodou lze natisknout funkční vrstvy (vodivé, polovodivé či dielektrické). Z tohoto důvodu je tato technologie vhodnou volbou pro výrobu membránových klávesnic a RFID antén.[24]

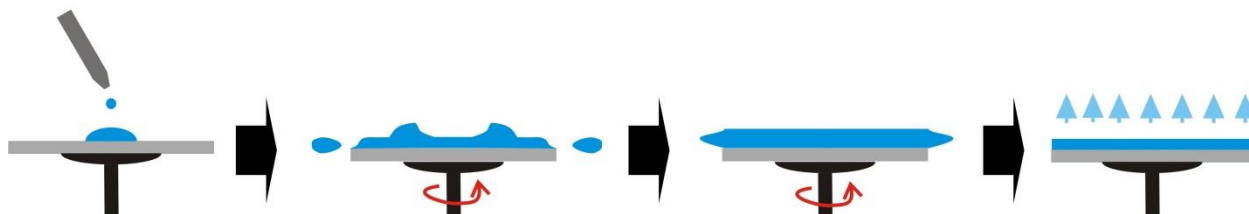


Obr. 5.7 Princip metody síťotisku (převzato z [30])

5.3.7 Rotační nanášení

Volně přeloženo z anglického „*spin-coating*“. Jedná se o jednoduchou metodu nanášení vodivého materiálu na substrát připevněný na rotující desce, resp. podložce. Na substrát se nanese požadované množství vodivého polymerního roztoku, poté je substrát roztočen určitou úhlovou rychlostí ω . Vlivem odstředivé síly a koncentrací roztoku se vrstva polymeru začne rozpínat do stran a celková tloušťka se bude úměrně zmenšovat v závislosti na rychlosti rozpínání. V rotačním nanášení se pokračuje až do té míry, kdy je dosažena požadovaná tloušťka vodivé vrstvy a dokud nedojde k odpaření roztoku, který je nestálý.[31][32]

Tato metoda je graficky znázorněna na následujícím obrázku Obr. 5-8:



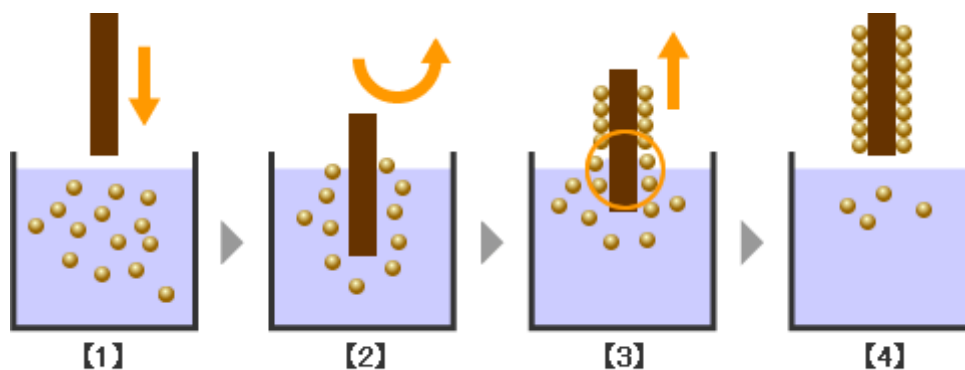
Obr. 5.8 Princip rotačního nanášení [33]

5.3.8 Nanášení ponorem

Anglický název pro nanášení ponorem je „Dip coating“. Jak je již z názvu patrné, tato metoda spočívá v máčení požadovaného substrátu do chemicky polymerizovaného roztoku. U určitých materiálů dochází poté k přilnutí roztoku na materiál. Tloušťka této krycí vrstvy je dána dobou máčení. Dalším podobným procesem je střídavé máčení substrátu do roztoku monomeru a oxidačního roztoku. Vlivem střídavého namáčení se na substrát nanese vrstva monomeru, která zpolymerizuje a vytvoří tak tenkou vrstvu na jeho povrchu.[32]

Nanášení ponorem lze rozdělit do pěti následujících etap: ponoření, „star-up“ (začátek vzájemného působení), nanesení materiálu na substrát, odpařování a odvodnění.[34]

Následující Obr. 5-9 reprezentuje metodu nanášení ponorem



Obr. 5.9 Princip nanášení ponorem [35]

5.3.9 Nanášení sprejem

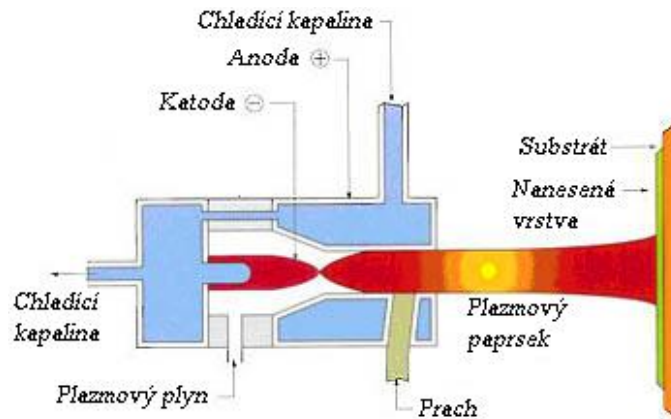
Technologickou metodu „*spray coating*“ lze rozdělit na 4 podkategorie:

Studené nástřiky – při tomto způsobu je nanášení práškových částic nebo připraveného materiálu urychleno pomocí stlačeného plynného media v trysce. Jako hnací medium je v běžném technologickém procesu použit, natlakovaný vzduch. Povlakování probíhá při pokojové teplotě a pomocí studených nástřiků jsou nanášeny povlaky převážně z mědi a hliníku. Tlaková síla hnacího media musí dosáhnout rychlosti vedoucí k mechanickému ukotvení práškových částic na povrchu substrátu. Velikost této tlakové síly je při průchodu tryskou $500 - 5000 \text{ psi}$ ($34 - 340 \text{ bar}$).[36][37]

Termické nástřiky – Materiál nanášený na požadovaný povrch je v ohřátém nebo roztaveném stavu. Tento typ nanášení se využívá spíše pro větší tloušťky nanášeného materiálu (od 20 mikrometrů až po jednotky milimetrů). Termickým způsobem lze nanášet kovy, slitiny, plasty, keramiku nebo kompozitní materiály.[36]

HVOF sprejování – „*High Velocity Oxygen Fuel Spraying*“. Jako reakční plyn je při této metodě používána směs acetylenu a kyslíku. Transportním plynem je zde dusík. Směs těchto reakčních plynů je v další fázi procesu zapálena a poté dochází k lokální detonaci. Prachové částice nanášeného materiálu jsou urychleny rychlostí až $750 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vzdálenost mezi povrchem trysky a povlakovaným materiálem je $100 - 120 \text{ mm}$. Teplota plynu ve fázi detonace dosahuje až $4000 \text{ }^\circ\text{C}$. Po každém výbuchu je komora pročištěna dusíkem.[36]

Plazmové nástřiky – Jedná se o nejuniverzálnější nanášecí proces ze všech výše zmíněných. V plazmovém zařízení je mezi elektrodami vytvořen vysokoteplotní plazmový oblouk, který se skládá ve většině případů z inertních plynů (argon a helium). Nanášený materiál je vstříknut skrze tento plazmový oblouk, kde dochází k jeho ohřevu a urychlení prostřednictvím tvarové trysky, směrem k místu povlakovaného substrátu. Teplota v ohnisku plazmového oblouku je $20\,000 \text{ K}$, což je $19\,727 \text{ }^\circ\text{C}$. Výstupní teplota plazmové trysky je $10\,000 \text{ K}$ ($= 9726,9 \text{ }^\circ\text{C}$).[36]



Obr. 5.10 Princip metody nanášení sprejem (převzato z [38])

Plazmové nástřiky se používají u komponent, které vyžadují vysokou tepelnou ochranu, například v proudových motorech. Běžně používaným nanášeným materiálem je zde ytrium s částečně stabilizovaným oxidem zirkoničitým.[36][39]

5.3.10 Elektropolymerace

Základním principem elektropolymerace je rozpuštění monomeru určité sloučeniny v roztoku, do kterého je ponořen substrát s pracovní a pomocnou elektrodou. Monomer sloučeniny je elektrochemicky oxidován a vzniklé volné radikály jsou poté adsorbovány na povrch elektrody. Následně dochází k řadě postupných reakcí, díky kterým se vytvoří na povrchu substrátu souvislá vrstva polymerní sítě.[40]

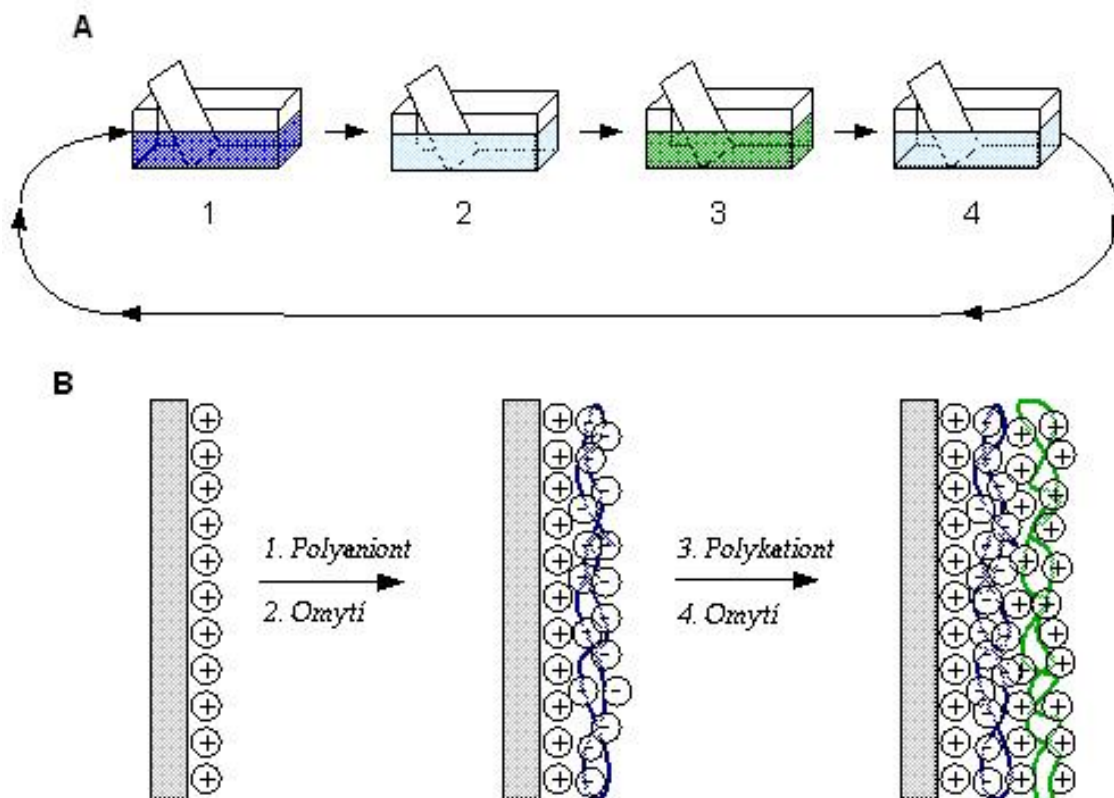
Elektrosyntéza na povrchu filmu může probíhat následujícími třemi způsoby:

- **Potenciostaticky** (= při stále hodnotě potenciálu)
- **Amperostaticky** (= za stálého proudu)
- **Potenciodynamicky** (= metodou cyklických změn potenciálu)

Pomocí dynamických metod lze dosáhnout kvalitnějších, hladkých a lépe přilnavých filmů. Při statickém postupu je možné lépe kontrolovat výslednou tloušťku filmu. Membránové vrstvy vzniklé elektropolymerací lze dělit na vodivé a nevodivé.[40]

5.3.11 Metoda Layer-by-layer

Technologie nanášení vrstev je založena na střídavém máčení požadovaného substrátu ve dvou polymerních elektrolytech. Elektrolyty jsou kationtového a aniontového charakteru. Cílem této technologie je vytvoření střídavých vrstev s opačnými polarizacemi. Tloušťka vrstev je závislá na počtu opakování noření, nicméně jednotlivé vrstvy mohou dosahovat tloušťky 1 až 5 nm. Následující obrázek znázorňuje základní princip metody Layer-by-layer.[32][41]



Obr. 5.11 Metoda Layer-by-layer (převzato z [41])

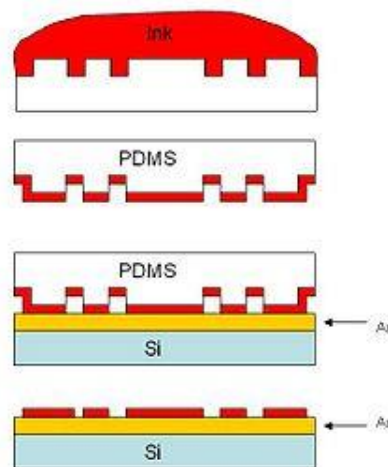
5.3.12 Mikrokontaktní tisk

Základním nástrojem mikrokontaktního tisku jsou elastomerová razítka s nízkým až plochým reliéfem. Jsou používána pro přenos povrchových molekul (resp. molekulového roztoku) na substrát. Elastomerem je Amodimethicone. Jedná se o netoxický organický polymer na silikonové bázi, který je průhledný a bezbarvý. Razítka jsou nejprve obarvena nejčastěji thioly¹, které vytvoří tenkou vrstvu. Po nanesení vrstvy dochází k sušení razítek a následnému

¹ Thioly – organické sloučeniny síry odvozené od alkoholu[42]

lisování na povrch substrátu. Razítko vytvoří shodný otisk na povrch během několika sekund.[43][44][45]

Výhodou mikrokontaktního tisku je možnost natisknout vzory i na nerovné povrchy. Z tohoto důvodu je tato metoda efektivním nástrojem pro tisk povrchových struktur.[43]

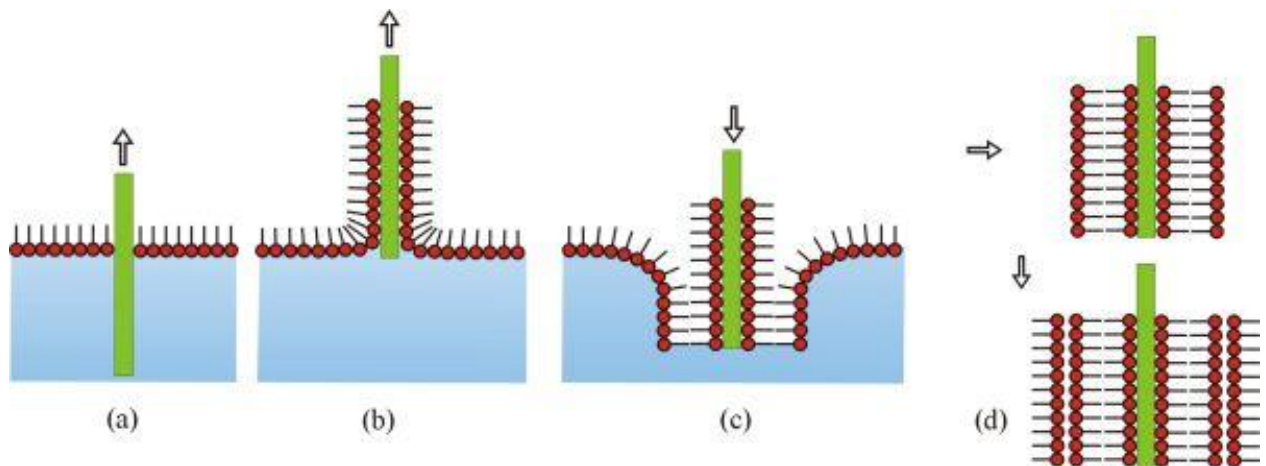


Obr. 5.12 Princip mikrokontaktního tisku [46]

5.3.13 Metoda Langmuir – Blodgett

Langmuir – Blodgett technologie umožňuje zhotovit ultra tenké, vysoce organizované organické vrstvy. V této metodě je nejprve jednomolekulová (Langmuirova) vrstva uspořádána na rozhraní kapaliny (obvykle vody) a vzduchu, aby se nejdříve vytvořila tenká vrstva o tloušťce velikosti jedné molekuly. Tato vrstva je následně nanášena na pevný substrát. Po tomto procesu je zmíněná Langmuirova vrstva nazývána Langmuir – Blodgettova folie. Jestliže je tento proces opakován, mohou být vytvořeny vícevrstvé folie.[32][47]

Vrstva je na substrát aplikována pomocí postupného máčení do kapaliny skrze Langmuirovu vrstvu. Je velmi důležité při této operaci udržovat konstantní povrchový tlak. Ten je řízen pomocí počítače a systému zpětné vazby, která vyhodnocuje tlak na povrchu kapaliny a zároveň kontroluje, aby tloušťka vrstvy na povrchu byla nadále stejná. Na následujícím obrázku je znázorněn princip aplikované Langmuir – Blodgett metody pro nanášení hydrofilních a hydrofobních substrátů. Zatímco u hydrofobních substrátů se první vrstva nanáší ponořením do kapaliny, u hydrofilních substrátů, jako je sklo či oxid křemičitý SiO_2 , je první vrstva nanášena vynořením substrátu z kapaliny.[48]



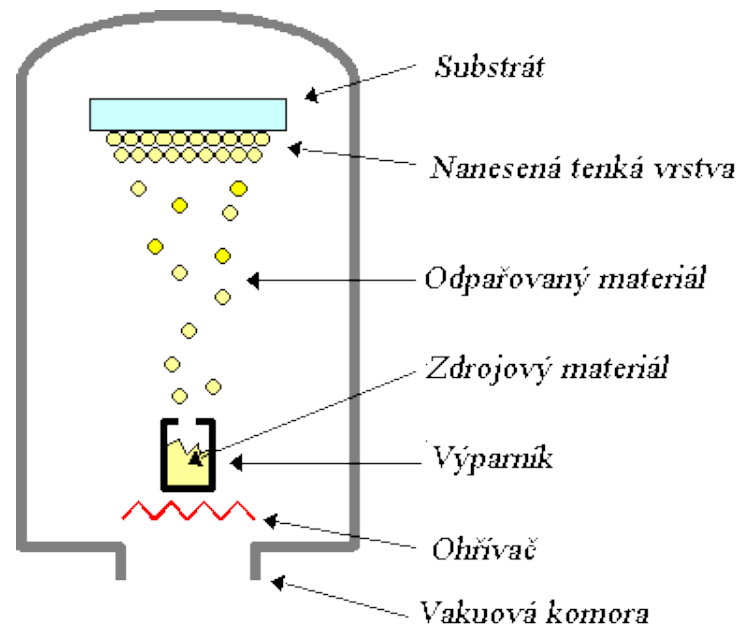
Obr. 5.13 Princip metody Langmuir - Blodgett [49]

5.4 Materiály nanášené v plynném skupenství

5.4.1 Metoda tepelného napařování

Mnoho organických materiálů lze nanášet na substrát v podobě plynného skupenství. Jedním z takto používaných postupů je metoda tepelného napařování, kdy je materiál nanášen na substrát pomocí zkondenzované páry. Výhodou této vakuové metody je tloušťka takto nanesené vrstvy (může být až v řádech nanometrů) a fakt, že celý proces probíhá ve vakuově čistém prostředí. Přestože vakuové depozice jsou široce používány pro přípravu tenkých anorganických vrstev v průmyslovém odvětví, ojediněle se také používá pro nanášení organických vrstev. Tato metoda je oproti ostatním stále ještě finančně i časově náročnější. Na druhou stranu, díky vakuovému způsobu nanášení bylo možné vytvořit vícevrstvou strukturu, která přispěla k dalšímu rozvoji organické elektroluminiscenční diody (OLED).[50]

Princip této metody je založen na ohřátí nanášeného materiálu, který je umístěn v blízkosti substrátu. Substrát může být pevný, nebo flexibilní. Při změně skupenství na plynné se nanášený materiál začne odpařovat a kondenzovat na substrátu, kde vytvoří tenkou vrstvu. Tloušťka této vrstvy je dána dobou napařování.[32]



Obr. 5.14 Metoda tepelného napařování (převzato z [50])

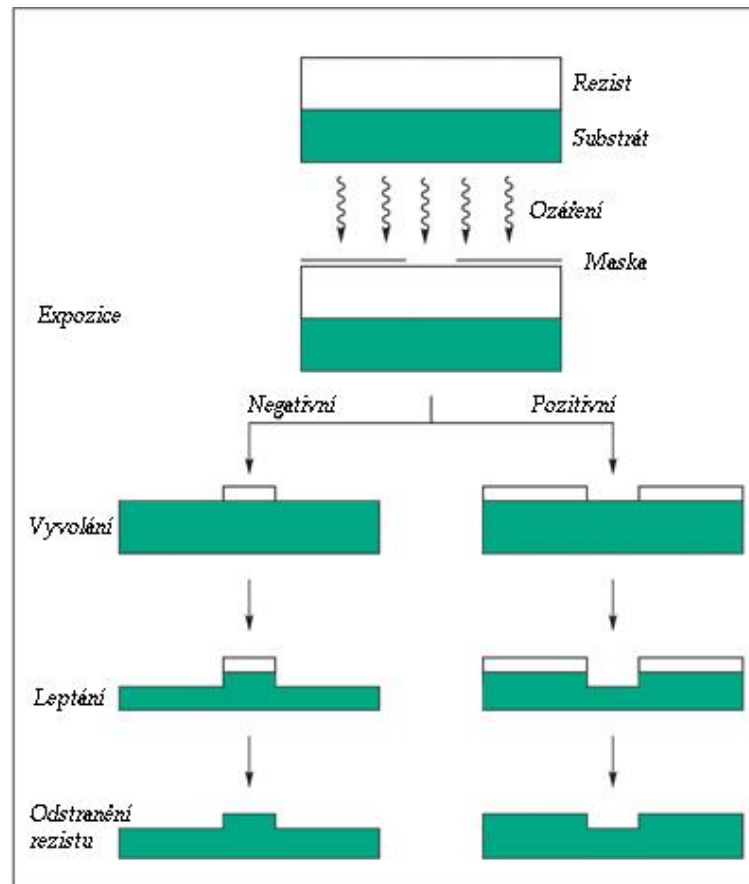
Dále existují různé modifikace tohoto procesu, avšak princip napařování je stále stejný. Dalšími druhy napařování jsou například:

- **Plynné napařování** – Od klasického tepelného napařování se liší v přítomnosti okolního plynu v atmosféře. Vhodné pro výrobu plynových a optických senzorů.[51]
- **Napařování pomocí ionizace** – sráží odpařené části materiálu na substrát za vzniku tenkého filmu. Poskytuje oproti klasickému napařování dvě výhody: lepší regulovatelnost a vyšší výslednou kvalitu funkční vrstvy na substrátu.[52]
- **Plynná epitaxe organických sloučenin** – Organické sloučeniny jsou tepelně odpařovány v jednotlivě oddělených nádobách. Poté jsou transportovány skrze křemíková potrubí do horké komory, kde dochází k smíchání 2 a více druhů organických látek. Tyto organické látky v plynném skupenství kondenzují na předem ochlazený substrát.[53]

5.4.2 Nanolitografické metody

Litografie je technologický výrobní postup pro vytvoření jemných struktur, v případě nanolitografie mikro a nanostruktur. Principem této metody je vzájemné působení elektromagnetického záření na světlocitlivou vrstvu fotorezistu. Fotorezist může být negativní, kdy se osvitom tato vrstva vytvrzuje, nebo naopak pozitivní, kdy se osvitom narušuje. Dále může být nanášen v suché, mokré ale i kovové formě (pokovením). Nejdříve je substrát zbaven povrchových nečistot, poté je na tento substrát nanášena tenká vrstva rezistu, která chrání vrstvy

pod sebou proti leptadlu. V další fázi se tato vrstva vysuší a vytvrdí. Na takto pokrytý substrát rezistem se nanese maska s požadovaným vzorem. Dalším krokem je expozice, resp. vyvolání obrazu přes filmovou matici a následné odstranění rezistu pomocí chemického odleptání. Leptání může být také dvojího charakteru, a to mokré, kdy se chemicky rozpouští nechráněné látky pomocí chloridu železitého či chloridu měďnatého, anebo suché, při kterém se používá jako zdroj leptání ionty z plazmatu. Posledním krokem je odstranění zbývajících rezistu a vysušení. Princip litografie znázorňuje následující obrázek.



Obr. 5.15 Princip litografie (převzato z [54])

Nanolitografických metod existuje velké množství. Lze je dále rozdělit na:

- **Termoplastická nanotisková technologie (T – NIL)**[55]
- **Foto – nanotisková litografie (P – NIL)**[55]
- **Elektronová litografie (EBL)**[43]
- **Projekční elektronová litografie (EPL)**[43]
- **Litografie zaostřeným iontovým svazkem (FIB)**[43]

- **Extrémní ultrafialová litografie (EUV)**[43]
- **Rentgenová litografie (XRL)**[56]

Ve všech případech se jedná o stejný princip vytváření vodivých motivů na substrátu a liší se například v druhu nanášeného rezistu, procesu vytvrzení nebo například v rozdílném prostředí.

5.5 Shrnutí tiskových metod

Každá z metod tisku má své specifické vlastnosti, výhody, omezení a požadavky. Mezi nejjednodušší tiskové metody patří sítotisk a metoda inkjet. O trochu složitější jsou metody flexografického, litografického tisku a hlubotisk. Následující tabulka shrnuje nejvíce používané tiskové metody ve flexibilní elektronice a porovnává jejich klíčové vlastnosti.

Tab. 5.1 Shrnutí tiskových metod [1]

Tiskové metody	Rychlost [m/min]	Rozlišení [μm]	Tloušťka filmu/folie [μm]	Viskozita [Pa.s]
Flexografický tisk	50 – 80	20 – 50	0,5 – 2	0,05 – 0,5
Hlubotisk	20 – 100	20 – 50	0,5 – 2	0,05 – 0,2
Ofset	15 – 100	15	0,5 – 2	30 – 100
Sítotisk	10 – 100	80 – 100	5 – 25	0,5 – 50
Inkjet	0,5 – 5	20	100 – 500	0,002 – 0,025
Nanotisk	50 – 100	1 – 15	0,5 – 200	0,05 – 0,5
Plasmové nástřiky	0,5 – 3	20 – 100	0,5 – 200	-
R2R	5 – 50	1 – 100	0,5 – 5	0,05 – 0,2

Zatímco metoda inkjet a metoda sítotisku se používají převážně pro pevné podklady jako je sklo a křemík, tiskové hromadné metody používají téměř výhradně pružné folie a papír.

6 Měření a výpočet elektrických parametrů vodivých motivů na flexibilních substrátech

Při návrhu vodivých motivů na flexibilních substrátech je potřeba se zaměřit na takové parametry, které hrají klíčovou roli a závisí na nich fungování celého systému. Mezi klíčové elektrické parametry patří *RLC* parametry a charakteristická impedance Z_0 .

Pokud se hodnoty *RLC* parametrů změní na základě použití flexibilního substrátu, namísto pevného substrátu, změní se také charakteristická impedance Z_0 . Změnou Z_0 mohou vznikat odrazy. Tyto odrazy mohou negativně ovlivnit funkčnost zařízení (poškození, špatná funkce zařízení atd.).

RLC parametry a charakteristická impedance Z_0 závisí na geometrických proporcích vodivých propojení a materiálu substrátu, mezi které patří šířka vodivé cesty, tloušťka substrátu a relativní permitivita daného materiálu.

Vodivý motiv je realizován například pomocí stříbrné pasty. Stříbro je velice dobrý vodič, ale nachází se v této pastě pouze v určitém množství. Dalším problémem je tloušťka vodivé cesty. Na PET foliích, konkrétně v případě RFID antén, jsou tyto cesty velice tenké (řádově jednotky mikronů až stovky nanometrů) a odpor této natisknuté vodivé dráhy je poměrně velký (přibližně desítky ohmů), což má za následek horší činitel jakosti této antény narozdíl od konvenční desky plošného spoje, kde tloušťka mědi je například $18 \mu\text{m}$.

Pro návrh těchto parametrů na flexibilním substrátu je zapotřebí nejprve porovnat *RLC* parametry a charakteristickou impedanci Z_0 desky FR-4 a ověřit, zda tyto návrhové metody lze použít i pro flexibilní materiály.

Tato praktická část diplomové práce je zaměřena na zjišťování případných změn *RLC* a Z_0 parametrů mezi flexibilním substrátem a pevným substrátem (FR-4).

Pro zjištění těchto změn se provádělo měření na vzorcích, teoretický výpočet a simulace v programu Ansoft Designer.

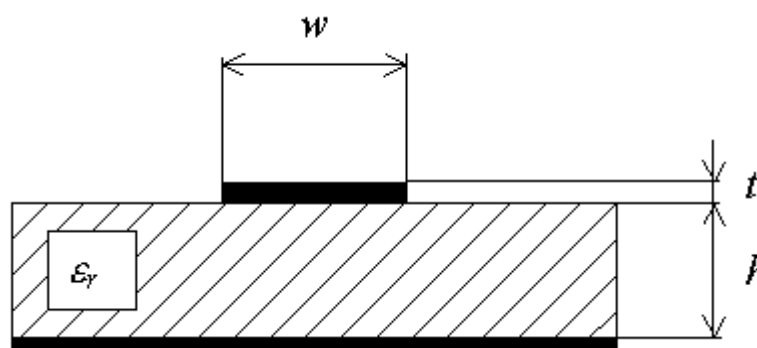
6.1 Teoretický výpočet

Pro výpočet základních parametrů použijeme substrát FR-4. Parametry této desky jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 6.1 Základní parametry desky FR-4

FR-4	
Relativní permitivita ε_r [-]	4,2
Tloušťka desky h [mm]	0,05 - 10
Tloušťka měděné folie t [μm]	18 - 35 - 70

Výpočty jsou uvedeny pro plošný vodič nad vodivou plochou (viz. Obr. 6-1).



Obr. 6.1 Řez nesymetrickým mikropáskovým vedením [57]

Při známých parametrech šířky vodivé cesty W , tloušťky desky h a koeficientů K_{L2} a K_{C2} platí pro výpočet charakteristické impedance Z_0 následující vztah[60]:

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{K_{L2} \cdot K_{C2} \cdot \sqrt{\varepsilon_r}}} \cdot \left(\frac{h}{W}\right) \quad (6.1)$$

Kde koeficienty K_{L2} a K_{C2} jsou definovány jako[60]:

K_{L2} :

$$K_{L2} \approx 1 + 1,5 \cdot \frac{h}{W} \quad (6.2)$$

K_{C2} :

$$K_{C2} \approx 1 + \frac{h}{W} \quad (6.3)$$

Dalším způsobem, jak lze vypočítat charakteristickou impedanci Z_0 , je z naměřených hodnot L a C . Pro tento výpočet platí následující vztah[61]:

$$Z_{01} = \sqrt{\frac{L_s}{C_p}} \quad (6.4)$$

Výslednou Z_{02} z parametrů Z_p a Z_k :

$$Z_{02} = \sqrt{Z_p \cdot Z_k} \quad (6.5)$$

Tyto hodnoty jsme dále porovnávali s teoretickými výpočty a kalkulačkou.

Pro výpočet šířky vodivé cesty W , při známých parametrech charakteristické impedance Z_0 , relativní permitivity ϵ_r , a tloušťky vodivé cesty platí následující vztahy[62]:

Pro $\frac{W}{h} \leq 2$:

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \cdot e^A}{e^{(2 \cdot A) - 2}} \quad (6.6)$$

Pro $\frac{W}{h} \geq 2$:

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ (B - 1) - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \cdot \epsilon_r} \cdot \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (6.7)$$

Dále je potřeba vypočítat pomocné proměnné A , B [62]:

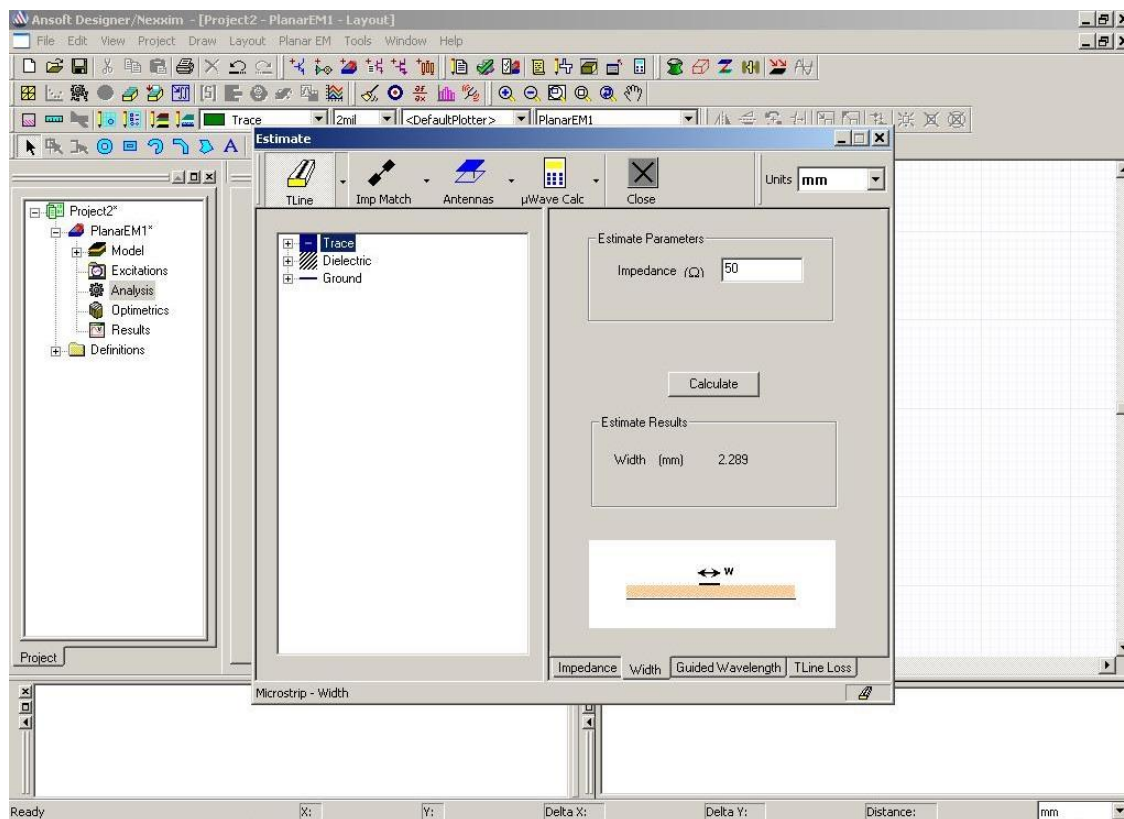
$$A = \frac{Z_0}{60} \cdot \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{0,5} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \cdot \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (6.8)$$

$$B = \frac{60 \cdot \pi^2}{Z_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (6.9)$$

6.2 Simulace

Pro ověření správného teoretického výpočtu byla použita kalkulačka, která se vyskytuje v programu *Ansoft Designer*. Jedná se o simulační program pro simulaci mikropáskového vedení. Tato kalkulačka sama spočítá šířku vodivé cesty W podle zadané charakteristické impedance Z_0 . Pro správný výpočet je potřeba ještě dosadit parametry mikropáskového vedení:

- **Relativní permitivita ϵ_r [-]**
- **Tloušťka desky h [mm]**
- **Tloušťka měděné folie t [μm]**
- **Frekvence [MHz]**
- **Charakteristická impedance Z_0 [Ω]**



Obr. 6.2 Kalkulačka v programu Ansoft Designer

6.3 Měření flexibilních substrátů

Měření vzorků probíhalo na precizním RLC můstku Agilent E4980A, Precision LCR Meter. Jedná se o velmi přesný přístroj, který umožňuje změřit základní RLC parametry na testovacích kmitočtech 20 Hz až 2 MHz, vlnovou impedanci Z_0 aj.



Obr. 6.3 RLC můstek Agilent E4980A [58]

Pro měření byly připraveny 3 vzorky vodivých motivů na flexibilním substrátu (PET folie) a 1 vzorek na substrátu FR-4. Jednalo se o mikropásková vedení.

Měřilo se pomocí měřících hrotů, které byly přikládány na vodivé cesty jednotlivých vzorků o známých šířkách W , a pomocí přístroje byly odečteny hodnoty.

Parametry flexibilních vzorků jsou zapsány v následující tabulce:

Tab. 6.2 Parametry flexibilních vzorků

Vzorek_0191		
Relativní permitivita ε_r [-]		2,7
Tloušťka desky h [mm]		0,17
Šířka vodivé cesty W [mm]	W_1	0,2
	W_2	0,4
	W_3	0,8
	W_4	1,2
Počet vrstev Ag		1x
Substrát		Melinex ST 504 175 um
Vzorek_0185		
Relativní permitivita ε_r [-]		2,7
Tloušťka desky h [mm]		0,08
Šířka vodivé cesty W [mm]	W_1	0,2
	W_2	0,4
	W_3	0,8
	W_4	1,2
Počet vrstev Ag		1x
Substrát		Core Gloss 130

Tab. 6.3 Parametry flexibilních vzorků

Vzorek_0137		
Relativní permitivita ε_r [-]		2,7
Tloušťka desky h [mm]		0,17
Šířka vodivé cesty W [mm]	W_1	0,2
	W_2	0,4
	W_3	0,8
	W_4	1,2
Počet vrstev Ag		1x
Substrát		Melinex ST 504 175 um

Parametry vzorku s FR-4 jsou zapsány v následující tabulce:

Tab. 6.4 Parametry desky FR-4

FR-4	
Relativní permitivita ε_r [-]	4,2
Tloušťka desky h [mm]	1,2
Šířka vodivé cesty W [mm]	1,97

Pomocí přístroje se u jednotlivých vzorků měřily tyto následující parametry:

- R_{DC} [Ω] – stejnosměrný odpor
- L_s [H] – sériová indukčnost
- C_p [F] – paralelní kapacita



Obr. 6.4 Flexibilní vzorek_0191

Vlastnosti zkušebních vzorků jsou uvedeny v Tab. 6-2 a Tab. 6-3.

Dalším bodem měření bylo porovnání naměřených elektrických parametrů RLC a Z_0 s elektrickými parametry stejných vzorků, ale ohnutých o 180° . Flexibilní vzorky se pak ohýbaly na připravených kartonových válcích o různých průměrech. U takto ohnutého substrátu se opět změřily elektrické parametry:

- $R_{DC} [\Omega]$ – *stejnoseměrný odpor*
- $L_s [H]$ – *sériová indukčnost*
- $C_p [F]$ – *paralelní kapacita*

6.4 Výsledky měření flexibilních substrátů

Praktické měření ukázalo, že hodnoty charakteristických impedancí Z_0 u vzorků souhlasí s teoretickými výpočty i simulací. S jistotou lze říci, že teoretické výpočty uvedené pro mikropásková vedení mohou být aplikovány pro výpočet charakteristické impedance Z_0 na flexibilních substrátech.

Následující tabulky znázorňují tři měřené vzorky na flexibilním substrátu v porovnání s teoretickým výpočtem a kalkulačkou z programu Ansoft Designer.

Tab. 6.5 Srovnání naměřených a teoretických hodnot - vzorek_0137

Vzorek_0137 ($h = 0,17 \text{ mm}$)			
W [mm]	Z_0 – kalkulačka Ansoft Designer [Ω]	Z_0 – teoretický výpočet [Ω] $Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{K_{L2} \cdot K_{C2} \cdot \sqrt{\epsilon_r}}} \cdot \left(\frac{h}{w}\right)$	Z_0 – Výpočet na základě měření [Ω] $Z_{01} = \sqrt{\frac{L_s}{C_p}}$
0,2	80,81	95,06	-
0,4	54,64	63,83	-
0,8	33,81	38,56	31,42
1,2	24,74	27,63	38,03

Tab. 6.6 Srovnání naměřených a teoretických hodnot - vzorek_0191

Vzorek_0191 ($h = 0,17 \text{ mm}$)			
W [mm]	Z_0 – kalkulačka Ansoft Designer [Ω]	Z_0 – teoretický výpočet [Ω] $Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{K_{L2} \cdot K_{C2} \cdot \sqrt{\epsilon_r}}} \cdot \left(\frac{h}{w}\right)$	Z_0 – Výpočet na základě měření [Ω] $Z_{01} = \sqrt{\frac{L_s}{C_p}}$
0,2	80,81	85,98	-
0,4	54,64	57,73	53,43
0,8	33,81	34,87	44,49
1,2	24,74	24,99	50,78

Tab. 6.7 Srovnání naměřených a teoretických hodnot - vzorek_0185

Vzorek_0185 ($h = 0,08 \text{ mm}$)			
$W \text{ [mm]}$	Z_0 – kalkulačka Ansoft Designer [Ω]	Z_0 – teoretický výpočet [Ω] $Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{K_{L2} \cdot K_{C2} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \left(\frac{h}{w}\right)}$	Z_0 – Výpočet na základě měření [Ω] $Z_{01} = \sqrt{\frac{L_s}{C_p}}$
0,2	52,61	61,32	-
0,4	32,32	36,74	-
0,8	18,59	20,4	19,76
1,2	13,11	14,12	10,64

Z předcházející tabulky lze vidět, že reálné měření odpovídá u vzorků 0191, 0185 a 0137 teoretickým výpočtům. Průměrný rozdíl mezi teoretickým výpočtem a výpočtem na základě měření dosahuje nepřesnosti 15%. Některé hodnoty se více liší od teoretických výpočtů. To může být způsobeno například špatným nakontaktováním.

6.4.1 Výsledky měření ohnutých vzorků

Výsledky jsou porovnány s naměřenými hodnotami, kdy substrát byl měřen na rovném povrchu. Účelem tohoto měření je zjistit, jaký vliv má ohyb substrátu na elektrické parametry *RLC*.

Pro toto měření byl vybrán pouze jeden vzorek, protože, jak je vidět z tabulky *Tab. 6-8*, hodnoty elektrických parametrů všech tří vzorků jsou si velice podobné.



Obr. 6.5 Měření ohnutých vzorků

Naměřené hodnoty ohnutých flexibilních vzorků jsou porovnány se stejným vzorkem, v rovném stavu v této tabulce:

Tab. 6.8 Porovnání hodnoty ohnutých vzorků s rovným vzorkem

PET folie_001 ($h = 0,125 \text{ mm}$)					
$R_{DC} [\Omega]$					
W [mm]	Rovný stav	1. Ohyb $\phi = 30 \text{ mm}$	2. Ohyb $\phi = 50 \text{ mm}$	3. Ohyb $\phi = 70 \text{ mm}$	4. Ohyb $\phi = 90 \text{ mm}$
0,52	5,11	5,07	5,15	5,41	5,76
0,94	2,33	2,53	2,329	2,417	2,508
1,32	1,59	1,74	1,55	1,654	1,641
$L_s [H]$					
W [mm]	Rovný stav	1. Ohyb $\phi = 30 \text{ mm}$	2. Ohyb $\phi = 50 \text{ mm}$	3. Ohyb $\phi = 70 \text{ mm}$	4. Ohyb $\phi = 90 \text{ mm}$
0,52	1,438E-07	1,68E-07	1,83E-07	1,54E-07	1,49E-07
0,94	1,565E-07	1,64E-07	2,2E-07	1,76E-07	1,83E-07
1,32	1,762E-07	1,53E-07	2,44E-07	1,85E-07	1,94E-07
$C_p [F]$					
W [mm]	Rovný stav	1. Ohyb $\phi = 30 \text{ mm}$	2. Ohyb $\phi = 50 \text{ mm}$	3. Ohyb $\phi = 70 \text{ mm}$	4. Ohyb $\phi = 90 \text{ mm}$
0,52	3,046E-11	2,8E-11	2,8E-11	2,9E-11	2,83E-11
0,94	4,673E-11	4,39E-11	4,4E-11	4,45E-11	4,42E-11
1,32	6,132E-11	5,83E-11	5,85E-11	5,89E-11	5,87E-11
$Z_0 [\Omega]$					
W [mm]	Rovný stav	1. Ohyb $\phi = 30 \text{ mm}$	2. Ohyb $\phi = 50 \text{ mm}$	3. Ohyb $\phi = 70 \text{ mm}$	4. Ohyb $\phi = 90 \text{ mm}$
0,52	68,7	77,54	80,82	72,8	72,5
0,94	57,87	61	70,6	62,8	64,34
1,32	53,6	51,18	64,6	56,1	57,42

Z naměřených hodnot vzorků lze usoudit, že ohyb o 180° nemá zásadní vliv na chování elektrických parametrů. Největší rozdíl (oproti hodnotám u rovného vzorku) lze vidět v měření ohybu na válci s průměrem $\varnothing = 50 \text{ mm}$, kde charakteristická impedance ohnutého substrátu Z_0 ($Z_0 = 80,82 \ \Omega$) oproti největší naměřené charakteristické impedanci rovného substrátu Z_0 ($Z_0 = 68,7 \ \Omega$) dosahuje nepřesnosti 15% . Ostatní elektrické parametry spadají do chyby menší než 15% , z čehož lze usoudit, že jakýkoliv ohyb do velikosti 180° neovlivňuje ve velkém množství elektrické parametry flexibilních substrátů.

7 Závěr

Tato diplomová práce pojednává především o flexibilních substrátech, jejich parametrech a metodami vytváření vodivých propojení. Hlavní část je zaměřena na výpočet, simulaci a měření *RLC* parametrů vodivých propojení na flexibilních substrátech.

Úvodní kapitola stručně definuje pojem flexibilní elektronika a prezentuje základní rozdíly mezi pevným a ohebným substrátem.

V teoretické části jsou popsány žádoucí vlastnosti typické pro flexibilní substráty. Jedná se především o rozměrovou stabilitu, flexibilitu, elektrické vlastnosti, odolnost proti roztržení, teplotní a chemickou odolnost a absorpci vlhkosti. Dále jsou zde uvedeny základní konstrukční prvky, které musí obsahovat každý flexibilní systém.

Nejvíce rozsáhlá kapitola z teoretické části je věnována samotným flexibilním substrátům. Zde jsou vypsány základní informace o těchto ohebných materiálech, především jejich elektrické a mechanické vlastnosti. V závěru této kapitoly je podrobný přehled a zhodnocení charakteristických vlastností flexibilních substrátů v závislosti na typu substrátu a způsobu využití.

Další kapitola pojednává o materiálech pro vytváření funkčních celků na flexibilních substrátech. Jedná se obecně o vodivé, dielektrické a polovodivé materiály. Tyto materiály se nanášejí na substráty různými technologiemi, jejichž popis je součástí diplomové práce, a to její poslední teoretické části.

Výrobních postupů a způsobů nanášení organické elektroniky a funkčních vrstev existuje celá řada. Oproti klasickým metodám přináší řadu výhod. Metody používané pro výrobu flexibilní elektroniky jsou méně finančně nákladné než klasické metody a relativně šetrné k životnímu prostředí. Příprava materiálů se provádí při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku.

Stěžejní praktická část diplomové práce je zaměřena na návrh vodivých motivů na flexibilních substrátech. Jsou zde popsány teoretické výpočty pro planární mikrovlnná vedení. Dále bylo provedeno ověření, zda tyto výpočty jsou použitelné pro flexibilní substráty. Následuje simulace v programu Ansoft Designer pro porovnání správnosti teoretických výpočtů na flexibilních substrátech.

Nejdůležitější částí je zde experimentální měření. Při tomto měření se porovnávaly získané hodnoty elektrických parametrů s teoretickým měřením a simulací. Na základě tohoto porovnání bylo zjištěno, že u testovaných vzorků nevznikají velké rozdíly hodnot elektrických parametrů na

pevném a flexibilním substrátu. Rozdíly jsou v tolerančních mezích a naměřené hodnoty se mohou od teoretických lišit z důvodu nepřesnosti měření. Nicméně tyto výsledky korespondují jak s teoretickými výpočty, tak se simulací.

Dalším bodem měření v praktické části bylo ohýbání flexibilních materiálů a vyhodnocení změn elektrických parametrů RLC a Z_0 s elektrickými parametry stejných vzorků na rovném povrchu. Flexibilní vzorky se ohýbaly o 180° na připravených válcích. Z naměřených hodnot lze usoudit, že ohyb o 180° nemá zásadní vliv na chování elektrických parametrů. Největší rozdíl (oproti hodnotám u rovného vzorku) charakteristických impedancí Z_0 dosahuje nepřesnosti 15%. Ostatní elektrické parametry spadají do chyby menší než 15 %, z čehož lze usoudit, že jakýkoliv ohyb do velikosti 180° neovlivňuje nijak zásadně elektrické parametry flexibilních substrátů.

Závěrem lze konstatovat, že všechny body zadání byly splněny.

8 Seznam literatury

- [1] FJELSTAD, Joseph. *Flexible circuit technology*. [2nd ed.]. Sunnyvale, CA: Silicon Valley Publishers Group, c1998, v, 217 p. ISBN 09-667-0750-8.
- [2] Flexible CNT circuits move on. In: *Nanotechweb.org* [online]. Jul 25, 2008 [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/35130>
- [3] WONG, William S a Alberto SALLES. *Flexible electronics: materials and applications* [online]. New York: Springer, c2009, xviii, 462 p. [cit. 2014-03-28]. ISBN 978-038-7743-639. Dostupné z: <http://erdinckuruoglu.files.wordpress.com/2011/03/flexible-electronics.pdf>
- [4] New Sony Flexible OLED Display (rollable around a pencil) to Have Applications in the Superyacht Industry — Luxury Yacht Charter & Superyacht News. In: *Luxury yacht charter - motor yacht boat vacations and crewed sailing yachts in the Mediterranean, Caribbean & worldwide*. [online]. June 11, 2010 [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://www.charterworld.com/news/new-sony-flexible-oled-display-rollable-around-a-pencil-to-have-applications-in-the-superyacht-industry>
- [5] C110 Copper; Cu-ETP. In: *Fisk Alloy* [online]. 2014 [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: http://www.fiskalloy.com/product/c110_alloy/
- [6] Copper- C110. In: *Special Steels and Metals importers and distributors* [online]. [cit. 2014-02-06]. Dostupné z: [http://www.ssm.co.nz/sitefiles/file/Copper110%20\(2\).pdf](http://www.ssm.co.nz/sitefiles/file/Copper110%20(2).pdf)
- [7] Bend me, shape me: flexible electronics perform under punishing conditions. In: *Ars Technica* [online]. June 5 2012 [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://arstechnica.com/science/2012/06/bend-me-shape-me-flexible-electronics-perform-under-punishing-conditions/>
- [8] SANKIR, Nurdan Demirci. *FLEXIBLE ELECTRONICS: MATERIALS and DEVICE FABRICATION* [online]. Blacksburg, Virginia, December 7, 2005 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-12212005-001600/unrestricted/NDSankirDissertation.pdf>. Dizertační práce. Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [9] KAPTON, KAPTONOVÉ POLYIMIDOVÉ LEPICÍ PÁSKY, FOLIE, MASKOVACÍ TERČE, TOPNÉ FOLIE. *ELCHEMCO* [online]. [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: <http://web.elchemco.cz/KAPTON.php>
- [10] Tváření plastů PET. *Vakuové tvarování* [online]. 2014 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/cz/PET/>
- [11] Synflex Elektro GmbH: Mylar® A. In: *Synflex Elektro GmbH - Cívkový drát Měděný lakovaný drát Výstřižky a výlisky Obchod s mědí* [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.synflex.com/cz/produkte/?id=18&areaid=flaechenisolierstoffe>
- [12] KOŘÍNEK, Zdeněk. Vlákna. In: *KOMPOZITY* [online]. [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [13] Teonex® - PEN Film - Teijin DuPont Films. In: *Teijin DuPont Films* [online]. [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: http://www.tejindupontfilms.jp/english/product/pen_teo.html
- [14] *Printing technology for Flexible Substrates* [online]. InterLingua Publishing, 2006 [cit. 2014-04-08]. ISBN 1-884730-46-9. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=MOBBP6tGd8EC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=true>
- [15] [Http://smarttextiles.co.uk](http://smarttextiles.co.uk). *Http://smarttextiles.co.uk* [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://smarttextiles.co.uk/overview/>

- [16] MILITKÝ, J. *Inteligentní textilie - realita nebo fikce* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, s. 6 [cit. 2013-12-11]. RIV/46747885:24410/02:00000123. Dostupné z: http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/inteligentni_textilie.pdf
- [17] Smart Fabrics - Intelligent Textiles. In: *Tech Bells* [online]. 11 December 2011 [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://techbells.blogspot.com/2011/12/smart-fabrics-intelligent-textiles.html>
- [18] DŽUGAN, Tomáš. *Senzory par a plynů na bázi ftalocyaninů* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2658/pdf\(2\).Disertace_Dzugan.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2658/pdf(2).Disertace_Dzugan.pdf?sequence=1). Dizertační práce. Západočeská Univerzita.
- [19] PCB007 DuPont Introduces New LDI Photoresists. In: *PCB007 IConnect007 Home* [online]. April 10, 2009 [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: http://www.pcb007.com/pages/columns.cgi?clmid=%20&artid=49345&_pf_=1
- [20] Roll-to-roll processing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014, 14 April 2013 [cit. 2014-02-12]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Roll-to-roll_processing
- [21] ČERNÝ, Jiří. Technologie pro tisk fotografií II. In: *FotoAparát.cz* [online]. 29.1.2004 [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.fotoaparar.cz/article/7178/2>
- [22] Hlubotisk. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014, 11.3.2013 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlubotisk>
- [23] Rotogravure printing process. In: *BOBST: Home* [online]. 2013 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: http://www.bobst.com/usen/products/rotogravure-printing/process/#.U2bus_1_tzo
- [24] PRUDENZIATI, M a HORMADALY, Jacob. *Printed films: materials science and applications in sensors, electronics and photonics*. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012, xxii, 586 p. ISBN 08-570-9621-4.
- [25] Ofset. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014, 10.4.2014 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ofset>
- [26] Tampónový tisk. In: *Nejlevnější reklamní tisk 0,95 Kč/kus, reklamní potisk | www.Tamponovy-tisk.cz* [online]. 2007 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://www.tamponovy-tisk.cz/sluzby.aspx>
- [27] Tamponový tisk. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014, 23.3.2013 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Tamponov%C3%BD_tisk
- [28] TRNKA, Pavel a BUJALOBOKOVÁ, Magdaléna. Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích. In: *Odborné časopisy - Časopis Elektro* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36505
- [29] SB 6/2008 AKTUÁLNÍ TÉMA – elektronika pod lupou: Sítotisk se prosadil i v elektronice | Svět balení - MATERIÁLY, TECHNOLOGIE, DESIGN, SYSTÉMY BALENÍ. In: *Svět balení - MATERIÁLY, TECHNOLOGIE, DESIGN, SYSTÉMY BALENÍ* [online]. 2008 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.svetbaleni.cz/sb-6-2008-aktuln-tma-elektronika-pod-lupou-sitotisk-se-prosadil-i-v-elektronice/>
- [30] HOBBY, Alan. SCREEN PRINTING FOR THE INDUSTRIAL USER. In: *The Gwent Group, Leaders in paste manufacturing, sensor/ biosensor development and Instrumentation* [online]. March 1997 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z:

- http://www.gwent.org/gem_screen_printing.html
- [31] Polymer thin films. In: *Physical and Chemical Graduate School Göttingen* [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: http://www.pcgg.de/download/Vor_Polymerfilme.pdf
- [32] BAI, Hua a Gaoquan SHI. *Sensors: Gas Sensors Based on Conducting Polymers* [online]. MDPI, 2007 [cit. 2014-04-15]. ISBN 1424-8220. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.mdpi.com/1424-8220/7/3/267/pdf&qscrl=1>
- [33] File:SolGel SpinCoating.jpg. In: *Wikimedia Commons* [online]. 12.11.2008 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolGel_SpinCoating.jpg
- [34] Dip-coating. In: *IFN - Institute for photonics and nanotechnologies* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.science.unitn.it/~gcsmf/facilities/dip-coating.htm>
- [35] Processes of dip coating. In: *Asumi Giken, Limited* [online]. 2010 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://www.dip-coater.com/english/about_dip_coating.html
- [36] EKRT, Ondřej. Technologie a vlastnosti tenkých vrstev, tenkovrstvé senzory: Technologie CVD, PVD, PECVD, MOVPE, MBE, coating technologie (spin-, spray-, dip-). In: *Fakulta chemicko-inženýrská VŠCHT v Praze* [online]. © 2010-11 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/05_TechnologieCVD_%20PVD_PECVD_MOVPE_MBE.pdf
- [37] Airless Spray Coating Technology: Including Air-Assisted Airless Spray Technology. In: *CH Reed paint finishing, fluid handling, air compressors, air management, assembly tools* [online]. ©1995 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://www.chreed.com/help_pages/airless_guns.pdf
- [38] Air Plasma Spray (APS) Hydroxyapatite (HA) Coatings. In: *Surface Dynamics / Coating Biomedical Surfaces for the World* [online]. 2011 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.sdbiocoatings.com/node/19>
- [39] Plasma Spray Coating: Thermal Spray Coating | Thermal Spray Technologies Inc. *TST - Thermal Spray Technologies* [online]. 2014 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.tstcoatings.com/plasma_spray.html
- [40] ZAJONCOVÁ, Ludmila a Kristýna POSPÍŠKOVÁ. *MEMBRÁNY PRO AMPEROMETRICKÉ BIOSENZORY* [online]. Olomouc, 2008 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: https://docs.google.com/viewer?url=http://www.researchgate.net/publication/259000344_Membrny_pro_amperometrick_biosenzory/file/72e7e529a64ada17d4.pdf?ev%3Dpub_ext_doc_dl%26origin%3Dpublication_detail%26inViewer%3Dtrue&pli=1. Referát. Katedra biochemie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého.
- [41] Layer-by-Layer-Technology. In: *Surflay Nanotec GmbH - Layer-by-Layer, nanocoatings, surface functionalization, polyelectrolyte* [online]. [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.surflay.com/en/layer-by-layer.php>
- [42] Thiol. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014, 22.11.2013 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Thiol>
- [43] KADAVÝ, Tomáš. *NANOTECHNOLOGIE V POLOVODIČOVÉ ELEKTRONICE* [online]. Turnov, 2009 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.mensagymnazium.cz/pdf/prace-studentu/nanotechnologie.pdf>. ROČNÍKOVÁ PRÁCE Z FYZIKY. Mensa gymnázium.
- [44] Amodimethicone. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA):

- Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Amodimethicone>
- [45] ALOM RUIZ, Sami a Christopher S. CHEN. Microcontact printing: A tool to pattern. *Soft Matter* [online]. 2007, vol. 3, issue 2 [cit. 2014-05-02]. DOI: 10.1039/b613349e. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=b613349e>
- [46] Microcontact printing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014, 17 April 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Microcontact_printing
- [47] HUSSAIN, Syed Arshad. Langmuir-Blodgett Films a unique tool for molecular electronics. In: *ArXiv.org e-Print archive* [online]. India [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0908/0908.1814.pdf>
- [48] Langmuir, Langmuir-Blodgett, Langmuir-Schaefer technique. In: *KSV NIMA* [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.ksvnima.com/technologies/langmuir-blodgett-langmuir-schaefer-technique>
- [49] BARTOVSKÁ, Lída a Marie ŠIŠKOVÁ. Film (monovrstva) Langmuirův a Blodgettové. In: *Vydavatelství VŠCHT Praha* [online]. 2005 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/film_langmuiruv_a_blodgettove.html
- [50] Vacuum Deposition. *Tokyo University of Agriculture and Technology* [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.tuat.ac.jp/~usuilab/English/depo.html>
- [51] Gas Deposition. In: *Tokyo University of Agriculture and Technology* [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.tuat.ac.jp/~usuilab/English/misc.html>
- [52] Ionization-Assisted Deposition. In: *Tokyo University of Agriculture and Technology* [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.tuat.ac.jp/~usuilab/English/IAD.html>
- [53] Organic Vapor Phase Deposition for Optoelectronic Devices. In: *Princeton University* [online]. [2014] [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.princeton.edu/~benziger/OVPD.pdf>
- [54] Tutorial Lithography Nanopatterning. In: *Czech Republic / Sigma-Aldrich* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/micro-and-nanoelectronics/lithography-nanopatterning/tutorial.html>
- [55] PEASE, R.F. a S.Y. CHOU. Lithography and Other Patterning Techniques for Future Electronics. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2008, vol. 96, issue 2, s. 248-270 [cit. 2014-05-05]. DOI: 10.1109/JPROC.2007.911853. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4432794>
- [56] Oligomer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Oligomer>
- [57] ŠMÍD, Petr. Návrh planárních mikrovlnných filtrů a využití umělých neuronových sítí pro odhad řádu filtru. In: *Elektrorevue* [online]. 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03041/index.html>
- [58] Agilent | Agilent Technologies Introduces High-Performance Low-Frequency Precision LCR Meter. In: *Agilent* [online]. 2000-2011 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://prphotos.tm.agilent.com/2006/10jan-em06001/>
- [59] Automatic Battery Electrode Coating System with Slurry Feeder, Coater, Roll (Un)Winder, and Drying Oven MSK-AFA-E300. In: *MTI Corp - Leading provider of lab equipments and advanced crystal substrates* [online]. 1994-2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.mtixtl.com/automaticbatteryelectrodecoatingsystem-msk-afa-e300.aspx>

- [60] Metodika návrhu plošných spojů. In: *SEMACH - výroba plošných spojů* [online]. 2008-2013 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z:
<http://www.semach.cz/pdf/metodika.pdf>
- [61] HOFFMANN, Karel. *Planární mikrovlnné obvody*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, c2000, 145 s. ISBN 80-010-2115-7.
- [62] HONG, Jia-Sheng a M LANCASTER. *Microstrip filters for RF/microwave applications* [online]. New York: John Wiley, 2001, xii, 471 s. [cit. 2014-05-09]. ISBN 04-713-8877-7. Dostupné z:
<http://kto.tam.free.fr/M/010/Microstrip%20Filters%20For%20RF%20Microwave%20Applications/Microstrip%20Filters%20For%20RF%20Microwave%20Applications.pdf>