

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tištěné součástky pro elektroniku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Filip KLÍMA**
Osobní číslo: **E15B0120P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Tištěné součástky pro elektroniku**
Zadávající 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. Proveďte rešerši současného stavu tištěných součástek pro elektroniku. Věnujte se okrajově i tiskovým technologiím, které lze pro výrobu využít.
2. Vyhledejte a popište vybrané součástky (odpor, kondenzátor, cívku), jejich parametry a materiály použité při výrobě.
3. Diskutujte využitelnost tištěných součástek v praxi, jejich výhody a nevýhody.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil a URBÁNEK, Jan. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
2. Screen printed antennas on textile substrate [stať] / Tomas Blecha, Richard Linhart, Jan Reboun. – In: Electronics System Integration Technology Conference ESTC 2014 : proceedings. – Piscataway : IEEE, 2014. – CD-ROM. – ISBN 978-1-4799-4026-4. – [4] s.
3. Getinet Ashebir, Serges Zambou, Ulrich Männl, Rhyme Setshedi, Margit Härting, David T. Britton, Fully screen printed LRC resonant circuit, Microelectronic Engineering, Volume 162, 16 August 2016, Pages 6-11, ISSN 0167-9317, <http://doi.org/10.1016/j.mee.2016.04.021>.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Navrátil

Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018

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



V Plzni dne 10. října 2017

Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zaměřuje na popis současného stavu tištěných součástek pro elektroniku, včetně současných technologií používaných při jejich výrobě. Text je rozdělen do tří částí. Začátek práce je věnován popisu tištěné elektroniky. Zaměřuje se nejen na její využití, ale i na porovnání jejích vlastností s konvenční elektronikou. Navazující část práce je věnována základním tiskovým technologiím, jako jsou sítotisk a šablonový tisk. Součástí je i popis technologií inkjet a aerosol jet. Hlavní část práce je zaměřena na vybrané tištěné pasivní součástky: odpor, kondenzátor a cívka. Popisuje jejich materiály a výrobu na konkrétních výrobních řešeních využitelných v praxi. Poslední část práce obsahuje diskuzi, ve které je popsána využitelnost tištěných součástek za použití současných technologií a materiálů.

Klíčová slova

Tištěná elektronika, organická elektronika, PEDOT:PSS, tištěná součástka, tištěný odpor, tištěný kondenzátor, tištěná cívka, výrobní technologie, sítotisk, šablonový tisk, inkjet, aerosol jet.

Abstract

This bachelor thesis is focused on description of present situation of printed passive components, including technologies used for their manufacture. Thesis is divided into three parts. Beginning of the thesis describes present printed electronics. It compares printed electronics with conventional electronics and aims at utilising of printed electronics. Next part of the work describes fundamental printed technologies essential to fabricate printed components. There are technologies such as screen printing, stencil printing, inkjet and aerosol jet. Main part of the thesis is focused on particular printed passive components: resistance, capacitor and inductor. It describes their materials and fabrication for specific solutions, which can be used in real manufacturing processes. Last part of the thesis is dedicated to discussion of practicability of printed components using current printing technologies and materials.

Key words

Printed electronics, organic electronics, PEDOT:PSS, printed components, printed resistor, printed capacitor, printed inductor, manufacturing technology, screen printing, stencil printing, inkjet, aerosol jet.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 4.6.2018

Filip Klíma

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 SOUČASNÝ STAV	11
1.1 TISKOVÉ TECHNOLOGIE.....	13
1.1.1 Sítotisk.....	14
1.1.2 Šablonový tisk.....	18
1.1.3 Aerosol Jet.....	19
1.1.4 Inkjet.....	21
1.2 MATERIÁLY PRO VÝROBU TIŠTĚNÉ ELEKTRONIKY.....	24
1.2.1 Příklady materiálů.....	26
2 POPIS TIŠTĚNÝCH SOUČÁSTEK	30
2.1 ODPOR.....	32
2.2 KONDENZÁTOR.....	36
2.3 CÍVKA.....	41
3 DISKUZE VYUŽITÍ TIŠTĚNÉ ELEKTRONIKY	45
ZÁVĚR	47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	48

Úvod

Tištěné pasivní součástky představují nezbytnou část pro konstrukci všech tištěných zařízení. To představuje jeden z důvodů, proč je třeba se jimi do budoucna zabývat. Mnoho současných výzkumných projektů se také zabývá například tištěnými senzory či tranzistory. Tištěná elektronika si klade za požadavky překonat některé z nedostatků konvenční elektroniky. Pomocí aditivních tiskových technologií lze tisknout selektivně a vytvářet součástky složené z několika vrstev i se složitými strukturami. Tištěné součástky mohou přinést nová řešení ve formě levných zařízení s přidanou hodnotou ve formě flexibility či komfortu a nízké hmotnosti (např. u nositelné elektroniky). Výroba těchto tištěných součástek je možná díky široké škále dostupných funkčních materiálů. Tato bakalářská práce je rešerší současného stavu tištěné elektroniky. Zahrnuje popis současných výrobních technologií, materiálů a možností výroby konkrétních pasivních součástek. Všechny parametry tištěných pasivních součástek jsou v současné době na takové úrovni, že je možné s jejich pomocí konstruovat funkční zařízení využitelná v praxi.

Cílem této práce bylo shrnutí získaných informací o současném stavu tištěné elektroniky se zaměřením na tištěné pasivní součástky.

Seznam symbolů a zkratek

AJP	Aerosol Jet Printing	Bezkontaktní tisková technologie Aerosol Jet®
CAD	Computer Aided Design	Počítačem podporované projektování
CIJ	Continual Inkjet	Režim kontinuálního tisku u metody inkjet
DOD	Drop On Demand	Režim řízeného dávkování inkoustu u metody inkjet
IoT	Internet of Things	Internet věcí
PA	Pneumatic Atomizer	Pneumatický atomizér
PEDOT	Polyethylenedioxythiophen	Organický vodivý materiál
PEDOT:PSS	poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate)	Organický vodivý materiál
PEN	Polyethylene napthalate	Polyethylen-naftalát
PET	Polyethylene terephthalate	Polyethylentereftalát
PVP	poly(4-vinylphenol)	-
RFID	Radio Frequency Identification	Radio-frekvenční identifikace
R2R	Roll-to-Roll	Výroba na odvíjený kontinuální substrát
SMD	Surface-Mount Device	Součástka pro povrchovou montáž
SMT	Surface-Mount Technology	Povrchová montáž
THD	Through-Hole Device	Součástka pro vývodovou montáž
THT	Through-Hole Technology	Vývodová montáž
UA	Ultrasonic Atomizer	Ultrazvukový atomizér
VI	Virtual Impactor	-

1 Současný stav

Za posledních několik dekad se spotřební elektronika a počítače staly nedílnou součástí našich životů. Počítačová technika ovlivnila způsob, jakým komunikujeme, pracujeme a přemýšlíme. Vývoj současné konvenční elektroniky za současného zvyšování výpočetního výkonu dosud směřoval k miniaturizaci a využívání převážně křemíkových materiálů [1, 2]. Konvenční elektronika má však řadu nevýhod (např. vysoké výrobní náklady a možné požadavky na výrobní procesy) [3].

Do podvědomí dnešní elektroniky se stále více dostává tzv. tištěná elektronika, která si klade za požadavky překonat některé z nedostatků konvenční elektroniky a nabídnout nová řešení, která byla klasickou elektronikou těžko realizovatelná. Termín tištěná elektronika je znám již několik desetiletí, avšak setkáváme se s ní ve větší míře až v současné době. To je dáno tím, že vývoj tištěné elektroniky je pevně spjatý s vývojem organické a flexibilní elektroniky a také s vývojem materiálů v těchto oblastech. [1]

Tišťená elektronika využívá obvykle aditivní tiskové technologie, které budou popsány v následující části práce. Těmito technologiemi lze tisknout nejen vodivé propojení, ale i pasivní součástky jako odpory, kondenzátory a cívky. Pomocí tiskových technologií však můžeme vyrobit i složitější elektronické součástky, např. tranzistory. Tisk součástek složených z několika vrstev či částí se realizuje tiskem několika vrstev přes sebe. Kombinací několika vrstev a materiálů s různými elektrickými vlastnostmi je možné na daném materiálu vytvořit i složité struktury, neboť tisk nemusí probíhat celoplošně, ale jen na potřebných místech, tzv. selektivně. [3, 4]

Organická elektronika si klade za cíl nahradit pomocí materiálů na bázi uhlíku křemík, který je používán jako základní prvek polovodičových součástek. Použitím organických materiálů lze vyrobit tištěné tranzistory tzv. OFET/OTFT (organické tranzistory). Tyto tranzistory nemají parametry ani životnost srovnatelnou s konvenčními tranzistory, ale pro jejich nízkonákladové a nenáročné aplikace jsou dostačující. Navíc je lze oproti křemíkovým tranzistorům vyrábět výrazně levněji a za nižších teplot, což nám umožňuje tisknout na široké spektrum substrátů. Technologie tištěné elektroniky navíc umožňují velkoplošný tisk na lehké flexibilní substráty, kterými může být plastová fólie, papír či

textilie. Fólie mají různé specifické vlastnosti a některé byly vyvíjené speciálně pro tištěnou elektroniku. Kombinace všech těchto faktorů s sebou v porovnání s konvenčně vyráběnou elektronikou přináší nízkonákladový výrobní proces bez nadměrné produkce chemického odpadu. [1, 2, 5]

Díky širokému spektru modifikovatelných materiálů se hlavní uplatnění očekává ve formě senzorů, biomedicínských zařízení či nositelné flexibilní elektroniky. Můžeme očekávat ohebné led displeje (OLED), paměti, solární články, senzory či další součástky [6]. Samotný trh s tištěnou elektronikou ve Spojených státech amerických by měl do roku 2019 dosáhnout hodnoty téměř 60 miliard dolarů [1].

1.1 Tiskové technologie

Tištěná elektronika má v porovnání s konvenční elektronikou obrovský ekonomický přínos, neboť přináší nová a efektivní řešení při její výrobě. Obecně lze říci, že výroba všech jejích zařízení spočívá v tisku vrstev různých materiálů. Velikou roli také hraje možnost implementovat do zařízení nové vlastnosti, jako například mechanickou flexibilitu, což může v jistých aplikacích hrát významnou roli (např. nositelná elektronika). Aby však tato zařízení bylo možné vytvořit, musí se správně zvolit tisková technologie. Výběr tiskové technologie je dán především požadavky na tištěné vrstvy a materiálovými vlastnostmi. Musí se samozřejmě uvažovat i technická a ekonomická náročnost, která vzniká v průběhu výroby tištěných zařízení. V dnešním světě tištěné elektroniky existuje mnoho tiskových metod. Řada těchto metod byla původně používána pro grafický tisk (např. flexotisk a ofsetový tisk) [5].

Obecně lze tiskové technologie rozdělit na kontaktní a bezkontaktní technologie. U kontaktních technologií hrozí riziko kontaminace pasty či poškození substrátu, neboť tisková forma s nanesenou pastou je v přímém kontaktu se substrátem. Příkladem kontaktních tiskových technologií mohou být flexotisk, sítotisk, ofsetový tisk, hlubotisk apod. Kontaktní tiskové technologie jsou charakteristické svojí vysokou výrobní rychlostí a malými náklady na tisk, neboť je lze implementovat jako R2R (Roll-to-roll) výrobní procesy vhodné pro masovou výrobu. U bezkontaktních tiskových technologií nehrozí rizika popsána u kontaktních technologií, navíc jsou vhodné pro tisk na citlivé či nepravidelně zakřivené substráty. Příkladem bezkontaktních tiskových technologií může být inkjet, aerosol jet či elektrografie. [4, 7]

Snaha je především o vývoj výrobních procesů, při kterých je možné provádět velkoplošný tisk a tisknout tak například několik struktur najednou. Příkladem jak zefektivnit výrobu mohou být metody tisku R2R (viz Obr. 3 u rotačního sítotisku). R2R systémy se skládají ze soustavy rotujících válců na kterých je posouvána fólie (substrát). Fólie je kontinuálně odvíjena z jednoho válce na začátku řetězce a navíjena na konci. Mezi těmito válci se nachází soustava kladek, která vede fólii skrz různé části výrobního procesu. Kromě tisku mohou být součástí výrobního procesu např. depozice materiálů, laminace, pokovování, balení apod. Výhodou R2R systémů je tedy možnost rychle se opakujícího velkoplošného tisku a možnost zahrnout do výrobního řetězce několik

výrobních operací najednou v rámci jedné výrobní linky. Hlavní nevýhodou těchto systémů je však složitější optimalizace celého procesu a možné větší nároky na údržbu a kontrolu celého systému. Efektivita výroby tedy hraje významnou roli. V oblasti tištěné elektroniky je snaha přiblížit se co nejvíce plně aditivním a automatizovaným procesům a minimalizovat tak množství odpadu vznikajícího při výrobě. [3, 6, 8, 9]

Pro výrobu pasivních součástek jako je odpor, kondenzátor a cívka lze teoreticky použít celou řadu tiskových metod. Tato práce se zaměřuje na metody, které lze užít jak pro průmyslovou výrobu, tak pro vývoj prototypových zařízení. V této práci jsou popsány techniky sítotisk, šablonový tisk, inkjet a aerosol jet. Pro základní představu tiskových parametrů těchto tiskových technologií je připravena následující tabulka (viz Tab. 1).

Tab. 1: Souhrn základních parametrů vybraných tiskových metod (převzato z [4])

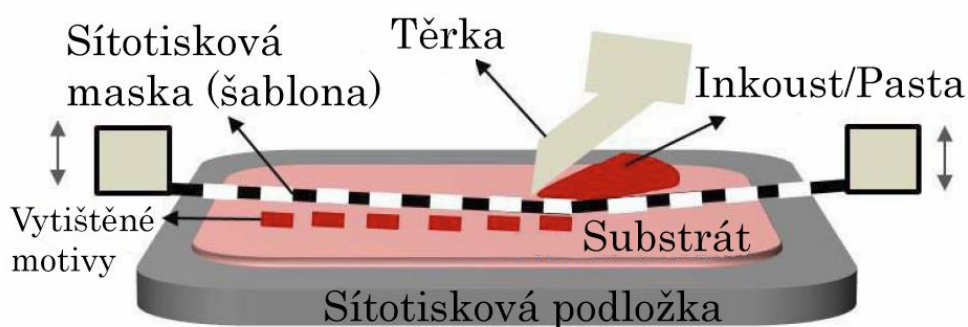
Metoda	sítotisk	inkjet	aerosol jet
rozlišení tisku [μm]	40 - 100	20 - 100	10 - 50
tloušťka vrstvy [μm]	10	<1	1
rychlost tisku [m/s]	0,1 - 0,5	10^{-2} - 10	10^{-3} - 10^{-2}
rozsah viskozit [mPa·s]	3×10^3 - 2×10^4	<1 - 50	<1 - 1×10^3

1.1.1 Sítotisk

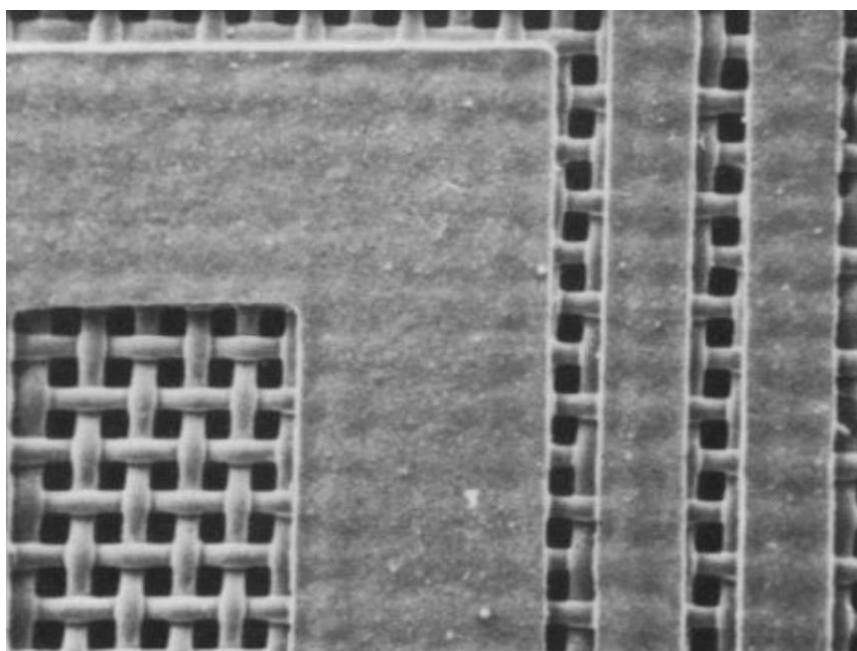
Sítotisk je jedna z nejpoužívanějších vyspělých technologií pro tištěnou elektroniku. V elektrotechnickém průmyslu je již celou řadu let používán k tisku vodivých propojení na deskách plošných spojů. Metoda je založena na principu průtisku pasty skrz oka v šabloně (motivu) vytvořené na napnuté síťovině. V porovnání s ostatními tiskovými metodami je rychlejší a všestranná, avšak má i svoje nevýhody. Za nevýhodu můžeme považovat nemožnost snadno měnit tiskový motiv, protože pro změnu motivu je třeba nové síto s nově vytvořenou šablonou. Pomocí sítotisku lze jen velice obtížně tisknout například na 3D substráty. Metoda sítotisku přináší jednoduchý, dostupný a rychlý výrobní proces, který se dá snadno přizpůsobit výrobním požadavkům. Výsledný sítotiskový proces se skládá z opakování několika výrobních kroků, ze kterých lze snadno vyvinout optimální výrobní smyčku. Existují dva možné způsoby sítotisku, a to konvenční sítotisk a R2R sítotisk, oba tyto způsoby jsou v následující části podrobněji popsány.

Konvenční síťotisk

Existují dva různé způsoby použití síťotisku. První způsob můžeme označit jako konvenční síťotisk, kde je na substrát přiložena průtisková šablona (viz Obr. 2), přes kterou se pohybuje těrka. Tiskací stroj se skládá ze síta, těrky, tiskového stolu a substrátu. Tisková pasta je nanášena na síto a následně pomocí těrky protlačována skrz otvory v síťovině na potřebná místa na substrátu (viz Obr. 1) [6, 10]. Vlákná síťoviny jsou vyráběna z různých materiálů. Příkladem může být monofilní polyester, který se vyznačuje dobrou pevností v tahu a pružností. Naopak tkanina vyrobená z ocelových vláken, má téměř nulovou pružnost, ale za to je rozměrově stálá. Kompromisem předchozích dvou můžeme označit metalizovaná polyesterová vlákna. Tato vlákna přináší větší elasticitu než ocelová vlákna a zároveň větší pevnost v tahu než u polyesterových vláken. [10, 11]



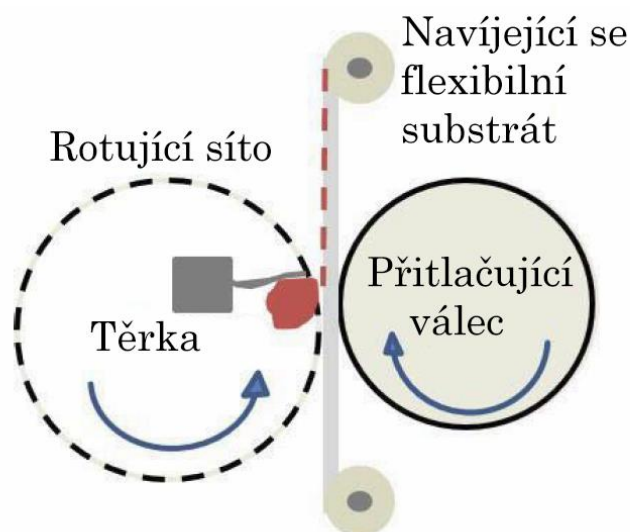
Obr. 1: Ukázka konvenční metody síťotisku (převzato a upraveno z [6])



Obr. 2: Detail síta s vytvořeným motivem (převzato z [10])

Rotační sítotisk

Druhý způsob využívá rotačního sítotisku. Ten je vhodný pro sériovou výrobu, mluvíme o tzv. R2R („Roll-to-roll“) výrobním procesu. Rotační sítotisk je realizován pomocí válce, kde tisknoucí místa tvoří otvory ve válci, skrz které je protlačována pasta na substrát (viz Obr. 3). Uvnitř válce je pevně umístěná třerka, která protlačuje pastu skrz otvory. Dochází k neustálému otáčení válce a posunu potiskového materiálu. V porovnání s klasickým konvenčním sítotiskem lze dosáhnout vysokých rychlostí tisku. Tato technologie má však svoje nevýhody, rotační řešení je poměrně drahé a náročné na údržbu a čištění. [5, 6]



Obr. 3: Ukázka rotačního sítotisku (převzato a upraveno z [6])

Kvalita tisku

Kvalita sítotisku závisí na mnoha faktorech. Nejprve je třeba zvolit správný formát rámu a obrazce. Pro požadovanou přesnost rozměrů a jemnost motivů je třeba volit správný materiál tkaniny, tloušťku tkaniny, velikost ok a volnou plochu tkaniny (tzn. poměr plochy, kterou zabírají na sítu otevřená oka). Dalším důležitým parametrem je směr vláken síta vůči tištěnému motivu. Za pomoci experimentů byl stanoven ideální úhel $22,5^\circ$ [10]. Pro nanesení správné tloušťky pasty je velice důležitá tloušťka použitých vláken a tzv. odtrh, což je vzdálenost síta od podložky. Při tisku tedy tlakem a pohybem těrky protlačujeme pastu skrze otvory v síťovině a v místě kontaktu dojde k protlačení pasty na substrát. Tloušťka pasty se přibližně rovná třetině tloušťky síta. Právě odtrh a správný tlak těrky na napjatá vlákna síťoviny významným způsobem ovlivní výslednou kvalitu a věrnost motivu. [6, 10]

Důležitým aspektem je volba pasty a substrátu pro sítotisk. Abychom kompletně přenesli pastu skrz síto, musíme se zabývat viskozitou pasty či povrchovým napětím substrátu. Nízko viskózní média totiž projdou velmi lehce skrz oka síta, a to takovým způsobem, že není možný správný přenos média na substrát. Média s vyšší viskozitou jsou vyžadována hlavně kvůli minimalizaci tečení média po substrátu. Avšak viskozita nesmí být příliš velká, neboť musíme optimálně přenést médium skrz síto tak, abychom zajistili dostatečné rozlišení a nezkreslené ostré hrany obrazce. [6, 10]

Bez velkého přizpůsobování vlastností past a síta můžeme u sítotisku mluvit běžně o rozlišení 50-100 μm [6]. Je třeba uvažovat také velikost částic pasty. Pro správný tisk bychom měli volit 2,5 až 3 krát větší velikost ok než je velikost částic pasty [10].

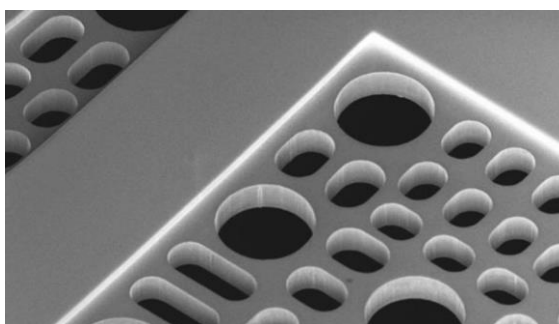
Shrnutí

Sítotisk na rozdíl od jiných výrobních metod nevyžaduje vysoké investiční náklady a je relativně nenáročný na obsluhu. Výhody jako je velice dobré rozlišení a vysoká přesnost tisku i vícevrstvých struktur ukazují, že sítotisk je velice výhodná metoda pro velkoobjemovou produkci. Metoda sítotisku je však nevhodná pro tisk na 3D či jinak zakřivené substráty a změna tiskového motivu je poměrně zdlouhavá. Dnes již nedosahuje rozlišení jako jiné tiskové technologie. [6, 8]

1.1.2 Šablonový tisk

Šablonový tisk je metoda téměř identická se sítotiskem. Místo síta s motivem se používá fólie s otvory (viz Obr. 4), skrz které prochází pasta. Oproti sítotisku je fólie koncipována tak, že se neprohýbá a má velice malou pružnost. Při přenosu pasty na substrát je fólie přímo celou plochou položena na substrátu a odtrh je tedy nulový. Z toho vyplývá, že u šablonového tisku je tloušťka tisku dána pouze tloušťkou šablony. Šablony jsou často vyráběné z mosazi, nerezové oceli, mědi apod. V dnešní době se v hojné míře používají šablony z plastu, a to díky jejich nízké ceně a snadné výrobě. [10, 12, 13]

Pro získání požadovaného motivu na šabloně jsou používány technologie leptání, laserového řezání a galvanoplastika. U procesu leptání je zajímavá hlavně jeho příznivá cena a značné rozšíření této techniky. Leptání probíhá zpravidla z obou stran souběžně. Použitelnost šablony vyrobené tímto procesem je limitována na součástky s roztečí nad 0,4 mm [10]. Proces leptání je výrazně rychlejší než obě výše zmíněné metody pro vytvoření šablony, neboť leptat lze velké množství otvorů najednou. Šablony vyrobené laserovým řezáním se oproti leptaným vyznačují snadnou opakovatelností a přesností rozměrů, neboť proces řezání probíhá z jedné strany. Tento proces je však dražší. Takto vyrobené šablony jsou nejpoužívanější pro součástky s roztečí pod 0,5 mm [10]. Pro levnější výrobu se někteří výrobci rozhodli kombinovat obě zmíněné metody. Větší otvory jsou leptány a menší řezány laserem. [10, 13]

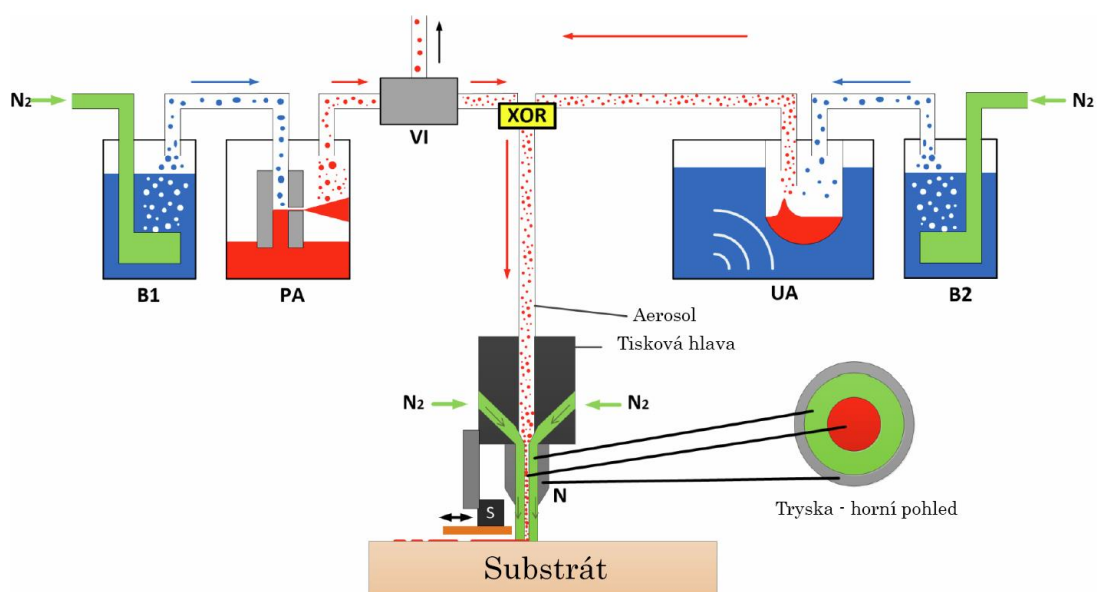


Obr. 4: Detail kovové šablony (převzato z [12])

Pro co nejjemnější rozlišení tisku byla vyvinuta metoda μ -Screen. Jako šablona je používána nerezová fólie, do které jsou za pomoci CAD systému mikroleptány otvory. Při tisku je pod fólii aplikována organická těsnící vrstva, která zaručí přenos tiskacího média přímo do otvorů. Tato technologie umožňuje tisk velice jemných čar, s šířkou menší než 50 μm . [10, 11]

1.1.3 Aerosol Jet

Aerosol Jet Printing® je poměrně nová inovativní technologie pro tisk. Princip této metody spočívá v tisku inkoustu na substrát ve formě aerosolu. Jedná se o bezkontaktní aditivní metodu s velkým rozlišením tisku umožňující tisk materiálů s širokou škálou viskozit. Tato technologie vznikla na základě projektu MICE (Mesoscale Integrated Conformal Electronics) ve výzkumu americké agentury DARPA (Defense Advanced Research Program Agency). Na základě vývoje nástroje v tomto projektu vznikla společnost OPTOMECH, která tuto technologii dnes komerčně vyrábí [14]. Systém tisku je založen na tvorbě a tisku inkoustu ve formě aerosolu. Je možné tisknout materiály, jejichž viskozita se pohybuje od 1 do 1000 mPa·s. Systém je omezen minimální tisknutelnou šířkou čar 10 μm a běžně lze tisknout vrstvy minimální tloušťkou 1 μm (u vybraných (nano)materiálů i méně). Tisk pomocí AJP je vhodný i pro tisk na zakřivené či 3D substráty. Návrh tiskového motivu pro AJP je založen na klasických CAD systémech, což přináší uživatelsky přívětivou metodu užívanou pro maloobjemový tisk a hlavně pro tzv. rapid prototyping. Rapid prototyping umožňuje vývoj nových elektronických zařízení stejným způsobem, jako jsou dnes využívány 3D tiskárny k vytváření prototypů složitých mechanických součástí. Můžeme pomocí něj zjistit a optimalizovat potřebné parametry zařízení před nasazením do velkoobjemové výroby. Tato zařízení tedy můžeme najít v oblasti pro výzkum tištěné elektroniky, smart textilií apod. V průmyslové výrobě se s ním prozatím můžeme setkat u tištěných antén v mobilních telefonech. [15–18]



Obr. 5: Schéma systému Aerosol Jet Printing [převzato a upraveno z [19]]

Princip celého systému je založen na vytvoření a následné depozici aerosolu (viz Obr. 5). Aerosol se vytváří v zařízení nazývaném atomizér (PA, UA). V atomizéru dochází k rozbíjení částic funkčního inkoustu a ke vzniku aerosolu. Existují dva druhy atomizérů. Pro depozici širších či tlustších linií (vrstev) se používá tzv. pneumatický atomizér (PA). Uvnitř tohoto atomizéru se nasává inkoust Venturiho efektem. Tento atomizér je vhodný pro inkousty o viskozitě 1-1000 mPa·s a lze ho tedy využít pro relativně široký rozsah inkoustů. Chceme-li provést depozici užších či tenčích linií (vrstev), musíme použít ultrazvukový atomizér (UA). Ten je použitelný pro inkousty o viskozitě 1-5 mPa·s. Obrovskou výhodou UA je minimální použitelné množství inkoustu 1ml (např. pro velmi drahé či na výrobu náročné (nano)materiály). Pro zlepšení procesu atomizace se používají tzv. bubbler (B1, B2). Pomocí bubblerů se „proubláváním“ dusíku přidávají rozpouštědla do inkoustu. Jako rozpouštědla je možné použít alkohol, aceton, vodu apod. [15–19]

Mezi pneumatickým atomizérem a depoziční hlavou se nachází zařízení nazývané virtual impactor (VI). Virtual impactor slouží k homogenizaci aerosolu z atomizéru. Z aerosolu se odstraní přebytečný plyn a velké kapky inkoustu, tím se dosáhne toho, že aerosol je pak za VI hustší a homogennější. Poté již aerosol pomocí proudu dusíku putuje do depoziční hlavy. Depoziční hlava je uspořádána tak, že další proud dusíku soustředí aerosol do velice tenkého paprsku. Zaostrění paprsku aerosolu dusíkem výrazně omezuje ucpávání trysky. Paprsek aerosolu je možné zaostrit až na vzdálenost 10 mm, je tedy možno vytvářet velice jemné motivy i na hrubé či 3D substráty. V blízkosti depoziční hlavy se nachází ještě jedno zařízení tzv. shutter (stavítko). Stavítko zastavuje v případě potřeby (např. tisk nespojitých motivů) tok aerosolu na substrát (bez přerušování generace aerosolu) a může ho odsávat do odpadní nádoby. [15–19]

Shrnutí

Ze všech popisovaných metod je aerosol jet printing jedna z nejpřesnějších současných metod tisku s minimálním rozlišením 10 μm a minimální tloušťkou tisknutelné vrstvy 10 μm . Díky svojí technologii je vhodný i pro tisk na zakřivené (3D) substráty a je ho možné využít pro tisk širokého spektra viskozit inkoustů. Jeho zásadní nevýhodou je cena celého systému, vhodný je spíše pro maloobjemovou výrobu či rapid prototyping. Ve výrobě se používá například pro tisk antén v mobilních telefonech. [18, 20]

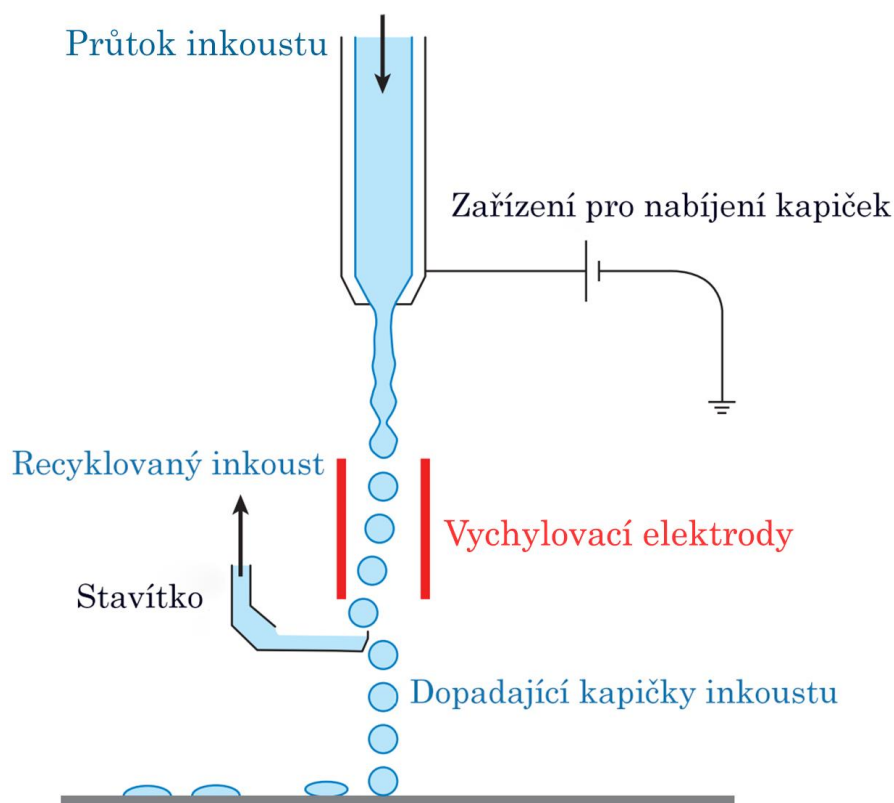
1.1.4 Inkjet

Technologie inkjet je bezkontaktní přímá tisková technologie. Princip technologie inkjet spočívá v řízeném nanášení inkoustu z tiskové hlavy přímo na substrát. Pomocí této technologie je možné snadno tisknout vodiče, polovodiče a dielektrika a to i na velkoplošné substráty. Je tedy možné vytvářet i elektronické součástky, jako například tištěné pasivní součástky či tištěné tranzistory. Pokud se použijí inkousty s nanočásticemi a dále popsanou metodu DOD, mohou se pomocí inkjet vytvořit i struktury s nanometrovými tloušťkami. [6, 16]

Existují dva hlavní způsoby vytváření tištěných motivů touto technologií. První způsob je kontinuální inkoustový tisk (CIJ) a druhý tisk drop on demand (DOD). Obě metody jsou bezkontaktní, ale liší se ve způsobu dávkování inkoustu. Volba uvedených způsobů tisku motivů se odvíjí od požadované přesnosti tisku. Kontinuální metoda tisku je vhodnější pro méně náročné aplikace bez méně jemných motivů, neboť tato metoda je limitována na tisk linií s šířkou okolo 100 μm . Metoda DOD je naopak vhodnější pro tisk jemných motivů, kde se šířka čar může pohybovat přibližně od 20 do 50 μm . [6, 8, 16, 21]

CIJ

Princip metody kontinuálního tisku spočívá v tisku nepřetržitého proudu inkoustu. Tisková hlava je v tomto případě uspořádána tak, že uvnitř se každá kapka inkoustu nabije na nenulový potenciál (viz Obr. 6). Na konci tiskové hlavy se nachází tryska, za níž následuje pár vychylovacích destiček, které na principu elektrostatického jevu směřují nabitě kapičky inkoustu s nenulovým potenciálem na požadovaná místa na substrátu. Systémy takového uspořádání dosahují poměrně vysokých rychlostí tisku, neboť kapky inkoustu jsou tisknuty na substrát rychlostí 10 m/s. Systém CIJ má podobně jako aerosol jet stavítka, které odsává inkoust do odpadní nádoby v případě, kdy je potřeba odstavit tok inkoustu. Hlavní nevýhodou metody je nemožnost zastavit nepřetržitý proud inkoustu v případě, kdy nechceme tisknout na místa, kde není vyžadován tisk. Tímto vzniká odpadní materiál, který však lze ve většině případů recyklovat a omezit tak finanční ztráty, protože při kontinuálním tisku se tryska tolik neucpává a materiál nemůže tak snadno zaschnout v trysce jako u DOD. [22, 23]

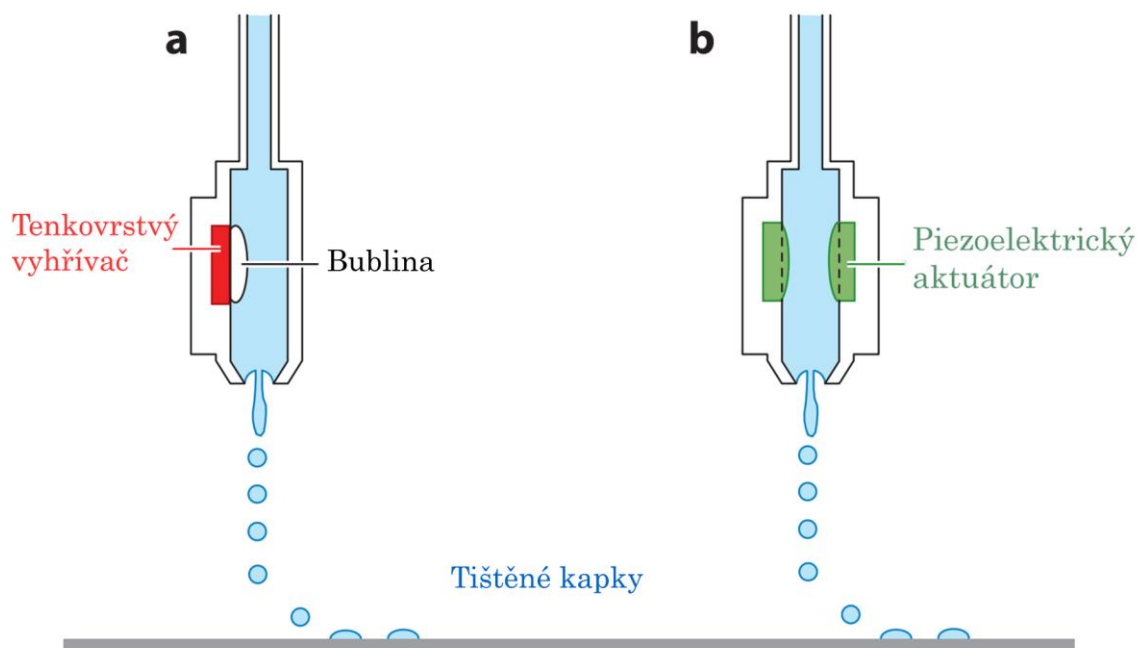


Obr. 6: Ukázka principu systému inkjet využívající metodu kontinuálního tisku (převzato a upraveno z [23])

DOD

Metoda DOD se odlišuje od CIJ tiskem kapiček inkoustu pouze, je-li vyžadován tisk. Použití této metody je tedy v porovnání s CIJ ekonomičtější. Uvnitř tiskové hlavy je aktuátor, který řídí množství kapek dopadajících na substrát (viz Obr. 7). V systémech DOD jsou kapičky generovány na akustických frekvencích (typicky 1-20 kHz). Aktuátory bývají piezoelektrické či tepelné. V případě tepelného aktuátoru je uvnitř komory vedoucí do trysky umístěn malý tenkovrstvý vyhřívač, který ohřeje kapalinu v jeho těsné blízkosti nad teplotu varu, čímž se vytvoří malá kapsička výparů (bublina). Náhlé vypnutí vyhřívače a přenos tepla vede k zhroucení bubliny. Náhlé vytváření a hroucení bublin vede k vytvoření požadovaného tlaku pro generování kapiček inkoustu. Piezoelektrický aktuátor využívá přímé mechanické dávkování kapiček inkoustu na základě piezoelektrického jevu. Při tisku inkoustu na požadovaná místa se tisková hlava posouvá nad substrátem a každá kapka dopadá balistickou trajektorií na místo na substrátu. Aktuátor po přijetí řídicího signálu generuje po různou dobu kapky inkoustu v závislosti na daném motivu a rozlišení tisku. Velikost kapek inkoustu se přibližně odvíjí od velikosti trysky. V určitém rozmezí lze však velikost kapek ovlivnit i ovládním tlaku, jakým je inkoust tlačěn ven z tiskové

hlavy. Metoda DOD umožňuje díky tisku menších částic inkoustu poměrně přesný tisk na požadovaná místa. Toho lze využít například i v grafice či tisku textu. [8, 22, 23]



Obr. 7: Ukázka principu systému inkjet využívající metodu řízeného dávkování inkoustu a) tepelný aktuátor b) piezoelektrický aktuátor (převzato a upraveno z [23])

Shrnutí

Podobně jako u aerosol jet se jedná o digitální metodu tisku, která využívá CAD systémy. Inkjet je v porovnání s ostatními technologiemi využívající přímý tisk ekonomicky nejvýhodnější způsob tisku. Navíc má tato technologie možnost nejrychlejšího tisku ze všech uváděných metod. Rozlišení tisku je jen o něco menší (20 až 100 μm) než u AJP. Jedním ze záporů této technologie je relativně malý rozsah tisknutelných viskozit, který se pohybuje přibližně od 1 do 50 $\text{mPa}\cdot\text{s}$. Dalším záporem může být možnost relativně snadného ucpání tiskové hlavy. To je způsobeno velice malým a pomalým průtokem inkoustu přes úzkou trysku a hlavně tím, že oproti aerosol jet je inkoust v kontaktu s tryskou. [11, 16, 22, 23]

1.2 Materiály pro výrobu tištěné elektroniky

Organické materiály

V poslední době se ukazuje jistý trend v oblasti využívání organických materiálů. Tyto materiály se díky svým jedinečným vlastnostem dají velmi dobře využít při výrobě tištěné elektroniky. Organické materiály mohou být použity jako izolanty ve formě plastů (polymery), avšak jejich uplatnění lze v oblasti tištěné elektroniky nalézt i ve formě odporových, polovodivých či vodivých materiálů. U těchto materiálů lze navíc chemicky modifikovat vodivé vlastnosti. Organické materiály můžeme dělit obecně na nízkomolekulární, oligomery a polymery. [24]

Popis

Nízkomolekulární materiály se vyznačují nižší molekulární hmotností, krátkými molekulárními řetězci a v jejich struktuře je zastoupeno menší množství uhlíkových atomů. Příkladem často využívaného materiálu může být „Pentacen.“ Polymery se vyznačují opačnými vlastnostmi, tedy vyšší molekulární hmotností, delšími molekulárními řetězci a vyšším obsahem uhlíkových atomů. Oligomery můžeme díky jejich vlastnostem zařadit někde mezi nízkomolekulárními a polymerními materiály. [25, 26]

Téměř ve všech elektronických zařízeních se lze setkat s plastovou izolací. Plastové materiály spolu s elastomery tvoří hlavní podskupinu materiálů nazývaných polymery. Polymery se díky svým vlastnostem využívají ve většině případů spíše jako dielektrika. Obecně můžeme polymery definovat jako materiály, jejichž molekulární struktura je složena z velkého počtu atomů. Nejčastěji jsou to atomy uhlíku, kyslíku a vodíku. Makromolekuly složené z velkého počtu atomů jsou mezi sebou chemicky vázány do dlouhých, pravidelně se opakujících řetězců. [26, 27]

Hlavními výhodami oproti často používaným izolantům jako například slída či keramika může být jejich snadná výroba, obrobitelnost a cena. Plastové materiály mohou mít i další přidanou funkci, protože např. plastová fólie (substrát) může být mechanicky flexibilní. Izolační vlastnosti je možné ovlivňovat změnou vlastností plnidel, ale i přesto mají horší dielektrické vlastnosti než výše zmíněné materiály. [27, 28]

Materiály s nevlastní vodivostí

Pokud je do polymerních materiálů přidáno plnidlo ve formě elektricky vodivých materiálů, výrazně se zlepši jejich elektrické vlastnosti (vodivost). Pro tyto účely se jako plnivo používají nejčastěji materiály na bázi uhlíku. Příkladem mohou být uhlíková vlákna, saze nebo grafit. Jako plnivo je možné dle požadavků na parametry materiálu použít i kovy. Do kompozitních materiálů jsou potom přidávány kovová plnidla ve formě prášků s kovovými nanočásticemi (anorganické vodivé látky). Z hlediska elektrické vodivosti se tedy polymery s takto zajištěnou vodivostí označují jako materiály s nevlastní vodivostí (kompozitní organické vodivé materiály). [26, 27, 29]

Materiály s vlastní vodivostí

Vedle kompozitních vodivých polymerů tedy existují ještě tzv. konjugované vodivé polymery (s vlastní vodivostí). Vodivost je u nich zajištěna pravidelným střídáním jednoduché a dvojně chemické vazby (případně trojně). Pravidelné střídání jednoduché a dvojně vazby v molekulární struktuře (konjugace), může vykazovat vysokou elektrickou vodivost srovnatelnou s kovovými vodiči. Polymery jsou přesto v čistém stavu spíše izolanty či polovodiče. [26–28]

Elektrické vodiče z nich vznikají až dopováním chemickými sloučeninami, které polymeru elektrony odebírají nebo naopak dodávají. Proces dopování si je možno představit analogicky k dopování u konvenčních anorganických polovodičů. U anorganických polovodičů jsou k dopování používána stopová množství dopujících látek, kdežto u organických látek (a organických polovodičů) jsou k dopování používány vyšší koncentrace dopantů v rozmezí pohybujících se v jednotkách až desítkách procent. [26, 27, 29]

Dopování

Příkladem dopujících sloučenin mohou být alkalické kovy či halogeny. Dopování může být elektrochemické či chemické. V případě chemického dopování je redukční dopování typu n a oxidační dopování typu p. Elektrochemické dopování je prováděno rozdílem potenciálů mezi pracovní a referenční elektrodou, přičemž elektrody jsou

umístěny spolu s polymerem v elektrolytu, ve kterém je polymer nerozpustný. Rozdíl potenciálu mezi elektrodami způsobuje vstup nábojů a odpovídajících iontů do polymerů ve formě odebírání elektronů (p-dopování) či přidání elektronu (n-dopování). Fyzický transport iontů sebou však nese i negativní vlastnosti ve formě pomalejších dynamických vlastností v pozdějších elektronických aplikacích. [24, 26, 27]

Pro vznik vodivosti je nutná přítomnost pohyblivého nosiče náboje, který se pohybuje po konjugovaném řetězci. V takovémto řetězci se elektrony začínají delokalizovat a povaha vazeb se začne střídavě měnit z jednoduchých na dvojné. Pohyblivé nosiče se tedy dostávají do makromolekuly pomocí dopování. Přidáním dopantů se výrazně zvýší rychlost pohybu nosičů elektrického náboje po konjugovaném řetězci. [28, 29]

1.2.1 Příklady materiálů

Materiály používané pro výrobu tištěné elektroniky mohou být vyráběny v různých formách, např. inkousty či pasty. Mohou to být vodivé materiály, dielektrika, polovodiče či speciální funkční materiály jako např. magnetický inkoust, piezoelektrický inkoust apod. Jako pasty se využívají polymerní materiály s kratšími řetězci a vodivě částice tvořící vodivá plniva bývají větší než u inkoustů. Inkousty mají oproti pastám nižší viskozitu a materiály mohou mít vlastní či nevlastní vodivost. Materiály s nevlastní vodivostí obsahují oproti pastám menší částice a rozpouštědla. U materiálů s vlastní vodivostí jsou pomocí dopování modifikovány jejich elektrické vodivosti a pro svou vodivost nevyžadují plniva ve formě vodivých částic anorganických materiálů.

Pasty

Pasty jsou v elektronice používané pro tisk vodivých, odporových, dielektrických či speciálních funkčních vrstev. Je možné je rozdělit na 2 hlavní skupiny, a to podle způsobu jejich vytvrzování. Do první skupiny patří pasty, které mohou být sušené či tvrzené teplem. Tyto pasty obsahují různé typy pryskyřic jako bisfenol-A epoxid, epoxodové novolakové, fenolické polyesterové apod. Druhou skupinou jsou pasty obsahující UV tvrditelné pryskyřice. To jsou například estery kyseliny akrylové a metakrylové. Pryskyřice mimo jiné slouží jako pojivová složka pasty. [10]

Pasty se obvykle skládají ze tří základních složek. První z nich může být funkční složka, která charakterizuje základní charakter pasty z hlediska elektrické vodivosti. U vodivých past jsou to sféricky tvarované částice kovů, které jsou odlévány ve vakuu. Často používané materiály jsou např. měď, cín, stříbro či zlato. U odporových past se jako funkční složka používají vodivé a polovodivé oxidy a různé kovové sloučeniny. Funkční složka u dielektrických past využívá feroelektrika nebo rekrystalující skla. Další složkou pasty může být složka tavivová, ta využívá nízkotavná skla a slouží k vytvoření vazby mezi substrátem a přidaným materiálem. Dále může být v pastě pojivová složka, ta slouží zejména k zajištění požadované viskozity a využívá organické materiály. Pasty však mohou obsahovat mnoho dalších složek (pigmenty, rozpouštědla, plniva apod.). Pro dosažení požadovaných vlastností pasty se do past často přidávají rozpouštědla, neboť pryskyřice v pastě jsou často pevné nebo vysoce viskózní materiály. [10, 30]

Tab. 2: Ukázka parametrů komerčně dodávané pasty se stříbrnými nanočásticemi s označ. 735825 od společnosti SIGMA-ALDRICH [31]

Koncentrace (objemová)	velikost částic	teplota vytvrzení	rezistivita	viskozita	hustota
≥75%	200 nm (80%), <5 nm (20%)	120-150 °C/ 30-60 min	(1-3)·10 ⁻⁵ Ω·cm	100 - 300 Pa·s	10,49 g/cm ³

Inkousty

Inkousty se v elektronice vyskytují v široké škále viskozit a lze jimi tisknout vodivé, odporové, dielektrické či speciální vrstvy. Dle různých kritérií je lze dělit na kovové a nekovové, dále na vodivé a nevodivé, případně organické a anorganické. Velikost částic, které obvykle inkousty obsahují, se pohybuje v přibližném rozmezí 10-500 nm [32, 33]. Zastoupení pevných částic v inkoustu udává tzv. hmotnostní procento (hm. %), které vyjadřuje hmotnostní podíl pevných částic a rozpouštědla. Rozpouštědla slouží k modifikaci viskozity a ostatních vlastností inkoustu. [33, 34]

Vodivé

Kovové inkousty

Používají se kovové inkousty, které podobně jako u vodivých past využívají nanočástice z materiálů jako měď, stříbro, zlato, platina, apod. Kovové inkousty obsahují malé vodivé částčky kovů a využívají se zejména pro tisk vodivých cest plošných spojů, či tisk kontaktů součástek. [33]

Nekovové vodivé inkousty

Nekovové vodivé inkousty využívají uhlíkové nanotrubičky s jednou stěnou (SWCNTs), víceštěnné uhlíkové trubičky (MWCNTs) či vodivé polymery (PEDOT:PSS) [33, 34].

Odporové inkousty

Odporové inkousty obsahují zpravidla jako hlavní složku uhlík nebo jeho kombinace s ostatními materiály (ruthenium, různé oxidy apod.). Jako odporové inkousty lze však využít i organické materiály, u nichž lze snadno modifikovat vodivost (PEDOT:PSS). Odporové inkousty slouží tedy zejména pro tisk pasivních součástek jako rezistory nebo tisk odporových cest. [33, 34]

Polovodivé

Polovodičové inkousty

Polovodičové inkousty využívají organické materiály, neboť modifikací jejich vlastností se elektricky chovají jako polovodiče. Nebo lze použít materiály na bázi jedностěnných uhlíkových nanotrubiček (SWCNTs). [33, 34]

Dielektrické inkousty

Dielektrické inkousty využívají organické či polymerní materiály. Izolační vlastnosti polymerních inkoustů se odvíjejí od jejich struktury či použitých plnidel. Často jsou používány polymery se zesíťovanou vazbou (PVP). [35, 36]

Tab. 3: Ukázka parametrů komerčně dodávaného vodivého inkoustu se stříbrnými nanočásticemi s označ. 796042 od společnosti SIGMA-ALDRICH [37]

Koncentrace (hmotnostní procenta)	velikost částic (distribuce velikosti částic)	rezistivita	viskozita
50 hm. %	115 nm (d90)	$\leq 20 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ (po vytvrzení teplotou 200°C; 2h)	24 mPa·s
	70 nm (d50)	$\leq 7 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ (po vytvrzení teplotou 240°C; 4h)	

PEDOT

PEDOT je jeden z nepoužívanějších organických vodivých materiálů, který je komerčně dostupný a má dostatečně vyvážené vlastnosti pro praktické využití. Tento organický materiál je možné dopovat různými sloučeninami, mezi nejznámější patří PEDOT:PSS. Jedná se o dopovaný derivát polythiophenu (poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)) (PEDOT:PSS). Tento polymer je vodivý a snadno vodou ředitelný. Mezi jeho vynikající vlastnosti lze zahrnout to, že je vysoce vodivý, stabilní v p-dotované formě, má dobré filmotvorné vlastnosti a v dopovaném stavu je opticky velice transparentní. Na vzduchu poměrně rychle oxiduje, čímž degradují jeho vlastnosti včetně jeho vodivosti. PEDOT se obvykle vyrábí v dotovaném stavu ve formě fólií, protože je velmi obtížné produkovat jeho dobré filmotvorné vlastnosti. PEDOT:PSS vznikne na základě chemické polymerace s polyelektrolytem, jímž je kyselina polystyrensulfonyl (PSS). Tato polymerní směs má potom velice stabilní vlastnosti. Vodivé vlastnosti PEDOT:PSS lze modifikovat obsahem PSS v polymerní směsi. Platí, že zvyšováním obsahu PSS v polymeru dochází k omezování elektrické vodivosti. V kapalně formě může být snadno aplikován pro vytvoření tenkých, opticky transparentních, vodivých vrstev např. pro flexibilní elektrody či jiné elektronické aplikace. V oblasti tištěné elektroniky je PEDOT:PSS často využívaným materiálem. Patří mezi nejúspěšnější vodivé polymery a můžeme se s ním setkat například pod názvem BAYTRON®. [25, 38–40]

2 Popis tištěných součástek

Tato kapitola se zabývá samotnými tištěnými pasivními součástkami. Zaměřuje se na jejich popis, ale také na způsoby a řešení použitelná při jejich výrobě. Pasivní součástky je možné realizovat téměř jakoukoliv z metod používaných v oblasti tištěné elektroniky a zmíněných v předchozí kapitole. V současné elektronice jsou z důvodu integrace často používané součástky vyrobené technologií SMT. V jistých aplikacích mohou tištěné součástky konvenčním technologiím konkurovat a přinášet nová řešení, která konvenční technika není schopna realizovat. Integrace tištěných součástek nemusí být v porovnání s SMT natolik náročná. Elektronické součástky lze natisknout přímo na substrát, zatímco SMD součástky se musí osazovat na desku plošných spojů. [3, 6]

Současná tištěná elektronika směřuje k nenáročným aplikacím. Příkladem mohou být tzv. „wearables“ neboli nositelná elektronika či využití tištěné elektroniky v kombinaci s propojením IoT (Internet of Things). Vytisknout lze například i celou řadu senzorů či chytrých štítků (viz Obr. 8) určených taktéž pro nenáročné aplikace. [1]

V souladu s potřebami elektrických obvodů je vyžadována schopnost vyrobit součástky se specifickými funkčními vlastnostmi vhodnými pro daný obvod a patřičnou funkci. Zde však tištěná elektronika v porovnání s konvenční elektronikou nedosahuje takové přesnosti a spolehlivosti. [1, 22]

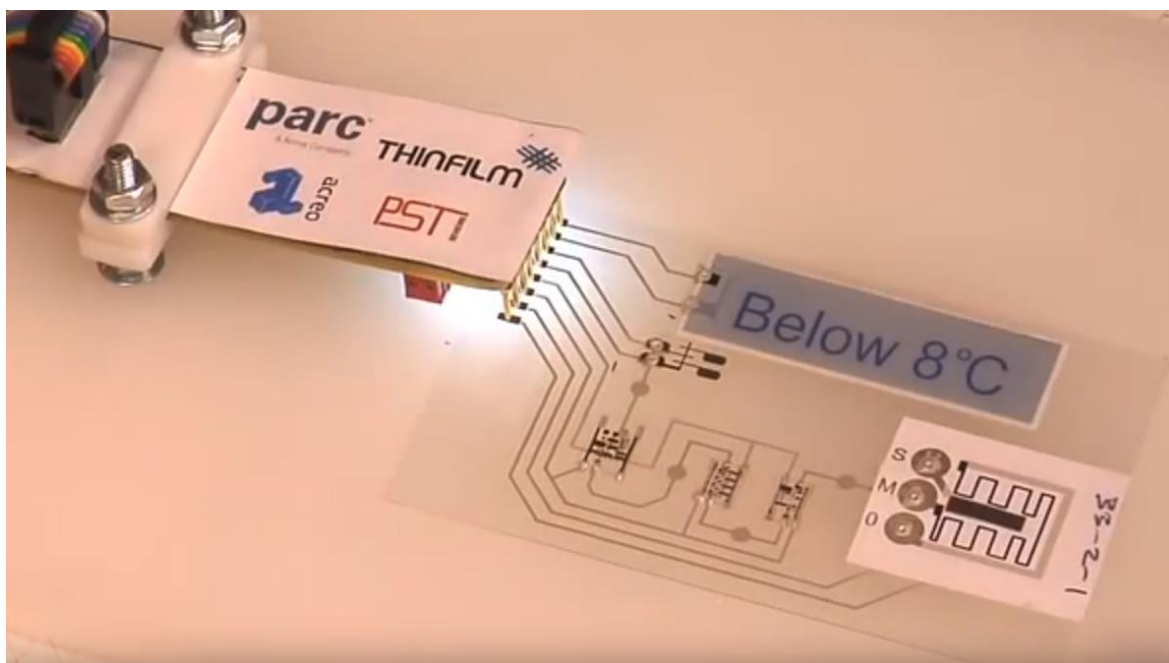
Výroba těchto součástek pomocí tiskových metod je možná jen díky existenci materiálů s širokou škálou funkčních vlastností. Je možné například modifikovat dielektrické vlastnosti či elektrickou vodivost daných materiálů. K vývoji může také přispět hlavně chemický vývoj a procesní inženýrství, díky kterým se dají upravit některé již existující materiály pro dosažení požadovaných vlastností součástek. [22]

Dosavadní vývoj v oblasti tištěných pasivních součástek se zaměřoval na zlepšení výkonu na jednotku plochy. Tohoto cíle lze dosáhnout třemi způsoby:

a) pomocí nových tiskových technologií s vyšším rozlišením tisku, vyšší opakovatelností a schopností tisku tenkých rovnoměrných vrstev

b) použitím nových inkoustů s přenosem vyšších výkonů a větší stabilitou

c) za pomoci nových výrobních procesů a taktéž za pomoci existujících technologií a inkoustů. Tento způsob může využít i podobající se poznatky z vývoje tradičních pasivních součástek. Například lze strukturu součástek vytvořit jako vícevrstvou a zlepšit tak výkon na jednotku plochy. Tím je možné upravit vlastnosti pasivních součástek v souladu s nároky na výrobu daného obvodu. [7]



Obr. 8: Ukázka z prezentace smart tagu pro měření teploty a vlhkosti (převzato z [41])

2.1 Odpor

Odpor (rezistor) patří mezi základní pasivní součástky a tvoří základ téměř každého elektronického zařízení. V elektrickém obvodu se ideálně projevuje jeho jediná vlastnost a parametr – elektrický odpor. V zapojení slouží obvykle ke snížení elektrického proudu či získání určitého úbytku napětí [42]. Konvenčně vyráběné rezistory určené k povrchové montáži na desky plošných spojů jsou vyráběné technologiemi THT a SMT. Velikosti těchto konvenčně používaných rezistorů jsou vyráběny v širokém rozsahu (jednotky $m\Omega$ až stovky $G\Omega$) [43]. V praxi by bylo nemožné vyrábět všechny hodnoty tohoto rozsahu, a proto se rezistory běžně vyrábějí s určitou tolerancí a využívá se tzv. řady vyvolených čísel. V současné konvenční elektronice je nejpoužívanější řada E24 (viz Tab. 4), která má toleranci 5%. Tištěné rezistory lze taktéž vyrobit v široké škále hodnot a to díky dostupným technologiím a materiálům [7].

Tab. 4: Řada E24 (5%)

1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

Návrh

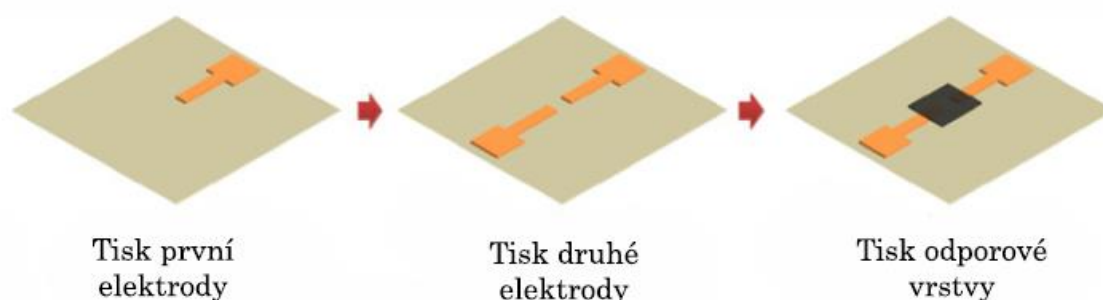
V současném světě tištěné elektroniky existuje celá řada výzkumných projektů zabývajících se aktivními součástkami (např. organické tranzistory a organické diody), avšak pasivní součástky jsou i přes jejich nezbytnost často opomíjeny a proto neexistuje tolik veřejně dostupných výzkumů (publikací), které by se jimi zabývaly. Tato část práce se tedy bude zaměřovat na návrh a konstrukci součástek hlavně na základě těchto dostupných zdrojů [7, 38, 44–46]. Na základě konkrétních výzkumných projektů bude popisován rezistor vyrobený s pomocí organického materiálu PEDOT:PSS.

Návrh tištěného odporu se podobně jako u tradičně vyráběných rezistorů skládá z geometrického návrhu aktivní odporové plochy (délka vrstvy, její šířka a tloušťka) [7]. Rezistor si tedy lze v tištěné elektronice představit jako velice tenkou tištěnou vrstvu odporového materiálu s různým geometrickým uspořádáním. Dalším důležitým aspektem návrhu je výběr vhodného materiálu, který bude zprostředkovávat stabilní vrstvu s danou vodivostí. Dle [7], [38] a [44] byl díky svým vlastnostem použit organický materiál

PEDOT: PSS. To bylo dáno díky tomu, že má především dobré vodivé vlastnosti a na vzduchu se jeho vlastnosti nemění ani při dlouhodobě zvýšených teplotách [44]. Tento organický materiál je komerčně dostupný a jeho vodivé vlastnosti lze modifikovat dle požadavků. Tento materiál je pro aplikaci daleko vhodnější než např. anorganické kovové inkousty, neboť je dodáván ve formě snadno aplikovatelného roztoku a díky jeho snadné modifikovatelnosti může mít daleko větší odpor než ostatní anorganické materiály [45].

Výroba

Pro výrobu tištěných rezistorů je potřeba vytisknout dvě samostatné vrstvy [45]. První vrstva slouží jako kontaktní elektrody, pro tento účel se pro svoje výborné vodivé vlastnosti často používá například inkoust na bázi stříbrných nanočástic (např. viz [7], [46] a další). Druhou vrstvou je aktivní odporový materiál s požadovanou vodivostí (PEDOT:PSS). Postup tisku lze vidět na Obr. 9.

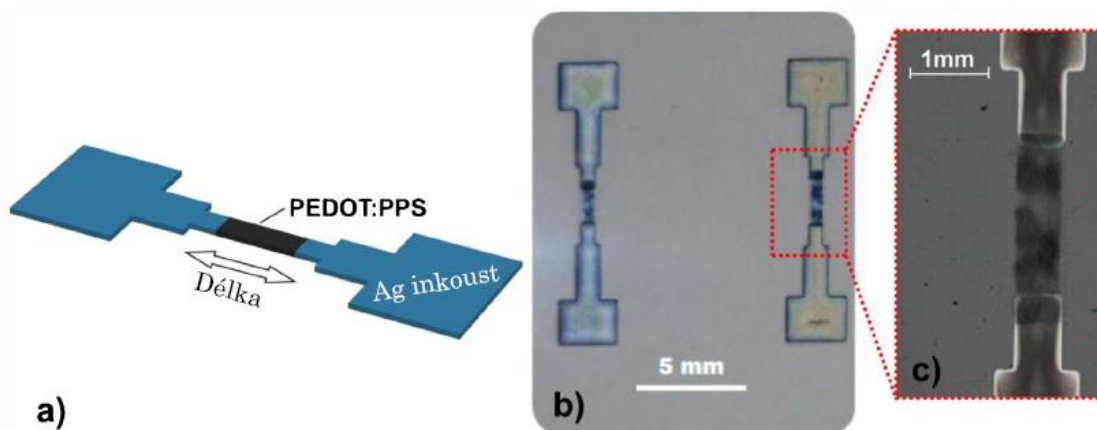


Obr. 9: Postup konstrukce tištěného odporu (převzato a upraveno z [45])

Nejprve se tedy natisknou elektrody, v tomto případě ze stříbra. Vzdálenost mezi elektrodami významným způsobem ovlivňuje výslednou velikost odporu rezistoru. Některé výzkumné projekty pracují s návrhem, který využívá např. jen dvě různé vzdálenosti mezi elektrodami [44, 45]. Zároveň podle [44] a [45] je třeba uvažovat i fakt, že kratší vzdálenost mezi elektrodami vede na menší vliv tloušťky odporové vrstvy na výsledný odpor.

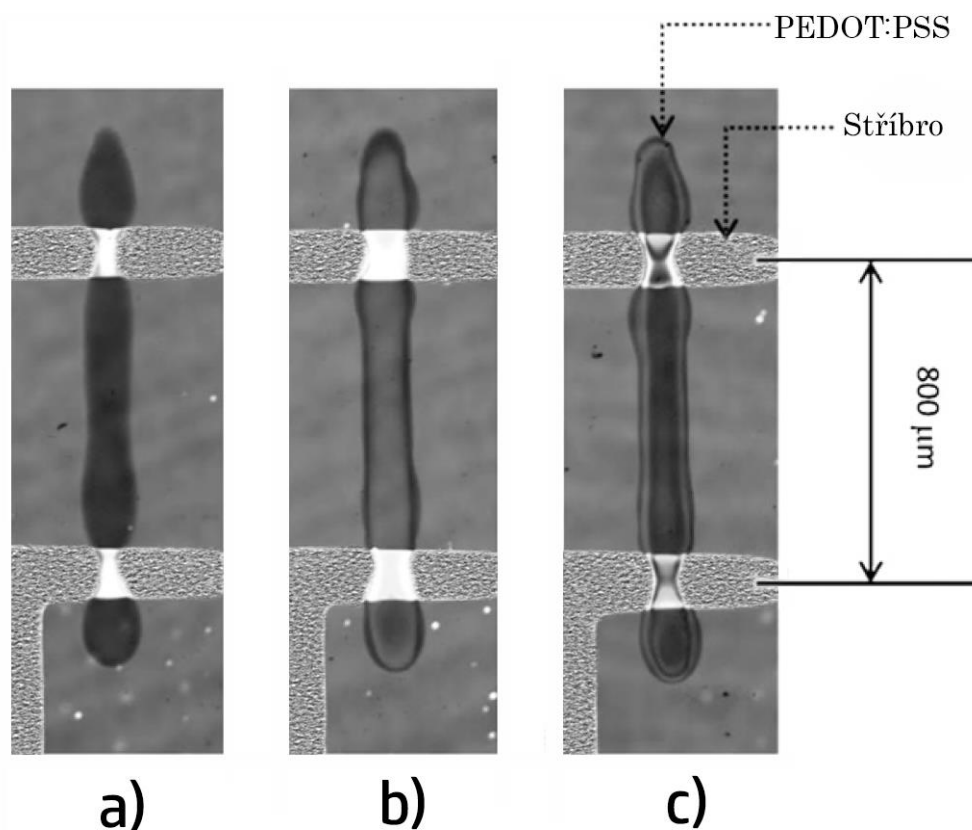
Šířka aktivní odporové vrstvy byla podle [7, 44, 45] zachována u všech natisknutých vzorků. Vezmeme-li tedy v úvahu, že rezistory budeme konstruovat tak, že délka a šířka odporové vrstvy bude stejná, velikost výsledného odporu bude možné ovlivňovat jen šířkou natištěné

odporové vrstvy a modifikací vodivých vlastností této vrstvy. Takového přístupu se využívá například při výrobě SMD součástek [7].



Obr. 10: Schématické znázornění struktury nezbytné pro vytvoření tištěného rezistoru a), ukázka dvou vytištěných rezistorů s různými délkami b), optický snímek stříbrné elektrody a aktivní odporové vrstvy (převzato a upraveno z [7])

Proces samotné výroby tištěného rezistoru většinou probíhá tiskem jedné či více odporových vrstev na substrát, kde jsou tyto vrstvy propojeny s elektrodami (viz Obr. 10 a Obr. 11). Množství vrstev samozřejmě ovlivňuje určitým způsobem výsledný odpor součástky. Tisk více vrstev na sebe vede ke snížení výsledného odporu. Daleko větší změny odporu lze provést změnou vodivosti. Příkladem může být právě organický materiál PEDOT:PSS, který byl již popsán v části práce zabývající se materiály. Elektrická vodivost tohoto materiálu závisí na obsahu složky PSS v komplexním polymerním řetězci. Vodivost se pak může pohybovat od $10^5 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro poměr PEDOT/PSS 1:20 až do $1 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro poměr 1:2,5 [38]. Z toho plyne, že zvýšení obsahu složky PSS vede k snížení elektrické vodivosti. Dalším způsobem jak ovlivnit vodivost PEDOT:PSS může být přidání dimethylsulfoxidu (DMSO), který je znám pro zvyšování vodivosti [44]. Pro zvýšení vodivosti je možné použít také např. ethylenglykol [45]. Tyto přídatné roztoky bývají dávkovány v jednotkách ml či jako několik procent celkového objemu roztoku. Proces vysychání, vytvrzování, spékání apod. se u materiálů může výrazně lišit. Výzkumné projekty ukazují, že teploty při těchto procesech se pohybují v rozmezí od $100 \text{ }^\circ\text{C}$ do $200 \text{ }^\circ\text{C}$, což ukazuje, že je možné použít běžně používané polyimidy (např. PET, PEN).



Obr. 11: Typický obrazec tištěného rezistoru z PEDOT:PSS s různým množstvím vrstev mezi stříbrnými elektrodami: a) jedna vrstva, b) dvě vrstvy a c) tři vrstvy (převzato a upraveno z [44])

Vlastnosti

Dle výzkumných projektů lze tištěné rezistory běžně vyrábět přibližně v rozmezí od 10Ω do $100 \text{ M}\Omega$, pokud bude použit jen jeden materiál aktivní odporové vrstvy a hodnoty odporů se budou měnit jen změnou geometrických rozměrů či tiskem více odporových vrstev přes sebe [7, 44, 45]. Tolerance těchto vyrobených rezistorů je $<5\%$ [7]. Podle [44] lze ředěním roztoku PEDOT:PSS dosáhnout postupně až hodnotám odporů přesahující $1 \text{ G}\Omega$. Takto vyrobené rezistory je možné využít v celé řadě aplikací, neboť rezistory jsou nezbytné téměř ve všech elektronických aplikacích. Příkladem využití může být nepřepisovatelná paměť („read only memory“) skládající se z pole natištěných rezistorů [44]. Rezistory lze tisknout téměř všemi tiskovými technologiemi, záleží však na rozsahu viskozit, které je daná technologie schopna tisknout. Tištěné rezistory mohou být v porovnání s konvenčně používanými rezistory daleko levnější a spolehlivější, avšak při poruše se nedají nijak vyjmout a nahradit.

2.2 Kondenzátor

Kondenzátor (kapacitor) patří mezi základní pasivní součástky a tvoří základ téměř každého elektronického zařízení. V elektrickém obvodu se ideálně projevuje jeho jediná vlastnost a parametr – kapacita. Kapacitu lze charakterizovat jako schopnost akumulovat elektrický náboj. Ideální kondenzátor vykazuje stálou kapacitu nezávislou na okolních podmínkách, skutečná součástka však vykazuje parazitní vlastnosti, které se projevují hlavně jako parazitní odpor a parazitní indukčnost. Samotná součástka se obvykle skládá ze dvou vodivých desek (elektrod), které jsou odděleny dielektrikem. Dielektrikum lze zjednodušeně popsat jako izolant, který má schopnost polarizace. Podle druhu dielektrika se konvenční kondenzátory dělí na vzduchové, vakuové, svitkové (plastové, papírové), keramické, slídové, elektrolytické apod. Konvenčně vyráběné kondenzátory, které jsou určené k povrchové montáži na desky plošných spojů, jsou vyráběné technologiemi THT a SMT. Velikosti běžně používaných kondenzátorů se pohybují v rozsahu jednotkách pF až do jednoho mF [43]. Ve většině elektronických zařízení se lze setkat s keramickými kondenzátory s kapacitami okolo 100 nF [43]. Hodnoty kapacity se vyrábí podle řady tzv. vyvolených čísel. Obvykle se používá řada E6, případně E12. Přesnost kapacit bývá malá (běžně \pm destíky %), a proto se vyšší řady nepoužívají. [46]

Tab. 5: Řada E12 (10%)

1,0	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8	8,2
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

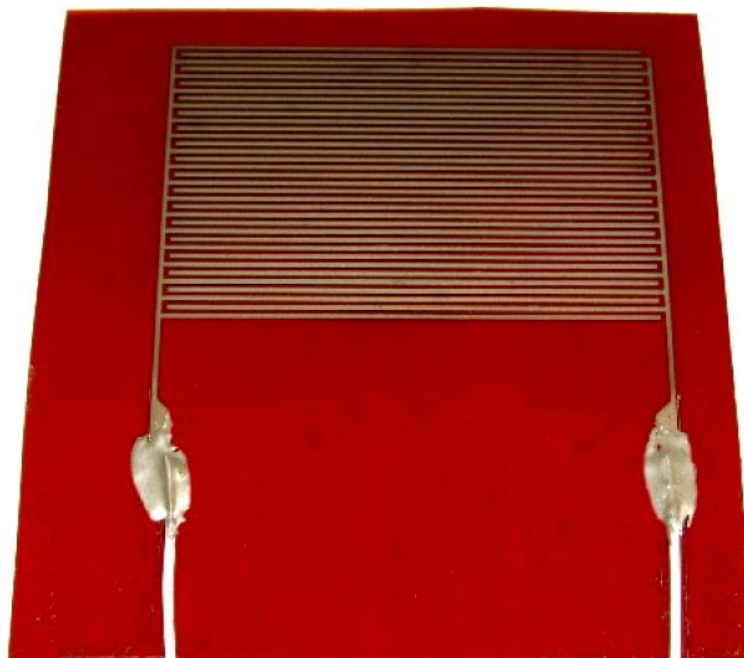
Návrh

Jak již bylo zmíněno u popisu odporu, veřejných zdrojů či publikací zabývajících se tištěnými pasivními součástkami není oproti popisu tištěných aktivních součástek takové množství. Nicméně v případě kondenzátoru lze najít určité množství publikací, neboť kondenzátory lze využít v celé řadě praktických aplikací (konstrukce zesilovače, rezonanční obvod, paměť, filtr, chemický senzor apod.). Návrh a konstrukce tištěných součástek tedy bude čerpat hlavně na základě těchto dostupných zdrojů [7, 35, 45–48]. Na základě konkrétních výzkumných projektů bude popisován kondenzátor se stříbrnými elektrodami a dielektrikem z PVP (poly(4-vinylphenol)).

Podobně jako u konvenčně vyráběných součástek se návrh tištěného kondenzátoru skládá z geometrického návrhu aktivní plochy elektrod (velikost plochy, vzdálenost mezi elektrodami). Tištěný kondenzátor lze navrhnout za pomoci dvou následujících přístupů.

Interdigitální topologie

V současné době se nejvíce využívá interdigitální kondenzátor, což je v podstatě planárně natištěná součástka [7]. Interdigitální kondenzátor se skládá ze dvou vodivých elektrod natištěných v jedné rovině (viz Obr. 12). Elektrody mají obvykle tvar dvou do sebe zapadajících hřebenů [21]. Mezera mezi prsty je vyplněna dielektrikem. Tento přístup však vykazuje malou kapacitu na jednotku plochy a při jeho výrobě je u něj obtížné dodržet minimální vzdálenost mezi prsty bez vzniku zkratu [7]. V porovnání s klasickým návrhem kondenzátoru, kde jsou jednotlivé vrstvy tištěny paralelně na sebe, je u interdigitálního řešení dielektrikum „otevřené“ okolní atmosféře [49]. Tohoto řešení se ale spíše využívá zejména v kapacitních senzorech.



Obr. 12: Interdigitální kapacitor natištěný na flexibilní polyamidové fólii (převzato z [50])

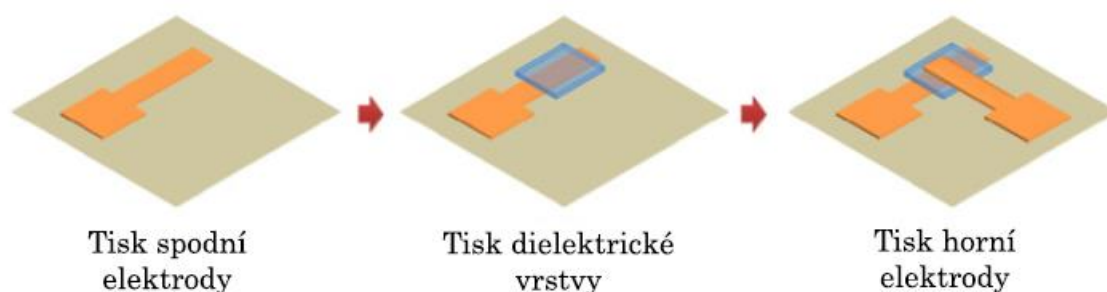
Klasická topologie

Tento návrh využívá podobný návrh jako konvenčně využívané SMD součástky [7]. Tištěná součástka se skládá ze tří na sobě natištěných vrstev (plochy dvou vodivých

elektrod navzájem oddělené dielektrikem). Návrh parametrů kondenzátoru tedy vychází z klasického geometrického návrhu ploch elektrod, tloušťky dielektrika a jeho elektrických vlastností. Tloušťka dielektrika a jeho vlastnosti dominantním způsobem ovlivňují výslednou kapacitu součástky [45, 47]. Na dielektrické materiály jsou kladeny podmínky zejména z hlediska elektrické pevnosti, relativní permitivity a dlouhodobé stability [51]. Dle [7], [46] a [51] se jako dielektrické materiály používají různě modifikované polymery se zesíťovanou vazbou (tzv. „cross linked“), příkladem může být PVP [35, 45]. Při tisku elektrod mohou být použity různé anorganické inkousty (viz např. [7, 45, 47]) nebo mohou být dle [52] použity i organické materiály např. PEDOT.

Výroba

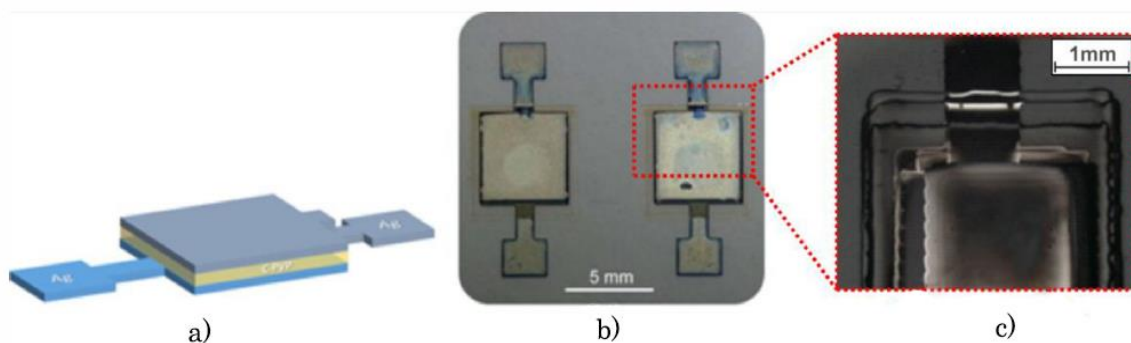
Pro výrobu tištěných kondenzátorů je potřeba natisknout minimálně tři samostatné vrstvy [7] (viz Obr. 16). Tato část práce se bude zaměřovat na výrobu součástky na základě klasické topologie. Dvě vrstvy slouží jako elektrody a tvoří vodivé desky kondenzátoru. Tyto dvě vrstvy jsou paralelně na sobě a mezi nimi je dielektrikum s požadovanými elektrickými vlastnostmi. Postup výroby lze vidět na Obr. 13.



Obr. 13: Postup konstrukce tištěného kapacitoru (převzato a upraveno z [45])

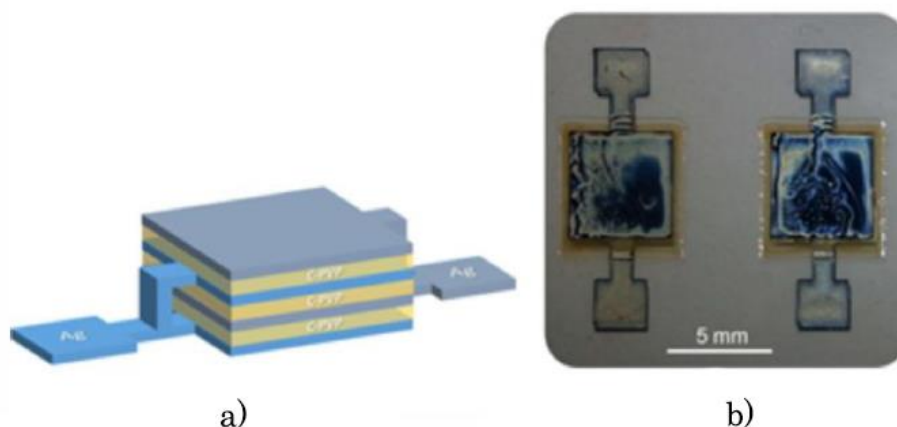
Kapacita výsledné součástky je přímo úměrná velikosti elektrod. Na tisk elektrod se díky svým výborným vodivým vlastnostem často používá inkoust na bázi stříbrných nanočástic (viz např. [7, 45, 46] apod.). Podle [7] či [45] byly pro elektrody zvoleny dvě různé plochy. Nejprve se tedy natiskne na substrát spodní elektroda, která funguje jako jedna z desek kondenzátoru. Jednotlivé vrstvy jsou vždy před tiskem následující vrstvy vytvrzeny, protože jinak by se do sebe vrstvy mohly absorbovat a vytvořily by rovinnou homogenní plochu [35, 46]. Poté následuje tisk dielektrické vrstvy a horní elektrody, která také funguje jako jedna z desek kondenzátoru. Při použití takovéto konstrukce bude

výslednou kapacitu přímo ovlivňovat hodnota elektrické permitivity dielektrika a nepřímo ovlivňovat vzdálenost mezi elektrodami (resp. tloušťka dielektrika). Pro co nejvyšší kapacitu tedy budeme vyžadovat materiál s co nejlepší elektrickou permitivitou či elektrodami v co nejtěsnější blízkosti.



Obr. 14: Schématické znázornění struktury nezbytné pro vytvoření tištěného kondenzátoru a), ukázka dvou vytištěných součástek b), optický snímek natištěné struktury (převzato z [7])

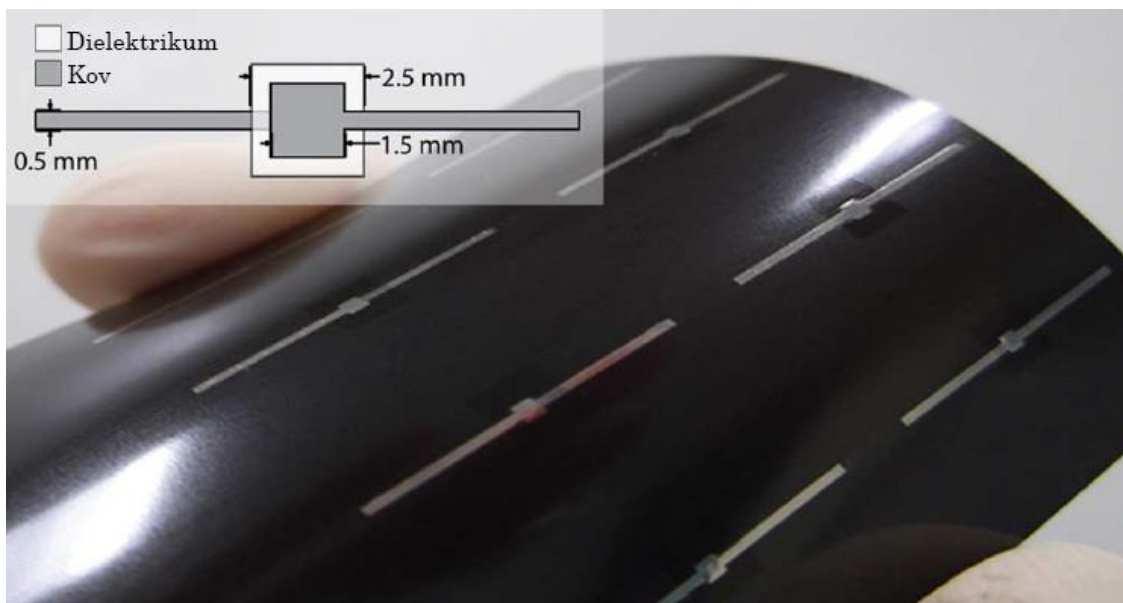
Proces samotné výroby tedy spočívá v tisku vrstev s různými elektrickými vlastnostmi (viz Obr. 14). Tloušťku dielektrika je možné ovlivňovat tiskem jedné či více dielektrických vrstev, přičemž více vrstev na sebe vede ke snížení výsledné kapacity [46]. Dle [45, 47, 52] lze zlepšit dielektrické vlastnosti PVP jeho kombinací např. s BaTiO_3 . Podle [45] se při použití této kombinace materiálů v porovnání se samotným PVP výsledná kapacita téměř zdvojnásobila.



Obr. 15: Schématické znázornění několikavrstvého tištěného kondenzátoru a), ukázka dvou vytištěných součástek (převzato z [7])

Jak ukazuje [7], kondenzátor lze realizovat i jako více než třívrstvou strukturu. Vícevrstvá struktura umožňuje zvýšit natištěnou kapacitu na velikost plochy. Natisknout

tak lze například sedmivrstvou součástku viz Obr. 15. Tisk více vrstev na sebe s sebou však nese i negativa ve formě možných parazitních vlastností výsledné součástky nebo obtížné dodržení rovinných ploch jednotlivých vrstev.



Obr. 16: Ukázka řady natištěných kondenzátorů na flexibilním polyimidovém substrátu (převzato a upraveno z [36])

Vlastnosti

Dle [46, 52] lze vyrábět tištěné kondenzátory s kapacitami jednotek nF/cm^2 respektive v rozumné míře lze navrhnout a vyrobit požadovaný kondenzátor o kapacitě desítek pF [35, 50]. Vícevrstvé řešení ukazuje, že výroba takového součástky je možným řešením, jak zvýšit kapacitu na jednotku plochy, avšak zvyšující se počet vrstev vede ke snížení homogenity vrstev a následnému snížení kapacity [7]. Kvalita tištěných kondenzátorů je v porovnání s konvenčními poměrně nízká [35, 48]. Tento nedostatek však může překonat budoucí vývoj lepších dielektrických materiálů. V současné době jsou tištěné kondenzátory v oblasti tištěné elektroniky využívány například ve spojení s rezistory a cívkami pro vytvoření rezonančního obvodu v RFID zařízení (viz [47, 53]) nebo mohou být zabudovány v nositelné elektronice [52].

2.3 Cívka

Cívka (induktor) patří mezi základní pasivní součástky a tvoří základ téměř každého elektronického zařízení. V elektrickém obvodu se ideálně projevuje její jediná vlastnost a parametr – indukčnost. Indukčnost lze charakterizovat jako schopnost akumulovat magnetickou energii podle proudu, který jí protéká [45]. Ideální cívka vykazuje stálou indukčnost, která není závislá na okolních podmínkách, avšak u skutečné součástky se projevují parazitní vlastnosti ve formě zejména parazitní indukčnosti či parazitní kapacity. Obecně si lze cívku představit jako vodič navinutý na nosnou izolační kostru. Kostra přitom nemusí splňovat pouze nosnou úlohu, v případě že je vyrobena z feromagnetického materiálu slouží potom k zesílení magnetického pole cívky a tím i indukčnosti cívky. Důležitým parametrem cívky je její počet závitů. Cívky můžeme rozdělit podle kostry na cívky s jádrem a bez jádra (vzduchové cívky). Dále je rozlišujeme podle tvaru rozměrů např. na solenoid či toroid a podle frekvence, na kterou jsou určeny na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. Cívku můžeme realizovat jako samostatnou součástku (např. elektromagnet, tlumivka apod.) nebo může být využita jako součást složeného zařízení (relé, transformátor, reproduktor apod.). Konvenčně využívané cívky jsou tedy ve většině případů realizovány jako prostorově navinutý vodič. Velikost těchto součástek nelze přímo charakterizovat, obvykle se můžeme setkat s poměrně širokým rozsahem indukčnosti (jednotky μH až 20 H) [54]. Běžně se můžeme setkat např. s cívkami s indukčnostmi okolo 100 μH [55]. V praxi se lze setkat i se součástkami vyráběnými SMT či THT technologiemi. V oblasti tištěné elektroniky se lze setkat s planárně natištěnou cívku různého provedení viz např. [7], [47] a [49]. Těmito cívkami se bude zabývat následující část práce. [55]

Návrh

S problematikou tištěných cívek se lze setkat hlavně při tisku antén pro RFID zařízení. Téměř všechny nalezené výzkumné projekty či publikace se zaměřovaly pouze na toto využití. Kromě využití ve formě antény lze cívky využít také pro konstrukci filtrů či zesilovačů [46, 48]. Návrh a konstrukce tištěných součástek bude tedy čerpat hlavně na základě těchto dostupných zdrojů [4, 7, 47, 49, 53]. Na základě konkrétních výzkumných projektů bude popisována cívka planárně natisknutá pomocí stříbrného inkoustu. Jak již bylo zmíněno, cívky se oblasti tištěné elektroniky tisknou planárně. Planárně natištěné

cívky mohou mít různý tvar, ve většině případů se můžeme setkat s čtvercovou spirálou [7, 47] nebo kruhovou spirálou [45]. Návrh tištěných součástek vychází z geometrického návrhu vodivé smyčky (tvar smyčky (spirály), hustota tisku jednotlivých vodivých drah, tloušťka vrstvy apod.). Obecně lze říci, že existují již odvozené vzorce pro výpočet indukčnosti čtvercové či kruhové spirály, avšak návrhy konkrétních součástek probíhají v simulačních programech či na základě testování [35]. Dalším aspektem návrhu je výběr vhodných materiálů, které budou zprostředkovávat vodivou dráhu cívky. Dle dostupných zdrojů byl ve všech případech použit vodivý inkoust, konkrétně inkoust se stříbrnými nanočásticemi. U planárně natisknuté spirály je také nutné vyvést střed cívky přes natisknuté závity. K tomu slouží elektricky izolační materiál. Na tyto materiály jsou kladeny podmínky z hlediska elektrické pevnosti a dlouhodobé stability [51]. Podle [7], [45] a [46] by použit zesíťovaný polyethylen (PVP).

Výroba

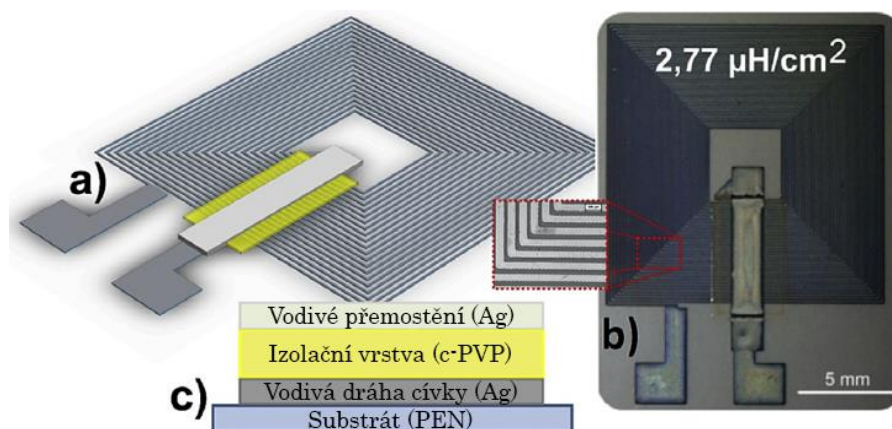
Pro výrobu tištěné cívky je potřeba natisknout pouze jednu vodivou vrstvu, avšak její výroba pro použití v tištěné elektronice vyžaduje tisk dalších dvou vrstev, které slouží k elektricky odizolovanému vyvedení středu cívky přes závity (přemostění) [7, 45, 47]. Jedna z těchto dvou vrstev tedy slouží jako izolační materiál (např. PVP) a druhá k vytvoření vodivé cesty ven ze středu cívky. Postup výroby lze vidět na obr. 17.



Obr. 17: Postup konstrukce tištěného induktoru (převzato a upraveno z [45])

Jak je možné vidět na Obr. 17, po vytvoření cívky a vyvedení středu spirály může následovat tisk další vrstvy. Dle [45] je možné natisknout přes závity cívky další vrstvu ve formě feromagnetického materiálu (feromagnetický inkoust) a zvýšit tak díky jeho vysoké permeabilitě výslednou indukčnost cívky. Tisk této vrstvy však pro vytvoření funkční

cívky není nutný. Indukčnost cívky přímo závisí na počtu závitů a odpovídající vodivé dráze [7, 46]. Pokud by bylo potřeba natisknout tištěnou cívku s co největší indukčností, musí se zvýšit hustota závitů cívky (viz Obr. 18), díky tomu však poklesnou vzdálenosti mezi závitů a vzrostou nároky na tiskový proces [7, 47]. U tištěných cívek se objevuje jejich hlavní nevýhoda ve formě parazitních vlastností. Jelikož jsou tištěné cívky vyrobeny planárně, vzniká mezi závitů cívky parazitní vlastnost ve formě parazitní kapacity [45, 47]. Mnohem více se však u tištěných cívek uplatňuje parazitní vlastnost ve formě parazitního odporu, který je dán nedokonalou vodivostí vodivé dráhy cívky [45, 47]. Tuto vlastnost lze omezit např. použitím materiálů s lepší elektrickou vodivostí či tiskem tlustší vodivé vrstvy. Jak ukazuje [47] tloušťku vodivé vrstvy natisknuté spirály lze zvýšit i tiskem několika takovýchto vrstev přes sebe, avšak příliš velký počet vrstev s sebou přináší nedodržení přesného tvaru vodivé dráhy a možný vznik zkratů. Tento přístup se ukázal jako velice výhodný, a při tisku dvou či tří vrstev došlo k velkému poklesu odporu. Dle [47] lze snížit parazitní vlastnosti odporu také stlačením pomocí válcovacího zařízení, čímž se k sobě přiblíží vodivé částice a vznikne více propojení ve vodivé vrstvě. V oblasti tištěné elektroniky se cívky vyrábějí hlavně jako antény pro RFID zařízení [4, 45, 47]. Tyto antény pracují jako rezonanční antény a cívky jsou tedy navrhovány tak, aby vykazovaly tuto rezonanční frekvenci [4, 47, 53].

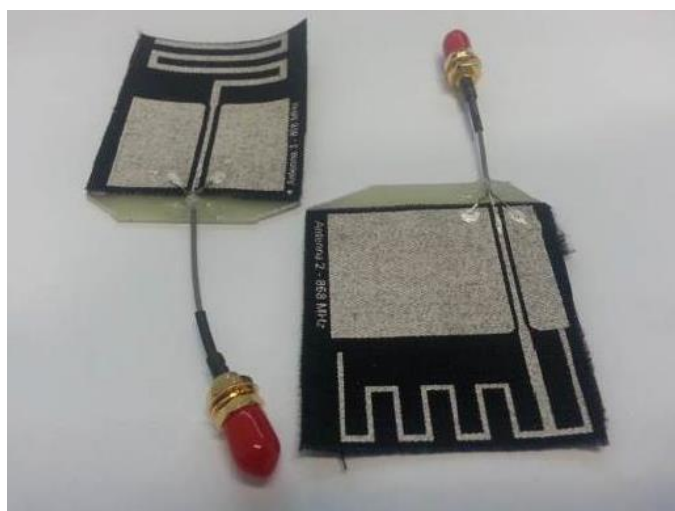


Obr. 18: a) Schématické znázornění různých vrstev a materiálů potřebných pro výrobu cívky s hustě natisknutými závitů, b) praktická ukázka natištěné cívky, c) pohled na jednotlivé natištěné vrstvy a jejich pořadí (převzato a upraveno z [4])

Vlastnosti

Dle [7, 46, 47] lze na plochu několika desítek mm^2 natisknout cívky o indukčnostech v řádech jednotek μH . Výzkumné projekty ukazují, že takovéto cívky lze vyrábět

s reprodukovatelností přibližně 70% [7, 46]. Jak již dříve bylo zmíněno, nevýhodou planárně natištěných cívek jsou jejich parazitní vlastnosti, které však lze do určité míry omezit. Cívky lze tisknout téměř všemi tiskovými technologiemi, záleží však na rozsahu viskozit, které je daná technologie schopna tisknout. Tištěné cívky lze využít v celé řadě aplikací. Kromě natištěné součástky vykazující indukčnost se cívky ve velké míře využívají jako antény ve spojení s RFID zařízení. Konkrétními příklady může být např. planární anténa natištěná na textilii, která je v praxi integrována v hasičském obleku (viz Obr. 19). Dalším praktickým příkladem může být integrace antény a RFID čipu uvnitř plastového zrcátka auta (viz Obr. 20).



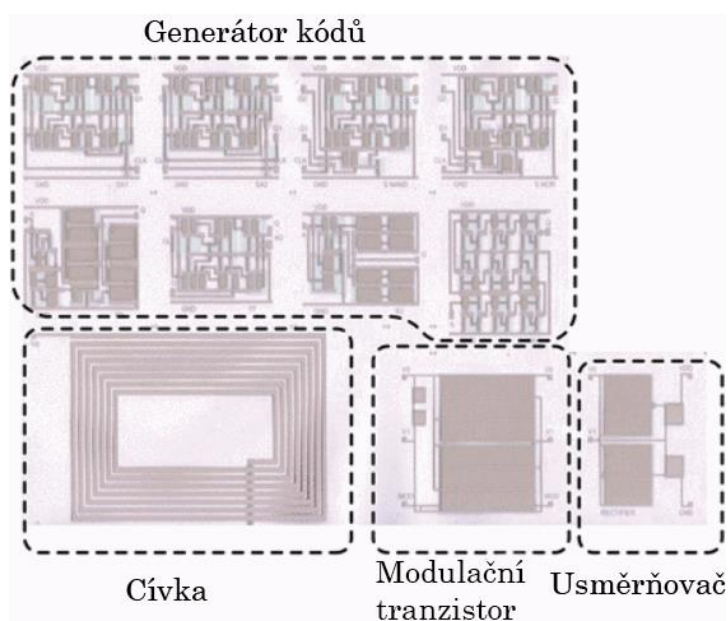
Obr. 19: Ukázka planární antény na textilním substrátu (převzato z [53])



Obr. 20: Ukázka natištěné antény s RFID čipem uvnitř plastového zrcátka auta (převzato z [4])

3 Diskuze využití tištěné elektroniky

Celá řada výzkumných projektů ukazuje, že tištěná elektronika s sebou nese velký potenciál ve formě nových řešení či jako potenciální doplněk ke konvenční elektronice. Na základě rešerše v této práci bylo potvrzeno, že v současné době lze vyrobit tištěné pasivní součástky, které mohou být v rozumné míře využity v praxi. Tištěné součástky nedosahují v porovnání s konvenčně používanými (SMD či THD) takových parametrů či výkonů, avšak pro jejich využití ve formě nenáročných a velice levných zařízení je lze vyrobit v dostatečně širokých hodnotách s dostatečnou přesností. Tištěné rezistory lze vyrobit v téměř stejných hodnotách jako běžně používané součástky, avšak nedosahují takových výkonů. Tištěné kondenzátory je možné vyrobit na velice malé ploše ve formě vícevrstvého řešení, ale nedosahují takové kvality jako konvenčně používané součástky, to však může zlepšit budoucí vývoj materiálů. Tištěné cívky se vyznačují svými parazitními vlastnostmi a nízkými indukčnostmi, v praxi jsou již dnes využívány ve formě antén v RFID zařízeních. Rezistor, kondenzátor i cívku je možné za pomoci již existujících materiálů ve formě past a inkoustů natisknout na běžně vyráběné flexibilní polymerní fólie, což představuje obrovskou výhodu a potenciál pro budoucí využití např. v nositelné elektronice, biomedicíně či jiných zařízeních vyžadujících flexibilní elektroniku. Za zmínku stojí říci, že tištěná elektronika využívá při výrobě součástek či zařízení i organické materiály, které díky svojí modifikovatelnosti či speciálním vlastnostem mohou přinést taktéž nová řešení.



Obr. 21: Tištěný RFID tag (upraveno a převzato z [56])

Kromě tisku pasivních součástek existuje v současnosti i možnost tisku aktivních součástek. Současné výzkumné projekty se ve velké míře zaměřují na tisk senzorů či tranzistorů. S vývojem těchto součástek se pojí i výzkum nových materiálů, od kterého se do budoucna očekává, že pomůže překonat některé z nevýhod tištěné elektroniky. Již dostupnými technologiemi lze tisknout různá zařízení s dostatečnou přesností a rychlostí tisku. Oproti konvenční elektronice mohou být navíc procesy výroby tištěné elektroniky plně aditivní, čímž lze provozovat nízkonákladový provoz s minimálním množstvím odpadu. Jak ukazuje Obr. 21, v budoucnu bude možné vyrobit plně tištěné zařízení ve formě RFID tagu, který v sobě obsahuje tištěný tranzistor a všechny tištěné součástky popsané v této práci.

Závěr

V bakalářské práci byly popsány technologie a materiály, které jsou v současné době v oblasti tištěné elektroniky dostupné pro výrobu tištěných pasivních součástek. Popis se nejprve zaměřil na dostupné tiskové technologie. Popsány byly dosud nejrozšířenější a nejdostupnější technologie - sítotisk a šablonový tisk. Tyto technologie umožňují nanášet materiál s požadovaným vzorem a tloušťkou. Technologie sítotisku může díky svojí možnosti rotačního sítotisku sloužit k rychlé a velkoobjemové výrobě. Ze současných technologií byly dále popsány technologie inkjet a aerosol jet. Obě tyto technologie slouží k bezkontaktnímu nanášení materiálu na rovný či jinak zakřivený substrát (3D). Technologie inkjet představuje nejrychlejší a ekonomicky nejvýhodnější možnost tisku. Tato technologie umožňuje selektivně nanášet materiál v režimu kontinuálního či přerušovaného tisku. Aerosol jet představuje dosud nejdokonalejší technologii pro výrobu tištěné elektroniky. Využívá řízenou depozici materiálu ve formě velice tenkého paprsku aerosolu. Umožňuje velice přesný tisk materiálů o široké škále viskozit, avšak tento systém je velice drahý a v současnosti vhodný jen pro rapid prototyping. V části zabývající se materiály bylo potvrzeno, že existuje dostatečné zastoupení funkčních materiálů potřebných pro výrobu tištěných součástek.

Hlavní část zabývající se popisem návrhu a výroby tištěných pasivních součástek na konkrétních řešeních ukázala, že lze s požadovanou přesností vyrobit funkční součástky využitelné ve velkoobjemové výrobě tištěné elektroniky. Tištěné pasivní součástky nelze v porovnání s konvenčními koncipovat na takové výkony a mají nevýhodu ve formě parazitních vlastností, avšak jejich použití se očekává v levných a masově rozšířených aplikacích, kde toto omezení nebude takovou překážkou. Od tištěné elektroniky se do budoucna očekává velké rozšíření ve formě levné a nositelné elektroniky, kterou bude moci zakomponovat do konceptu Internetu věcí (IoT).

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SEVILLA, Galo A Torres, Student MEMBER, Muhammad M HUSSAIN a Senior MEMBER. Printed Organic and Inorganic Electronics : Devices To Systems. 2016, **7**(1), 1–14.
- [2] KOPPENS, Arjen. *Jak může elektronický průmysl využít tisk plošných spojů ve 3D* [online]. 2015 [vid. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:23513/jak-muze-elektronicky-prumysl-vyuzit-tisk-plosnych-spoju-ve-3d>
- [3] GE, Tong, Jia ZHOU, Yang KANG a Joseph S CHANG. Review: A Fully-Additive Printed Electronics Process with Very-Low Process Variations (Bent and Unbent Substrates) and PDK. 2017.
- [4] GODLINSKI, Dirk, Ralf ZICHNER, Volker ZÖLLMER a Reinhard R. BAUMANN. Printing technologies for the manufacturing of passive microwave components: antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation* [online]. 2017, **11**(14), 2010–2015. ISSN 1751-8725. Dostupné z: doi:10.1049/iet-map.2017.0042
- [5] ŘEBOUN, Jan; *Tištěná a flexibilní elektronika - Tiskové technologie, Z prezentace k předmětu KET/ITE1*. Plzeň: Západočeská univerzita. 2017
- [6] KESSLER, Fondazione Bruno, Fondazione Bruno KESSLER, Saleem KHAN, Leandro LORENZELLI, Ravinder DAHIYA a Senior MEMBER. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE sensor Journal* [online]. 2014, **15**(DECEMBER), 3164–3185. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2014.2375203
- [7] CORREIA, V., K. Y. MITRA, H. CASTRO, J. G. ROCHA, E. SOWADE, R. R. BAUMANN a S. LANCEROS-MENDEZ. Design and fabrication of multilayer inkjet-printed passive components for printed electronics circuit development. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2018, **31**, 364–371. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2017.11.016
- [8] R.PARASKOV., E.BECKER., T.RIEDL., H.JOHANNES; a W.KOWALSKY. Large Area Elctronics Using Printing Methods. *Proceedings IEEE* [online]. 2005, **93**(7), 1321–1329. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1461589
- [9] LEVORA, Jakub. *Tištěné senzory plynů*. Plzeň, 2015. Západočeská univerzita.
- [10] SKOČIL, Vlastimil. a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [11] NEUHOFFER, Tomáš. *Technologie výroby tištěné elektroniky*. Plzeň, 2017. Západočeská univerzita.
- [12] *Stencils, Micro Stencils, Screen-printing Stencils* [online]. 2018 [vid. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.temicon.com/en/products/metal-micro-parts/stencils/>
- [13] KAY, Robert a Marc DESMULLIEZ. A review of stencil printing for microelectronic packaging. *Soldering & Surface Mount Technology* [online]. 2012, **24**(1), 38–50. ISSN 0954-0911. Dostupné z: doi:10.1108/09540911211198540
- [14] *The Technology Behind Aerosol Jet* [online]. 2018 [vid. 2018-02-16]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
- [15] GUPTA, Anubha A., Antoine BOLDUC, Sylvain G. CLOUTIER a Ricardo IZQUIERDO. Aerosol Jet Printing For Printed Electronics Rapid Prototyping. *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems* [online]. 2016, **2016–July**, 866–869. ISSN 02714310. Dostupné z: doi:10.1109/ISCAS.2016.7527378
- [16] MASHAYEKHI, Mohammad, Lee WINCHESTER, Louise EVANS, Tim PEASE, Mika Matti LAURILA, Matti MANTYSALO, Simon OGIER, Lluís TERES a Jordi CARRABINA. Evaluation of Aerosol, Superfine Inkjet, and Photolithography Printing Techniques for Metallization of Application Specific Printed Electronic Circuits. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2016, **63**(3), 1246–1253. ISSN 00189383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2016.2522388
- [17] *Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou* [online]. 2015 [vid. 2018-02-03]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [18] OPTOMECC. *AEROSOL JET® PRINTED ELECTRONICS OVERVIEW* [online]. 2014 [vid. 2018-02-07]. Dostupné z: https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_Printed_Electronics_Overview_whitepaper.pdf
- [19] NAVRÁTIL, Jiří; *Aerosol Jet®technologie, Z prezentace k předmětu KET/ITE1*. Plzeň: Západočeská univerzita. 2017
- [20] OPTOMECC. *Optomec's Aerosol Jet 3D printing technology is being used to mass-produce smartphones and other consumer devices embedded with commercial antennas* [online]. 2018 [vid. 2018-02-07]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-core-applications/printed-antennas/>

- [21] FAYOMI, Christian, Herve Achigui FACPONG, Judith MUELLER a Gordon W. ROBERTS. Passive sensors for flexible hybrid-printed electronics' systems: An IC designer view. *Midwest Symposium on Circuits and Systems* [online]. 2017, **2017–August**, 807–810. ISSN 15483746. Dostupné z: doi:10.1109/MWSCAS.2017.8053046
- [22] NAG, Anindya, Asif I ZIA, Arun BABU a S C MUKHOPADHYAY. Printed Electronics: Present and Future Opportunities. 2015, 380–389.
- [23] DERBY, Brian. Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution. *Annual Review of Materials Research* [online]. 2010, **40**(1), 395–414. ISSN 1531-7331. Dostupné z: doi:10.1146/annurev-matsci-070909-104502
- [24] NEŠPŮREK, Stanislav a Miloš MATYÁŠ. Elektroaktivní organické materiály [online]. 2006, **51**(1). Dostupné z: https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/141298/PokrokyMFA_51-2006-1_5.pdf
- [25] PRETL, Silvan; *Heterostruktury na bázi organických vodivých materiálů*. Plzeň, 2015. Západočeská univerzita.
- [26] *The Basics: Polymer Definition and Properties* [online]. 2018 [vid. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://plastics.americanchemistry.com/plastics/The-Basics/>
- [27] HRUBÝ, Lukáš; *Měření vlastností organických materiálů s vlastní vodivostí*. Plzeň, 2010. Západočeská univerzita.
- [28] BALINT, Richard, Nigel J. CASSIDY a Sarah H. CARTMELL. Conductive polymers: Towards a smart biomaterial for tissue engineering. *Acta Biomaterialia* [online]. 2014, **10**(6), 2341–2353. ISSN 18787568. Dostupné z: doi:10.1016/j.actbio.2014.02.015
- [29] PROKEŠ, Jan, Jaroslav STEJSKAL a Mária OMASTOVÁ. Polyanilin a polypyrrol - dva představitelé vodivých polymerů. *Chemické listy*. 2001, **95**(8), 484–492.
- [30] FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Vytváření tlustovrstvé pasivní sítě* [online]. 2016 [vid. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/11122685-1-vytvareni-tlustovrstve-pasivni-site.html>
- [31] SIGMA-ALDRICH. *Silver conductive paste* [online]. [vid. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/735825?lang=en®ion=US>
- [32] APPLIED-NANOTECH. *CuNi-IJ70 Spec and Application Sheet* [online]. 2018 [vid. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.appliednanotech.net/copper-nickel-alloy-ink-materials/>
- [33] OPTOMECC. *AEROSOL JET® Materials FAQs Min / Max Printable Feature Sizes for Aerosol Jet Systems* [online]. 2017 [vid. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
- [34] OPTOMECC. *Support for a wide range of commercially-available materials along with digital process recipes ensure quality result* [online]. 2018 [vid. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
- [35] MCKERRICHER, Garret, Jose Gonzalez PEREZ a Atif SHAMIM. Fully inkjet printed RF inductors and capacitors using polymer dielectric and silver conductive ink with through vias. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2015, **62**(3), 1002–1009. ISSN 00189383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2015.2396004
- [36] COOK, Benjamin S., James R. COOPER a Manos M. TENTZERIS. Multi-layer RF capacitors on flexible substrates utilizing inkjet printed dielectric polymers. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* [online]. 2013, **23**(7), 353–355. ISSN 15311309. Dostupné z: doi:10.1109/LMWC.2013.2264658
- [37] SIGMA-ALDRICH. *Silver nanoparticle ink* [online]. [vid. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/796042?lang=en®ion=US>
- [38] IONESCU, C., P. SVASTA, A. VASILE a D. BONFERT. Investigations on organic printed resistors based on PEDOT:PSS. *2012 IEEE 18th International Symposium for Design and Technology of Electronics Packages, SIITME 2012 - Conference Proceedings* [online]. 2012, 85–89. Dostupné z: doi:10.1109/SIITME.2012.6384352
- [39] SUN, Kuan, Shupeng ZHANG, Pengcheng LI, Yijie XIA, Xiang ZHANG, Donghe DU, Furkan Halis ISIKGOR a Jianyong OUYANG. Review on application of PEDOTs and PEDOT:PSS in energy conversion and storage devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2015, **26**(7), 4438–4462. ISSN 1573482X. Dostupné z: doi:10.1007/s10854-015-2895-5
- [40] BURDA, Zdeněk; *Tištěné rezistory na bázi organických materiálů*. Plzeň, 2014. Západočeská univerzita.
- [41] THINFILM. *Temperature Label Demonstration - Thinfilm Printed Electronics* [online]. 2012 [vid. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=xh3hBq2O2Wo>
- [42] *Resistor* [online]. [vid. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/resistor>
- [43] *Common Resistor and Capacitor Values for Electronic Circuits* [online]. 2018 [vid. 2018-05-16]. Dostupné z: http://www.kennethkuhn.com/students/rlc_values.pdf

- [44] JUNG, Sungjune, Antony SOU, Enrico GILI a Henning SIRRINGHAUS. Inkjet-printed resistors with a wide resistance range for printed read-only memory applications. *Organic Electronics: physics, materials, applications* [online]. 2013, **14**(3), 699–702. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2012.12.034
- [45] KANG, Byung Ju, Chang Kyu LEE a Je Hoon OH. All-inkjet-printed electrical components and circuit fabrication on a plastic substrate. *Microelectronic Engineering* [online]. 2012, **97**(4023), 251–254. ISSN 01679317. Dostupné z: doi:10.1016/j.mee.2012.03.032
- [46] CASTRO, H. F., V. CORREIA, E. SOWADE, K. Y. MITRA, J. G. ROCHA, R. R. BAUMANN a S. LANCEROS-MÉNDEZ. All-inkjet-printed low-pass filters with adjustable cutoff frequency consisting of resistors, inductors and transistors for sensor applications. *Organic Electronics: physics, materials, applications* [online]. 2016, **38**, 205–212. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2016.08.025
- [47] ASHEBIR, Getinet, Serges ZAMBOU, Ulrich MÄNNL, Rhyme SETSHEDI, Margit HÄRTING a David T. BRITTON. Fully screen printed LRC resonant circuit. *Microelectronic Engineering* [online]. 2016, **162**, 6–11. ISSN 01679317. Dostupné z: doi:10.1016/j.mee.2016.04.021
- [48] CHANG, Joseph, Xi ZHANG, Tong GE a Jia ZHOU. Fully printed electronics on flexible substrates: High gain amplifiers and DAC. *Organic Electronics: physics, materials, applications* [online]. 2014, **15**(3), 701–710. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2013.12.027
- [49] MOLINA-LOPEZ, F., D. BRIAND a N. F. DE ROOIJ. All additive inkjet printed humidity sensors on plastic substrate. *Sensors and Actuators, B: Chemical* [online]. 2012, **166–167**, 212–222. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2012.02.042
- [50] BLAŽ, Nelu, Milica KISIĆ, Čedo ŽLEBIĆ, Andrea MARIĆ a Ljiljana ŽIVANOV. Capacitance variation of inkjet printed interdigital capacitor by structure bending. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology* [online]. 2016, **2016–Septe**, 506–509. ISSN 21612536. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2016.7563250
- [51] TEHRANI, Bijan K., Chiara MARIOTTI, Benjamin S. COOK, Luca ROSELLI a Manos M. TENTZERIS. Development, characterization, and processing of thin and thick inkjet-printed dielectric films. *Organic Electronics: physics, materials, applications* [online]. 2016, **29**, 135–141. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2015.11.022
- [52] LI, Yi, Russel TORAH, Steve BEEBY a John TUDOR. An all-inkjet printed flexible capacitor for wearable applications. *Proceedings of IEEE Sensors* [online]. 2012, (April), 25–28. Dostupné z: doi:10.1109/ICSENS.2012.6411117
- [53] BLECHA, Tomas, Richard LINHART a Jan REBOUN. Screen printed antennas on textile substrate. *Proceedings of the 5th Electronics System-Integration Technology Conference, ESTC 2014* [online]. 2014, 14–17. Dostupné z: doi:10.1109/ESTC.2014.6962761
- [54] *Standard Inductor Values* [online]. [vid. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.rfcafe.com/references/electrical/inductor-values.htm>
- [55] *Inductance* [online]. [vid. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/inductance>
- [56] GE, Tong, Joseph S. CHANG, Tong LIN, Zhang LEI a Lim Geok SOON. Fully-Additive printed electronics on flexible substrates: A Fully-Additive RFID tag. *Midwest Symposium on Circuits and Systems* [online]. 2014, 825–828. ISSN 15483746. Dostupné z: doi:10.1109/MWSCAS.2014.6908542

