

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Technologie výroby tištěné elektroniky

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš NEUHÖFER**
Osobní číslo: **E14B0108P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Technologie výroby tištěné elektroniky**
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 aditivních technologií používaných při výrobě elektroniky s důrazem na použití pro tištěnou elektroniku.
2. Jednotlivé technologie detailně popište, uveďte jejich výhody a nevýhody a shrňte důležité tiskové parametry a jejich vliv.
3. Diskutujte možnosti použití těchto technologií pro výrobu flexibilní tištěné elektroniky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. LEŠIKAR, Adam. Sítotisk: úvod do technologie sítotisku. V Praze: Nakladatelství grafické školy, 2010.
2. MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil a URBÁNEK, Jan. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
3. Goth, C.; Putzo, S.; Franke, J., "Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications," Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2011 IEEE 61st , vol., no., pp.1211,1216, May 31 2011-June 3 2011 doi: 10.1109/ECTC.2011.5898664


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Navrátil
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017


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




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

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na technologie pro výrobu tištěné elektrotechniky a jejich popis.

Klíčová slova

Tištěná elektronika, flexibilní elektrotechnika, výrobní technologie, sítotisk, šablonový tisk, napařování, naprašování, dispensing, aerosol jet, ink-jet, flexografický tisk, ofsetový tisk.

Abstract

This bachelor thesis is focused on technologies for the production of printed electrical engineering and their description.

Key words

Printed electronics, flexible electrical engineering, manufacturing technology, screen printing, template printing, steaming, spraying, dispensing, aerosol jet, ink-jet, flexgraphic printing, offset printing.

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/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Tomáš Neuhöfer

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 TIŠTĚNÁ ELEKTRONIKA	11
1.1 SÍTOTISK	11
1.1.1 Síta.....	12
1.1.2 Rámy.....	13
1.1.3 Napínací zařízení.....	13
1.1.4 Sítotisková šablona.....	14
1.1.5 Těrka.....	15
1.1.6 Kvalita tisku.....	15
1.2 ŠABLONOVÝ TISK	16
1.2.1 Šablony	16
1.3 NAPRAŠOVÁNÍ.....	17
1.3.1 Reaktivní naprašování	18
1.3.2 Magnetronové naprašování.....	18
1.4 VAKUOVÉ NAPAŘOVÁNÍ.....	18
1.5 DISPENSING.....	19
1.5.1 Plné jehly.....	20
1.5.2 Duté jehly.....	20
1.5.3 Bezkontaktní dispensing	21
1.5.4 Jetting	21
1.6 AEROSOL JET	22
1.6.1 Princip funkce Aerosol Jet.....	23
1.6.2 Inkousty.....	24
1.6.3 Substráty.....	25
1.6.4 Výhody Aerosol Jet.....	25
1.7 INK-JET.....	26
1.7.1 Princip funkce Ink-jet	26
1.7.2 Inkousty Ink-jet	28
1.8 FLEXOGRAFICKÝ TISK	29
1.9 OFSET.....	30
1.9.1 Mokrý ofset	30
1.9.2 Suchý ofset.....	31
2 FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA A JEJÍ HISTORIE	32
3 DISKUZE	32
ZÁVĚR	35
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	36

Seznam symbolů a zkratk

AJP	Aerosol Jet Printing
CAD	Počítačem podporované projektování
CAM	Počítačem podporovaná výroba
CIJ	Kontinuální princip tisku technologie ink-jet
DOD	Drop on demand princip tisku technologie ink-jet

Úvod

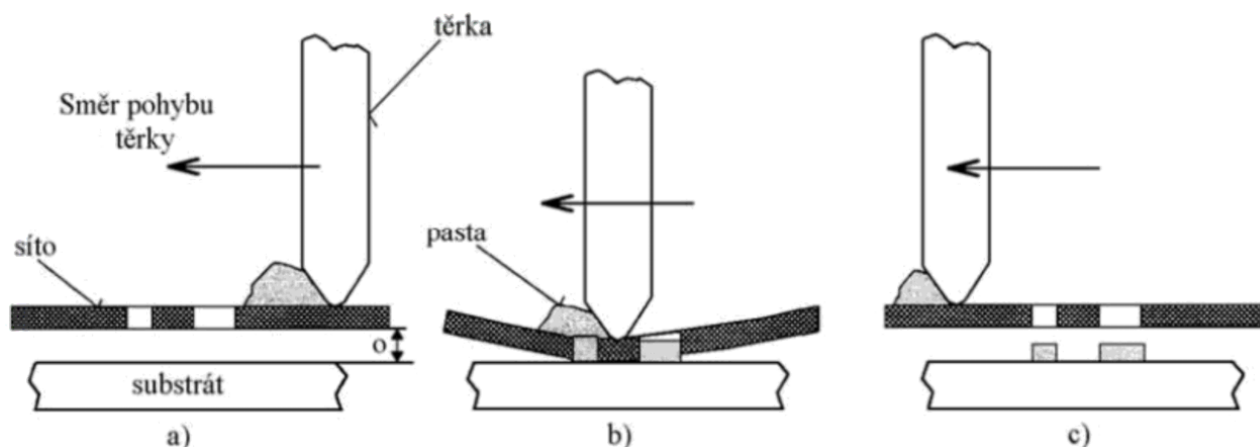
Cílem předkládané bakalářské práce je seznámení s aditivními technologiemi pro tištěnou a elektroniku a jejich popis. Na začátku práce popisují co je to tištěná elektronika a k čemu se využívá. Další část práce je věnována samotným technologiím, popisují zde základní technologie, jako jsou sítotisk, šablonový tisk nebo dispensing. V práci dále popisují technologie napařování a vakuového napařování, které slouží k celoplošnému nanášení tenkých vrstev. A také novější technologie Aerosol Jet a Ink-jet. Dále je zde uvedeno seznámení s flexibilní elektronikou a její historií. Práce obsahuje diskuzi, kde porovnávám vlastnosti jednotlivých technologií a jejich využití.

1 Tištěná elektronika

Tištěná elektronika, ačkoliv je tento termín znám už od z první poloviny minulého století, běžně se začala používat teprve nedávno a její vývoj ještě řadu let potrvá. Tištěnou elektroniku lze používat k vytváření elektronických systémů, obsahující součástky jako kapacitory, rezistory a tranzistory a to za pomoci nanášení funkčních materiálů na základní substrát. Tištěná elektronika má řadu využití, například pro senzory, ohebné fotovoltaické články nebo tištěné baterie. K její výrobě se používají technologie jako Ink-Jet, Aerosol Jet nebo ofsetový tisk. Tyto technologie nanášejí materiál pouze na místo určení, takže s materiálem nakládají poměrně efektivně. Tištěná elektronika přináší mnoho výhod, jako je tisk na ohebné substráty, rychlost výroby, nižší cena a v rámci efektivního nakládání s materiály i ochrana životního prostředí. [1][2][3][4]

1.1 Sítotisk

Sítotisk je základní tisková metoda, která se neustále vyvíjí a zdokonaluje. [5] Tato technologie se využívá v mnoha oborech. Principem technologie je, že nanosená pasta se protlačuje za pomoci těrky skrz síto (viz obr. 1). Pasta sítem ovšem projde jen tam, kde jsou v sítu volná oka. Na místech, kde pasta být nemá, je síto zaslepeno maskou a pasta zde nebude nanesena. Využívá se k vytváření vodivých cest, aktivních či dielektrických vrstev. Protože splňuje podmínky hospodárnosti a výkonnosti, tak se využívá především v sériové výrobě. [5] Příkladem využití může být servisní potisk, nebo tisk nepájivé masky. [6][7] Zařízení určená pro sítotisk mohou být jednoduchá, ale i velmi složitá plně automatická vyhovující nepřetržitému průmyslovému provozu. Pro levná ruční zařízení je důležité, aby bylo zajištěno, že konstrukce bude pevná a masivní, tak, aby byla podložka stále paralelně k rámu se sítem. Konstrukce musí umožňovat nastavování mezery mezi sítem a substrátem. Složitá poloautomatická a automatická zařízení musí splňovat již uvedené požadavky a také musí zajistit nastavení umístění obrazce, přítlak a rychlost těrky a snadnou výměnu rámu. Každé sítotiskové zařízení má základní tři části – síto, rám a těrku. [5]



Obr. 1: Princip sítotisku (převzato z [8])

1.1.1 Síta

Síta jsou vyráběny napnutím síťoviny vyrobené z nerezové oceli nebo polyesteru na vhodný rám. Tkaninu vybereme podle přesnosti rozměrů, tloušťce tisku, jemnosti motivu, ostrosti obrazce, velikosti částic pasty a struktury povrchu. Používáme tyto tkaniny. [5]

- Monofilní polyester, zajistí dobrou pevnost v tahu a také pružnost, umožňuje zotavení (100% do 2% protažení) a má dobrou rozměrovou stálost. [5]
- VA – tkanina, má ocelová vlákna, téměř nulovou pružnost, ale je také rozměrově stálá. Kvůli tomu je obtížné správně nastavit vzdálenost podložky od síta a správný přítlak těrky. Pokud není zařízení ideálně nastaveno a seřízeno může docházet k častým poruchám. [5]
- Metalizovaná polyesterová tkanina je kompromisem vlastností předchozích dvou. Vlákna jsou v tahu pevnější než u polyesteru a mají větší elasticitu, než ocelová vlákna. Nanáší menší tloušťku pasty, metalizovaná vlákna mají větší průměr a tak projde sítem méně pasty. [5]

Tloušťka nanesené pasty je pak závislá na technických parametrech tkaniny. To je počet vláken na cm, tloušťka vlákna d , velikost ok w , volná plocha tkaniny F_0 a tloušťka tkaniny a . těmito parametry je ovlivněna jemnost motivu. Tkaniny můžeme podle těchto parametrů rozdělit na tři skupiny. Tkaniny s velikostí oka větší než tloušťka vlákna ($w > d$), tkaniny s velikostí oka stejnou jako tloušťka vlákna ($w = d$) a tkaniny s velikostí oka menší než tloušťka vlákna ($w < d$). [5]

Aby se zajistilo, že pasta projde dobře tkaninou, musí být velikost částic pasty 2,5 až 3 krát menší než velikost ok w . Pro tisk na nerovný povrch je třeba použít síťovinu s elastickou tkaninou, aby se zajistilo přilnutí k povrchu a nedošlo tak k nekvalitnímu tisku. [5]

1.1.2 Rámy

Rám slouží k uchycení a udržení síta v jeho napnutém stavu po celou dobu životnosti. Dříve se rámy vyráběly ze dřeva a síťovina se připevnila lepením nebo sponami na strany rámu. Dnes se nejčastěji používají kovové rámy z hliníkových slitin, ocelový a tvarově různých profilů. [5] Rámy z hliníku jsou velmi pevné vzhledem k nízké hmotnosti. Nedochází u nich ke korozi, což prodlužuje životnost rámu. [9] Důležitá je velikost rámu v poměru k velikosti tištěného motivu. Je důležité, aby rámy měly co nejmenší tepelnou dilataci a aby udržely rovinnost i při velkém namáhání. [5]

1.1.3 Napínací zařízení

Pro zajištění kvalitního tisku je důležité správné napnutí tkaniny. Aby se zajistilo správné napnutí, je třeba dodržet výrobcem doporučené hodnoty napnutí, zajistit aby napnutí bylo rovnoměrné po celé ploše a aby bylo dosaženo stabilního napětí v čase. Pro napínání a zajištění těchto požadavků byla vytvořena řada zařízení, která pracují většinou na mechanickém nebo pneumatickém principu. [5]

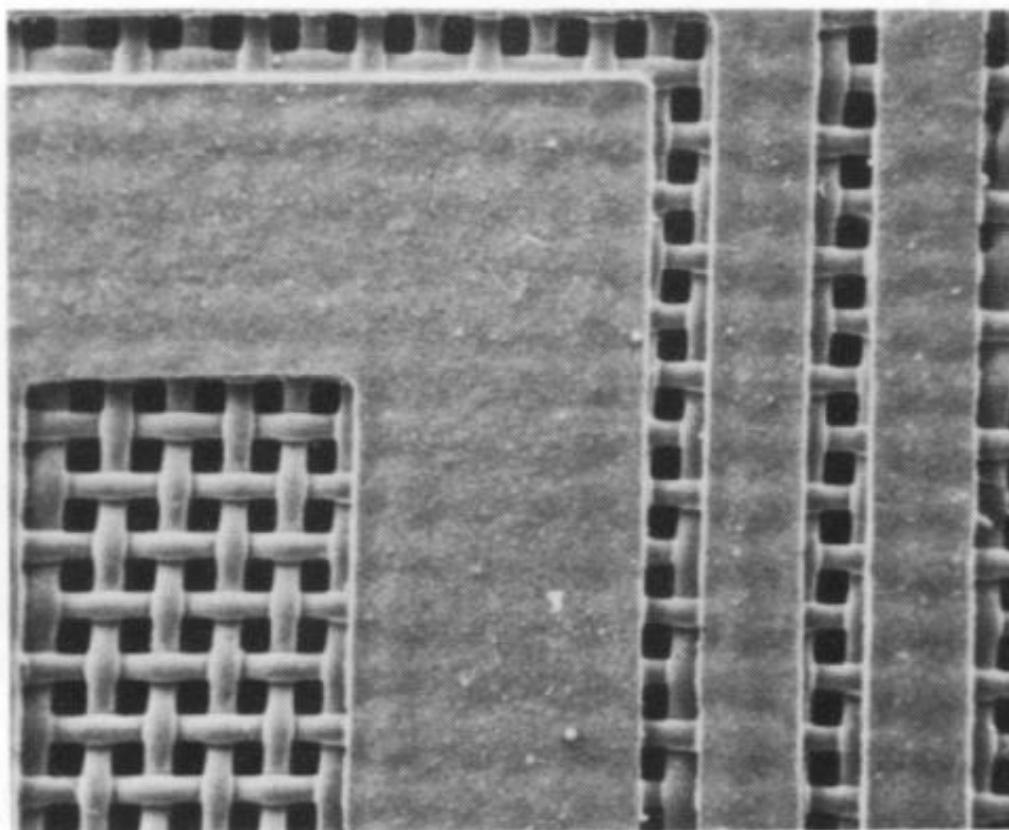
Mechanické napínání využívá k napnutí mechanického tahu. Ten bývá zajištěn šnekovým mechanismem poháněný klikou, nebo motorem. Pneumatické napínání používá písty s tlakovým vzduchem. Toto řešení se v dnešní době používá nejčastěji. Pneumatická napínací zařízení mají oproti mechanickým tu výhodu, že nabízejí větší a rovnoměrnější tah. Napínací zařízení se mohou lišit způsobem uchycení tkaniny. Může být uchycena pomocí samostatných klapek nebo být uchycena do lišty. V takovém případě nelze dosáhnout rovnoměrného tahu na všech místech tkaniny. [10]

Při napínání se nejprve rovnoměrně rozmístí klapky po obvodu rámu a tkanina se upne do jejich čelistí. Síťovina není napnuta naráz ale postupně. Tkanina musí být napínána s vlákny rovnoběžnými s napínacím rámem a napětí se zvyšuje postupně během 15 minut. Napětí je třeba měřit průběžně v obou osách a síto musí být na rám přilepeno až po ustálení

napětí. [5] K přilepení se nejčastěji používají dvousložková lepidla na bázi polyuretanu. [10] U různých tkanin časem dochází k různému poklesu napětí. Hned během prvních 4 hodin dojde ke strmému poklesu napětí a na konečný stav se ustálí po 48 hodinách. Proto se rámy nesmí používat hned po napnutí ale nejdříve za 1 nebo 2 dny. [5]

1.1.4 Sítotisková šablona

Sítotisková šablona (viz obr. 2) je vyráběna pomocí fotocitlivé emulze. Princip tkví v tom, že některá oka síta zůstanou vyplněná fotocitlivou emulzí a jiná ne (ty zůstanou průchozí). Používají se 3 typy šablon. Přímá šablona se vyrábí nanesením emulze na oka, expozicí a vyvíjením. Má nejdelší životnost (až 100 000 tisků) a hodí se na dlouhé a opakované používání. Nepřímá šablona se vyrábí nanesením emulze ve formě listu a může být exponována a vyvíjena před aplikací na síto. Má krátkou životnost (2 000 – 4 000 tisků). Kombinovanou šablonu vyrobíme pomocí emulze ve formě listu, ale aplikujeme ji na síto před exponováním a vyvíjením. Má tu výhodu, že emulze může zaplnit i jen část oka. Má dobrou rozměrovou stabilitu a životnost lepší než nepřímé šablony, ale horší než přímé (60 000 – 80 000 tisků). [5]

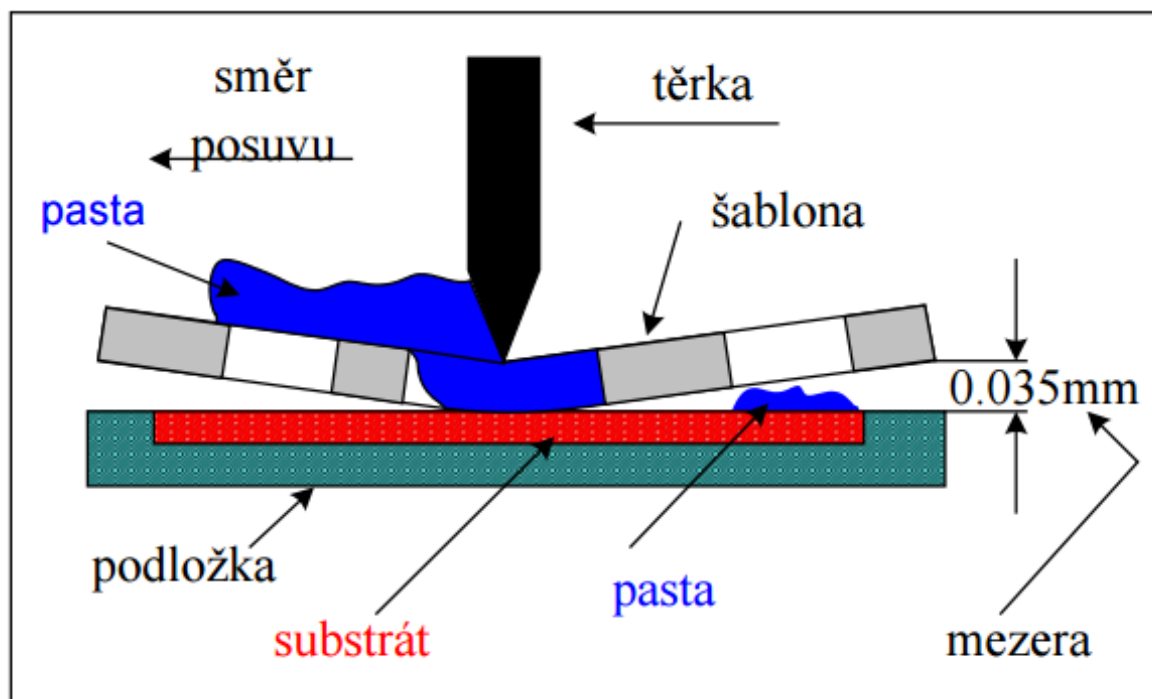


Obr. 2: Hotová šablona (převzato z [11])

1.1.5 Těrka

Těrka je zařízení, které má za úkol roztírat pastu po sítu a tak jí vtláčit do průchozích ok. Těrka výrazně ovlivňuje kvalitu tisku. Aby se zajistil ideální přenos pasty, musí se zajistit rovinnost hrany těrky, její ostrost a geometrická přesnost. Nesplnění těchto požadavků se okamžitě přenesou na substrát.

K výrobě terek se používá pryž nebo kov. Volba materiálu závisí na vlastnostech šablony a pasty. Kovové těrky vytváří velmi rovné vrstvy tisku, jsou odolné vůči poškození a je možné používat nízký přítlak. Nevýhodou je, že jsou drahé a šablony se během jejich používání rychleji opotřebovávají. Pryžové těrky se hodí pro víceúrovňové a nerovné šablony, naopak se nehodí pro šablony s velkými otvory, protože z nich nabírají pastu. Důležité parametry jsou přítlak, úhel náklonu, rychlost posunu těrky a kvalita povrchu těrky. [5][12]



Obr. 3: Princip sítotisku (převzato z [11])

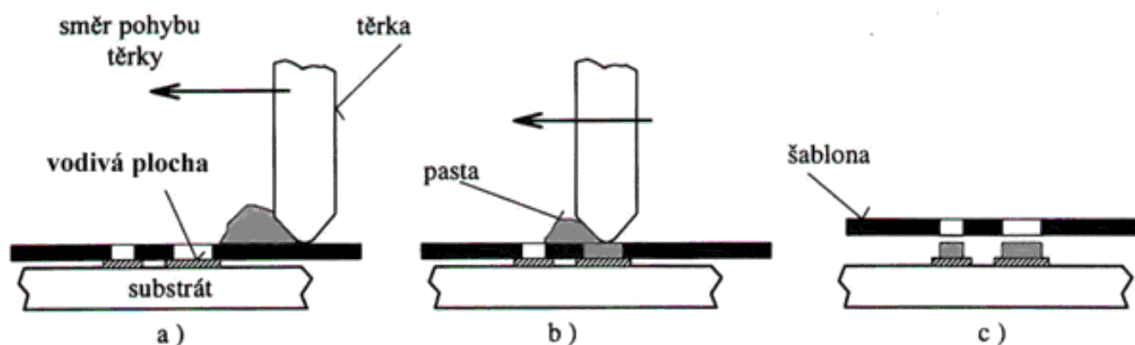
1.1.6 Kvalita tisku

Kvalita tisku závisí na správné volbě formátu rámu a obrazce, vzdálenosti síta od podložky a šířce, délce dráhy a tlaku těrky. Správný tlak je důležitý, jinak může narušit elasticitu tkaniny. Důležitý parametr je také úhel směru vláken síta a tištěného motivu. Pomocí experimentů bylo stanoveno, že ideální úhel je 22,5°. [5]

Tloušťka nanesené vrstvy je dána použitou tkaninou a její vzdáleností od podložky pastou, náklonem a rychlostí těrky, strukturou a nasákavostí materiálu. Průměr vlákna a velikost ok nám určuje množství protlačené pasty. V kvalitě má důležitou úlohu vzdálenost síta od podložky (odtrh). Odtrh spolu s mírou napětí síta ovlivní věrnost zobrazení na podložce. Těrka vyvíjí tlak působící na síto a způsobí jeho prohnutí k podložce. V místě kontaktu dojde k protlačení pasty. Pokud bude odtrh příliš velký, nebo malý, může znemožnit kvalitní přenos tištěného obrazce. [5]

1.2 Šablonový tisk

Šablonový tisk používá identická zařízení jako sítotisková technologie, ale síto je zde zaměněno za folii s otvory kudy prochází pasta. Díky tomu má jiné vlastnosti. Na rozdíl od síta má folie lepší rozměrovou stabilitu a přesnost, ale má nižší pružnost. Šablonovým tiskem nelze tisknout uzavřené obrazce. Tloušťka tisku je dána tloušťkou šablony. Šablona je během tisku položena přímo na substrátu (oproti sítotisku je zde tedy odtrh roven nule) a je odtržena až po skončení tisku (viz obr. 4). [5]



Obr. 4: Princip šablonového tisku (převzato z [8])

1.2.1 Šablony

Šablona je folie, která se vyrábí z mosazi, nerezové oceli, mědi molybdenu nebo plastu. Nejčastěji používaným šablonovým materiálem je mosaz. Její výhodou je snadné leptání při výrobě šablony. Vlastnosti lze ještě zlepšit pokovením niklem to zajistí hladší povrch otvorů a tím pádem lepší průchod pasty. Otvory se nejčastěji vytvářejí za pomoci leptání, či laseru. Šablony z nerezové oceli mají delší životnost a jsou tvrdší, otvory lze vytvářet leptáním nebo laserem. Měď se snadno leptá, je měkká a snadno poškoditelná. Proto se šablony z ní pokovují niklem. Šablony z molybdenu se často používali v USA. Jsou snadno leptatelné a umožňují vytvářet otvory pro tisk jemných motivů. Plastové

šablony jsou ve srovnání s kovy levné, mají dobrou pružnost a to i při vyšších tloušťkách. [5]

Na výrobu šablon se využívají různé technologie. Velmi rozšířené je leptání. Nejprve se na obě strany folie nanese fotorezist. Následuje osvit a vytvrzení fotorezistu. Pak chemické leptání, které probíhá z obou stran zároveň. V místě, kde se leptání z obou stran spojí, dochází k zúžení, které může způsobit těžší průchod pasty. Proto je nutné vytvářet otvory užší než tloušťka šablony plus 50 %. Výhodou oproti laseru je že lze vytvářet všechny otvory najednou, nevýhodou pak je používání žíravín a nebezpečných látek. [5]

Další technologií je řezat šablonu laserem. Laser je mnohem přesnější než leptání a řeže jen z jedné strany, to zabraňuje vzniku problému soutisku. Bohužel je laser dražší a časově náročnější než leptání a to především u velkých šablon s mnoha otvory. Nejčastěji se používá pro součástky s roztečí pod 0,5 mm. Tyto dvě technologie lze samozřejmě i kombinovat. Systém kombinace je levnější a má dobré výsledky. [5]

Poslední technologií je galvanoplastika (pokovení). Je to aditivní technologie pracující na principu chemického nanášení kovové vrstvy na podklad z nerezové oceli, nesoucí fotorezistem tvořené obrazy otvorů. Kovová vrstva narůstá všude, kde nerezový podklad není pokryt fotorezistem. Jakmile je dosaženo požadované tloušťky, je podklad s fotorezistem oddělen a šablona je hotová. Stěny otvorů jsou mírně zúženy. Cena se pohybuje mezi šablonou leptanou a šablonou řezanou laserem. [5]

Kovové šablony se pro zajištění dobrého uchycení upevňují do litých nebo svařovaných rámců. Aby se zajistila větší pružnost šablony, lze ji upevnit do polyesterové nebo nylonové sítě. Šablonu lze upevnit i bezrámově. [5]

1.3 Naprašování

Klasické naprašování je metoda pro vytváření tenkých vrstev. Probíhá ve vakuu a pracuje na principu bombardování terče ionty s vysokou energií (tisíce eV), díky čemuž dojde k vytržení atomů, molekul, nebo jejich shluků. Jako zdroj iontů je používán inertní plyn (nejčastěji argon) který se do komory dostane přes jehlový ventil. Tlak se udržuje v řádech jednotkách pascalu. Ionty jsou následně elektricky urychleny. Po nárazu iontu do

terče je předána hybnost částicím terče a dojde k vytržení. Následuje depozice částic na substrát. [13][14]

Naprašování má výhodu, že lze naprašovat téměř všechny stabilní látky. Má vyšší rychlost depozice. Pomocí proudu a napětí lze naprašování dobře regulovat. Nevýhodou pak, že není vhodné pro organické materiály a je třeba zdroj iontů s vysokou čistotou. [8][13][14][15]

1.3.1 Reaktivní naprašování

Reaktivní naprašování je založeno na odpařování materiálu ve vakuu a kondenzaci jeho par na substrátu. Využívá se pro vytvoření vrstev například oxidů, nitridů a karbidů. Terč je zde bombardován směsí inertního plynu s dusíkem, kyslíkem nebo čistým plynem (bez inertního). Vlastnosti výsledné vrstvy jsou pak dány složením použitých plynů. Je zde možnost vytvářet vrstvy o různé vodivost. [8][14]

1.3.2 Magnetronové naprašování

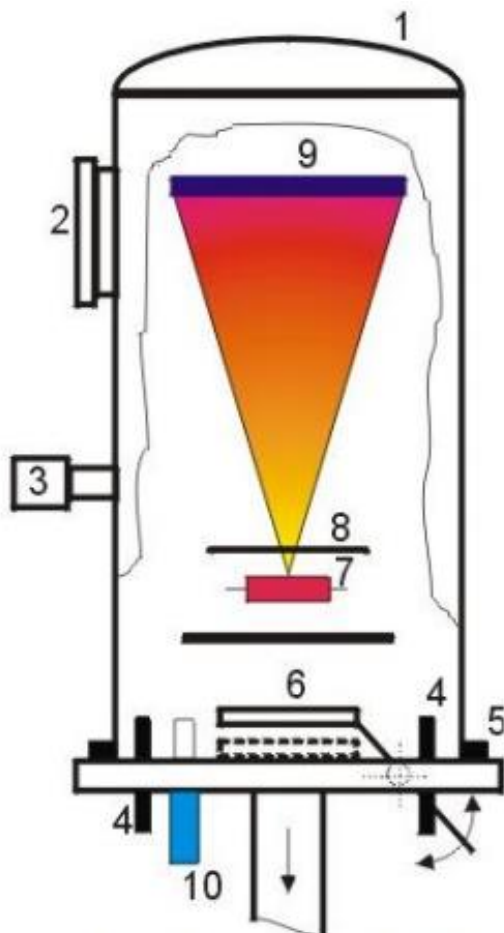
Magnetronové naprašování je zdokonalená technologie klasického naprašování. Před terčem se pomocí elektromagnetu nebo permanentních magnetů (magnetron) vytvoří magnetické pole definovaného tvaru. Elektrony, které normálně unikají z prostoru před terčem se kvůli působení Lorentzovy síly musí pohybovat po šroubovici podél siločar. To prodlouží jejich dráhu a zvýší počet srážek. Díky tomu můžeme udržovat výboj při nižším tlaku (desetiny pascalu), a napětí (stovky voltů). Nižší tlak způsobuje větší čistotu vytvářených vrstev. Magnetronové naprašování nám umožňuje naprašovat i na nevodivé terče. [13]

1.4 Vakuové napařování

Vakuové napařování je technologie, se kterou je možné nanášet tenké vrstvy kovů, polovodičů a některých dielektrik. Pracuje na principu odpaření materiálu zdroje a jeho nanesení na chladnější materiál (substrát). Ve vakuové komoře (viz obr. 5) se ohřeje napařovaný materiál. Na ohřev se používá laser, odporový ohřev, elektrická indukce nebo iontový svazek. Po dosažení požadované teploty, dojde u povrchových částic ke zvýšení kinetické energie. Z povrchové vrstvy se následně začnou uvolňovat atomy nebo molekuly, které dopadají na substrát, kde utvoří tenkou vrstvu. [15]

Substrát se musí před napařováním očistit a odmastit. Aby se zajistila efektivita přenosu částic, probíhá proces ve vakuové komoře. [16]

Nevýhodou napařování je nesnadná depozice kompozitních materiálů, u kterých mají různé složky různé teploty tavení. Může tak vzniknout vrstva různého materiálového složení. Tento problém řeší mžikové napařování, kde je materiál dodán ve formě jemného prášku. [16]



Legenda:

1. snímatelný kovový/skleněný recipient
2. průzor
3. ventil pro připouštění
4. přívod pro ohřev lodičky s odpařovaným materiálem
5. těsnicí příruba
6. deskový ventil pro uzavření vývěvy
7. keramická/kovová lodička s odpařovaným materiálem - výparník
8. pohyblivá clona slouží k zachycení první dávky znečištěných par
9. předmět, na němž vytváříme napařováním vrstvu
10. měrka

Obr. 5: Vakuová napařovací aparatura (převzato z [16])

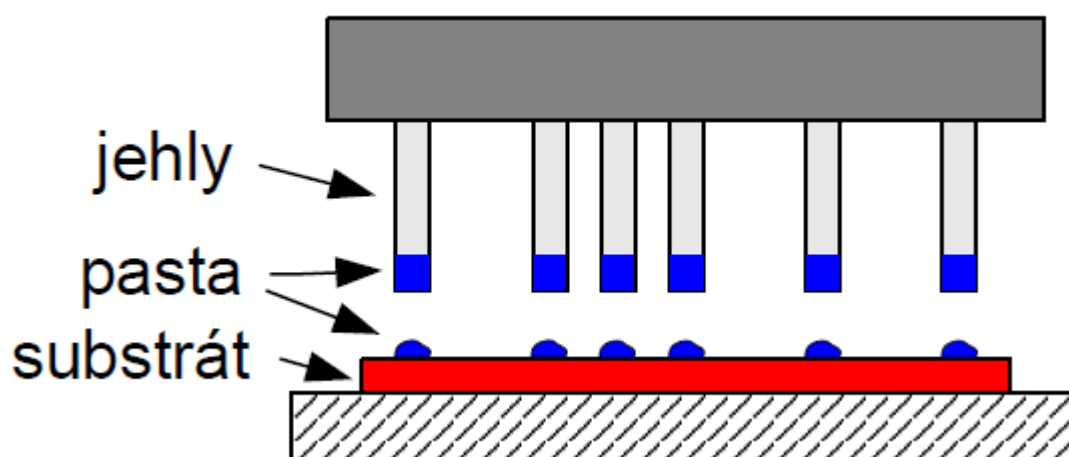
1.5 Dispensing

Dispensing je aditivní proces, který je založený na principu nanášení pasty na substrát dotykem, nebo jejím vytlačěním ze zásobníku, využívá k tomu plných nebo dutých jehel. Rychlost těchto jednohlavých metod není příliš vysoká (poloautomatická verze dovede deponovat 10 000 – 15 000 bodů za hodinu a automatická 20 000 – 40 000 bodů za hodinu). Aby se rychlost zvýšila, byl vyvinut bezkontaktní dispensing a ještě lepší a složitější jetting (až 140 000 bodů za hodinu). [5] Neotech Amt je společnost vyvíjející systémy pro 3D tisk. Společnost nabízí například ekonomický systém Rapid Prototyping

PJ 15X, který využívá technologii tisku s pětiosým řízením pohybu umožňující kompletní 3D tisk. [17]

1.5.1 Plné jehly

Nejednodušší metodou pro přenos pasty je přenos plnými jehlami. Pracuje na snadném principu. Jehla připevněná v držáku je ponořena do zásobníku pasty pro její nabrání, následně se přesune na místo určení a dotkne se substrátu. Dotek zajistí, že pasta steče z jehly na substrát, kde vytvoří ovrstvenou plochu (viz obr. 6). Velikost této plochy je dána množstvím nanesené pasty (hloubkou ponoření jehly do zásobníku), tvarem jehly a viskozitou pasty. Metoda není příliš rychlá ani přesná. Rychlost lze ale zvýšit upnutím více jehel do držáku, následně lze ovrstvit celý substrát naráz, což je užitečné pro sériovou výrobu. [5]



Obr. 6 : Dispensing plnými jehlami (převzato z [11])

1.5.2 Duté jehly

Metoda dutých jehel je přesnější a také mnohem více používaná metoda dispensingu. Principem je, že požadované množství pasty je vytlačováno ze zásobníku skrze duté jehly. Jehla se pohybuje nad deskou a nanáší pastu na požadovaná místa. Proces lze urychlit zrychlením posuvu jehly nebo umístěním více jehel vedle sebe jako v předchozím případě. V takovém případě se pak jehly mohou pohybovat jen vertikálně a ušetřit tak mnoho času. Důležité parametry, ovlivňující kvalitu tisku jsou viskozita pasty a vzdálenost podložky od konce jehly. [5]

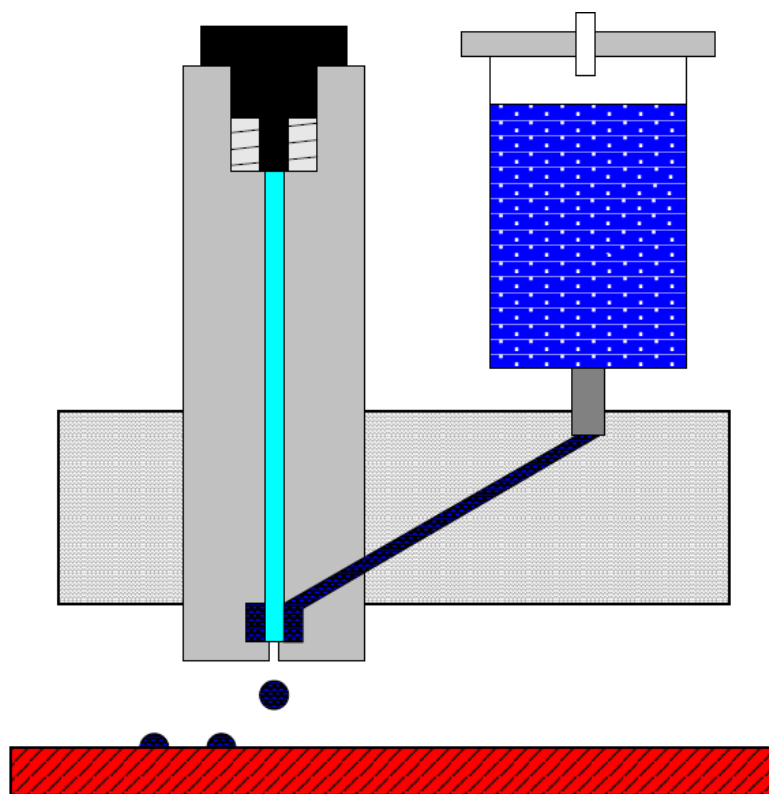
Na vytlačení pasty se používají dva způsoby. Vzduchové pumpy používají řízené vzduchové pulzy. Ale dochází u nich ke značnému zpoždění mezi vytlačení pasty a

pulzem. Nevýhodou je také pružnost vzduchu, zahřívání a změna viskozity způsobená působením pulzů. To ovlivňuje přesnost a výslednou kvalitu tisku. [5]

Druhou možností jsou šroubové píсты. Pastu zde vytlačujeme otáčením šroubu v pístu, přičemž rotace šroubu je přímo úměrná množství vytlačené pasty. Rotaci a tedy i množství vytlačené pasty lze řídit snadno regulovatelným elektrickým motorem. [5]

1.5.3 Bezkontaktní dispensing

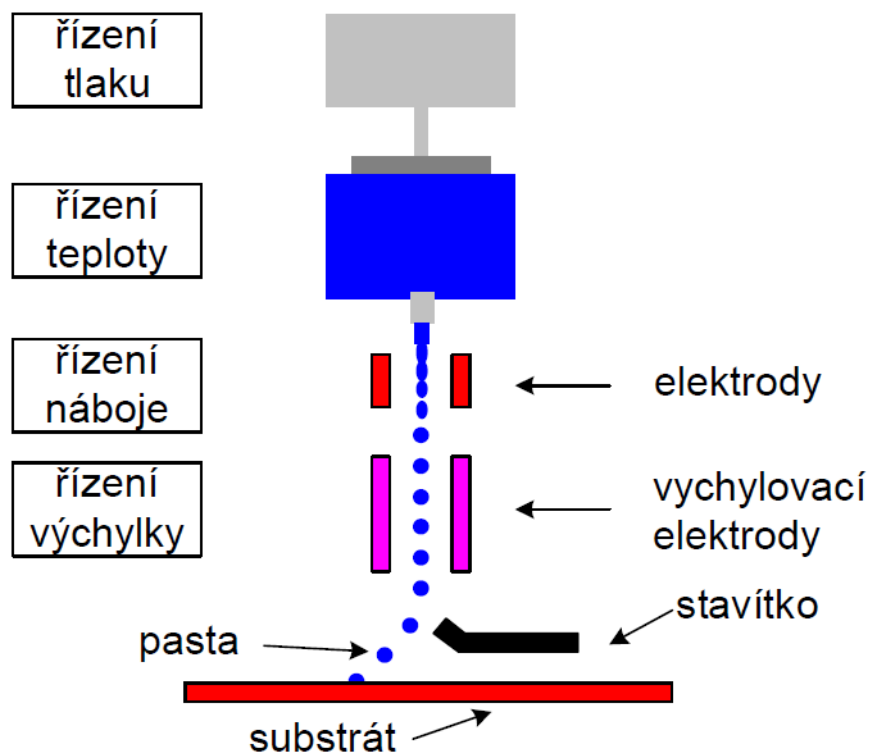
Aby se u dispensingu dosáhlo větší rychlosti, byly odstraněny jehly a vyvinut bezkontaktní dispensing (viz obr. 7). S odstraněním jehel se odstranila i jejich údržba, což snížilo náklady na proces a zvýšilo rychlost a také opakovatelnost (asi o 5%). Bez jehel je vzdálenost mezi substrátem a vypouštěcím otvorem konstantní (1 – 3,5 mm). Bezkontaktní dispensing se nejčastěji používá pro aplikaci lepidla. [5]



Obr. 7: Bezkontaktní dispensing (převzato z [11])

1.5.4 Jetting

Jetting je dokonalejší a také složitější technologie bezkontaktního dispensingu (viz obr. 8). Je zde možnost řízení směru vypouštěných kapek pomocí vychylovacích elektrod. Předností technologie je rychlost, přesnost a možnost ovrstvit i malé plochy. [5]



Obr. 8: Jetting (převzato z [11])

1.6 Aerosol Jet

Aerosol Jet Printing je aditivní, bezkontaktní metoda, která umožňuje tisk materiálů pro senzorové aplikace, propojovací struktury a elektrotechnické součástky jako například tranzistory. Tato unikátní technologie využívá aerodynamické usměrňování aerosolu, který je vytvářen pomocí atomizéru ze širokého spektra funkčních inkoustů. AJP vynalezla americká společnost Optomec, která ji má patentovanou. Díky této metodě můžeme osazovat součástky bez nutnosti přípravy masek a filmových předloh. Také nám AJP umožňuje vytvářet jemné vodivé motivy a miniaturizaci elektrotechnických systémů. Používání tohoto zařízení se v mnoha projektech zaměřuje na tištěnou elektroniku. Zařízení AJP se uplatňuje v oblasti výzkumu tištěné elektroniky, smart textílie inteligentních obalů, flexibilních displejů a solárních článků. Tato technologie se také používá pro Rapid Prototyping, na vytváření prototypů. Průmyslově se zařízení používá např. pro tisk antén do mobilních zařízení. [6][18]

1.6.1 Princip funkce Aerosol Jet

Principem systému je vytváření aerosolu z funkčních inkoustů a jeho depozice na substrát (viz obr. 9). První částí systému je bubbler. Bubbler přináší do inkoustu kapičky rozpouštědla, čímž pomáhá vytvořit v atomizéru potřebný aerosol. V bubbleru se tedy musí nacházet látka, ve které je inkoust rozpouštěn. Může to být voda, isopropyl, alkohol, aceton a jiné. [19]

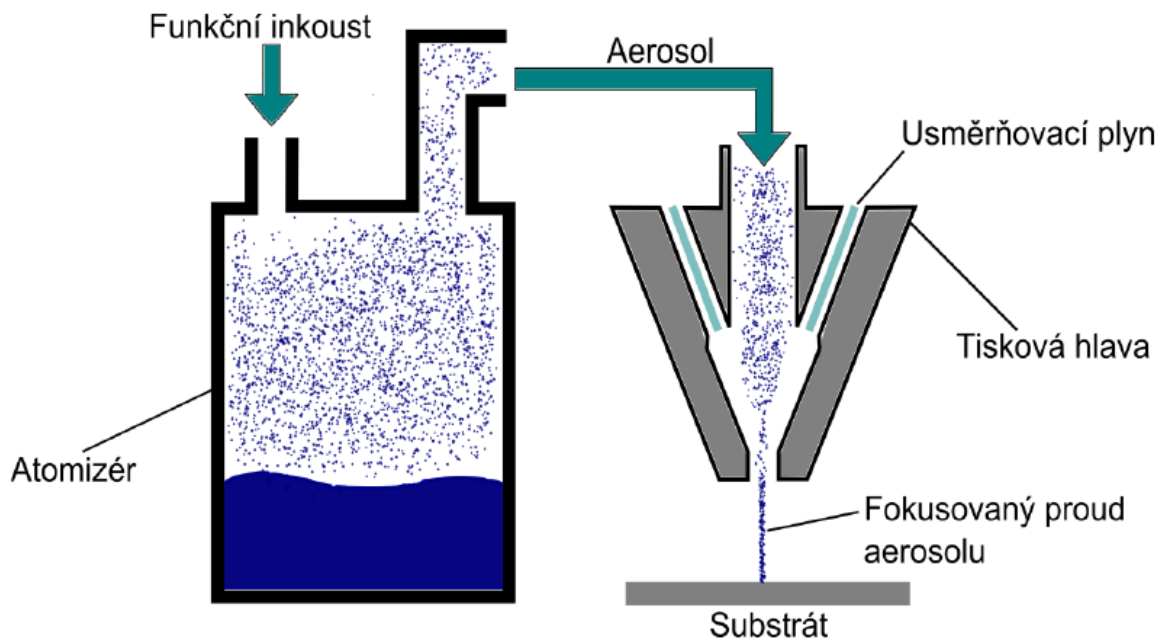
Nadále je nutné vytvořit aerosol z daného inkoustu. Ten vytváří zařízení s názvem atomizér. Existují dva druhy atomizéru, pneumatický a ultrazvukový. Pneumatický atomizér vytváří aerosol nasáváním inkoustu a jeho tryskáním na stěnu nádoby. Proud inkoustu o vysoké rychlosti vystupuje z rozprašovače a rozbíjí se o stěnu nádoby. Velké kapky padají zpět do nádoby, zatímco menší kapičky mohou postupovat dále systémem ve formě aerosolu. Nevýhodou je větší potřeba minimálního množství inkoustu potřebného k tisku (minimálně 30 ml). Výhodou pak je široké spektrum použitelných viskozit 1 – 1000 mPa·s. [18] Ultrazvukový atomizér vytváří aerosol za pomoci zvukových vln, které rozbíjejí inkoust. Pro účinnou atomizaci musí být ultrazvuková energie přenášena z měniče přes spojovací kapalinu (destilovanou vodu) a atomizační lahvičku (tenkostěnné sklo či PFA) na materiál. Nevýhodou oproti pneumatickému atomizéru je pak úzké spektrum použitelných viskozit 1 – 5 mPa·s. Výhodou je potřeba malého vstupního množství inkoustu (1ml). [20]

Za pneumatickým atomizérem se nachází zařízení nazývané virtual impactor. Úkolem virtual impactoru je odtahovat přebytečný nosný plyn, tedy dusík, a příliš velké částice inkoustu. Aerosol se za ním stává homogennějším, což je vyžadováno pro kvalitní a rovnoměrnou depozici. [20]

Aerosol je dále pomocí dusíku transportován do depoziční hlavy a trysky a následně bezkontaktně nanášen na substrát. [20][18] Do depoziční hlavy je přiváděn dusík, který proud aerosolu prstencově obklopuje a zaostřuje do formy tenkého paprsku (vytvoří se tak velice úzký tok aerosolu, do průměru 10 μm). [6] Umožňuje nám to tisknout jemné a přesné motivy a to i na nerovné substráty. Díky tomu je průchod toku aerosolu tryskou bezkontaktní, takže nedochází k jejímu ucpávání. To zrychluje výrobu a zlepšuje

spolehlivost technologie. [20] Aerosol vystupuje z trysky rychlostí 10 až 100 m/s, udržuje velkou mezeru mezi hlavou trysky a substrátem (typicky 3 – 5 mm). [21]

Lze zde dosáhnout rychlé změny tištěného motivu. To především díky podpoře počítačem navržených návrhů, v systémech CAD a CAM. Následně se tento návrh vygenerujeme pomocí nástroje Optomec VMTools do požadovaného formátu. [6][18][20] Díky tomu je technologie ideální pro vytváření prototypů.



Obr. 9: Princip Aerosol Jet (převzato z [6])

Samotný tisk může probíhat dvěma způsoby. První možností je pohyblivá deska, na které je uchycen substrát. V tomto případě je pak trysková hlava nehybná. V druhé možnosti je to naopak. Deska se substrátem je nehybná a tryska se pohybuje v ose x, y a z dle programu. [19]

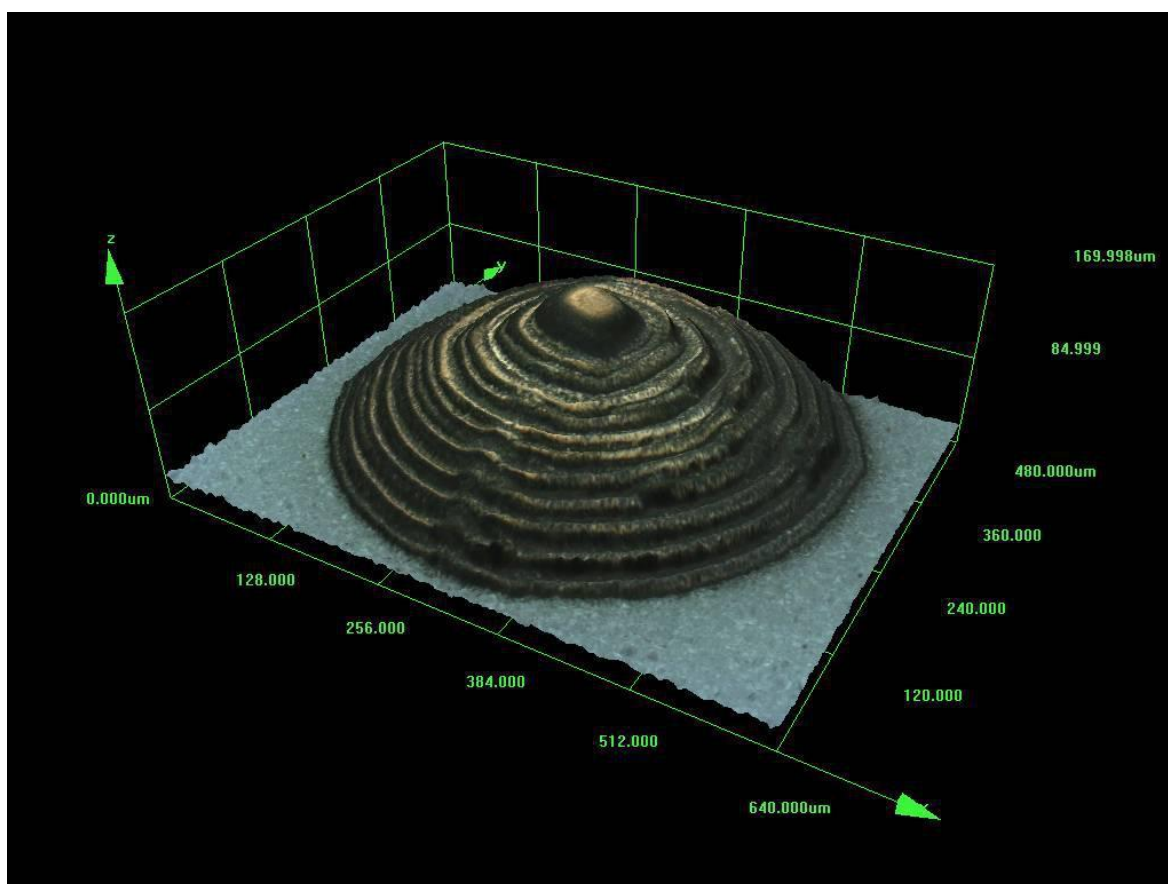
1.6.2 Inkousty

Zařízení může používat široké spektrum inkoustů a tekutých látek. Důležitými parametry inkoustů jsou velikosti částic a viskozita. Ideální suspenze pro Aerosol Jet má velikost částic do 500 nm a viskozitu 1 až 1000 mPa·s. Dle viskozity je třeba zvolit vhodný atomizér pro výrobu aerosolu. Pneumatický je ideální pro viskozitu 1 – 1000 mPa·s a ultrazvukový pro menší viskozitu jako 1 – 5 mPa·s. [6] Vodivé inkousty jsou obvykle skládány z nanočástic kovů (měď, stříbro, zlato, platina), polymerů a speciální funkční

roztoky (enzymy, iontové kapaliny). [6][20] Stříbro se nejčastěji používají na vodivé struktury.

1.6.3 Substráty

Materiál používaný pro substráty je omezen pouze jeho kompatibilitou s použitým funkčním inkoustem. Oproti jiným metodám je možné velmi snadno nanášet na nerovné či 3D substráty. [6] Tato schopnost AJP velice odlišuje od jiných technologií. Kromě tisku na 3D materiál umí aerosol jet sám tisknout miniaturní 3D struktury (viz obr. 10). [20]



Obr. 10: Miniaturní 3D objekt z Ag inkoustu – kužel (převzato z [18])

1.6.4 Výhody Aerosol Jet

Technologie umožňuje vytvářet velmi jemné tištěné motivy. Šířka tisknuté linie může být od 10 μm až po milimetry a o tloušťce od desítek nm dle použitého inkoustu. Tato vlastnost vede k celkovému zmenšení substrátu a tudíž ke zmenšení například celé desky plošných spojů nebo elektronických součástí. [6] Aerosol Jet vytváří méně odpadu než jiné technologie. Je to dáno tím, že účinněji zpracovává surový materiál a nevyužívá žíraviny, které jsou u jiných metod třeba. Další výhodou je vysoká kvalita tisku. Ta je

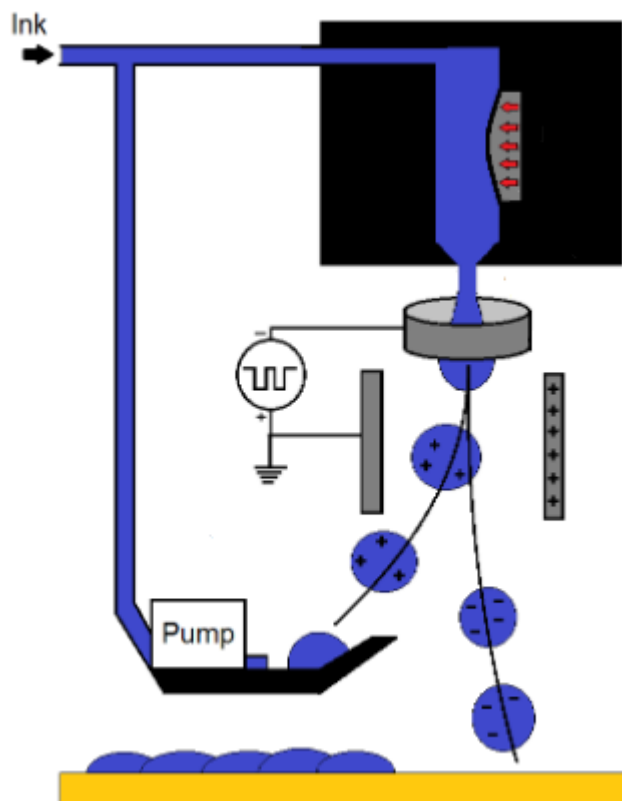
dána především kombinací inkoustů a substrátů, nastavení zařízení, vysoká přesnost tisku na pozici ($\pm 1 \mu\text{m}$), linie od šířky $10 \mu\text{m}$ ($\pm 10\%$). Může používat široké spektrum materiálů. Největší výhodou je možnost vytvářet návrhy v systémech CAD a jejich realizace. Díky této možnosti je usnadněna a zrychlena výroba a ušetřen čas a náklady na vytváření motivu oproti fotolitografii. To se využívá především při výrobě prototypů. Nevýhodou je rozhodně cena zařízení a jeho malá užitkovost v sériové výrobě. [19]

1.7 Ink-jet

Jedná se o další bezkontaktní způsob nanášení inkoustu přímo na substrát. Je to aditivní proces. Postupně se začal testovat a používat pro využití v elektrotechnice, především pro tištěnou elektroniku jako jsou kapacitory, indukory a tranzistory. [22][23] Technologie ink-jet má dva způsoby, které vytvářejí tištěné motivy. Je to kontinuální inkoustový tisk (CIJ) a tisk drop on demand (DOD). Tyto metody jsou rozdílné ve způsobu nanášení inkoustu na substrát. Kontinuální metoda tiskne méně jemné motivy se šířkou linie okolo $100 \mu\text{m}$, zatímco DOD nám umožňuje tisknout jemnější motivy, zhruba 20 až $50 \mu\text{m}$. [6][24][25]

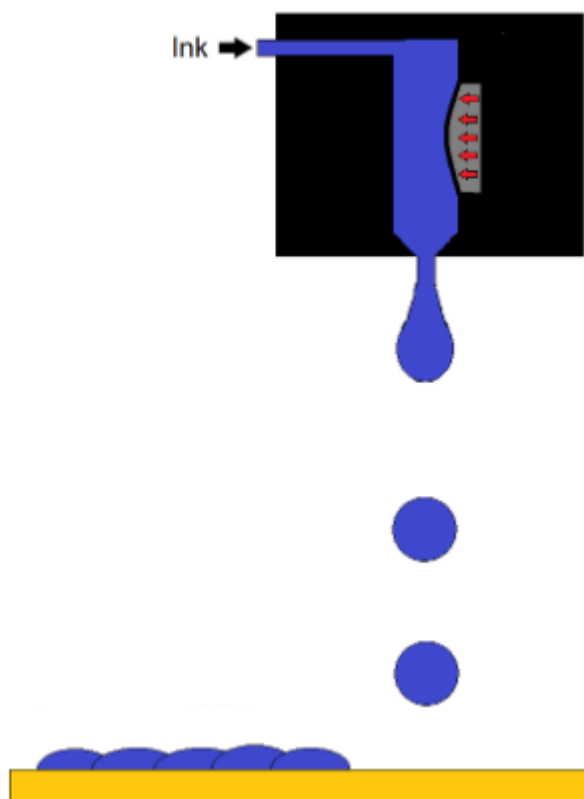
1.7.1 Princip funkce Ink-jet

Kontinuální metoda využívá nepřetržitého proudu inkoustu. V tiskové hlavě se každá kapka inkoustu nabije na nenulový potenciál, vůči zemi. Následně je za pomoci vychylovacích destiček směřována na svou pozici (viz obr. 11). Tyto systémy využívají vysoké rychlosti tisku a kapky se tisknou na substrát rychlostí 10 m/s . Tato metoda neumožňuje zastavit proud inkoustu v případě nanášení na místa, kde se tisk nevyžaduje. Vzniká vysoká produkce odpadu. Naštěstí je možné z těchto míst pastu setřít a následně znovu použít. Tato recyklace je velice užitečná jedná-li se o drahý inkoust (mohou obsahovat např. částice zlata nebo platiny). Lze tak zabránit finančním ztrátám. Kontinuální ink-jet lze využívat v průmyslu také pro kódování a značení. [6][26]



Obr. 11: Princip metody CIJ pro Ink-Jet (převzato z [25])

Druh metody DOD je ekonomičtější než CIJ, především díky tomu že generuje kapičky, jen když to vyžaduje tisk. Nejsou zde potřeba vychylovací destičky (viz obr. 12). K dosažení polohy tisku slouží manuální posun nad cílové místo na substrátu. Inkoust zůstává uvnitř trysky, dokud nedorazí řídicí signál. Pokud dorazí, tryska vyvine tlak a vystřelí inkoust na požadované místo. DOD vytváří mešní kapky a umožňuje přesnější tisk. Také nám snižuje technické požadavky na výrobu inkoustu. Díky tomu je metoda DOD hodně využívaná v grafice a tisku textu. [6][26]



Obr. 12: Princip metody DOD pro technologii Ink-Jet (převzato z [25])

1.7.2 Inkousty Ink-jet

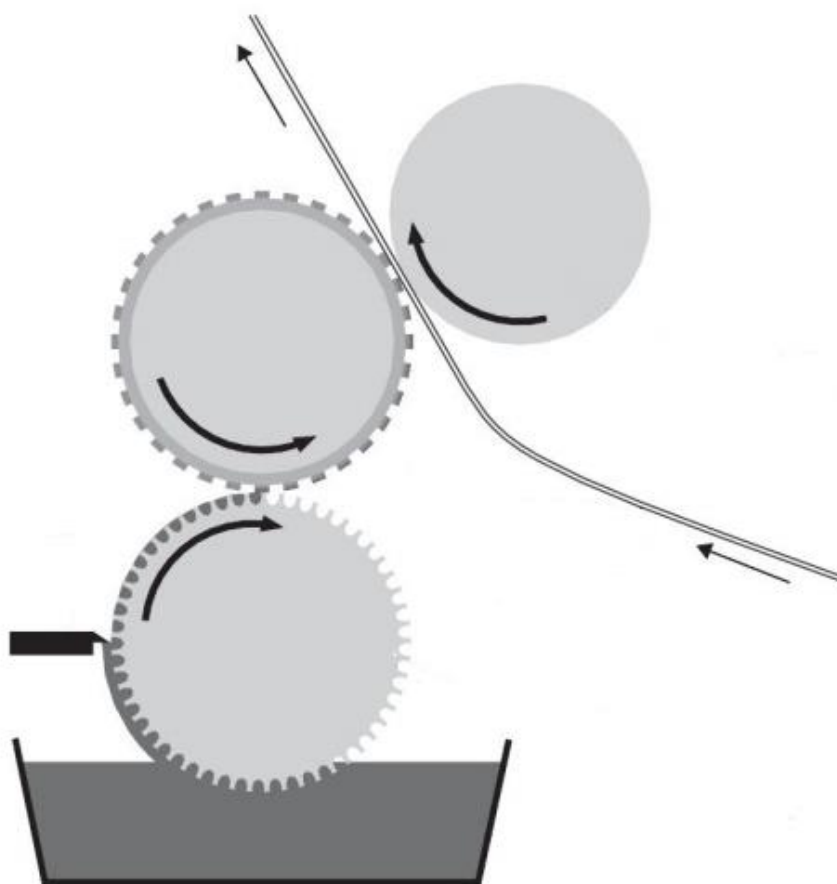
Funkční inkousty se skládají ze dvou složek, kapalně a dispergované (rozpuštěné) složky. Kapalná složka určuje základní vlastnosti a umožňuje nám tisk danou metodou, používá se především voda nebo organická rozpouštědla. Její volba závisí na požadované viskozitě inkoustu. Důležité je také povrchové napětí a smáčivost které se odvíjí od použitého substrátu. Zatímco dispergované složky inkoustu dodávají jeho funkční vlastnosti. Dispergované složky se nám mohou vyskytovat ve formě nanočástic a jsou tedy rozptýlené v kapalně složce. Po nanesení inkoustu na substrát a zpracování inkoustu (hlavně teplem – vysušení) dojde k odpaření nosné kapalně složky inkoustu. Následně je třeba provést úpravy výsledné desky, aby se zajistil vzájemný kontakt funkčních částic. Tomu mohou bránit dispergační činidla, která nám zůstávají přítomna v inkoustu. [6][25][26]

K vytvoření vodivých struktur používáme inkoust složený z vodivých nanočástic. Nejčastěji používané jsou stříbrné, především kvůli vysoké vodivosti a odolnosti proti oxidaci. [26] Lze použít i měď, ale ta oxidaci snadněji podléhá.

1.8 Flexografický tisk

Gumotisk neboli flexografický tisk je metoda, která pracuje s tiskovými válci. Metoda se skládá ze tří válců, dávkovací (aniloxový), nanášecí, protitlakový, dále je zde stírací nůž a zásobník inkoustu (viz obr. 13). [27]

Dávkovací válec, jehož povrch je tvořen buňkami různých velikostí a tvarů, schopných absorbovat inkoust, nabírá inkoust ze zásobníku. S přesností se mění počet buněk na centimetr čtvereční až do 20 μm . Potom je za pomoci stíracího nože odstraněno přebytečné množství inkoustu. Následuje přenesení požadovaného množství inkoustu na nanášecí válec s připraveným vzorem. Tento válec je tvořen pružnými destičkami, které tvoří vzor. Ty mohou mít rozlišení až 75 řádků na cm. Aby se zajistil dotyk substrátu a nanášecího válce je naproti němu přes substrát protitlakový válec. Inkousty pro flexografický tisk jsou vyráběny ze suspenzních částic nebo organických materiálů a mají nízkou viskozitu. [27][28]



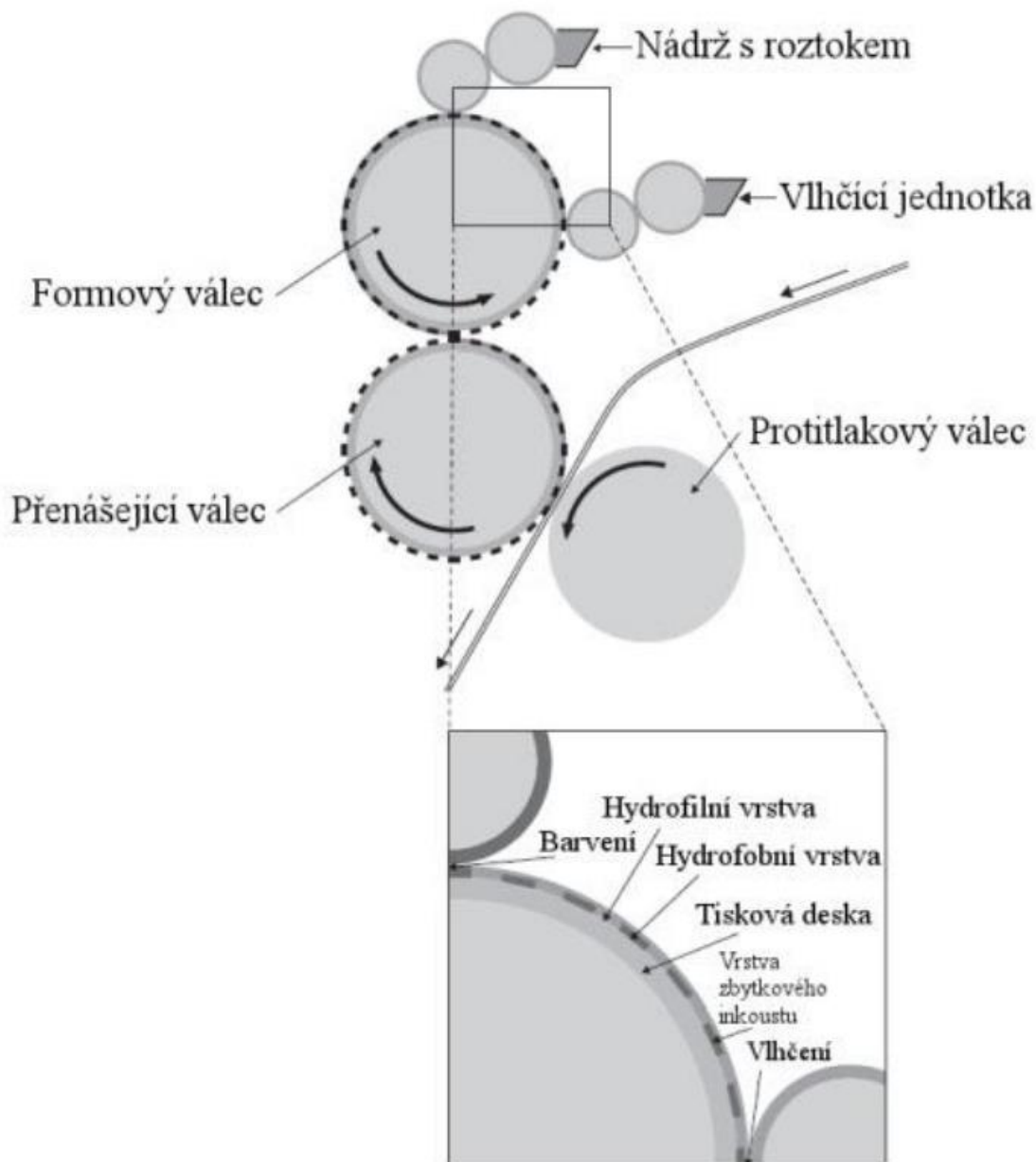
Obr. 13: Princip Flexografického tisku (převzato z [27])

1.9 Ofset

Ofsetový tisk lze rozdělit na dvě metody, suchý a mokrá ofset. Ofsetový tisk je velice přesný a rychlý. Mezi jeho výhody patří také cena a možnost výroby flexibilních solárních panelů. [27][28]

1.9.1 Mokrá ofset

Mokrá neboli klasický ofsetový tisk (viz obr. 14) využívá různorodých fyzikálně-chemických vlastností formy. Ta je z hliníkové desky, na které jsou naneseny 2 vrstvy. První (spodní) vrstva přitahuje vodu (hydrofilní) a druhá (horní) vrstva ji naopak odpuzuje (je hydrofobní). Data nanese laser, ten naruší vrchní vrstvu v místě, kde se nemá tisknout a místa která jsou určena k tisku, zůstávají neporušená. Forma potom prochází vývojkou, kde dojde k vyplavení narušené vrstvy. Kam se roztok nanese a kam ne, záleží tedy pouze na připravené formě. Následně je forma upevněna na formový válec. U formového válce jsou upevněny další 4 válce s roztokem a vodou, které po něm rotují. Z formového válce se barva přenáší na přenášející válec, který se točí synchronně s ním. Zde je roztok již bez vody a je možné jej nanést na substrát. Stejně jako u flexografického tisku se zde nachází i protitlakový válec aby se zajistil dotyk substrátu s přenášejícím válcem. [27][28]



Obr. 14: Princip mokrého ofsetu (převzato z [27])

1.9.2 Suchý ofset

V technologii suchého ofsetu nedisponuje voda, je zde nahrazena vrstvami, které jsou nanesené na tiskové formy a jejichž vlastnosti ji nahradí. Spodní vrstvou je polymer, který přijímá roztok a horní silikonová vrstva roztok nepřijímá. Laser vypálí horní silikonovou vrstvu a odstraní jí, takže dojde k odhalení spodní vrstvy. U této metody je nutný vlastní termoregulační systém, aby se udržela stálá teplota tiskových válců. Kdyby teplota vzrostla, roztok by mohl přilnout na netisknoucí místa a došlo by k špatnému přenosu. Naopak kdyby se teplota příliš snížila, bylo by obtížné roztok nanést. [27]

Suchý ofset se používá především pro nízkonákladové aplikace. Jeho nevýhodou je vytváření malých bílých míst v tištěném obrazu. To je způsobeno odlupováním malých prachových částic z tiskové desky. [27]

2 Flexibilní elektronika a její historie

Začátek vývoje flexibilní elektroniky sahá až do šedesátých let minulého století. Díky myšlence, že cokoliv tenké může být i ohebné byl právě v roce 1960 vyroben první solární článek na flexibilním substrátu. Ten byl vyroben z monokrystalického křemíku a pro zajištění flexibility se použil substrát z tenkého plastu. V osmdesátých letech se začaly pak solární články vyrábět pomocí vakuového napařování. Křemíkový tenkovrstvý tranzistor (TFT) byl poprvé vyroben v roce 1968. TFT je základem většiny displejů a zobrazovacích jednotek. V Japonsku v roce 1980, byl pak poprvé sestaven displej na bázi tekutých krystalů. Nerezové fólie na které se TFT připevňovali se začali vyrábět v roce 1996. V roce 1997 se začaly TFT na substrát nanášet pomocí laserového žihání. Od té doby se flexibilní elektronika velmi rozrostla a to především v odvětví displejů. Začali se objevovat ohebné displeje se substráty z plastových nebo ocelových fólií. [29][30]

Dnes na sebe flexibilní elektronika upozorňuje především nízkou cenou a také mnoha aplikacemi kde se dá využít. Solární panely, antény, ohebné displeje, senzory to vše nám umožňuje flexibilní elektronika. [30]

3 Diskuze

Technologie výroby tištěné elektroniky se stále vyvíjí a sítotisk patří mezi nejstarší a nejuniverzálnější tiskové techniky. Lze tedy předpokládat, že je nejvíce prozkoumán a inovován. Technologie si je velmi podobná se šablonovým tiskem, kde je síto zaměněno za šablonu. Techniky tisku jsou pak velmi podobné nebo totožné. Šablona u šablonového tisku má lepší rozměrovou stabilitu a je přesnější, ale má nižší pružnost. Velkou nevýhodou je že u šablonového tisku nemůžeme tisknout uzavřené obrazce. Obě technologie se využívají pro nanášení tlustých vrstev (řádově desítky μm) a nehodí se pro flexibilní elektroniku. Kvůli náročné přípravě síta nebo šablony se tyto technologie nehodí pro Rapid Prototyping naopak se hodí pro sériovou výrobu.

V tomto směru by se dal systém Aerosol Jet Printing označit jako přesný opak. Ten je díky podpoře navrhování v systému CAD nebo CAM ideální do laboratoří, výzkumných stanic a pro Rapid Prototyping. Technologie ink-jet také disponuje možností rychlé změny návrhu za použití systému CAD a je do jisté míry podobná systému AJP. Systém AJP byl vyvinut poměrně nedávno a bere si tedy z obou technologií to nejlepší. Velkou výhodou oproti sítotisku, šablonovému tisku a ink-jetu je možnost nanášet na nerovný povrch nebo tisknout miniaturní 3D konstrukce.

Dalším důvodem proč sítotisk a šablonový tisk využívat v sériové výrobě je větší rychlost tisku než u AJP a ink-jetu, u nich mohou nastat problémy s ucpáním tiskových trysek nebo zaschnutí inkoustu v tiskové hlavě. U sítotisku a šablonového tisku je třeba, aby se připravilo větší množství inkoustu, než kolik se nanese, materiál který zůstane v sítu nebo na třece, nejde recyklovat. Technologie AJP a ink-jet jsou ekonomičtější, stačí připravit jen takové množství inkoustu, které bude naneseno.

Nejjednodušší technikou pro přenos pasty je dispensing plnými jehlami, kde se jehla namočí v pastě a následně dotykem přenesení na substrát. Díky možnosti použití více jehel najednou a nanést tak pastu na celý substrát naráz se tato technologie hodí pro sériovou výrobu. Dispensing dutými jehlami je dosti podobný, akorát místo namáčení a přenášení pasty jehlami je zde pasta vytlačována srze jehly ze zásobníku. Proces lze ještě urychlit použitím více jehel naráz, stačí tak pohyb zařízení pouze po ose z. Aby se proces ještě urychlil, používá se bezkontaktní dispensing kde pasta jen kape na substrát. Díky jednoduchosti a rychlosti lze tyto technologie dobře uplatnit v sériové výrobě. Nejčastěji se využívají pro nanášení past a lepidel.

Vakuové naprašování se využívá k nanášení tenkých vrstev. Má výhody jako např. vyšší rychlost depozice nebo možnost nanášet téměř všechny termálně stabilní látky. Technologie je složitá a náročná na čistotu prostředí. Naprašování a napařování probíhá ve vakuu. Technologie mají své uplatnění v mnoha odvětvích. Tenké vrstvy mají v elektrotechnice široké využití. Pomocí nich je možné vyrábět vodivé cesty, rezistory, kondenzátory nebo cívky. Lze také nanést kontakty na polovodivé čipy.

Ofsetový tisk je jedna z nejrozšířenějších metod tisku. Nanáší tenké vrstvy a hodí se tak pro výrobu flexibilní elektroniky, např. flexibilních solárních článků. Flexografický tisk

je podobný a v současné době je kvalita potisku lepší než u ofsetové tisku. Stejně jako ofsetový tisk nanáší tenké vrstvy. Ofsetový tisk lze rozdělit na dvě metody suchý a mokry. U suchého ofsetu ale dochází k tvoření malých bílých míst v tiskovém obrazu. Může za to odlupování prachových částic z pomezí tisknoucích a netisknoucích prvků. Flexografický tisk i ofsetový tisk jsou vhodné pro sériovou výrobu.

Závěr

V bakalářské práci jsem se seznámil s aditivními technologiemi pro výrobu tištěné elektroniky a s jejich možnostmi využití.

Popsal jsem technologie jako napařování a naprašování, které umožňují nanášet tenké vrstvy po celém substrátu naráz. Je možné nanášet téměř všechny termálně stabilní látky a díky proudu a napětí je snadno regulovatelné. Technologie je vhodná například na pokovení substrátu.

Další technologie které jsme v práci popsal jsou sítotisk a šablonový tisk. Zde se využívá třerky k rozetření a protlačení nanášeného materiálu skrz předem připravené síto či šablonu na materiál. Tyto technologie umožňují nanášet materiál v požadovaném vzoru. Jsou to staré technologie a nanášejí tlusté vrstvy.

Flexografický tisk a ofsetový tisk jsou v tomto směru podobné. Inkoust je u nich nanášen nejdříve do folie se vzorem a následně tisknut na substrát. Oproti předchozím dvou metodám nanášejí teké vrstvy a lze je tak využívat pro výrobu flexibilní elektroniky.

Dispensing začal bodovým nanášením dutými jehlami a byl nadále zdokonalován přes duté jehly až na bezkontaktní a 3D dispensing.

Bezkontaktní dispensing je dost podobný metodě DOD pro technologii ink-jet. Zde inkoust kape na substrát. Ink-jet má ještě druhou metodu CIJ, kde jsou kapky inkoustu směřovány vychylovacím destičkami na svou pozici.

Nejdokonalejší technologií je v dnešní době technologie AJP. Která kombinuje to nejlepší z jiných technologií. Využívá řízeného tryskání aerosolu a může tak tisknout na rovné, nerovné povrchy nebo tvořit miniaturní 3D objekty. Jeho nespornou výhodou je možnost vytvoření návrhu v systému CAD. Nevýhodou pak velká cena a zatím malá užitkovost v sériové výrobě.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] D. Redinger, S. Molesa, S. Yin, R. Farschi, and V. Subramanian, “An ink-jet-deposited passive component process for RFID,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 51, no. 12, pp. 1978–1983, 2004.
- [2] M. Jung, J. Kim, J. Noh, N. Lim, C. Lim, G. Lee, J. Kim, H. Kang, K. Jung, A. D. Leonard, J. M. Tour, and G. Cho, “All-Printed and roll-to-roll-printable 13.56-MHz-operated 1-bit RF tag on plastic foils,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 3, pp.571–580, 2010.
- [3] HU, Jupiter. Overview of Flexible Electronics from ITRI’s Viewpoint [online]. Taiwan, 2010,[cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://80.ieeexplore.ieee.org.dialog.cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5469608&tag=1>
- [4] KATSUAKI SUGANUMA. Introduction to Printed Electronics. Imprint: Springer, 2014. ISBN 9781461496250
- [5] Mach, P.; Skočil, V.; Urbánek, J.; *Montáž v elektrotechnice*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001
- [6] LEVORA, Jakub. Tištěné senzory plynů. Plzeň, 2015. Bakalářská práce.
- [7] PANDIARAJAN, Ganesh, Satyanarayan Satya IYER, Gurudutt CHENNAGIRI, Ross HAVENS a Krishnaswami Hari SRIHARI. Effect of pad design (SMD/NSMD), via-in-pad, and reflow profile parameters on voiding during the lead-free solder bumping process [online]. 2013, s. 1777–1782. ISSN 05695503. [cit. 2017-5-20] Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2013.6575816
- [8] HLÍNA, Jiří. Aditivní metody vvytváření vodivých obrazců na substráty pro senzorické aplikace. Plzeň, 2013. Bakalářská práce.
- [9] Sítotiskové rámy a síťovina. In: THOMA, Patrik. *Svět tisku* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1717
- [10] Napínání sítotiskových rámců. In: THOMA, Patrik. *Svět tisku* [online]. [cit. 2017-5-20]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1872
- [11] Skočil, V.: Diferenciace, Z prezentace předmětu KET/Technologie elektroniky, Plzeň: Západočeská univerzita
- [12] Sítotiskové těrky. In: THOMA, Patrik. *Svět tisku* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=2114
- [13] Naprašování tenkých vrstev. In: [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>
- [14] Iontové, reaktivní, magnetronové naprašování. In: [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/04_naprasovani.pdf?redirected
- [15] Fyzikální metody nanášení tenkých vrstev. In: [online]. [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/03_Fyzikalni_metody_nanaseni_tenkych_vrstev.pdf?redirected
- [16] Vakuová depozice materiálů - naprašování. In: LIBICH, Jiří. [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/vak/VRSTVY/FLASH_LIBICH.pdf
- [17] Neotech-amt.com, [32] [online]. [cit. 2017-06-2]. Dostupné z: http://www.neotech-amt.com/wp-content/uploads/2014/03/DS_PJ15X.pdf
- [18] Vyvoj.hw. *Aerosol Jet printing aneb když tranzistor prochází tryskou* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz->

- [tranzistor-prochazi-tryskou.html](#)
- [19] OPTOMECC. *Aerosol Jet*® Printed Electronics Overview [online]. ©2014. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_Printed_Electronics_Overview_whitepaper.pdf
- [20] NAVRÁTIL, Jiří (ed.). Možnosti systému Aerosol Jet®. In: FÍRT, Jaroslav. *Elektrotechnika a informatika 2015: Sborník konference*. První. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015, s. 87-90. ISBN 978-80-261-0514-5.
- [21] Radek Soukup and others, 'A Comparison of the Interdigital Electrodes Prepared by Aerosol Jet Printing and Lift-off Technique', in *2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* (IEEE, 2015), 2015–SEPT, 30–35 [online] [cit. 2017-5-20] Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ISSE.2015.7247956>.
- [22] YONG-HOON KIM, KWANG-HO KIM, MIN SUK OH, HYUN JAE KIM, JEONG IN HAN, MIN-KOO HAN a SUNG KYU PARK. Ink-Jet-Printed Zinc–Tin–Oxide Thin-Film Transistors and Circuits With Rapid Thermal Annealing Process. *IEEE Electron Device Letters* [online]. 2010, roč. 31, č. 8, s. 836–838. ISSN 0741-3106. [cit. 2017-5-20] Dostupné z: [doi:10.1109/LED.2010.2051404](https://doi.org/10.1109/LED.2010.2051404)
- [23] KO, Seung Hwan, Jaewon CHUNG, Heng PAN, Costas P. GRIGOROPOULOS a Dimos POULIKAKOS. Fabrication of multilayer passive and active electric components on polymer using inkjet printing and low temperature laser processing. *Sensors and Actuators, A: Physical* [online]. 2007, roč. 134, č. 1, s. 161–168. ISSN 09244247. [cit. 2017-5-20] Dostupné z: [doi:10.1016/j.sna.2006.04.036](https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.04.036)
- [24] PARK, Es. Application of Inkjet-Printing Technology to Micro-Electro-Mechanical Systems [online]. 2013, s. 102. [cit. 2017-5-20] Dostupné z: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Application+of+Inkjet-Printing+Technology+to+Micro+Electro-Mechanical+Systems#0>
- [25] LIIMATTA, Toni. Inkjet Printing in Manufacturing of Stretchable Interconnects [online]. 2014, č. October, s. 1–85. [cit. 2017-5-20] Dostupné z: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/22074>
- [26] DERBY, Brian. Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution. *Annual Review of Materials Research* [online]. 2010, roč. 40, č. 1, s. 395–414. ISSN 1531-7331. [cit. 2017-5-20] Dostupné z: [doi:10.1146/annurev-matsci-070909-104502](https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104502)
- [27] HORMADALY, Jacob.;PRUDENYIATI, Maria. Printed films: Materials science and applications in sensors, electronics and photonics. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 26.
- [28] BARBONELOVA, Angelina. Experiments on Printed Intelligence and Its Applications. Helsinki, 2015.
- [29] WONG, William S a Alberto SALLES. Flexible electronics: materials and applications [online]. New York: Springer, 2009, xviii, 462 p. [cit. 2017-05-29]. ISBN 978-038-7743-639. Dostupné z: <https://erdinckuruoglu.files.wordpress.com/2011/03/flexible-electronics.pdf>
- [30] LI, Zhuo, Rongwei ZHANG, Kyoung-Sik MOON, Yan LIU, Kristen HANSEN, Taoran LE a C. P. WONG. Highly Conductive, Flexible, Polyurethane-Based Adhesives for Flexible and Printed Electronics. *Advanced Functional Materials*. 2013-03-20, vol. 23, issue 11, s. 1459-1465. DOI: 10.1002/adfm.201202249. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adfm.201202249>

