

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Přehled dielektrických, polovodivých a jiných  
speciálních funkčních inkoustů pro systém aerosol jet  
printing**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin ŠKUBAL**  
Osobní číslo: **E13B0149P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Přehled dielektrických, polovodivých a jiných speciálních  
funkčních inkoustů pro systém aerosol jet printing**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Seznamte se s technologií aerosol jet printing.
2. Popište důležité parametry pro inkousty použitelné v této technologii.
3. Zpracujte podrobný přehled inkoustů, srovnání jejich parametrů a ceny.
4. Diskutujte možnosti využití těchto inkoustů.


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. 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
2. Jeffrey G. Tait, Ewelina Witkowska, Masaya Hirade, Tung-Huei Ke, Pawel E. Malinowski, Soeren Steudel, Chihaya Adachi, Paul Heremans, Uniform Aerosol Jet printed polymer lines with 30 μm width for 140 ppi resolution RGB organic light emitting diodes, Organic Electronics, Volume 22, July 2015, Pages 40-43, ISSN 1566-1199,  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.orgel.2015.03.034>.
3. Datasheety výrobců (NeXolve, DuPont, Brewer Science atd.)

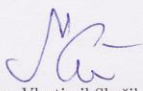
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Navrátil  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis technologie Aerosol Jet®, její výhody, vhodná užití a dielektrické, polovodivé a další speciální inkousty. V první části jsou rozebrány jednotlivé kroky v procesu, výhody, vhodné užití a experimenty provedené za pomoci této technologie. V druhé části jsou zmíněny hlavní vlastnosti inkoustů. Třetí část obsahuje přehled dielektrických, polovodivých a dalších speciálních inkoustů a jejich parametrů.

## **Klíčová slova**

Aerosol Jet, tisk elektroniky, dielektrický inkoust, polovodivý inkoust, viskozita

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on description of Aerosol Jet® technology, its advantages, commercial usage and dielectric, semiconducting and special inks. In the first part is described each step during the process, advantages, commercial usage and experiments done by using this technology. In the second part are main properties of inks. In the third part is survey of different dielectric, semiconducting and special inks and their properties.

## **Key words**

Aerosol Jet, printing of electronics, dielectric ink, semi conductive ink, viscosity

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/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 2.6.2016

Martin Škubal

## **Poděkování**

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

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TECHNOLOGIE AEROSOL JET®</b> .....	<b>11</b>
1.1 PRINCIP FUNKCE.....	12
1.1.1 Jednotlivé kroky tisku.....	12
1.1.2 Možná vylepšení.....	14
1.2 VÝHODY AEROSOL JET SYSTÉMU.....	14
1.2.1 Výrobní flexibilita.....	15
1.2.2 Úspora času a zvýšená výrobní rozmanitost.....	15
1.2.3 Nízké náklady.....	15
1.2.4 Zelená technologie.....	15
1.2.5 Velikost tisku.....	16
1.2.6 Velké množství substrátů.....	16
1.2.7 Velké množství inkoustů.....	16
1.3 KVALITA NANÁŠENÍ.....	17
1.4 EXPERIMENTY SE SYSTÉMEM AEROSOL JET®.....	18
1.4.1 Tisk obvodové desky.....	18
1.4.2 Perspektivní metody vytvoření vodivých cest pomocí Aerosol Jet technologie . <i>Chyba! Záložka není definována.</i>	
1.5 KOMERČNÍ VYUŽITÍ.....	20
1.5.1 Efektivnější solární články.....	20
1.5.2 Uhlíkové nanotrubicové tranzistory.....	21
1.5.3 Tištěné antény.....	22
1.5.4 Tištěné senzory na nerovných plochách.....	23
<b>2 HLAVNÍ VLASTNOSTI INKOUSTŮ</b> .....	<b>23</b>
2.1 DĚLENÍ INKOUSTŮ PODLE UŽITÍ.....	25
<b>3 PŘEHLED DIELEKTRICKÝCH INKOUSTŮ</b> .....	<b>27</b>
3.1 PŘEHLED POLOVODIVÝCH INKOUSTŮ.....	27
3.2 PŘEHLED SPECIÁLNÍCH INKOUSTŮ.....	27
<b>4 DISKUZE</b> .....	<b>27</b>
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>28</b>
<b>6 ZDROJE</b> .....	<b>29</b>
<b>7 PŘÍLOHY</b> .....	<b>30</b>



## Úvod

Tato práce je rozdělena do tří částí. První se věnuje popisu technologie Aerosol Jet. Jsi zde rozebrány jednotlivé kroky tisku, kterými inkoust prochází jako je bubbler, atomizér, shutter až po finální nanesení na substrát. Dále jsou zde zmíněny některé výhody spojené s využíváním Aerosol Jet printingu. Jednou z nich je výrobní flexibilita, nízké výrobní náklady a stí související úspora času při výrobě. Jsou zde také uvedeny nejrůznější komerční využití, jako jsou tištěné antény nebo senzory.

Další část se věnuje experimentům, které byly s touto technologií již provedeny a jde především o tisk vodivých cest se změřením na jejich vlastnosti a tisk na 3D objekty.

Ve třetí části jsou zmíněné důležité vlastnosti pro inkousty jako viskozita, velikost částic a rozpouštědlo. Je zde uvedeno hlavní rozdělení inkoustů do skupin. Jsou kovové, nekovové, nekovové vodivé, dielektrické a adhezivní, polovodičové a speciální funkční.

Závěrečný přehled shrnuje dielektrické, polovodivé a speciální funkční inkousty, které jsou vhodné pro Aerosol Jet. Každý inkoust uvedený v tabulce je popsán jednotlivými technickými parametry od výrobce.

## **Seznam symbolů a zkratek**

3D	trojdimenzionální
CAD	computer aided design
DNA	deoxyribonukleová kyselina
GPS	global positioning system
IDE	interdigitální elektrody
ISE	inputu solární energie
LED	light emitting diode
LTE	long term evoluition
MHz	megahertz
Mikron	mikrometr (jednota užívaná v USA)
mm	milimetr
mPa·s	milipascal sekunda
mW	miliwatt
nm	nanometr
μm	mikrometr
PEDOT:PSS	poly(3,4-ethylendioxythiofen) polystyren-sulfonát
PET	polyethylentereftalát
Pick and place	system osazování
SU-8	druh fotorezistu
SWCNT	single wall carbon nanotube
MWCNT	multi wall carbon nanotube
UV	ultra fialové záření
WiFi	wireless fidelity
Wt%	hmotnostní procento
°C	stupeň Celsia

## 1 Technologie Aerosol Jet®

Aerosol-jet technologie je bezkontaktní aditivní metoda nanášení materiálu na substrát využívající aerodynamické usměrňování funkčních inkoustů ve formě aerosolu. V současné době je tato technologie vyráběná pouze společností Optomec, která sídlí v USA.[1]

Aerosol Jet® je řešení nanášení materiálu, užívané k přímému tisku elektronických obvodů a komponentů na substráty za nízké teploty. Tato průlomová technologie je vznikající náhradou za tradiční silnovrstvé procesy jako jsou například sítotisk, fotolitografie a mikrodispensing. Zároveň zvládne mnohem více než technologie ink-jet.[2]

Jedná se o aditivní, selektivní, depoziční techniku, která umožňuje miniaturizaci elektronických systémů, realizaci jemných vodivých motivů a integraci pasivních součástek bez nutnosti přípravy masek a filmových předloh. Patentované řešení selektivní depozice, které je zcela odlišné od principu inkoustové tiskárny, využívá aerodynamického proudu nosného plynu pro soustředění aerosolu deponovaného materiálu na přesně definovanou plochu substrátu.[3]

Proces Aerosol Jet® byl původně vyvinut k zaplnění opomíjené mezery při zpracování mikroelektroniky. Současné technologie zpracování vytváří velmi malé elektronické prvky např. napařováním a větší součástky pomocí metody sítotisku. Žádná z těchto užívaných technologií nebyla schopna uspokojivě vytvořit spoje, komponenty a zařízení v potřebné mikro velikosti (10-100 $\mu$ m). S postupným zmenšováním elektronických zařízení se sítotisk blíží ke svým fyzickým možnostem šablonového tisku. Tenkovrstvé technologie mohou nanášet prvky v požadovaném mikro měřítku, ale vyžadují velmi zkušený personál a vysoké kapitálové investice do nových zpracování pro každou novou aplikaci. Obě technologie jak silno- tak tenkovrstvé jsou 2D procesy a nejsou příliš vhodné pro zpracování přesné a precizní 3D elektroniky.[1]

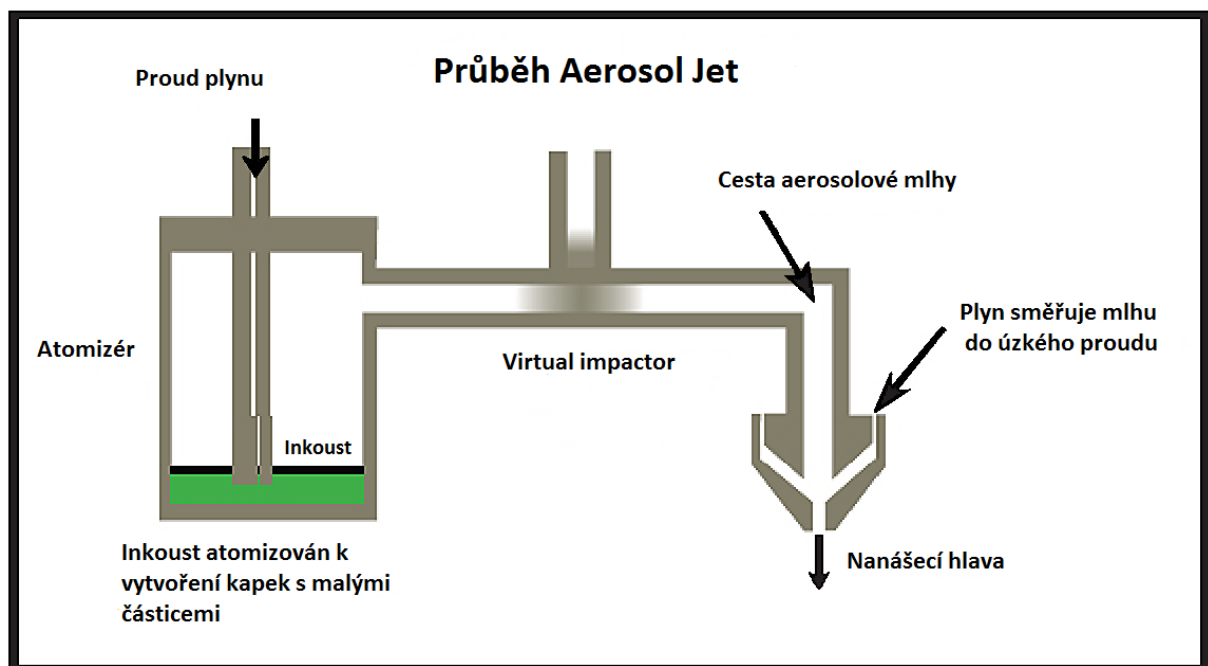
Technologie umožňuje počítačem podporované navrhování designu motivů (systémy CAD/CAM), což slouží k rychlé změně tiskového motivu. Výhodou oproti sítotisku a ink-jetu je tisknutí nejen na planární (rovinné), ale také na nerovné substráty. Větší odstup tiskové

hlavy od substrátu (řádově milimetry) umožňuje nanášení na zakřivené plochy, do tzv. „průchodů“ nebo do „kanálek“. [2]

## 1.1 Princip funkce

Technologie Aerosol Jet® využívá aerodynamické zaměřování k přesnému nanášení elektrických inkoustů na substrát. Tento inkoust je prvně umístěn do zařízení zvaného atomizér, který z něj vytvoří hustou mlhu složenou z kapek o průměru 2-5 mikronů.

Tato aerosolová mlha je poté vedena do nanášecí hlavy, kam je vedena nosným plynem, který jí obklopuje v kruhovém prstenci. Když tento nosný plyn společně s aerosolovou mlhou projdou skrz profilované trysky, zrychlí a aerosol se soustředí do úzkého proudu kapek plujících v nosném plynu. Nosný plyn také slouží jako izolátor trysky a procházejícího inkoustu, aby nedošlo k jejímu zanesení. Výsledný urychlený proud částic inkoustu zůstává stabilní při cestě z trysky na substrát, který je vzdálený 2-5 mm a zachovává si rozlišení i na nerovnoměrných a 3D substrátech.[4]



Obr.1.1 : Schéma systému Aerosol Jet® (převzato a upraveno z [5])

### 1.1.1 Jednotlivé kroky tisku

První částí systému je bubbler. Jeho účelem je napomoci tvorbě aerosolu v atomizéru přinesením kapiček rozpouštědla do inkoustu. Bubbler tedy musí obsahovat látku, ve které se inkoust bude moci rozpustit. Může to být voda, isopropyl, alkohol, aceton a jiné.[4]

Další část procesu tisknutí se nazývá atomizér. Tato součást může být dvojího typu

pneumatický nebo ultrazvukový. Pneumatický atomizér vyrábí aerosol rozbíjením inkoustu o stěnu nádoby. Je vhodný pro inkousty větších viskozit (1-1000 mPas), ale inkoustu je potřeba nejméně 30 ml. Je možné jej promíchávat a vyhřívat.[4] V pneumatickém atomizéru je inkoust vysokou rychlostí vytlačen z trysky a vystřelen do jeho bočních stěn. Proud inkoustu se rozbije o stěnu na miniaturní kapičky, které jsou unášeny proudem plynu do tiskové hlavy. Pokud jsou kapičky moc velké, spadnou zpátky do zásobníku inkoustu a jsou znovu tryskou vystřeleny proti stěně. [2]

Ultrazvukový atomizér vyrábí aerosol rozbíjením inkoustu ultrazvukovými vlnami. Na rozdíl od pneumatického atomizéru vytváří pouze slabý a pomalý proud. Přestřík je v podstatě eliminován, což vede, na výraznou úsporu materiálu a k menšímu znečištění vzduchu. Rychlost, jakou je inkoust atomizován závisí v rámci mezí výhradně na amplitudě a frekvenci, která je puštěna na povrch látky. Obecně platí, že čím větší frekvence, tím menší schopnost zpracování. Množství atomizovaného materiálu může být maximálně do 2  $\mu\text{l}/\text{sec}$ , neboť kapky stékají dolů za malé rychlosti pouze pod vlivem gravitace, pokud není v zařízení rovněž nízkotlaká měřicí pumpa.[6] U ultrazvukového atomizéru je inkoust umístěn v nádobě ponořené ve vodě nad piezoelektrickým převodníkem. Tento převodník generuje vlny o vysoké frekvenci, které se díky vodě přenáší na nádobu s inkoustem.[2]

Tento atomizér je vhodný především pro inkousty menších viskozit (1-5 mPas) a díky malé rychlosti zpracování je potřeba pouze 1 ml inkoustu.[7]

Z atomizéru přijde aerosol do zařízení nazývané virtual impactor. Toto zařízení odtahuje přebytečný nosný plyn, tedy dusík, a příliš velké částice inkoustu a dělá tak vycházející aerosol homogennějším.[4]

Dále se aerosol dostává do tiskové hlavy, na které se nachází tryska. Jde o trysku, ze které vychází proud aerosolu fokusovaného dusíkem. Hroty jsou keramické či ocelové a jsou k dispozici od velmi tenkých pro jemné motivy až po silné pro pokrývání ploch.[4]

Nosný plyn zde stlačí aerosolovou mlhu do centrální linky a dále jí tlačí do zaostřovací trysky, která kolimuje aerosol do přesného paprsku materiálu, který je široký pouze 10 mikronů. Kontinuální množství kapek pak opouští trysku při rychlosti až 70 m/s. [8]

Jako poslední přichází aerosol do tiskového zařízení zvaného shutter. Jedná se o mechanické zařízení, které velmi rychle zastavuje tok aerosolu na substrát a to tak, že se přesune pod špičku trysky. Toto tzv. stavítko umožňuje bezprostřední přerušování tisku u nespojitých motivů a ukládání přebytečného materiálu v případě přemístování trysky na jinou pozici. Při využití širokých trysek má shutter jiný tvar a je odsávaný, aby se v něm nehromadil přebytečný materiál. [4]

Nanesení aerosolu na požadované místo můžeme docílit dvěma způsoby. První způsob je pevné ukotvení substrátu k pohyblivé desce, jejíž poloha je ovládána pomocí počítače. Mění se jen poloha desky, na které je substrát, zatímco tisková hlava je při tisku ve stálé poloze. Druhou možností je ukotvení substrátu k nepohyblivé desce, zatímco tisková hlava se pohybuje podle předem vytvořeného programu v počítači.[1]

### **1.1.2 Možná vylepšení**

#### **Zvýšený rozsah tisku**

Původní cíle k tisknutí pomocí technologie Aerosol Jet byly mezi hodnotami 10-100  $\mu\text{m}$  šířkou linky. Od té doby došlo k rozvoji této technologie a bylo dosaženo hodnot menších než 10  $\mu\text{m}$ . Byly vyvinuté nové širokopásmové tiskové hlavy na stejném proudovém principu, které mohou tisknout objekty větší než 3mm. Dohromady je demonstrován operační rozsah technologie Aerosol Jet printing tisícinásobný. [3]

#### **Multiplexing pro výrobu**

Toho bylo dosaženo přidáním více trysek na tiskové hlavy nebo přidáním více tiskových hlav do systému. Technologie Aerosol Jet je k dispozici v konfiguracích na klíč nebo jako modulární tiskový stroj, který může být integrován do automatizačních platforem pro aplikace s velkým objemem výroby. Modulární architektura je škálovatelná a je navržena tak, aby umožnila rychlou výměnu Aerosol Jet Print kazet z tiskových hlav na běžné čištění a doplnění inkoustů.[3]

## **1.2 Výhody Aerosol Jet systému**

V posledních letech se nové techniky zpracování stávají stále dostupnějšími, což nabízí značné výhody a to především v oblasti ceny, času a kvality skrz celé spektrum odvětví.

Tyto nové technologie jsou obecně známé jako aditivní zpracování. Během těchto aditivních procesů je materiál nanášen vrstvu po vrstvě k vytvoření struktury nebo určité vlastnosti. Toto je hlavní rozdíl oproti tradičním technologiím zpracování, při kterých je krytí a leptání použito pro odstranění materiálu a utvoření konečné formy. Výhody aditivních procesů zahrnují přímé zpracování pomocí programu CAD a to konkrétně díky toolboxu Optomec VMTools, který eliminuje drahé nástroje, masky, a vertikální / horizontální integrace, což vede ke snížení počtu celkových výrobních kroků.[2][7]

### **1.2.1 Výrobní flexibilita**

Tato výhoda nabízí především potenciál pro revoluční nové koncové produkty se zlepšeným výkonem založeném na nové velikosti, tvarování včetně 3D spojování, užitých materiálech a jejich kombinaci.[2]

### **1.2.2 Úspora času a zvýšená výrobní rozmanitost**

Tato výhoda souvisí především s tím, že díky užití CAD systému a nulovou potřebou strojů dochází k výraznému urychlení vývoje a výroby produktu a také ke zlepšení výrobní rozmanitosti. Aktivní i pasivní komponenty stejně jako nejrůznější propojení mohou být vytištěny přímo s Aerosol Jet nástrojem a tím umožnit bezchybné integrované zpracování pro elektronické systémy. [2]

### **1.2.3 Nízké náklady**

Tato výhoda vzniká, protože všechny náklady na nástroje a masky jsou eliminovány, což umožňuje cenově výhodné zpracování i s nízkým objemem výroby. Procesní náklady, pokud jde o vstupní operátory, komplexitu dodavatelského řetězce a pracovní postupy, jsou sníženy také.[2]

### **1.2.4 Zelená technologie**

Aerosol Jet proces využívá hrubý materiál efektivněji než tradiční metody, čímž sám o sobě redukuje množství odpadu. Žíravé chemikálie, které se typicky využívají u substraktivních procesů, zpracování nejsou u technologie Aerosol Jet vyžadované.

Nanášení během tohoto procesu je velmi precizní, a tak dochází k minimálním ztrátám a zároveň i ke snížení množství použitého materiálu.[2]

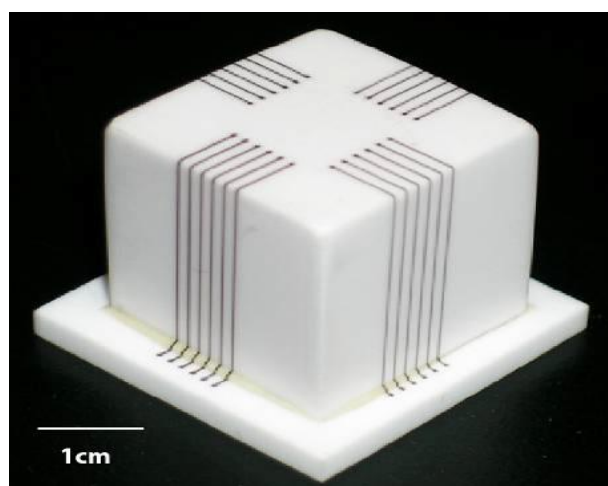
### 1.2.5 Velikost tisku

Velkou předností zařízení Aerosol Jet je jeho schopnost vytvářet velmi jemné motivy s šířkou dráhy od 8 $\mu$ m. Tloušťka takto natištěného motivu se poté pohybuje v rozmezí 0,1-5 $\mu$ m. Aby nedošlo k poškození naneseného inkoustu, je blízko tiskové hlavy je také umístěn 700 mW laser s vlnovou délkou 830 nm, který pracuje v kontinuálním režimu a slouží pro selektivní vytvrzování inkoustů. Je-li laser využíván pro sintrování, bude obsluha před laserovým paprskem chráněna speciálním sklem ve výplních dvířek. [1][4]

### 1.2.6 Velké množství substrátů

Tato technologie umožňuje tisk propojení jak na 2D tak i na 3D substráty. Pro 2D aplikaci vícevrstvého propojení může být vytvořeno tiskem dielektrických materiálů na obvod přejetím bodů. V podstatě emuluje vícevrstvou obvodovou desku, ale v jedné vrstvě. Toho lze dosáhnout díky tomu, že systém Aerosol Jet podporuje širokou škálu dávkovačů inkoustu, což umožňuje výměnu nebo smíchání materiálů během tisku.[3]

System Aerosol Jet rovněž umožňuje tisk přesných propojení na 3D povrchy, což odstraňuje potřebu ohýbání drátů. Například pro výrobu LED čipu. [3]



Obr.1.2 3D propojení pomocí stříbra na hliníkové krychli (převzato z [3])

### 1.2.7 Velké množství inkoustů

Pro zařízení je vhodné široké spektrum inkoustů či tekutých látek. Významnými atributy vhodného inkoustu jsou velikost částic (nejedná-li se o roztok ale suspenzi) a viskozita. Ideální velikost částic v suspenzi je do 100 nm, ideální viskozita 1 až 1000 mPa·s. Technologie nemá striktní požadavky na viskozitu inkoustu, avšak záleží na použitém



atomizéru k vytváření aerosolu. Ultrazvukový atomizér je vhodný pro menší viskozitu 1 – 5 pneumatický pak pro viskozitu 1 - 1000. Jako příklady lze uvést vodivé inkousty na principu kovových nanočástic (na bázi mědi, stříbra, zlata, platiny) organické inkousty (PEDOT:PSS, uhlíkové nanotrubic), dielektrické inkousty (polyimid) či další speciální funkční roztoky (iontové kapaliny, enzymy atd.)[1][7]

### **1.3 Kvalita nanášení**

Kvalita nanášení je závislá především na typu užitého inkoustu. Dále pak na kombinaci samotného substrátu a inkoustu a na dalších vlastnostech, jako je například hrubost povrchu. Proces Aerosol Jet nemění chemické ani fyzikální vlastnosti daného materiálu.

V obecných podmínkách může proces Aerosol Jet nanášet s:

- Velikostí až do 10 mikronů s odchylkou +/- 10%
- Velkou přesností umístění +/- 1 mikron opakovaně
- Velmi dobrým rozlišením okrajů
- Velmi vysokou vodivostí díky velkému obsahu kovů
- Jednotnou tloušťkou průchodu od 10nm do 5+ mikronů
- Malou hrubostí povrchu
- Dobrou přilnavostí

System Aerosol Jet spolehlivě tvoří velmi kvalitní obvody daleko za hranicemi technologie tlustých vrstev nebo ink-jet. S většinou materiálů lze tisknout s rozlišením až do 20 $\mu$ m. Pro elektronické prvky na bázi stříbra je tato hodnota dokonce pouhých 10 $\mu$ m s roztečí 20 $\mu$ m.

Tato schopnost nabízí řešení pro produkci menších, vysokovýkonných komponentů tolik potřebných pro aplikaci v odvětvích, které jsou velmi citlivé na velikost jako například bezdrátových a kapesních zařízení, kde se hustota komponentů mění drasticky. Schopnost technologie Aerosol Jet vytvářet jemné prvky s komplexními tvary ve 3D z široké škály materiálu ji dělá vhodnou k vytváření jak pasivních tak i aktivních prvků včetně rezistorů, induktorů, kapacitorů, filtrů, mikroantén, mikrobaterií a senzorů. Celková přesnost a opakovatelnost tohoto procesu je obzvláště důležitá pro požadavky na rychlou výrobu. Ve srovnání se sítotiskem mohou být vestavěné rezistory za pomoci Aerosol Jet vyrobeny menší a s větší přesností, neboť není potřeba laserového ořezávání k dosažení požadovaného odporu. [2]

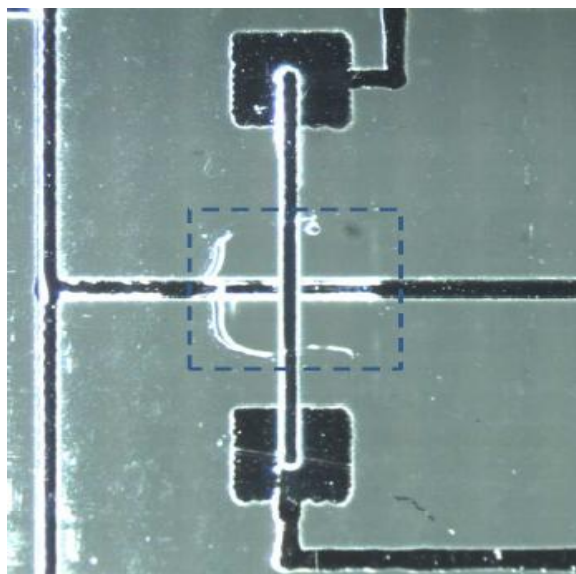
Zlaté a stříbrné inkousty obecně vykazují vodivosti blížíící se objemovým vlastnostem s konvečním sintrováním a 2-3x objem s laserovým sintrováním. Inkousty s malou viskozitou mohou tvořit povrch podobný zrcadlu, zatímco tlustovrstvé inkousty mají mikroskopickou hrubost. Celková přilnavost je vysoce závislá na vzájemné kombinaci substrátu a inkoustu. Například inkousty na bázi zlata přilnou na širokou škálu substrátů včetně skla, keramiky a různých polymerů. Stříbro je více citlivé, ale přesto má také velkou přilnavost na mnoho substrátů. [2]

## **1.4 Experimenty se systémem Aerosol Jet®**

V této kapitole budou popsány různé experimenty, které byly prováděny za pomoci technologie Aerosol Jet. Tyto experimenty sloužily ke zjištění možného užití této technologie v různých odvětvích.

### **1.4.1 Tisk obvodové desky**

Tištěné obvodové desky (PCBs) jsou obvykle zpracovány za použití substraktivní technologie jako je litografie a leptání. Oddělené pasivní a aktivní komponenty jsou nejčastěji připraveny systémem pick and place, a poté jsou spojeny pomocí ohýbání drátů a následným pájením. Tento experiment dokazoval, že přímý tisk může nahradit mnoho tradičních kroků výroby a v důsledku dovolit aby tyto obvody byly zpracovávány na nových substrátech a za použití 3D tisku, především pak systému Aerosol Jet, který by tiskl spojení, pasivní prvky a COTS připravení. Automatická generace tiskových vzorů byla založena na standardním Eagle CAD PCB nákresovém softwaru. Vícevrstvé obvody jsou zpracovány střídavým tiskem kovových drátů a polymerových izolátorů. Pasivní komponenty jako rezistory a kapacitory jsou tisknuty z datové knihovny. Rezistory založené na uhlíku mají rozsah od  $50\Omega$  do  $1M\Omega$  a paralelní desky kondenzátoru od 1pF do 1nF. Aktivní zařízení mohou být zakomponována do obvodu připravením oddělených IC čipů pomocí kovových a adhezivních inkoustů. Teplota během procesu nepřekračuje  $150^{\circ}\text{C}$  při žádném z kroků.[13]



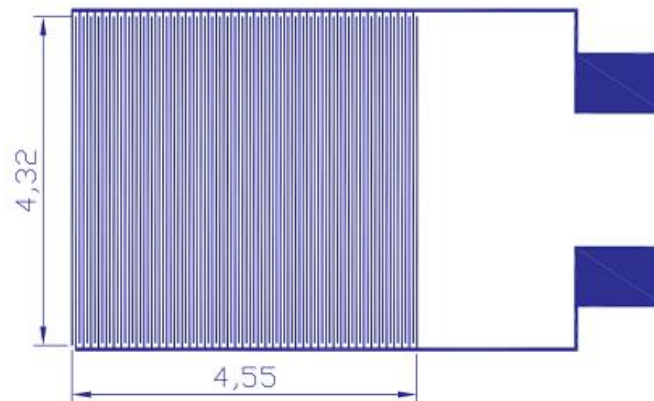
Obr. 1.3 Přechod dvou vodivých oddělených izolantem (převzato z [13])

#### 1.4.2 Srovnání interdigitálních elektrod vytvoření metodou Aerosol Jet a Lift-off

Tento experiment se zaměřil na srovnání kvality a elektrických parametrů interdigitálních elektrod (IDE) vytvořených metodou Aerosol Jet a konvenční technikou lift-off. Interdigitální elektrody patří mezi nejvíce v praxi používané periodické struktury elektrod pro širokou škálu senzorů a převodníků. Testovací prvky IDE byly navrženy s délkou  $25\mu\text{m}$  a šířkou  $25\mu\text{m}$  a aktivní oblastí s rozměry  $4,32 \times 4,55 \text{ mm}$ .

Pro tento experiment byl použit Clariant nanočásticový stříbrný inkoust a Fraunhofer IKTS nanočásticový zlatý inkoust, které byly natištěny na ohebnou PET a Kapton® polyimidovém substrátu pomocí technologie Aerosol Jet. Změřená data všech testovaných subjektů byla porovnána se změřenými daty ze vzorků realizovaných metodou lift-off na hliníkovém substrátu.

Testovací vzorek byl navržen v programu AutoCAD 2015 a upraven pomocí Optomec VMTools do vhodného formátu pro použití Aerosol Jet. Vzorek se skládal ze dvou podložek a interdigitálních elektrod s izolační mezerou.[18]



Obr. 1.4 Návrh IDE testovacího vzorku v programu AutoCAD (velikost v mm)  
(převzato a upraveno z [18])

## 1.5 Komerční využití

Velká část komerční inkoustů už je k dispozici pro konvenční Aerosol Jet zpracování. S každou nově vzniklou technologií, vytváří každá nová aplikace doprovázející příležitosti stanovit optimální materiál k dosažení nejvyššího výkonu výsledného produktu. Tisk pomocí Aerosol Jet nabízí téměř neomezenou škálu možností a jeho jemná kontrola tvarování, velká pracovní vzdálenost a pokročilý rozptyl mohou být využity k vytvoření komponentů nové generace.[9]

Tyto zdroje dovolily vývoj inkoustů a tím rozvoj nových aplikací pro Aerosol Jet, jako jsou piezoelektrické, fotovoltaické, optické, polovodičové, biologické a další pokročilé materiály.[9]

### 1.5.1 Efektivnější solární články

Dokázané využití v blízkém čase pro Aerosol Jet technologii je produkce solárních článků s vysokou účinností. Ve spolupráci se světoznámým Fraunhoferovým institutem solárních systémů (ISE) byl systém firmy Optomec Aerosol Jet použit k výrobě úzkých kolektorových drah na krystalický křemík solárních článků s šířkou pouhých 20 $\mu$ m, což je ve srovnání oproti současným tištěným linkám se šířkou zhruba 100 $\mu$ m. Navíc k redukci stínění díky šířce, vykazuje tvar Aerosol Jet linek také vysokou odrazivost, která se přesouvá do optické šířky, která je menší než 50% její geometrické šířky. Tyto snížení v zastíňovacím efektu společně s využitím vysokovodiivých materiálů vedou ke zvýšení efektivity solárního článku o více než 1% absolutního průměru.[3]

Přesněji uvedeno, užití technologie Aerosol Jet dokázal ISE účinnost článku až 16,7% a faktor naplnění 79% na multikrystalickém křemíkovém solárním článku 15,6cm x 15,6cm a účinnost 18,3% a faktor naplnění 81% na křemíkovém článku s hlinovým zadním povrchem o rozměrech 12,5cm x 12,5 cm. Nejlepší výkony článků přesáhly účinnost 20%.[3]

Navíc se k funkčním plusům řadí také to, že Aerosol Jet je navržen k dramatickému snížení celkových nákladů na pořízení skrz následující zlepšení:

- Snížení spotřebního vybavení
- Snížení spotřeby materiálu - stříbrná pasta
- Snížení spotřeby křemíku - tenčí křemíkové desky
- Zlepšená produkce - méně poruch a vadných výrobků
- Zlepšení doby provozu tiskárny
- 

Ve snaze splnit požadavky rozvíjejícího se solárního systému vyvinula firma Optomec technologii 40-ti tryskovou konfiguraci, která dokáže tisknout články rychlostí 1 článek za 3 sekundy. Dále pak Optomec uzavřel partnerství s přední firmou na poli automatizace za účelem stavby systému, jež je schopen vyrobit přední články v počtu 2400 za hodinu, což je větší než 50MW roční produkce.[3]

### **1.5.2 Uhlíkové nanotrubicové tranzistory**

Tisk tenko vrstevných tranzistorů (TFTs) na ohebné substráty za pokojové teploty nabízí cenově výhodnou cestu jak docílit masové sériové produkce velkoplošných elektrických obvodů bez použití speciálního litografického vybavení. V nedávné době Univerzita v Massachusetts a Brewer Science Inc.. Předvedli uhlíkové nanotrubicové (CNT) TFT na DuPont® Kapton®FPC polyimidovém filmu vytvořené za pomoci Aerosol Jet systému. Byl získán velmi rychlý (5 GHz) TFT s velmi vysokým on-off poměrem přes 100.[3]

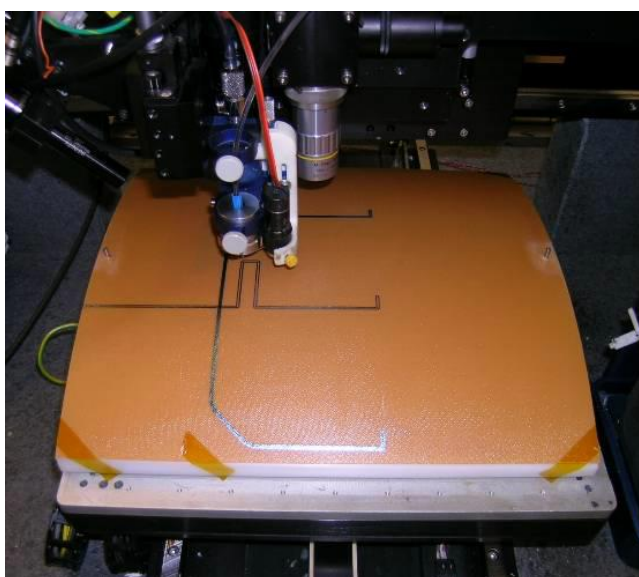
Aerosol Jet tisk ohebných TFTs za pokojové teploty umožňuje tisk na prakticky každý ohebný substrát za malou cenu a je příslibem pro mnoho rozvíjejících se aplikací, jako je například ohebný displej, RFID, elektronický papír a chytrá kůže.[3][12]

### 1.5.3 Tištěné antény

Tradiční přístup k výrobě antény je nejdříve natisknout jednotlivé elementy na Kapton® list (polyimidový list), a poté přilepit tento list na kompozitní vrstvu. Tento způsob není vhodný pro výrobu antén, neboť kovový tisk je možný pouze na rovné povrchy při použití tradičních technologií jako chemické leptání. Navíc tento proces vede k slabé struktuře a ke komplikovanému procesu sestavování díky mnohočetnému spojování. Proces Aerosol Jet poskytl řešení ke všem výše zmíněným problémům. Se systémem Aerosol Jet mohou být vodivé cesty natištěny přímo na zakřivený povrch. To urychluje a zjednodušuje montážní proces tím, že je odstraněno přebytečné spojování a problémy se sesazováním.[3][10][11]

Na základě technologie Aerosol Jet jsou antény tisknuty za použití vodivého nanočásticového stříbrného inkoustu. Během tisku je přesně kontrolována pozice, geometrie a tloušťka naneseného materiálu, aby vytvořil hladký povrch k zajištění optimálního výkonu antény.[10]

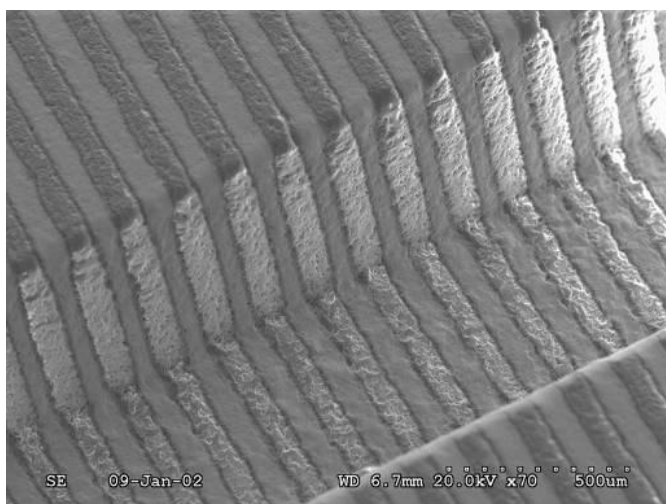
Mobilní zařízení obsahující anténu LTE, NFC, GPS, WiFi, Wlan a BT byly vytištěny pomocí Aerosol Jet a nezávisle testovány hlavními dodavateli součástek pro mobilní zařízení. Změřené výkony antén byly srovnatelné s ostatními výrobními metodami. Proces tisku Aerosol Jet je škálovatelný a je možné tisknout až 4 antény simultánně na jednom přístroji.[10]



Obr. 1.5 Aerosol Jet systém tiskne anténu na zakřivený povrch (převzato z [3])

#### 1.5.4 Tištěné senzory na nerovných plochách

Aerosol Jet umí přesně nanášet materiály jak na rovinné tak i zakřivené. Tato unikátní vlastnost jej činí ideálním řešením pro tištěné senzory, které mohou být integrovány do specifických vojenských aplikací. Je to umožněno relativně velkou (1 až 5mm) vzdáleností depoziční hlavy a substrátu. Dále také dlouhou ohniskovou vzdáleností paprsku nanášeného materiálu vylétávajícího z trysky. Není zde žádný fyzický kontakt mezi substrátem a přístrojem (kromě proudu nanášeného materiálu), a proto lze snadno dosáhnout kvalitního tisku. Toto umožňuje vytvoření 3D konformních prvků na tvarovaných dílech, dále nanášení materiálu do prohlubní nebo přes schody a kontury.



Obr. 1.6 Tisk stříbrných linek 60 $\mu$ m přes žlábek široký 500 $\mu$ m (převzato z [3])

## 2 Hlavní vlastnosti inkoustů

Aerosol Jet tiskárny podporují širokou škálu komerčně dostupných materiálů včetně zředěných past pro tlusté vrstvy, termosetových polymerů, jako je UV-vytvrzované epoxidy a polymerů na bázi rozpouštědel jako polyuretan nebo polyimid. Kombinace chemických vlastností a vhodného ošetření po nanesení dovolují funkčním elektronickým strukturám být nanášeny přímo na nízko teplotní substráty. Vodivé inkousty na bázi stříbra, zlata, platiny a mědi byly vyvinuty pro vytvrzovací teplotu nižší než 120 °C a vysokoteplotní keramiky, oxid stroncia a ferity jsou vytvrzovány za užití vhodného laseru. Polovodiče, rezistory, dielektrická lepidla a také ochrana proti leptání byly nanášeny pomocí systému Aerosol Jet na velkou škálu substrátů včetně polyester, polyimid, sklo, C-Si, keramika, FR4 a kovové materiály. Dokonce biomateriály jako například proteiny a

DNA už byly nanášeny s tímto systémem, a to bez ztráty bio aktivity. [14]

## **Rozpouštědlo**

Hlavním úkolem rozpouštědel je převést filmotvornou složku do roztoku, který má jednotné chemické a fyzikální vlastnosti v celém svém objemu. U každého roztoku existují dvě složky: rozpouštědlo a rozpouštěná látka. Rozpouštědlem je nazývána každá látka, která je schopna rozpouštět jinou látku.

V případě technologie Aerosol Jet jsou nejčastějšími rozpouštědly voda, isopropyl, alkohol a aceton.[14]

Každý výrobce ve svých datasheetech uvádí jaké použít rozpouštědlo pro daný inkoust.

Dále se rozpouštědla se dělí na dva typy a to s nízkým bodem varu a s vysokým. Rozpouštědlo s nízkým bodem varu tvoří hlavní kapalnou složku s vysokým tlakem výparu. Mezi výhody rozpouštědla s nízkým bodem varu patří:

- Lepší kontrola šířky natištěné linky
- Redukce kondenzace
- Nižší teplota substrátu
- Rychlejší atomizace inkoustu

Naopak rozpouštědlo s vysokým bodem varu tvoří menšinovou kapalnou složku s nízkým tlakem výparu. Mezi výhody rozpouštědla s vysokým bodem varu patří:

- Redukce možné přestřiku (vysoušení redukováno o 10-20%)
- Stabilnější atomizace.[15]

## **Fyzikální parametry**

Hlavním fyzikálním parametrem týkajících se inkoustů je viskozita. Viskozita je fyzikální veličina, která udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami proudící kapaliny. Jedná se o veličinu, která charakterizuje vnitřní tření kapaliny a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mezi částicemi mají větší viskozitu, větší viskozita zpomaluje pohyb kapaliny nebo těles v kapalině.



Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu. Kapaliny s nenulovou viskozitou se označují jako viskózní (vazké).[16]

Primární jednotkou užívanou ve spojení s inkousty je Pascal-sekunda [Pa·s], nebo Poise [P]. Ve výrobci poskytovaných datasheetech se nejčastěji objevuje jednotka centiPoise [cP], což je ekvivalent pro mPa·s. U inkoustů používaných v technologii Aerosol Jet se udávaná viskozita pohybuje v rozmezí 1 – 1000 cP při pokojové teplotě nebo zahříváním inkoustu.[14][17]

### **Velikost částic a obsah částic**

Velikost částic v inkoustu se obvykle pohybuje v rozmezí 300 - 500nm, ale upřednostňovaná hodnota je < 200nm. Obsah pevných částic se udává v procentech a jeho hodnota je 5 – 70 wt%, což vyjadřuje tzv. hmotností procento, která udává kolik procent z celkové hmotnosti daný kov nebo látka zabírá a zbytek hmotnosti tvoří samotné rozpouštědlo. Pokud by inkoust obsahoval několik pevných částic různých látek, jako například stříbro a skleněný frit, je velmi důležité, aby byly tyto částice rovnoměrně rozptýlené v celém inkoustu a zajistila se tak celková homogenita při tisku. [17]

## **2.1 Dělení inkoustů podle užití**

Primární dělení inkoustů užívaných v technologii Aerosol Jet je závislé na hlavní příměsi, která určuje jeho vlastnosti, využití, typ potřebného rozpouštědla a další důležité vlastnosti. Hlavní třídy inkoustů jsou kovové, odporové, nekovové vodivé, dielektrické a adhesivní, polovodičové a další speciální funkční inkousty.

### **Kovové inkousty**

Kovové inkousty jsou jedny z nejrozšířenějších a nejvyužívanějších pro Aerosol Jet. Obsahují malé částičky kovu, čímž zajišťují elektrickou vodivost. Nejčastěji jsou tyto inkousty na bázi zlata a stříbra, ale existují i takové s příměsí platiny či mědi. Bohužel použití měděných sebou nese menší riziko, protože díky obsahu mědi může tento inkoust oxidovat.[17]

## **Odporové inkousty**

Odporové inkousty obsahují uhlík jako hlavní složku. Mohou obsahovat pouze uhlík, nebo kombinací uhlíku a ruthenia, nebo mohou být tvořeny strukturou PEDOT:PSS. Existují i takové, které obsahují oxid nějakého kovu. Hlavní užití takových inkoustu je při tisku pasivních součástek, především rezistoru nebo odporových cest.[14][17]

## **Nekovové vodivé inkousty**

Nekovové vodivé inkousty jsou tvořeny jednotěnnými uhlíkovými nanotrubicemi - SWCNTs, víceštěnnými uhlíkovými nanotrubicemi - MWCNTs nebo strukturou PEDOT:PSS.[14][17]

## **Dielektrické a adhesivní inkousty**

Dielektrické a adhesivní inkousty jsou po kovových druhou nejrozšířenější skupinou co do počtu výrobců tak využití. Tyto inkousty mohou obsahovat polyimid, PVP, teflon AF, adheziva, fotorezist SU 8 nebo UV světlem vytvrzována adheziva a akryly.[14][17]

## **Polovodičové inkousty**

Polovodičové inkousty jsou buď na organickém základu, nebo jednotěnných uhlíkových nanotrubic - SWCNTs.[14][17]

## **Speciální funkční inkousty**

Speciální funkční inkousty mohou být na bázi rozpouštědel, kyselin a zásad, odolné proti leptání a osvit, magnetické inkousty a keramické inkousty. Lze sem rovněž zařadit DNA, proteiny a nerůznější enzymy organického původu.[14][17]

## **3 Přehled dielektrických inkoustů**

### **3.1 Přehled polovodiivých inkoustů**

### **3.2 Přehled speciálních inkoustů**

## **4 Diskuze**

## 5 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na dielektrických, polovodiivých a jiných speciálních funkčních inkoustů pro systém aerosol jet printing. Zásadami vypracování bylo seznámit s technologií Aerosol Jet printing, pospat důležité parametry pro inkousty používané v této technologii. Zpracovat podrobný přehled inkoustů, srovnání jejich parametrů a ceny a nakonec diskutovat možnosti využití těchto inkoustů.

Aerosol Jet printing je bezkontaktní aditivní metoda nanášení materiálu na substrát využívající aerodynamické usměrňování funkčních inkoustů ve formě aerosolu. Tento aerosol se tvoří v zařízení zvaném atomizér a dále je veden přes různé části k trysce, kde je nanášen na substrát. Díky veliké přesnosti nanášení a možnosti tisknutí na nerovné povrchy je tento systém velmi vhodný pro tisk antén, senzorů, pasivních součástek a vodivých cest. Díky dávkování inkoustu a malým ztrátám při tisku je tato technologie rovněž velmi cenově výhodná oproti svým předchůdcům.

Inkousty používané při technologii mohou nejrůznější vlastnosti, které se odvíjí on hlavní složky daného inkoustu. Hlavní skupiny inkoustů jsou kovové, nekovové, nekovové vodivé, dielektrické a adhezivní, polovodičové a speciální funkční. Vhodnost použití některé z inkoustů určují jeho vlastnosti jako například nutné rozpouštědlo, viskozita, doba vytvrzování či velikost částic. Při použití je třeba hlídat, aby inkoust měl správné hmotnostní procento, čili aby obsahoval správný poměr potřebné látky. Pro dokončení výrobku je zvolit správnou metodu vytvrzování. Některé inkousty se vytvrdí na vzduchu, jiné zas potřebují UV světlo či laser.

## 6 Zdroje

- [1] LEVORA, Jakub. *Tištěné senzory plynů*. Plzeň 2015. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [2] OPTOMEK. *Aerosol Jet ® Printed Electronics Overview* [online]. ©2014 [vid. 1. března 2016]. Dostupné z: [http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ\\_Printed\\_Electronics\\_Overview\\_whitepaper.pdf](http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_Printed_Electronics_Overview_whitepaper.pdf)
- [3] PowerElectronicTips *Your next circuit design could be fabricated on a printer* [online]. 2016 [vid. 13. března 2016]. Dostupné z: <http://www.powerelectronicstips.com/your-next-circuit-design-could-be-fabricated-on-a-printer/>
- [4] HW.CZ. *Aerosol Jet printing aneb když tranzistor prochází tryskou* [online]. 2015 [vid. 9. listopad 2015]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [5] OPTOMEK. *Aerosol Jet Technology* [online]. ©2014 [vid. 9. března 2016]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
- [6] Sonics, *Ultrasonics atomizers* [online]. ©2015 [vid. 9. března 2016] Dostupné z: <http://www.sonics.com/liquid-datasheet/Atomizers.pdf>
- [7] NAVRÁTIL, Jiří (ed.). Možnosti systému Aerosol Jet®. In: FIŘT, Jaroslav. *Elektrotechnika a informatika 2015: Sborník konference*. První. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015, s. 87-90. ISBN 978-80-261-0514-5. Citace pro článek Nectiny\_2015.pdf
- [8] Micronics Japan Ltd., *Printed Electronics with Aerosol Jet Technology* [online]. [vid. 15. března] Dostupné z: [http://www.mjc.co.jp/eng/product/index3\\_12.html](http://www.mjc.co.jp/eng/product/index3_12.html)
- [9] Qi2, *Expanding Aerosol Jet applications* [online]. [vid. 25. Květen 2016] Dostupné z: <http://www.qi2.com/index.php/researchdevelopment/novelmaterials/aerosolinks>
- [10] OPTOMEK. *Printed Antennas* [online]. [vid. 9. Března 2016] ©2014 Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-core-applications/printed-antennas/>
- [11] Dupont. *Kapton® polyimide film* [online]. [vid. 25. Květen 2016] Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/membranes-films/polyimide-films/brands/kapton-polyimide-film.html>
- [12] RFIDportal. *Co je RFID* [online]. [vid. 25. Květen 2016] Dostupné z: [http://www.rfidportal.cz/index.php?page=rfid\\_obecne](http://www.rfidportal.cz/index.php?page=rfid_obecne)
- [13] Kurt K. Christenson, Jason A. Paulsen, Michael J. Renn, Kelley McDonald, Justin Bourassa; Optomec; St. Paul, Minnesota/USA. *Direct Printing of Circuit Boards*

- Using Aerosol Jet®*. International conference; 27th, Digital printing technologies; Digital fabrication; 2011; Minneapolis, MN. ISBN:9780892082964 [online].  
Dostupné z:  
[http://www.imaging.org/ist/publications/reporter/articles/REP26\\_5\\_6\\_NIP27DF11\\_CHRISTENSON\\_PG433.pdf](http://www.imaging.org/ist/publications/reporter/articles/REP26_5_6_NIP27DF11_CHRISTENSON_PG433.pdf)
- [14] OPTOMECC. Aerosol Jet Materials. [online]. ©2014 [vid. 10. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.optomecc.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
- [15] MIKE, Renn. *2015 Aerosol Jet User Group Meeting: Tips, tricks and materials*. 2015. Interní dokument společnosti Optomecc
- [16] WikiSkripta, *Viskozita* [online]. ©2010 [vid. 25. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Viskozita>
- [17] OPTOMECC. *Aerosol Jet materials faqs* [datasheet]. ©2014 [vid. 10. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.optomecc.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
- [18] R. Soukup, J. Navratil, J. Reboun and T. Rericha, "A comparison of the interdigital electrodes prepared by aerosol jet printing and lift-off technique," *2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Eger, 2015, pp. 30-35. doi: 10.1109/ISSE.2015.7247956 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7247956&isnumber=7247949>

## Přílohy