

**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**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s technologií aerosol jet printing.
2. Popiště 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

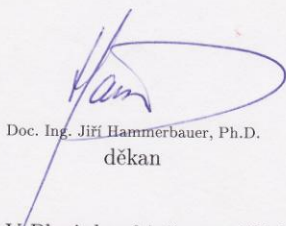
Seznam odborné literatury:

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.)

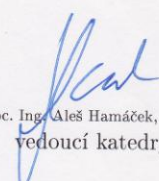
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Navrátil
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 24. června 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 22. srpna 2016


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




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

V Plzni dne 24. června 2016

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 22.8.2016

Martin Škubal

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TECHNOLOGIE AEROSOL JET®	11
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 Srovnání interdigitálních elektrod vytvoření metodou Aerosol Jet a Lift-off.....	19
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
2 HLAVNÍ VLASTNOSTI INKOUSTŮ	24
2.1 DĚLENÍ INKOUSTŮ PODLE UŽITÍ.....	26
3 PŘEHLED DIELEKTRICKÝCH INKOUSTŮ	28
TLOUŠŤKA VRTEV [μM]	28
4 DISKUZE	32
5 ZÁVĚR	33
6 ZDROJE	35
6.1 SEZNAM DATASHEETŮ.....	36

Úvod

Tato práce je rozdělena do tří částí. První se věnuje popisu technologie Aerosol Jet. Jsou 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 s tím 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
cP	centiPoise (ekvivalent k mPa·s)
cSt	centiStokes
DNA	deoxyribonukleová kyselina
GPS	global positioning system
IDE	interdigitální elektrody
ISE	inputu solární energie
LED	light emitting diode
LTE	long term evoluion
MHz	megahertz
mm	milimetr
mPa·s	milipascal sekunda
mW	miliwatt
NFC	near field communication (komunikace na blízkou vzdálenost)
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 selektivní metoda nanášení materiálu na substrát využívající aerodynamické usměrňování při tisku funkčních inkoustů ve formě aerosolu. V současné době je tato technologie vyráběná pouze společností Optomec, která sídlí v USA.[1]

Aerosol Jet® je technologie nanášení materiálu, užívaná k přímému tisku elektronických obvodů a komponentů na substráty za nízké teploty. Tato průlomová technologie je vznikající doplňkem k tradičním silnovrstvým procesům jako jsou například sítotisk, fotolitografie a mikrodosing. 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. Všechny doposud užívané technologie uměli tvořit pouze velmi jemné nebo velmi hrubé motivy, ale technologie aerosol jet umí vytvořit motivy od šířky čáry 10 μ m do 0,5mm, což zatím žádná technologie neuměla při velké flexibilitě zabezpečit. 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]

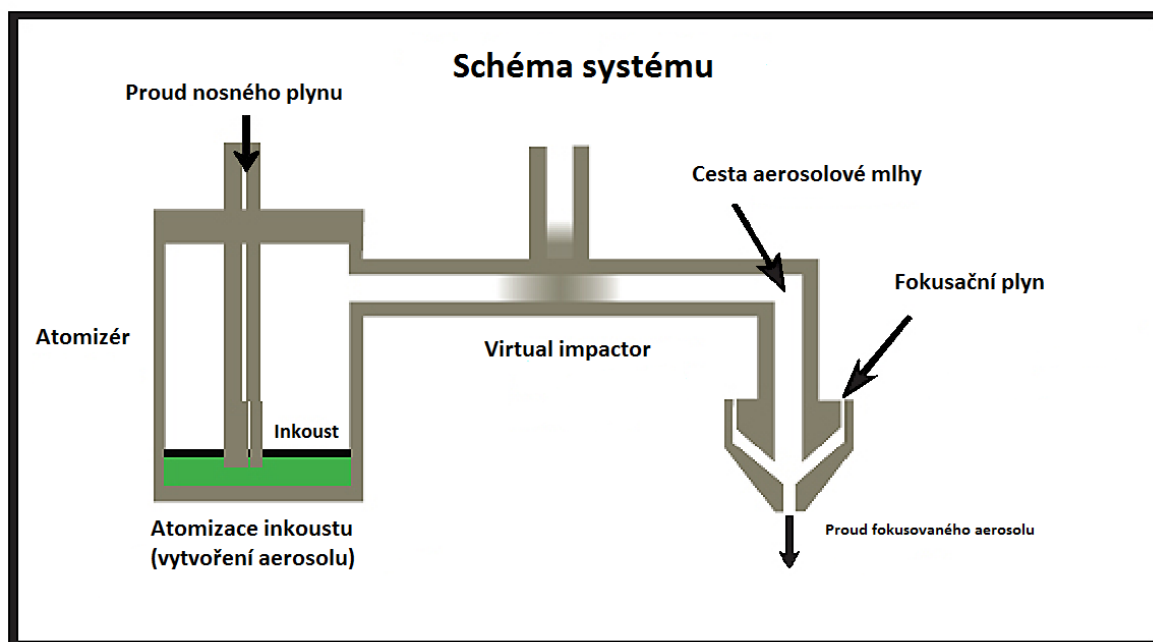
Technologie umožňuje počítačem podporované navrhování designu motivů (systémy CAD/CAM), což slouží k rychlé změně tiskového motivu. Výhodou oproti sítotisku a ink-jetu

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 zaostřování k přesnému nanášení elektrických inkoustů na substrát. 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 nosným plynem vedena do nanášecí hlavy, kde jí obklopuje v kruhovém prstenci fokusační plyn. 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. Fokusační plyn také slouží jako oddělovač trysky a procházejícího inkoustu, aby nedošlo k jejímu zanesení kontaktem kapek inkoustu se stěnou trysky. Výsledný urychlený proud částic inkoustu zůstává zaostřený do vzdálenosti až 10 mm a lze potiskávat i velmi hrubé a 3D substrát.[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 vyhřívát.[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 dovede vytvořit menší množství aerosolu a tudíž se hodí pro tisk jemnějších a menších motivů. 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 inkoustu. Množství atomizovaného materiálu může být maximálně do 2 μ l, 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) je potřeba pouze 1 ml jako vstupní množství inkoustu.[7]

Z pneumatického atomizéru je aerosol unášen nosným plynem 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 u obou atomizérů 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]

Aerosolová mlha je zde tlačena z trysky pomocí nosného plynu a zároveň je zde zaostřována fokusačním plynem do velmi úzkého paprsku aerosolu. Kontinuální množství kapek pak opouští trysku při rychlosti až 70 m/s. [8]

Poslední částí zařízení je shutter neboli stavítko. Jedná se o mechanické zařízení, které velmi rychle zastavuje tok aerosolu na substrát a to tak, že se přesune pod špičku trysky. Stavítko umožňuje bezprostřední přerušení tisku u nespojitých motivů a ukládání 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 μm šířkou linky. Od té doby došlo k rozvoji této technologie a bylo dosaženo hodnot menších než 10 μm . 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 kazet z tiskových hlav pro účely běžného 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. Selektivní aditivní technologie také proti plošným aditivním/subtraktivním efektivněji využívají materiál.[2][7]

1.2.1 Výrobní flexibilita

Tato výhoda nabízí především potenciál pro revoluční nové koncové produkty se zlepšeným výkonem založeném na možnosti tvorby menších součástek, 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 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

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 subtraktivních 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]

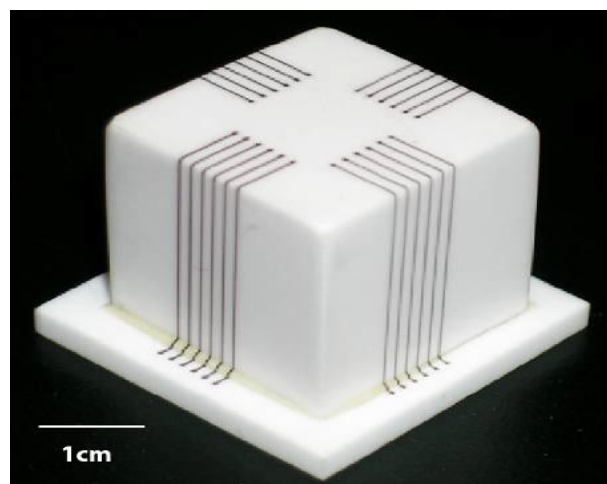
1.2.5 Velikost tisku

Velkou předností zařízení Aerosol Jet je jeho schopnost vytvářet velmi jemné motivy s šířkou dráhy od 8 μ m. Tloušťka takto natištěného motivu se poté pohybuje v rozmezí 0,1-5 μ m. Aby nedošlo k poškození naneseného inkoustu, je blízko tiskové hlavy 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 vytvoření 2D vícevrstvého propojení mohou být části vodivých motivů ovrstveny dielektrikem a v následujícím kroku přetisknuty v další vrstvě vodivým motivem. Toto v podstatě emuluje vícevrstvou obvodovou desku, ale v podstatně tenčí vrstvě. Toho lze dosáhnout díky tomu, že systém Aerosol Jet podporuje širokou škálu inkoustů, což umožňuje nanášet různé typy inkoustů přes sebe a tak dosáhnout požadovaných vlastností.[3]

Systém Aerosol Jet rovněž umožňuje tisk přesných propojení na 3D substráty, které se dostávají do popředí díky další možnosti zvýšení hustoty propojení. Technologie tisku na 3D substráty může být využita 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. 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 nanotrubičky), 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 vlastnosti daného materiálu. V obecných podmínkách může proces Aerosol Jet nanášet s:

- Šířka linie až do 10 mikronů s odchylkou +/- 10%
- Velkou přesností umístění +/- 1 mikron opakovaně
- Velmi dobrým rozlišením okrajů
- Motivů s vysokou vodivostí díky velkému obsahu kovů v použitých materiálech
- Malou hrubostí povrchu vytvořeného nanášením inkoustu
- Dobrou přilnavostí

Systém 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 20µm. Pro elektronické prvky na bázi stříbra je tato hodnota dokonce pouhých 10µm s roztečí 20µm. 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 justování k dosažení požadovaného odporu. [2]

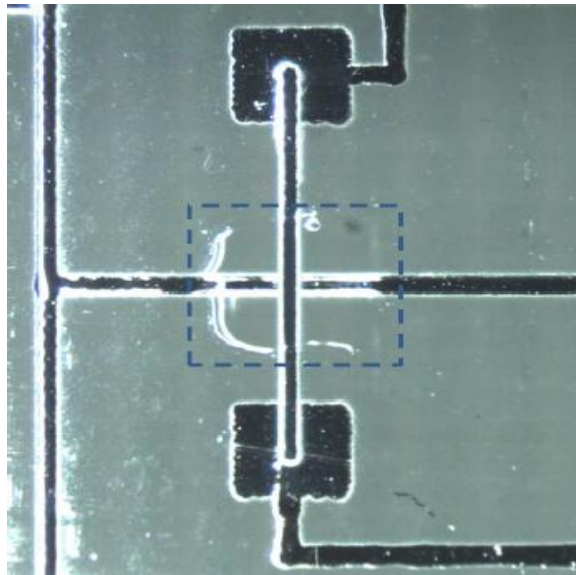
Zlaté a stříbrné inkousty obecně vykazují vodivosti blížíící se objemovým vlastnostem s konvečním sintrováním a 2-3x objem s laserovým sintrováním. Inkousty s malou viskozitou mohou tvořit povrch podobný zrcadlu, zatímco tlustovrstvé inkousty mají mikroskopickou hrubost. Celková přilnavost je vysoce 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 ohýbaní 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 vodivých kovových cest a polymerových izolátorů. Pasivní komponenty jako rezistory a kapacitory jsou tisknuty z datové knihovny. Rezistory založené na uhlíku mají rozsah od 50Ω 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°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

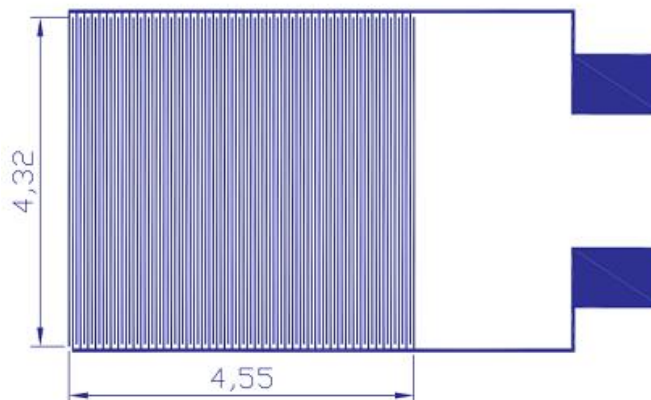
Tento experiment se zaměřil na srovnání kvality a elektrických parametrů interdigitálních elektrod (IDE) vytvořených metodou Aerosol Jet a konvenční technikou lift-off. Interdigitální elektrody patří mezi nejvíce v praxi používané periodické struktury elektrod pro širokou škálu senzorů a převodníků.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

Bylo prokázáno, že lze realizovat interdigitální diody s izolační mezerou 25 μm a šířkou vodivé cesty 25 μm pomocí aerosol jet. Diody nanesené pomocí této technologie jsou geometrickými parametry srovnatelné s diodami vytvořenými naprašováním. Hlavní rozdíl mezi diodami je v jejich kapacitě. Tohoto faktu lze využít především pro aplikaci v chemických odporech nebo pro vysokofrekvenční měření. Jedna z největších výhod je

možnost nanášení na flexibilní substráty nebo přímo na 3D substráty, což otevírá nové možnosti pro aplikaci například pro tzv. chytré oblečení, které by na základě dat ze senzorů mohlo měnit vlastnosti během nošení.[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 přesné nanášení velká pracovní vzdálenost 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 μ m, což je ve srovnání oproti současným tištěným linkám se šířkou zhruba 100 μ 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 zastiňovacím efektu společně s využitím vysokovodivých materiálů vedou ke zvýšení efektivity solárního článku o více než 1% absolutního průměru.[3]

Přesněji uvedeno, užití technologie Aerosol Jet dokázal ISE zvýšit 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

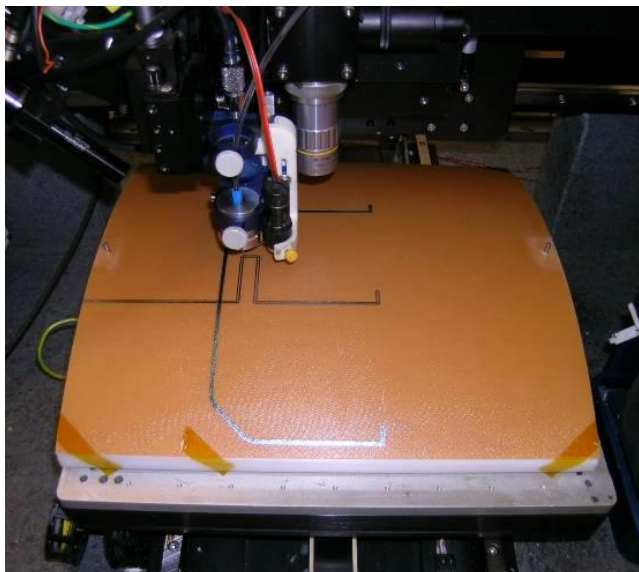
například ohebný displej, RFID, elektronický papír a chytrá kůže.[3][12]

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]

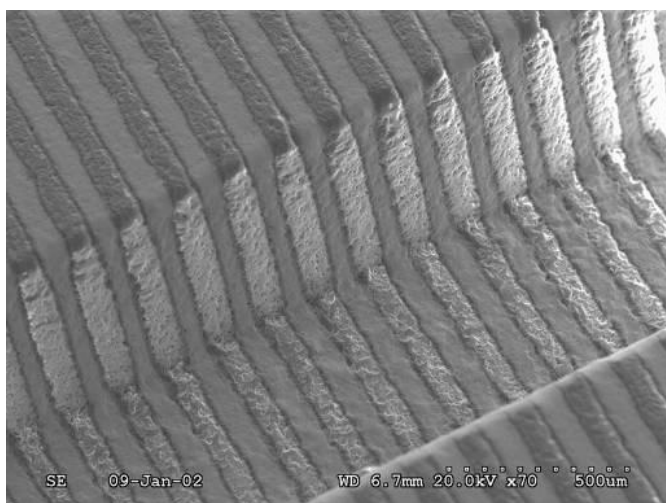
Mobilní zařízení obsahující anténu LTE, NFC, GPS, WiFi, Wlan a BT byly vytištěny pomocí Aerosol Jet a nezávisle testovány hlavními dodavateli součástek pro mobilní zařízení. Změřené výkony antén byly srovnatelné s ostatními výrobními metodami. Proces tisku Aerosol Jet je škálovatelný a je možné tisknout 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 μ m přes žlábek široký 500 μ 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 100 - 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 se sebou nese větší riziko, protože díky obsahu mědi tento inkoust oxiduje.[17]

Odporové inkousty

Odporové inkousty obsahují převážně uhlík jako svou 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 inkoustů je při tisku pasivních součástek, především rezistorů 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 jednostěnných uhlíkových nanotrubic - SWCNTs.[14][17]

Speciální funkční inkousty

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

3 Přehled dielektrických inkoustů

Tab. 3.1 Přehled dielektrických inkoustů

Název	Tloušťka vrtev [μm]	Teplota vytvzování [°C]	Viskozita [[cSt]]	Vytvzování	Výrobce	Hustota [g/ml]
GM 1040	0,8 - 10	135	-	Trouba	Gersteltec	-
GM 1050	3 - 8	150	-	Trouba	Gersteltec	-
GM 1060	10 - 50	135	-	Trouba	Gersteltec	-
GM 1070	50 - 250	135	-	Trouba	Gersteltec	-
GM 1075	250 - 350	120	-	Trouba	Gersteltec	-
Loctite 3104	-	-	90-210 [mPa·s]	UV	Henkel	-
CORIN® XLS Polyimide	-	-	-	-	Nexolve	-
SU-8 2	2-5	65-95	45	UV	Microchem	-
SU-8 5	7-10	65-95	290	UV	Microchem	-
SU-8 10	15-30	65-95	1050	UV	Microchem	-
SU-8 25	25-40	65-95	2500	UV	Microchem	-
SU- 8 50	50 - 100	65-95	12 250	UV	Microchem	-
SU-8 100	150 - 250	65-95	51 150	UV	Microchem	-
SU-8 2000 řada	0,5 - 40	65-95	2,49 – 1 250	UV	Microchem	1,070 – 1,200
SU – 2025 řada	25 - 225	65-95	4 500 - 22 000	UV	Microchem	1,219 – 1,236
SU-8 2100	100-225	65-95	45 000	UV	Microchem	1,237
SU-8 2150	230-550	65-95	80 000	UV	Microchem	1,238
SU-8 3005	4-10	65-95	65	UV	Microchem	1,075
SU-8 3010	8-15	65-95	340	UV	Microchem	1,106
SU-8 3025	20-50	65-95	4 400	UV	Microchem	1,143

SU-8 3035	30-80	65-95	7 400	UV	Microchem	1,147
SU-8 3050	40-100	65-95	12000	UV	Microchem	1,153
PI-2525/PI-2574	5 - 13	300	60 [Pa·S]	Trouba	HD MicroSystems	-
PI-2555	1,8 – 3,8	300	14 [Pa·S]	Trouba	HD MicroSystems	-
PI-2556	0,8 – 1,6	300	35 [Pa·S]	Trouba	HD MicroSystems	-
ADHESIVE 121 RED	-	80-125	300	UV	Norland	-

Tab. č. 3.2 Přehled polovodiivých inkoustů

Název	Velikost částic[nm]	Plyn na zpracování	Obsah pevných částic[wt%]	Výrobce	Cena
IsoNanotubes -S	1,2 - 1,7	-	99	NanoIntegri s	199\$-899\$ (Dle elektronického obohacení)
IsoNanotubes -M	1,2 - 1,7	-	95	NanoIntegri s	
PureTubes	1,2 - 1,7	-	-	NanoIntegri s	
N2 Functionalize d SW-DW Carbon Nanotubes 99	-	Dusík	>99,9	Cheaptubes	\$156,25- \$300,00/gram
SW-DW Carbon Nanotubes 99	-	Argon	>99,9	Cheaptubes	\$125,00 - \$250,00/gram
O Functionalize d SW-DW Carbon Nanotubes 99	-	Směs kyslíku	>99,9	Cheaptubes	\$156,25 - \$300,00/gram

COOH Functionalize d SW-DW Carbon Nanotubes 99	-	-	>99	Cheaptubes	\$156,25 - \$300,00/gram
SW/DW Nanotubes 90	-	-	>90	Cheaptubes	\$78,00 - \$110,00/gram
OH Functionalize d SW-DW Carbon Nanotubes	-	-	>90	Cheaptubes	\$78,00 - \$130,00/gram
Short SW- DW Carbon Nanotubes	-	-	>90	Cheaptubes	\$104,00 - \$150,00/gram
SW-DW Carbon Nanotubes 60	-	-	>60	Cheaptubes	\$24,48 - \$70,00/gram
F Functionalize d SW-DW Carbon Nanotubes	-	Tetrafluor metan	>99	Cheaptubes	\$156,25 - \$300,00/gram
NH2 Functionalize d SW-DW Carbon Nanotubes	-	-	>99	Cheaptubes	\$156,25 - \$300,00/gram
55034-79-2	-	-	97	Sigma- Aldrich	1 660,5Kč/1,5 gram
95689-91-1	-	Dichlorme tan	99	Sigma- Aldrich	2 489Kč/gram
128-65-4	-	-	98	Sigma- Aldrich	4 954Kč/500m g

Tab. č. 3.3 Přehled speciálních inkoustů a rezistů

Název	Velikost částic [nm]	Viskozita [mPa·S]	Obsah pevných částic [wt%]	Rozpouštědlo	Výrobce
-------	-------------------------	----------------------	-------------------------------	--------------	---------

3D Printing Graphene Ink	1-15	25-45	-	-	Sigma-Aldrich
InkA-M100	<30	-	2	Dvakrát destilovaná voda/ethanol	Politronica
InkA-M10	<30	-	2	Dvakrát destilovaná voda/ethanol	Politronica
Ferromagnetic Ink	-	-	-	-	Nanum
Rezisty					
Název	Teplota vytvrzování [°C]	Viskozita [mPa·S]	Tloušťka [μm]	Vytvrzování	Výrobce
Microposit S1822	115	-	1.1-4.0	UV	Rohm and Haas
Microposit S1818	115	-	1.1-4.0	UV	Rohm and Haas
Microposit S1813	115	-	1.1-4.0	UV	Rohm and Haas
Microposit S1811	115	-	1.1-4.0	UV	Rohm and Haas
Microposit S1805	115	-	1.1-4.0	UV	Rohm and Haas

4 Diskuze

Informace o jednotlivých inkoustech byly čerpány hlavně z datasheetů, které mají výrobci na svých stránkách. Některé společnosti online datasheety na svých webových stránkách nenahrávají a tak byly získány díky e-mailové komunikaci se samotnými výrobci. Seznam výrobců byl čerpán z oficiálního seznamu firmy Optomec, kde byly inkousty, které lze při aerosol jet použít uvedeny. Bohužel některé firmy nekomunikovali, ani při odeslání více mailů a tím pádem jejich inkousty či technické údaje nejsou uvedeny.

Díky velké rozdílnosti užitých inkoustů je velmi složité najít společné vlastnosti pro všechny. Zároveň ne všichni výrobci uvádí dané parametry. Někteří výrobci jako Sigma-Aldrich uvádí především cenu, obsah pevných částic a některé fyzikální vlastnosti. Viskozitu jako jednu z charakteristických bohužel neuvádí. Viskozitu obecně mnoho ze zkoumaných výrobců neuvádí. Jedinými dvěma výrobci, kteří ji uvádí u všech inkoustů jsou firmy Microchem a HD MicroSystems.

Další z údajů uvedených u některých inkoustů v tabulce je cena. Cena je uvedena hlavně u firem Cheaptubes a Sigma-Aldrich. Je to tím, že stránky těchto firem fungují rovnou jako obchod a ne pouze jako informace pro zájemce. Nabízí možnost vybrat potřebné množství a okamžitě objednat. Ostatní firmy ceny uvedené na stránkách nemají a ve-mailové komunikaci uvádějí, že při uvedení názvu inkoustu a jeho množství zašlou cenovou nabídku. Další problém spojený s cenou je množství, které je za ni nabízeno. Někteří výrobci uvádějí cenu za jeden gram, jiní za například jednu lahev, které je určitý objem apod.

Jako další údaj k inkoustům je uvedena teplota vytvrzování a způsob jakým k němu dochází. Nejčastější teploty se pohybují v rozmezí 65-150°C. Většinou není teplota přesně stanovena. Jde o postupný proces, při kterém dochází k postupnému navyšování teploty v časových intervalech. Výjimkou jsou inkousty firmy HD MicroSystems, které se vytvrzují při teplotě 300°C a někdy dokonce i 400°C. Pokud by substrát nemohl projít stejnou teplotou jako inkoust, tak se používá selektivní vytvrzování pomocí laseru.

Nejčastěji dochází k vytvrzování pomocí UV záření s nastavenou určitou vlnovou délkou, která také bývá uvedena v některých datasheetech. Další možností je pak vytvrzování v troubě nebo kombinace trouby a poté užití UV světla.

Poslední ze základních údajů je obsah pevných částic. Tuto hodnotu výrobci moc často neuvádějí. Jediné firmy, kde byla tato hodnota uvedena jsou NanoIntegris, Cheaptubes a Sigma-Aldrich. Většinou byly u inkoustu uvedeny hodnoty jako velikost částic, či tloušťka vrstev, pro kterou je daný inkoust vhodný.

5 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na dielektrických, polovodivých 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 velké 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 od 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
- [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
- [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
- [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
- [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>

6.1 Seznam datasheetů

- [19] Gersteltec. Engineering Solutions Swiss made SU-8 Photoepoxy Functional Products [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z: http://140.116.176.21/www/rules/doc/GM_1040_Datasheet_1%5B1%5D.0.pdf
- [20] Gersteltec. Engineering Solutions Swiss made SU-8 Photoepoxy Functional Products [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z: http://www.gersteltec.ch/userfiles/GM1050_v1.0.pdf
- [21] Gersteltec. Engineering Solutions Swiss made SU-8 Photoepoxy Functional Products [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z: <http://www.gersteltec.ch/userfiles/1197841378.pdf>
- [22] Gersteltec. Engineering Solutions Swiss made SU-8 Photoepoxy Functional Products [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z: <http://www.gersteltec.ch/userfiles/1197841484.pdf>
- [23] Gersteltec. Engineering Solutions Swiss made SU-8 Photoepoxy Functional Products [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z: <http://www.gersteltec.ch/userfiles/1197841293.pdf>
- [24] Henkel. Henkel Adhesives North America [online]
Dostupné z: <http://na.henkel-adhesives.com/product-search->

1554.htm?nodeid=8797925081089

- [25] Nexolve CORIN® XLS Polyimide [online]
Dostupné z: <http://nexolvematerials.com/low-cure-polyimides/corin-xls-polyimide>
- [26] Microchem Su-8 Negative Tone Photoresists [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z: http://www.microchem.com/pdf/SU8_2-25.pdf
- [27] Microchem Su-8 Negative Tone Photoresists [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z: http://www.microchem.com/pdf/SU8_50-100.pdf
- [28] Microchem Su-8 Negative Tone Photoresists [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z:
http://www.microchem.com/pdf/SU82000DataSheet2000_5thru2015Ver4.pdf
- [29] Microchem Su-8 Negative Tone Photoresists [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z:
<http://www.microchem.com/pdf/SU82000DataSheet2025thru2075Ver4.pdf>
- [30] Microchem Su-8 Negative Tone Photoresists [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z:
<http://www.microchem.com/pdf/SU82000DataSheet2100and2150Ver5.pdf>
- [31] Microchem Su-8 Negative Tone Photoresists [online]. [vid. 13. července]
Dostupné z: <http://www.microchem.com/pdf/SU-8%203000%20Data%20Sheet.pdf>
- [32] HD Microsystems. Product Bulletin [datasheet]. [vid. 13. červenec].
Dostupné z: e-mailová konverzace
- [33] Norland Production Incorporated. Norland Electronic Adhesive 121 RED [datasheet]. [vid. 19. května]. Dostupné z: e-mailová konverzace
- [34] NanoIntegris. IsoNanotubes-S [online]. [vid. 1. srpen]. Dostupné z:
<http://www.nanointegris.com/semi-conducting>
- [35] CheapTubes. Single Walled-Double Walled Carbon Nanotubes [online]. [vid. 1. srpen]
Dostupné z: <https://www.cheaptubes.com/product-category/single-walled-double-walled-carbon-nanotubes/>
- [36] Sigma-Aldrich [online]. [vid. 1. srpna] Dostupné z:
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/793256?lang=en®ion=CZ>
- [37] Sigma-Aldrich [online]. [vid. 1. srpna] Dostupné z:
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/773824?lang=en®ion=CZ>
- [38] Sigma-Aldrich [online]. [vid. 1. srpna] Dostupné z:
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/663905?lang=en®ion=CZ>

- [39] Politecnico di Torino. *Magnetic Inks*[online]. [vid. 10. srpen] Dostupné z:
http://www.politronica.eu/products/magnetic_inks/inka-M100.html

- [40] Politecnico di Torino. *Magnetic Inks*[online]. [vid. 10. srpen] Dostupné z:
http://www.politronica.eu/products/magnetic_inks/inka-M10.html

- [41] Roh mand Haas. *Electronic materials, Microposit* [datasheet]. [vid. 13. července]
Dostupné z: e-mailová konverzace