

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Přehled vodivých 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: **Jan RŮŽIČKA**
Osobní číslo: **E13B0143P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Přehled vodivých 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. Popiště důležité parametry pro inkousty použitelné v této technologii.
3. Zpracujte podrobný přehled vodivých 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 (Novacentrix, Paru, Sun Chemicals 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 Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na systém Aerosol Jet® a na vodivé inkousty pro tento systém. Hlavním cílem práce je zmapování trhu s vodivými inkousty, které mohou být použity v systému Aerosol Jet®. V první části práce je popsán princip, výhody, experimenty a využití systému. Druhá část se zabývá inkousty pro systém Aerosol Jet®, především rozdělením a vlastnostmi těchto inkoustů. Ve třetí části je zmapován trh s vodivými inkousty, je sepsán přehled inkoustů a jejich vybraných parametrů.

Klíčová slova

Aerosol jet, inkoust, vodivý inkoust, tisk, tištěná elektronika, viskozita, nanočástice

Abstract

This bachelor thesis is focused on the Aerosol Jet® system and the conductive inks for this system. The main aim of the thesis is to conduct a survey of the market with conductive inks, which can be used in the Aerosol Jet® system. The first part describes the principle, advantages, experiments and usage of the system. The second part deals with the inks for Aerosol Jet® system, especially division and specifications of these inks. In the third part is conducted a survey of nowadays ink market and is provided a survey of conductive inks and its chosen specifications.

Key words

Aerosol jet, ink, conductive ink, printing, printed electronics, viscosity, nanoparticle

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 25.5.2016

Jan Růžička

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Navrátilovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu při psaní bakalářské práce a při celém studiu.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 SYSTÉM AEROSOL JET®	12
1.1 PRINCIP SYSTÉMU.....	13
1.2 VÝHODY SYSTÉMU.....	16
1.2.1 Velikost vytvářených motivů.....	16
1.2.2 Použití široké škály inkoustů.....	16
1.2.3 Spotřeba inkoustu.....	17
1.2.4 Široká škála substrátů.....	17
1.2.5 Vzdálenost mezi substrátem a tryskou.....	17
1.2.6 Urychlení výrobního procesu a zvýšení flexibility výroby.....	17
1.2.7 Zelená technologie.....	18
1.2.8 Nízké výrobní náklady.....	18
1.3 NÁKLADOVÝ MODEL.....	18
1.4 KVALITA TISKU.....	19
1.5 EXPERIMENTY SE SYSTÉMEM AEROSOL JET®.....	20
1.5.1 Tisk rovných linií.....	20
1.5.2 Nejmenší vzdálenost mezi dvěma liniemi.....	22
1.5.3 Vícevrstvý tisk.....	22
1.6 POUŽITÍ SYSTÉMU AEROSOL JET®.....	23
1.6.1 Tisk antén.....	23
1.6.2 Solární články s vyšší účinností.....	24
1.6.3 Tisk na 3D substráty.....	25
2 INKOUSTY PRO SYSTÉM AEROSOL JET®	27
2.1 DĚLENÍ INKOUSTŮ.....	27
2.2 PARAMETRY INKOUSTŮ.....	28
3 PŘEHLED VODIVÝCH INKOUSTŮ PRO AEROSOL JET®	31
4 DISKUZE	35
ZÁVĚR	38
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	39
SEZNAM DATASHEETŮ	40

Seznam symbolů a zkratk

AF	amorfní fluoroplast
AJP	aerosol jet printing
CAD	computer aided design
CIJ	continuous inkjet – princip metody inkjet
DNA	deoxyribonukleová kyselina
DOD	drop on demand – princip metody inkjet
FDM	fused deposition modeling – technologie 3D tisku
GPS	global positioning system
ISE	institut solární energie
LED	light emitting diode - dioda emitující světlo
LTE	long term evolution
m/s	metr za sekundu
MHz	megahertz
ml	mililitr
mm	milimetr
mPa·s	milipascal sekunda
ms	milisekunda
MW	megawatt
MΩ	megaohm
N/m	newton na metr
nm	nanometr
PC	polykarbonát
PEDOT:PSS	poly(3,4-ethylendioxythiofen) polystyren-sulfonát
PEN	polyethylen naftalát
PET	polyethylentereftalát
PI	polyimid
PVDF	polyvinylidenenfluorid
SU-8	druh fotorezistu
SWCNT	single-wall carbon nanotube – jedностěnné uhlíkové vlákno
UAV	unmanned aerial vehicle – bezpilotní letadlo
UV	ultrafialové záření
WiFi	wireless fidelity
Wt%	procenta z váhy

μm	mikrometr
$\mu\Omega\cdot\text{cm}$	mikroohm centimetr
$\Omega\cdot\text{m}$	ohm metr
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia

Úvod

Tištěná a flexibilní elektronika zažívá v poslední době velký rozmach. Jsou kladeny stále větší nároky na velikost elektronických součástí a také vyvstává potřeba tisku na nerovné či trojrozměrné substráty. Tradiční tiskové technologie, jako sítotisk, jsou dobře technologicky zvládnuté, ale již nedokáží plně uspokojit potřebu výrobců a zákazníka. Proto je kladen velký důraz na vývoj nových technologií, které mohou být postupně implementovány do průmyslové výroby. Jednou z těchto nových technologií je systém Aerosol Jet®, který díky svým unikátním vlastnostem přináší nové možnosti v oblasti tištěné elektroniky. Hlavní výhodou je možnost tisku na 3D objekty a možnost tisku linií o šířce od 10 μm .

Práce je rozdělena do čtyř kapitol, první se zabývá popisem systému Aerosol Jet®. Nejdříve je detailně popsán princip systému, jeho jednotlivé části jako atomizér či tryska, a celkový postup nanášení inkoustu na substrát. Dále se první kapitola zabývá výhodami systému, jako jsou například velikost vytvářených motivů, možnost použití široké škály substrátů a inkoustů nebo flexibilita výroby. Následně jsou popsány vybrané experimenty a použití systému Aerosol Jet®, především tisk na 3D objekty. Druhá kapitola se věnuje inkoustům pro Aerosol Jet®. Inkousty jsou rozděleny na základě příměsí, které obsahují, a dále jsou popsány některé vybrané vlastnosti inkoustů jako viskozita, velikost částic a jiné. Ve třetí části se nachází přehled vodivých inkoustů pro systém Aerosol Jet®. Přehled spočívá ve zmapování trhu s vodivými inkousty, které jsou vhodné pro Aerosol Jet®. Jednotlivé inkousty jsou zde popsány vybranými technickými parametry. Poslední kapitola diskutuje přehled vodivých inkoustů, získané informace jsou zhodnoceny z různých pohledů.

1 Systém Aerosol Jet®

Aerosol Jet®, někdy označován jako AJP, je moderní bezkontaktní tisková technologie nanášení materiálu na substrát využívající aerodynamické usměrňování funkčních inkoustů ve formě aerosolu. Jedná se o patentovanou technologii v současnosti vyráběnou pouze společností Optomec (USA – Nové Mexiko). Aerosol jet® je aditivní, selektivní, depoziční technologie, která umožňuje realizaci elektronických součástek, tištěných propojovacích struktur, nanouhlíkových struktur a bioaktivních obrazců na téměř jakýkoliv materiál. Díky této technologii je možná miniaturizace elektronických systémů, realizace jemných vodivých motivů a integrace pasivních součástek bez nutnosti přípravy masek a filmových předloh. Tento patentovaný proces je naprosto odlišný od předešlých technologií jako např. sítotisk nebo inkjet. Hlavní rozdíl je ve velikosti natištěných vodivých cest a obrazců. Aerosol Jet® umožňuje tisk vodivých cest v rozmezí šířky linie od 10 μm až do několika milimetrů.[1][2][3]

Systém Aerosol Jet® byl původně vyvinut k vyplnění zanedbané střední cesty ve výrobě mikroelektroniky. Současné výrobní technologie vytvářejí velmi malé elektronické prvky, například chemickou depozicí, a ty relativně velké, například sítotiskem. Žádná technologie nebyla schopna uspokojivě produkovat propojení, komponenty a zařízení velikosti mikronů (10-100 μm). Zatímco se elektronická zařízení i nadále zmenšují, zpracovatelé tlustovrstvých technologií se blíží fyzikálním mezím šablonového tisku. Tenkovrstvé technologie mohou nanášet prvky velikosti několika μm , ale vyžadují vysoce kvalifikovanou pracovní sílu a hlavně kapitálové investice do nového výrobního procesu pro každou aplikaci. Tlustovrstvé i tenkovrstvé technologie jsou 2D procesy a nejsou vhodné pro výrobu 3D konformní elektroniky.[4]

Ještě předtím, než bude popsán celý systém a jeho jednotlivé části, tak bych se rád krátce zmínil o technologiích sítotisk a inkjet. Obě tyto technologie jsou déle a více používané než Aerosol Jet®. Sítotisk je tisková metoda využívaná v mnoha oborech. Základním principem je protlačování pasty skrz síto. Sítotisk se skládá ze tří základních komponentů, a to ze síťoviny s otvory, pasty nebo jiného materiálu, který má být nanášen, a vhodného zařízení (těrky) pro aplikaci pasty na substrát. Pasta se skrz síto protlačí jen v místech, kde má být nanášena na substrát. Je to jednoduchá metoda, při jejímž využití se

snižují náklady zejména při velkosériové výrobě. Technologie inkjet je bezkontaktní aditivní technologie, využívaná například v běžných domácích tiskárnách. Existují dva mechanismy, které jsou využívány v technologii inkjet. První mechanismus je označován jako CIJ a je založen na nepřetržitém toku inkoustu. Proud inkoustu je vychylován pomocí elektrického pole, k tomu slouží vychylovací elektrody. Výhodou je velká rychlost nanášení, nevýhodou je velké množství odpadního inkoustu. Druhý mechanismus je DOD, který generuje inkoust pouze v případě, že je to vyžadováno, což vede k menší spotřebě inkoustu. Nejsou zde nutné vychylovací desky, neboť proud inkoustu se dá zastavit. Technologií inkjet lze dosáhnout šířky linií v rozmezí 50-100 μm . [3][5][6]

1.1 Princip systému

Základní princip systému Aerosol Jet® je bezkontaktní nanášení inkoustu ve formě aerosolu na substrát. Aerosol je směs malých pevných nebo tekutých částic v plynu. V prvním případě se aerosol označuje jako dým, v druhém případě jako mlha. V systému Aerosol Jet® hovoříme o takzvané aerosolové mlze, protože v plynu jsou rozptýleny tekuté částice inkoustu. K přenosu a nanášení aerosolu slouží nosný plyn – dusík. Celý systém se skládá z několika částí, které dohromady tvoří komplexní přístroj určený k nanášení aerosolu na substrát. Schéma systému AJP a jeho jednotlivé části jsou znázorněny na obr. 1.1. [1][7]

První částí systému je bubbler (B1, B2 na obr. 1.1). Bubbler přináší do inkoustu kapičky rozpouštědla, čímž pomáhá vytvořit v atomizéru potřebný aerosol. V bubbleru se tedy musí nacházet látka, ve které je inkoust rozpouštěn. Může to být voda, isopropyl, alkohol, aceton a jiné. [1]

Část systému, ve které dochází ke vzniku inkoustového aerosolu, se nazývá atomizér. Atomizér může být dvojího typu, a to pneumatický nebo ultrazvukový. V pneumatickém atomizéru (PA na obr. 1.1) se aerosol vyrábí rozbíjením inkoustu o stěnu nádoby. K tomu slouží proud plynu s vysokou rychlostí, který je do atomizéru přiváděn přes rozprašovací trysku. Proud plynu unáší inkoust proti stěně atomizéru, což vede k následnému rozbití inkoustu na miniaturní kapičky (disperze inkoustu), které jsou poté unášeny nosným plynem do tiskové hlavy. Pokud jsou kapičky příliš velké na to, aby mohly být uneseny nosným plynem, spadnou zpátky na dno nádoby s inkoustem, ze kterého jsou znova

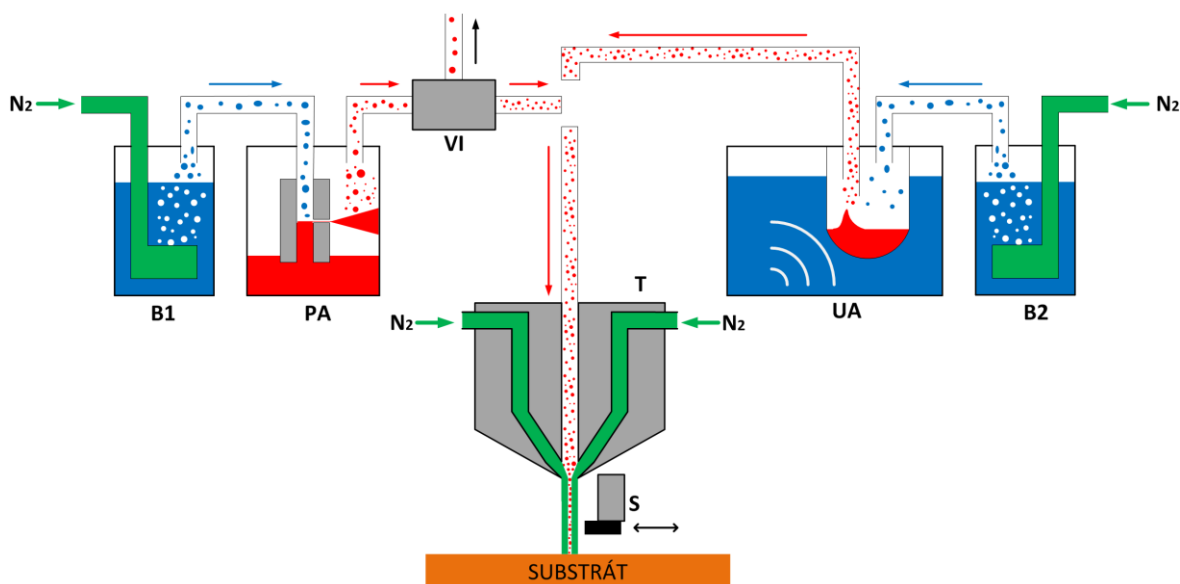
unášeny plynem proti stěně atomizéru, dokud nedosáhnou požadované velikosti. Pneumatický atomizér je vhodný pro inkousty větších viskozit (1-1000 mPa·s) a velikostí pevných částic do 500 nm. Inkoustu je potřeba nejméně 30 ml [8]. Součástí systému je magnetické míchadlo a vyhřívací zařízení pro nádobku s inkoustem. Míchání napomáhá k udržení stabilní disperze inkoustu, a to zejména u inkoustů složených z nanovloček. Zahřátí inkoustu pomáhá při atomizaci vysoko viskózních inkoustů. Pokud je inkoust vyhříván, tak jeho viskozita může být při pokojové teplotě až 8000 mPa·s [9], aby došlo ke vzniku aerosolu. Ultrazvukový atomizér (UA na obr. 1.1) vytváří aerosol rozbíjením inkoustu ultrazvukovými vlnami. Inkoust je umístěn v lahvičce ponořené ve vodě nad piezoelektrickým převodníkem. Převodník slouží ke generaci vln o ultrazvukových frekvencích, které jsou pomocí vody přenášeny na nádobu s inkoustem. Frekvence se obvykle pohybuje v rozmezí od 1,6 – 2,4 MHz [10]. Jakmile amplituda vln dosáhne určité velikosti, inkoust již dál neudrží svou strukturu a postupně se začnou od inkoustu odtrhávat malé kapičky. Tyto malé kapičky vystřelují do vzduchu a jsou následně unášeny nosným plynem do tiskové hlavy, stejně jako tomu je v pneumatickém atomizéru. Tento typ atomizéru je vhodný pro inkousty menších viskozit (1- 5 mPa·s) a velikostí pevných částic do 100 nm. Inkoustu je ale potřeba jen 1 ml [8].[1][3][5][9]

Za pneumatickým atomizérem se nachází zařízení nazývané virtual impactor (VI na obr. 1.1). Úkolem virtual impactoru je odtahovat přebytečný nosný plyn, tedy dusík, a příliš velké částice inkoustu. Aerosol se za ním stává homogennějším, což je vyžadováno pro kvalitní a rovnoměrnou depozici.[1]

Poté se aerosol dostává do tiskové hlavy (T na obr. 1.1), ve které se nachází tryska. Do tiskové hlavy vstupuje usměrňovací plyn, který prstencově obklopuje aerosol, ten je díky tomu fokusován do velmi úzkého proudu. Toto velmi omezuje nežádoucí usazování materiálu na stěnách tiskové trysky a její ucpávání. Jako usměrňovací plyn se opět využívá dusík. Aerosolový proud je poté bezkontaktně nanášen na substrát rychlostí až 80 m/s [11]. Šířka aerosolu vycházejícího z trysky může být až desetkrát menší, než je otvor trysky. Šířka toku aerosolu a tím pádem šířka naneseného inkoustu je ovlivněna poměrem usměrňovacího plynu k proudu aerosolu. Větší množství usměrňovacího plynu vede k zúžení toku aerosolu a naopak. Kromě toho šířku nanesené linie také ovlivňuje např. vzdálenost trysky od substrátu. Čím větší vzdálenost, tím širší natisknutá linie. Vzdálenost od substrátu se obvykle pohybuje od 1 do 5 mm. Hroty trysky jsou keramické nebo

ocelové a jsou k dispozici od velmi tenkých s kruhovým průřezem pro jemné motivy až po silné s obdélníkovým průřezem pro pokrývání ploch.[1][2][3][5][9]

Poslední část tiskového zařízení je takzvané stavitko - shutter (S na obr. 1.1). Jedná se o mechanické zařízení, které velmi rychle zastavuje tok aerosolu na substrát a to tak, že se přesune pod špičku trysky. Využívá se při tisku nespojitých motivů. V shutteru také dochází k ukládání přebytečného materiálu v případě přemístování trysky na jinou pozici. Protože při tisku silnými tryskami by se v shutteru hromadilo příliš mnoho materiálu, má pro tyto trysky shutter připojené odsávání do odpadní nádoby. Inkoust, který se dostane do odpadní nádoby, může být využit při dalším nanášení. [1][10]



Obr. 1.1 Schéma systému Aerosol Jet® (převzato z [1])

Depozici aerosolu na požadované místo můžeme docílit dvěma způsoby. První způsob znamená 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. Pohyb tiskové hlavy bývá obvykle možný pouze v osách x a y. Optomec ale nabízí i konfiguraci systému, kdy je možnost pohybu i v ose z. Tato konfigurace je využívána při tisku na nerovné substráty.[2][4]

Jakmile je inkoust na substrát nanesen, může dojít k tepelné nebo chemické úpravě inkoustu. Těmito úpravami lze dosáhnout požadovaných elektrických a mechanických vlastností a přilnavosti k substrátu. Elektronické systémy vytvořené systémem Aerosol Jet® mohou být vytvrzeny v peci nebo přímo v zařízení integrovaným laserem o vlnové délce 830 nm, který je umístěn v blízkosti tiskové hlavy a pracuje v kontinuálním režimu. Laser umožňuje selektivní vytvrzování inkoustů za použití substrátových materiálů s velmi nízkou teplotní tolerancí, jako jsou například polymery.[1][2][3]

1.2 Výhody systému

Systém Aerosol Jet® s sebou přináší několik velmi zásadních výhod oproti předešlým technologiím. Výhody se týkají nanášených motivů, použitých substrátů, ale i široké škály vhodných inkoustů. V následující kapitole budou jednotlivé výhody detailněji rozebrány. Nevýhodou je poměrně vysoká pořizovací cena systému Aerosol Jet®, což je dáno tím, že se jedná o novou technologii, která je zatím používána k sériové výrobě jen zřídka.

1.2.1 Velikost vytvářených motivů

První zásadní výhodou je bezesporu velikost vytvářených motivů a vodivých cest. Technologie umožňuje vytvářet velmi jemné tištěné motivy. Šířka tisknuté linie může být od 10 μm a o tloušťce od desítek nm dle použitého inkoustu. Tato vlastnost vede k celkovému zmenšení substrátu a tudíž ke zmenšení například celé desky plošných spojů nebo elektronických součástek.[3][5]

1.2.2 Použití široké škály inkoustů

Mohou být použity inkousty se širokým rozsahem viskozit. Aerosol Jet® je schopen nanášet inkousty s viskozitou 1 – 1000 mPa·s. Tento velmi široký rozsah je omezen pouze použitím ultrazvukového atomizéru, který je vhodný pro inkousty s viskozitou 1 – 5 mPa·s. Naopak pneumatický atomizér dokáže pracovat s inkousty z širokého rozsahu viskozit. Kromě viskozity mohou být inkousty posuzovány z hlediska příměsí, které obsahují. Nejčastěji se jedná o vodivé inkousty na principu kovových nanočástic (na bázi mědi, stříbra, zlata, platiny atd.), funkční organické inkousty na bázi uhlíkových nanotrubic, dielektrické inkousty či další speciální funkční inkousty, jako například polymerní nebo adhesivní.[1][3][5][8]

1.2.3 Spotřeba inkoustu

Další výhodou spojenou s inkousty je potřeba malého vstupního množství inkoustu, a to především při použití ultrazvukového atomizéru. V tomto případě je potřeba jen 1 ml inkoustu. Dále bych rád zmínil nízkou spotřebu inkoustu a také bezkontaktní způsob průchodu inkoustu tryskou, který zajišťuje, že téměř nedochází k jejímu ucpávání, tím se zvyšuje plynulost nanášení a celé výroby.[1][3][8]

1.2.4 Široká škála substrátů

Nespornou výhodou je možnost použití široké škály substrátů. Materiál substrátu je omezen pouze kompatibilitou s používaným inkoustem. Substráty mohou být například z PET, PEN či polyimidové folie, keramiky, silikonu, skla atd. Velkou výhodou je možnost použití drsných, nerovinných či 3D substrátů. Tato vlastnost je velkým rozdílem mezi technologií Aerosol Jet® a technologií inkjet. Kromě tisku na 3D substrát umí Aerosol Jet® sám tisknout 3D miniaturní struktury.[1][4][8]

1.2.5 Vzdálenost mezi substrátem a tryskou

Aerosol Jet® umožňuje poměrně široké nastavení vzdálenosti mezi tryskou a substrátem, a to v rozmezí od 1 mm do 5 mm. Naopak technologie inkjet funguje správně při vzdálenosti trysky od substrátu maximálně do 1 mm. Díky nastavitelné vzdálenosti mezi substrátem a tryskou je umožněn tisk na nerovné či 3D substráty. Tato unikátní schopnost přináší ideální řešení například pro tisk antén a v mnoha dalších oblastech.[1][4][8]

1.2.6 Urychlení výrobního procesu a zvýšení flexibility výroby

Aerosol Jet® dále také zrychluje a usnadňuje výrobní proces. Je to dáno tím, že k vytváření motivů je potřeba pouze samotný přístroj na nanášení aerosolu a počítač. Celý proces začíná nejprve na počítači, kde se v programu CAD namodeluje požadovaný motiv. Namodelovaný motiv se poté převede v CADu pomocí utility (doplňku) od společnosti Optomec VMTools do požadovaného formátu *.prg, který je již kompatibilní s přístrojem Aerosol Jet®. Tento doplněk také urychluje samotné modelování v CADu, protože již obsahuje možnost automatické výplně uzavřených motivů, které mohou být ihned použity. Nejsou potřebné žádné další nástroje, jako například u sítotisku maska nebo filmová

matrice. Modelování motivů v CADu umožňuje rychlou změnu tištěného motivu, a tím zvyšuje flexibilitu výroby. Zařízení je tedy přímo předurčeno pro technologii rapid prototyping – rychlé tvoření prototypů. Aktivní a pasivní prvky, stejně jako propojení, lze přímo vytisknout pomocí technologie AJP. Tím se umožňuje souvislá integrovaná výroba pro elektronické systémy.[3][4][8]

1.2.7 Zelená technologie

Technologii Aerosol Jet® můžeme označit jako zelenou technologii. Aerosol Jet® používá surové materiály efektivněji než tradiční metody, čímž se snižuje množství odpadu. Nedochází ke zbytečnému plýtvání inkoustu a jiných materiálů, jak je tomu například u sítotisku. Žíravé chemikálie, které jsou obvykle vyžadovány v subtraktivních výrobních procesech, nejsou v technologii Aerosol Jet® nutné.[4]

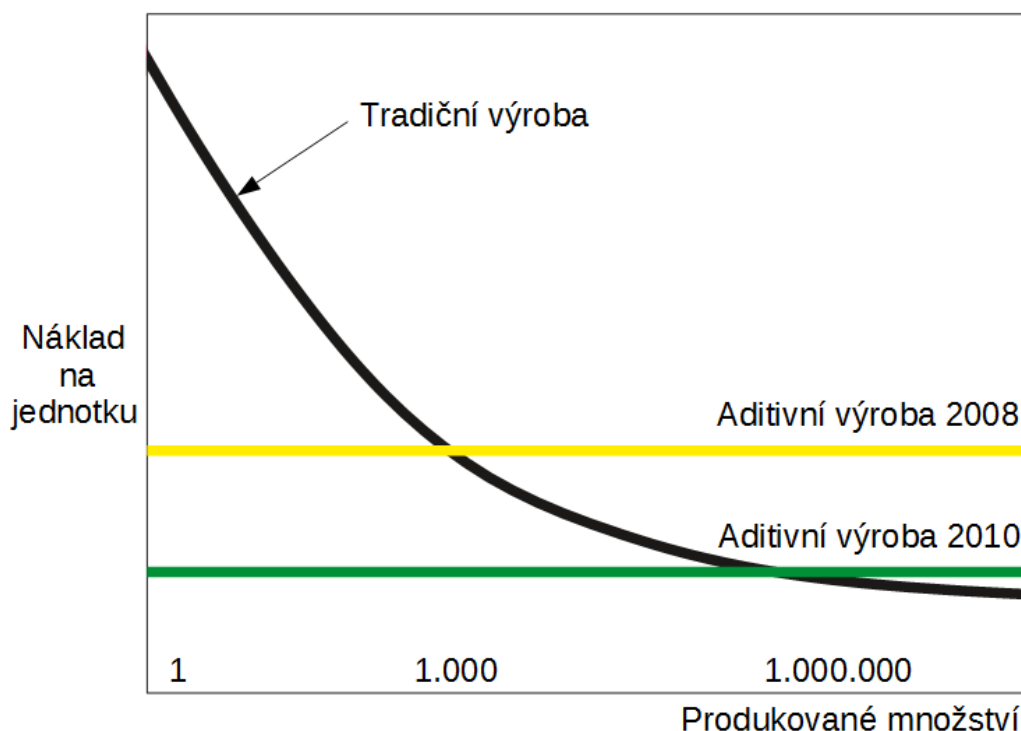
1.2.8 Nízké výrobní náklady

Technologie Aerosol Jet® vyžaduje při použití jen malé náklady. Prostředky klasické výroby - nástroje, maska, film a jiné pomůcky jsou eliminovány, což umožňuje nákladově efektivnější výrobu i při nízkých objemech výroby. Jak bylo zmíněno v kapitole 1.2.6., základní podoba motivu pro Aerosol Jet® je vytvořena na počítači v CAD programu. To dává obsluze možnost rychlého vytvoření motivu, jeho rychlé úpravy a tisku prototypů na široké rozpětí materiálů. To zásadně eliminuje čas a náklady na vytvoření motivů a jejich následnou úpravu proti klasické fotolitografii. Tato nákladově efektivní technologie zásadně podporuje rychlý vývoj produktu s možností úpravy designu bez nutnosti dalších pomůcek a nástrojů. Dále se také snižují náklady na proces z hlediska nutnosti obsluhy, složitosti dodavatelského řetězce a pracovních postupů.[4]

1.3 Nákladový model

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.8., Aerosol Jet® je technologií nízkých nákladů a zrychlení vývoje nových produktů. Na druhé straně se jedná o novou technologii, která si nese vyšší pořizovací náklady. Otázkou je, kde je tedy hledaná hranice efektivity. Obr. 1.2 znázorňuje závislost nákladu na jednotku na produkovaném množství výrobku, a to pro aditivní technologie v roce 2008 a 2010 a pro tradiční výrobní technologie. V roce 2008 byly aditivní technologie výrazně efektivnější než tradiční výrobní technologie pro malé série, zhruba do 1000 kusů. Ale s vývojem technologií dochází ke zlevnění jak technologií

samotných, tak jednotlivých inkoustů, a tak v roce 2010 byla hranice efektivity posunuta zhruba až na 1 000 000 kusů. Můžeme tedy konstatovat, že aditivní technologie poskytují nákladově efektivní řešení pro malé série výroby, nebo tam, kde je požadována častá úprava požadavků na výrobu – rapid prototyping a věda a výzkum.[4]



Obr. 1.2 Závislost nákladu na jednotku na produkovaném množství (překresleno z [4])

1.4 Kvalita tisku

Systém umožňuje tisk v různých kvalitách a rozlišeních. Aerosol Jet® využívá vlastností inkoustu, substrátu a jejich kombinace k požadované kvalitě tisku. Sám o sobě nemůže měnit základní vlastnosti nanášených materiálů. Kvalita tisku závisí zejména na správném nastavení zařízení, typu inkoustů, hrubosti, poréznosti a smáčivosti substrátu, a také na vhodné kombinaci inkoust-substrát.[4]

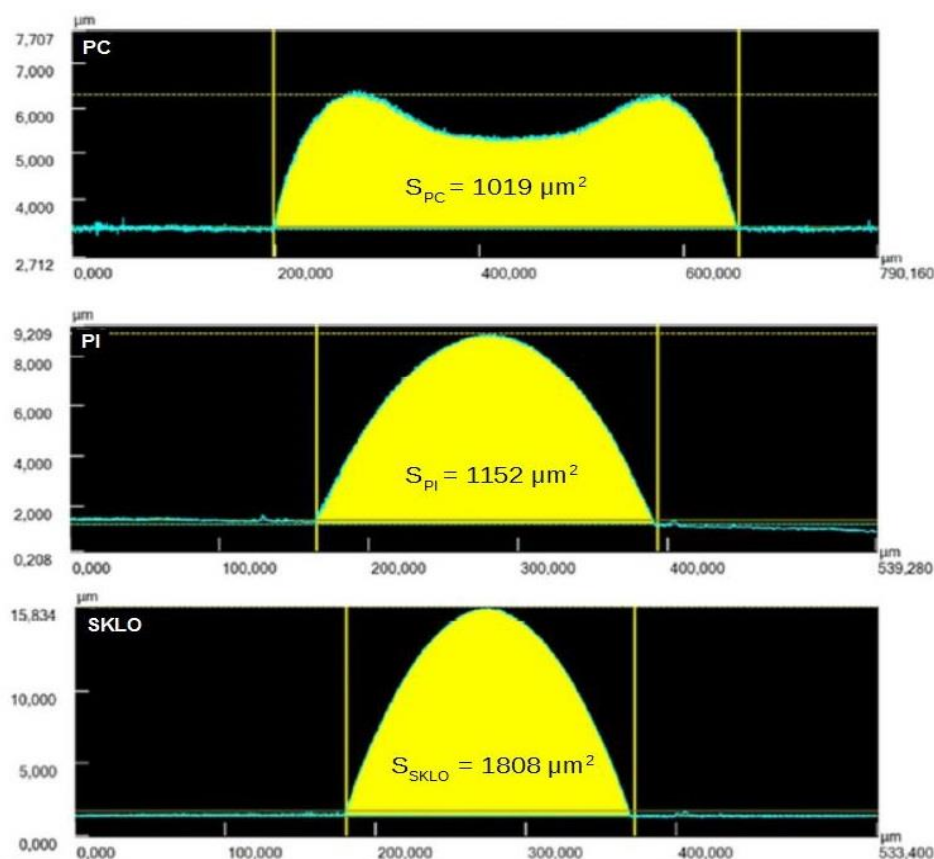
Kvalitu tisku můžeme posuzovat z následujících pohledů: nanášení jednotlivých linií od šířky 10 μm \pm 10%, vysoká přesnost tisku na pozici \pm 1 μm , velmi dobrá přesnost tisku rohů a hran, vysoká vodivost při nánosu kovů, jednovrstvá tloušťka od desítek nm až do 5 μm , dobrá adheze, možnost i malé tvrdosti podkladového materiálu, vysoké rozlišení tisku do reliéfu podkladu.[4]

1.5 Experimenty se systémem Aerosol Jet®

V následující kapitole budou popsány některé experimenty, jejichž výsledky jsou velmi důležité pro následné konkrétní použití. Experimenty zkoumají možnosti technologie Aerosol Jet®, a to například, jaké nejmenší vzdálenosti dvou linií lze dosáhnout při použití systému AJP.

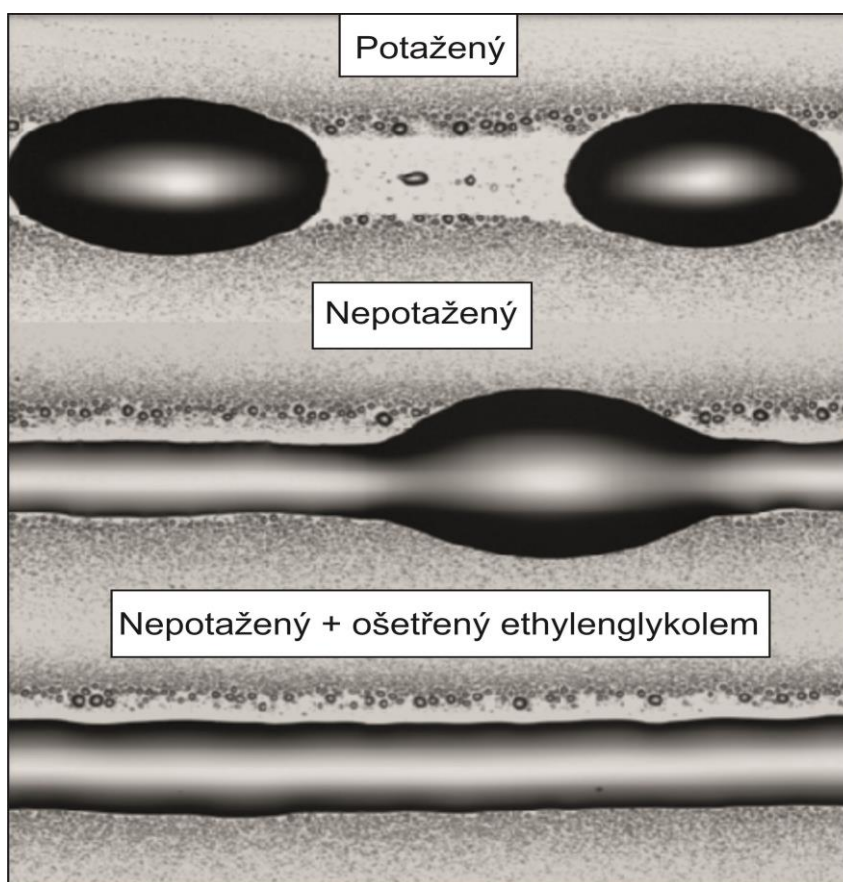
1.5.1 Tisk rovných linií

Aerosol Jet® je tisková technologie, jejíž parametry musí být upraveny tak, aby docházelo k homogennímu tisku čar s definovanými obrysy. Výzkumy ukázaly, že profil nanášeného materiálu závisí na kombinaci použitého inkoustu a podkladového materiálu, ale také na ošetření substrátu. Jako příklad můžeme uvést experiment, který byl proveden na univerzitě v Norimberku. Během experimentu byl použit systém Aerosol Jet® pro vytvoření optických vlnodů. Jako substrát byl použit polyimid (PI), polykarbonát (PC) a sklo. Jako inkoust byla použita dvousložková epoxidová pryskyřice, jejíž viskozita byla 160 mPa·s. Výsledky experimentu jsou vidět na obr. 1.3.[12]



Obr. 1.3 Výsledky experimentu závislosti substrátu na tvaru naneseného inkoustu (převzato z [12])

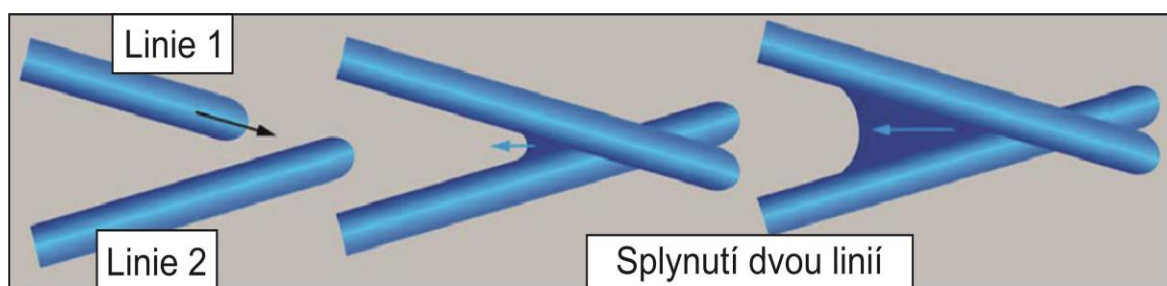
Na obr. 1.3 je vidět, že rozdílné podkladové materiály vykazují rozdílné typy a charaktery nanesených spojů. PI substrát dosahuje největší tloušťky nánosu inkoustu v cca. $\frac{1}{2}$ naneseného spoje, stejně tak se chová i sklo. Naproti tomu na PC substrátu se maximum tloušťky nachází v $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$. Tyto rozdíly dokazují vliv povrchové energie a napětí na výsledné nanášení inkoustu a jeho kvalitu. Povrchová energie substrátu v kombinaci s povrchovým napětím inkoustu jsou 2 základní parametry pro tisk linií s ostrými hranami. Pokud by bylo povrchové napětí příliš velké, tak by nebylo možné spoj vůbec vytvořit. Důležitou roli hraje také čistota, nasákavost a přilnavost substrátu. Proto byl povrch každého substrátu nejdříve ošetřen isopropanolem a poté ponořen do ethylenglykolu, čímž byla upravena povrchová energie substrátu. Na obr. 1.4 můžeme vidět, že úprava povrchu substrátu hraje zásadní roli na vliv povrchové energie substrátu. Na potaženém substrátu z polytetrafluorethylenu můžeme vidět, že povrchová energie je příliš vysoká, takže není možné vytvořit souvislou linii. Jsou vidět pouze jednotlivé kapky. Na nepotaženém substrátu již byla vytvořena souvislá linie, ale stále se zde nachází oblasti s kapkami. Až na nepotaženém substrátu ošetřeném ethylenglykolem došlo k vytvoření souvislé linie bez kapek. Tato kombinace dosahovala nejnižší hodnoty povrchové energie.[12]



Obr. 1.4 Vliv úpravy povrchu substrátu na kvalitu tisku (převzato z [12])

1.5.2 Nejmenší vzdálenost mezi dvěma liniemi

Pro integraci tištěných linií do skutečných produktů je důležité vědět nejmenší možnou vzdálenost mezi dvěma liniemi. Pro tento experiment byly vytištěny dvě linie, které se křížily pod malým úhlem. Po sintrování vzorků byla naměřena nejmenší vzdálenost mezi oběma liniemi, kde nedošlo ke splynutí linií. Nejmenší vzdálenost byla naměřena v rozmezí 40 μm – 49 μm . Menší vzdálenosti lze dosáhnout jen teoreticky, protože v realitě jsme omezeni velikostí povrchového napětí inkoustu, které klesá až dále od místa překřížení. Pro pochopení tohoto faktu je nutné si uvědomit, že vytištěné linie se před sintrováním chovají jako kapaliny, nikoliv jako pevné látky. Ukázka splynutí linií je vidět na obr. 1.5.[12]



Obr. 1.5 Ukázka splynutí překřížení dvou linií (převzato z [12])

1.5.3 Vícevrstvý tisk

Řada aplikací pro elektroniku vyžaduje vícevrstvé aplikace různých materiálů, což je pomocí Aerosol Jet® možné. Lze dosáhnout kombinace vodivých, izolačních a adhesivních vrstev. Nanášení více vrstev na sebe umožňuje aplikaci vložených pasivních prvků. Jako příklad si můžeme uvést tisk obvodu, který se skládá z pětice vodičů překřížených dalšími vodiči. Mezi obě pětice vodičů byla aplikována mezilehlá vrstva dielektrického materiálu, která zajišťuje elektrickou izolaci. První tištěná vrstva se skládá z vodičů vyrobených za použití stříbrného nanoinkoustu. Druhá tištěná vrstva byla vytvořena pomocí PVDF dielektrického materiálu. Poslední tištěná vrstva byla vytvořena nanášením PEDOT:PSS vodivého polymeru, který byl nanášen přes PVDF. Elektrický odpor mezi dvěma vodivými vrstvami překročil 10 $\text{M}\Omega$, což značí dobrou izolaci. Všechny výše uvedené kroky bylo dosaženo, aniž by byl substrát vyjmut z tiskového systému. Vrstvy vodič-dielektrikum-vodič tvoří základ tištěných paralelních deskových kondenzátorů.[11]

1.6 Použití systému Aerosol Jet®

Aerosol Jet® je nová technologie, jejíž využití je zatím spíše ve fázi vývoje a výzkumu. Využívá se především tam, kde jsou zapotřebí unikátní vlastnosti tohoto systému. Využívá se například pro tisk na 3D objekty, což není možné využitím předešlých technologií. Konkrétní využití bylo vyzkoušeno například při pokovování efektivních solárních panelů, tisku tranzistorů, rezistorů, antén, senzorů, flexibilních displejů a okruhů při nanášení biologických buněk nebo při vytváření hustého pole součástek v obvodu. V mnoha případech dochází ke kombinaci více technologií najednou, protože každá technologie s sebou přináší určité výhody ale i nevýhody. V následující kapitole budou popsány některé konkrétní využití technologie.[4][13][14]

1.6.1 Tisk antén

Jedním z možných využití systému Aerosol Jet® je tisk antén. Je to možné díky schopnosti technologie Aerosol Jet® nanášet inkoust přímo na nerovný substrát. Tradiční postup při výrobě antén spočívá v tisku jednotlivých elementů antény na Kaptonový® film (polyimidový film) a následném lepení filmu na kompozitovou vrstvu. Tento postup není vhodný pro výrobu antén, protože při použití tradičních metod (jako je chemické leptání) je tisk kovových částí možný pouze na rovinný povrch. Kromě tohoto problému má tento způsob výroby antén další nevýhody, jako slabé struktury a složitý montovací proces kvůli mnohonásobnému bondování. Aerosol Jet® přináší řešení výše zmíněných problémů při výrobě antén, neboť umožňuje nanášení vodivých cest přímo na zakřivený podklad. To zefektivňuje a zjednodušuje montážní proces tím, že je odstraněno přebytečné bondování a problémy se sesazováním. Systémem AJP byly vytištěny antény pro mobilní zařízení, které podporovali LTE, WiFi či GPS. Dodavatelé mobilních komponentů tyto antény ozkoušeli a zjistili, že výkon vytištěných antén je srovnatelný s jinými výrobními postupy. Ukázka tištěné antény pomocí AJP je vidět na obr 1.6.[4][15]



Obr. 1.6 Ukázka tištěné antény pomocí systému AJP (převzato z [15])

1.6.2 Solární články s vyšší účinností

Zde se jedná již o vyzkoušenou a můžeme říci v podstatě výrobní aplikaci systému Aerosol Jet®. Fraunhofer Institute of Solar Energy System (ISE) použil technologii Aerosol Jet® k výrobě úzkých kolektorových drah na krystalicko-křemíkových solárních článcích. Dosáhnutá šířka drah byla 20 μm , zatímco při použití síťotisku se šířka drah pohybovala kolem 100 μm . Kromě toho se snížilo stínování díky redukci šířky, tvar drah vytvořených technologií Aerosol Jet® vykazuje vysokou odrazivost, která upravuje optickou šířku drah, která je menší než 50 % jejich geometrické šířky. Snížení stínu spojené s použitím vysoce vodivých materiálů se promítlo zvýšením účinnosti solárního článku o více než 1 % absolutního průměru.[4]

Přesněji řečeno, použitím Aerosol Jet® prokázal ISE účinnost článku až 16,7% na multi-krystalickém křemíkovém článku velikosti 15,6 cm x 15,6 cm. Při použití Czochralského křemíkového článku velikosti 12,5 cm x 12,5 cm s hliníkovým zadním povrchem bylo dosaženo účinnosti až 18,3 %.[4]

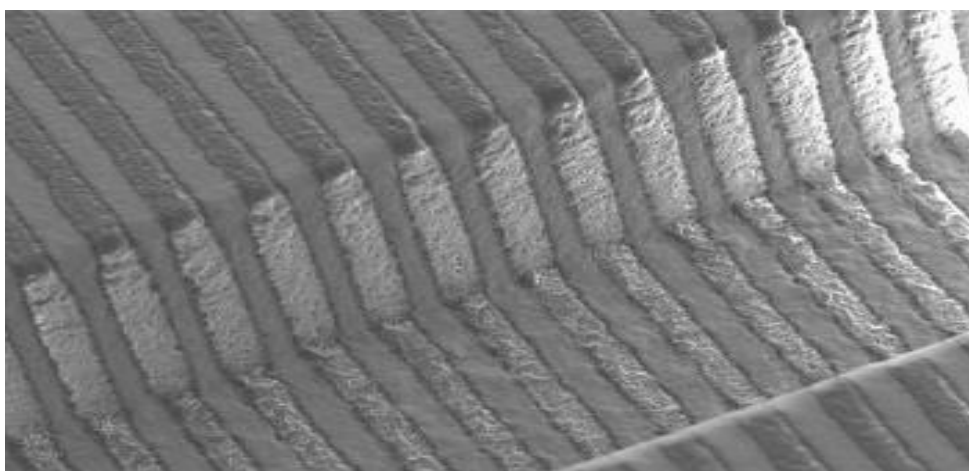
Kromě funkčních zisků se použití systému Aerosol Jet® také promítlo celkovým snížením nákladů na výrobu solárního článku. Snížení nákladů bylo dosaženo nižší spotřebou stříbra, křemíku, nižší poruchovostí a nižším počtem nedokonalých výrobků.[4]

Za účelem splnění požadavků rozvíjejícího se solárního průmyslu rozšířil Optomec svoji technologii Aerosol Jet® na čtyřiceti tryskovou konfiguraci, která je schopna tisknout 1 článek za 3 sekundy. Společnost Optomec spojila Aerosol Jet® s automatizovaným robotizovaným manipulačním systémem pro destičky polovodičů, čímž vznikl systém,

který je schopný vytvářet až 2400 článků za hodinu, což je více než 50 MW produkce za rok.[4]

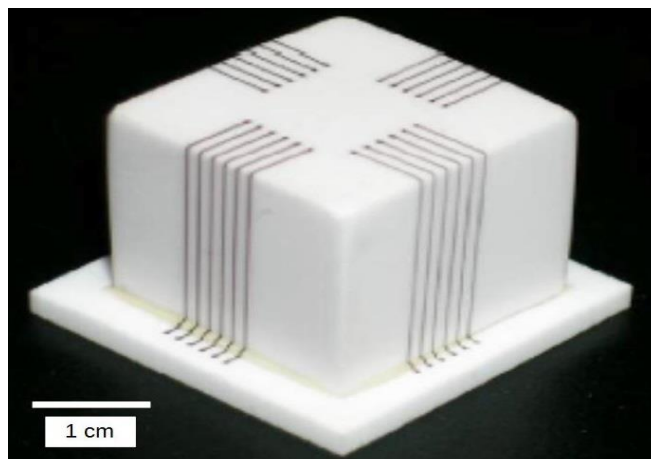
1.6.3 Tisk na 3D substráty

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.4., Aerosol Jet® je schopen nanášet materiály na rovinné, zakřivené nebo dokonce na 3D substráty. Tato unikátní vlastnost z něj činí ideální řešení pro mnoho aplikací. Je to umožněno relativně velkou vzdáleností mezi depoziční hlavou, ve které se nachází tryska, a substrátem a dále také dlouho ohniskovou vzdáleností materiálového paprsku vystupujícího z trysky. Neexistuje žádný fyzický kontakt substrátu s přístrojem (kromě nanášeného materiálu) a díky tomu lze snadno dosáhnout kvalitního nanášení materiálu. To umožňuje vznik 3D konformních prvků na tvarovaných dílech, dále nanášení materiálu do prohlubní nebo přes schody a kontury. Ukázka tisku přes prohlubeň je vidět na obr. 1.7.[4]



Obr. 1.7 Ukázka tisku 60 μm linií přes prohlubeň (převzato z [4])

Pro 3D povrchy s větším povrchovým profilem je využíván Aerosol Jet® se třemi osami pro tisk - tříosé tisknutí. To umožňuje tisk až do maximálního rozdílu výšky povrchu 50 mm. Příklad této schopnosti je tisk 3D stříbrného propojení na substrát z oxidu hlinitého s více než 25 mm výškovým rozdílem. V tomto případě byla depoziční hlava nejdříve nakloněna pod úhlem 45° a následně se pohybovala ve směru osy Z, aby bylo možné tisknout na svislé stěny a dosahovat požadované změny výšky. Výsledný produkt je zobrazen na obr. 1.8.[4]



Obr. 1.8 Stříbrné propojení na krychli z oxidu hlinitého (převzato z [4])

Jako první konkrétní příklad můžeme uvést tisk senzorů, antény a obvodu pro distribuci elektrické energie na křídla bezpilotního letounu - UAV, který byl sám vytvořen pomocí aditivní technologie FDM. Před tiskem elektroniky byl povrch křídel ošetřen šetrkem, čímž se dosáhlo lepšího smáčení inkoustu a zároveň byl aplikován dielektrický nátěr, aby vyhladil povrch a vyplnil trhliny. Obvody byly pak vytištěny na křídla, aby dodávaly energii LED diodám a vrtulím. Dalším konkrétním příkladem je tištěný snímací obvod hladiny kapaliny na plastové nádobě. V tomto případě byly vytištěny dvě kapacitní snímací struktury na koncích lisované dvoukomorové nádrže. Snímací struktury jsou propojeny pomocí klasických zapouzdřených komponentů, tím je vytvořeno kompletní zařízení pro snímání hladiny kapaliny. Když kapalina dosáhne určité výšky, tak se rozsvítí LED dioda. Pokud hladina kapaliny dosáhne svého maxima, tak se rozsvítí všechny LED diody a obrátí se směr chodu čerpadla. Nádrž s tištěným snímacím obvodem je vidět na obr. 1.9.[11]



Obr. 1.9 Dvoukomorová nádrž s tištěným snímacím obvodem hladiny kapaliny (převzato z [11])

2 Inkousty pro systém Aerosol Jet®

Aerosol Jet® podporuje tisk široké škály komerčně dostupných materiálů včetně zředěných past pro tlusté vrstvy, termosetových polymerů, jako například UV-vytvrditelné epoxidy, 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 zahrnující stříbro, zlato, platinu a jiné materiály byly vyvinuty pro vytvrzovací teplotu nižší než 120 °C. Polovodiče, dielektrické a adhesivní materiály a dokonce biomateriály jako proteiny a DNA mohou být nanášeny se systémem Aerosol Jet®, a to vše bez ztráty jejich bioaktivity.[16][17]

2.1 Dělení inkoustů

Základní dělení inkoustů pro AJP je podle příměsí, které obsahují, protože tyto příměsí určují jejich elektrické vlastnosti. Jedná se zde o kovové, odporové, nekovové vodivé, dielektrické a adhesivní, polovodičové a další speciální funkční inkousty.[16][17]

Kovové inkousty

Kovové inkousty patří mezi nejrozšířenější inkousty pro Aerosol Jet®. Obsahují malé částičky kovu, čímž zajišťují elektrickou vodivost. Nejrozšířenější příměsí je stříbro následované zlatem, platinou, mědí, niklem či hliníkem.[9][17]

Odporové inkousty

Odporové inkousty nejsou tak rozšířené jako kovové inkousty, jsou tvořeny uhlíkem, kombinací uhlíku a ruthenia, nebo strukturou PEDOT:PSS. Odporové inkousty se používají pro nanášení odporových cest nebo při výrobě tištěných rezistorů.[9][17]

Nekovové vodivé inkousty

Nekovové vodivé inkousty jsou buď tvořeny jednostěnnými uhlíkovými nanotrubicemi – SWCNTs nebo kombinací jednostěnných a víceštěnných uhlíkových nanotrubic.[17]

Dielektrické a adhesivní inkousty

Dielektrické a adhesivní inkousty tvoří značnou část inkoustů pro systém Aerosol Jet®, nabízí je velká řada výrobců. Tyto inkousty mohou obsahovat polyimid, polyvinylpyrrolidon, teflon AF, UV adhesiva a akryly nebo fotorezist SU 8.[17]

Polovodičové inkousty

Polovodičové inkousty jsou buď na bázi organických polovodičů, nebo uhlíkových nanotrubic. Uhlíkové nanotrubice mohou být buď jednostěnné, nebo víceštěnné.[9][17]

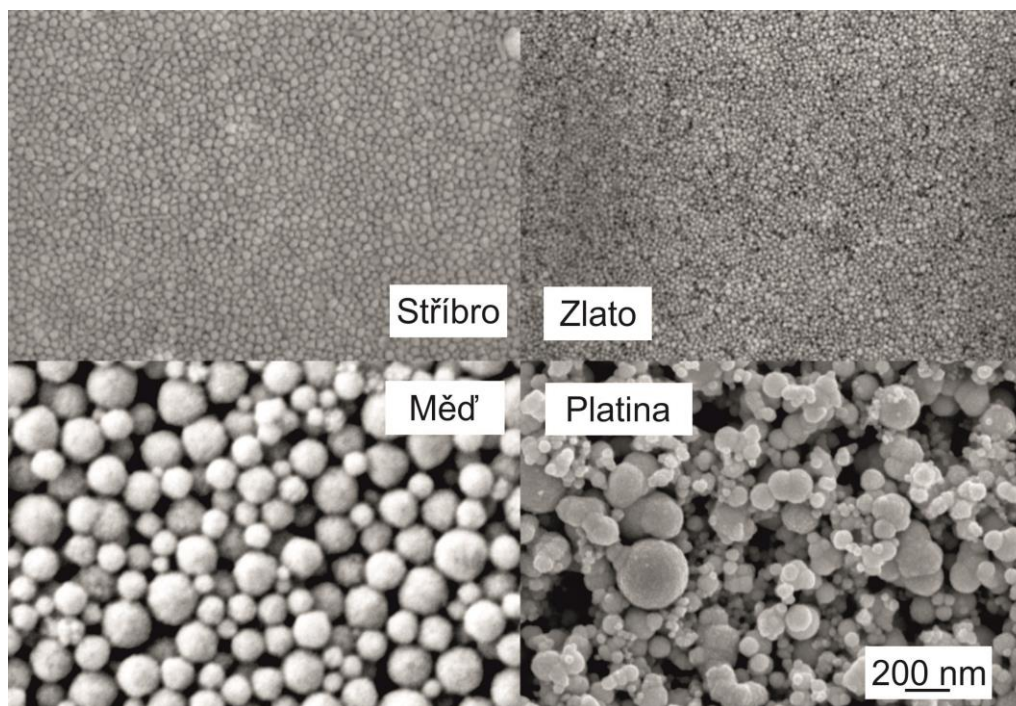
Speciální funkční inkousty

Poslední skupinou inkoustů jsou speciální funkční inkousty. Patří sem inkousty na bázi rozpouštědel, kyselin a zásad, inkousty odolné proti leptání a osvětlení či magnetické inkousty. Do speciálních inkoustů se dají zařadit inkousty obsahující biomateriály jako DNA, proteiny či enzymy.[9][17]

2.2 Parametry inkoustů

Velikost částic a obsah částic

Inkousty pro Aerosol Jet® jsou označovány jako nanoinkousty. Toto označení vzniklo z pevných částic, které tvoří inkoust. Právě velikost pevných částic je jedním ze základních parametrů inkoustů. Jejich velikost se pohybuje v řádu nanometrů, maximálně v rozmezí 300 – 500 nm. Taková velikost pevných částic platí pouze pro kulovité částice, ale pro vysoce anizotropní částice (např. nanotrubice) se může velikost částic blížit až 5 μm. Avšak největšímu vědeckému a komerčnímu zájmu se dostává inkoustům, které jsou tvořeny částicemi v rozmezí 1 – 100 nm. U částic pod 10 nm bylo dosaženo několika kladných vlastností, a to například poklesu bodu tání materiálu či změny vlnové délky absorbovaného nebo vyzářeného světla nanočásticí. Příklad rozdílných velikostí částic můžeme vidět na obr. 2.1, na kterém jsou zobrazeny čtyři inkousty od společnosti Fraunhofer IKTS, kde každý inkoust je tvořen jinou příměsí.[9][16][14]



Obr. 2.1 Ukázka rozdílných velikostí částic inkoustů (převzato z [18])

S velikostí pevných částic souvisí i jejich obsah v inkoustu. Obsah pevných částic se pohybuje v rozmezí od 5 do 70 %. Často se uvádí tzv. hmotnostní procenta. Například stříbrný inkoust má v datasheetu údaj 40 wt%, což značí, že stříbro tvoří 40 % celkové hmotnosti inkoustu, zbytek hmotnosti je tvořen rozpouštědlem. Pokud je inkoust tvořen z více druhů pevných částic, tak by oba druhy měly být rozptýleny rovnoměrně po celém objemu inkoustu.[9][16]

Fyzikální parametry

Mezi fyzikální parametry inkoustů patří především viskozita. Viskozita je fyzikální veličina charakterizující odpor tekutiny působící proti změně tvaru, nebo pohybu sousedních částic vůči sobě navzájem. Někdy je také označována jako vnitřní tření molekul. Převrácená hodnota viskozity se nazývá tekutost. Základní jednotkou používanou pro inkousty je Pascalsekunda [Pa·s], nebo Poise [P]. V datasheetech je nejčastěji uváděna jednotka centiPoise [cP], což je ekvivalent pro mPa·s. Viskozita inkoustů se pro Aerosol Jet® pohybuje v rozmezí 1 – 1000 mPa·s, udává se při pokojové teplotě.[16][19]

Rozpouštědlo

Rozpouštědla se dělí na dva typy - s nízkým a vysokým bodem varu. Rozpouštědlo s nízkým bodem varu tvoří hlavní kapalnou složku s vysokým tlakem výparu. Výhody rozpouštědel s nízkým bodem varu jsou: lepší kontrola šířky natisknuté linie, snížení kondenzace, nižší teplota substrátu a vyšší rychlost atomizace inkoustu. Naopak rozpouštědlo s vysokým bodem varu tvoří menšinovou kapalnou složku s nízkým tlakem výparu. Zasychá pomalu a působí jako vyrovnávací činidlo. Výhodou je snadná redukce při nanesení příliš mnoho inkoustu. Vytvrzení snižuje množství inkoustu o 10 – 20 %.[9]

3 Přehled vodivých inkoustů pro Aerosol Jet®

Následující kapitola obsahuje přehled vodivých inkoustů pro systém Aerosol Jet®. Inkousty jsou rozděleny podle příměsí, které obsahují. Jednotlivé inkousty jsou popsány vybranými vlastnostmi – viskozita, teplota a doba sintrování, velikost částic, rezistivita a cena.

Tab. 3.1 Přehled stříbrných inkoustů

Výrobce	Název	Viskozita [mPa·S]	Sintrování [°C] / [min]	Vel. částic [nm]	Rezistivita [μΩ·cm]	Cena
*ANP [21]	DGP 40LT-15C	10 - 17	120 - 150	neuváděno	10 - 12	600 - 850\$ /100g
*ANP [21]	DGP 45TE-20C	10 - 17	180 - 200	neuváděno	5 - 9	600 - 850\$ /100g
*ANP [21]	DGP 405 HTG	10 - 17	400 - 550	neuváděno	2 - 3	600 - 850\$ /100g
*ANP [21]	DGH 55LT-25C	7 - 16	250	neuváděno	2,4 - 3	600 - 850\$ /100g
*ANP [21]	DGH 55-HTG	7 - 16	400 - 550	neuváděno	2 - 2,5	600 - 850\$ /100g
*Applied Nanotech [22]	Ag-IJ10	4 - 5	150/30	3 - 10	10 - 50	nezjištěno
*Clariant [23]	Prelect TPS 30G2	15+-2	100-200/15-60	30 – 50	neuváděno	180€/40g
Clariant [23]	Prelect TPS 40G2	15+-2	100-200/15-60	30 – 50	neuváděno	nezjištěno
Clariant [23]	Prelect TPS 50G2	15+-2	100-200/15-60	30 – 50	neuváděno	370€/50g
Fraunhofer IKTS [24]	Ag-LT-20	8 - 12	> 25	< 80	< 0,1	nezjištěno
Fraunhofer IKTS [24]	Ag-LT-40	15 - 20	> 25	< 80	< 0,1	nezjištěno
Fraunhofer IKTS [24]	Ag-HT-20	8 - 12	> 350	< 80	0,03	nezjištěno
**Henkel [25]	ECI 1011	71	130/60	< 3000	neuváděno	nezjištěno
Novacentrix [26]	HPS-030AE1	130 - 180	> 140/20?	400	neuváděno	250\$/100g
Novacentrix [27]	HPS-108 AE1	neuváděno	> 140	400	neuváděno	250\$/100g

*Novacentrix [27]	Metalon JS-B25HV	8	125/5	60	2,8	250\$/50ml
*Novacentrix [27]	Metalon JS-B15P	4	neuváděno	70	4,5	nezjištěno
*Novacentrix [27]	Metalon JS-B25P	5	neuváděno	75	5	250\$/50ml
*Novacentrix [27]	Metalon JS-B35P	6	neuváděno	55	6,4	nezjištěno
Novacentrix [26]	PSPI-1000	50 - 80, 70 - 100	75/15	neuváděno	8,5	500\$/200g
Paru [28]	PG 007-AJ	70	80 - 200	100	neuváděno	480\$/200g
Resin Designs (AgE) [29]	ACURA E8074	250	150/60	neuváděno	$5 \cdot 10^{-5}$	nezjištěno
*Sun Chemical [30]	EMD5730	10 - 13	150 - 250 /10 - 30	neuváděno	5 - 30	nezjištěno
UT Dots [31]	UTDAg40	1 - 30	120 - 300	8 - 15	8	112\$/5ml

Tab. 3.2 Přehled hliníkových inkoustů

Výrobce	Název	Viskozita [mPa·S]	Sintrování [°C]/[min]	Vel. částic [nm]	Rezistivita [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	Cena
Applied Nanotech [32]	Al-IS1000	80 - 120	100/30	neuváděno	neuváděno	400\$/100g

Tab. 3.3 Přehled zlatých inkoustů

Výrobce	Název	Viskozita [mPa·S]	Sintrování [°C]/[min]	Vel. částic [nm]	Rezistivita [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	Cena
Fraunhofer IKTS [33]	Au-LT-20	8+3	> 40	< 60	< 0,15	713€/10ml
Fraunhofer IKTS [33]	Au-LT-40	15+5	> 40	< 60	< 0,15	1555€/10ml
Fraunhofer IKTS [33]	Au-HT-20	8+3	> 350	< 60	0,06	nezjištěno
UT Dots [34]	UTDAu	1 - 15	> 200 - 400	3 - 5	neuváděno	126\$/1ml

Tab. 3.4 Přehled měděných inkoustů

Výrobce	Název	Viskozita [mPa·S]	Sintrování [°C]/[min]	Vel. částic [nm]	Rezistivita [μΩ·cm]	Cena
Applied Nanotech [35]	Cu-IJ70	10 - 20	100/30	10 - 200	5 - 7	770\$/100g
Frauenhofer IKTS [36]	Cu-LT-20	8 - 12	> 40	< 90	< 0,2	nezjištěno
Frauenhofer IKTS [36]	CU-LT-40	8 - 12	> 40	< 90	< 0,2	nezjištěno
Frauenhofer IKTS [36]	Cu-HT-20	8 - 12	> 500	< 90	< 0,1	nezjištěno
*Novacentrix [27]	Metalon ICI-002	1 - 6,5	PulseForge®	85 - 115	3,4	nezjištěno
*Novacentrix [27]	Metalon ICI-002HV	9 - 12	PulseForge®	110-130	2,8 - 4,1	100\$/50ml
*Novacentrix [27]	Metalon ICI-003	1 - 6,5	PulseForge®	85-115	4,3	100\$/50ml

Tab. 3.5 Přehled niklových inkoustů

Výrobce	Název	Viskozita [mPa·S]	Sintrování [°C]/[min]	Vel. částic [nm]	Rezistivita [μΩ·cm]	Cena
Applied Nanotech [37]	Ni-IJ70-30	16 - 25	100/30	20 - 100	20 - 50	660\$/100g

Tab. 3.6 Přehled platinových inkoustů

Výrobce	Název	Viskozita [mPa·S]	Sintrování [°C]/[min]	Vel. částic [nm]	Rezistivita [μΩ·cm]	Cena
Frauenhofer IKTS [38]	Pt-LT-20	10+-3	> 100	< 100	< 0,5	487€/10ml
Frauenhofer IKTS [38]	Pt-LT-40	30+-5	> 100	< 100	< 0,5	nezjištěno
Frauenhofer IKTS [38]	Pt-HT-20	10+-3	>350	< 100	< 0,22	nezjištěno

Tab. 3.7 Přehled uhlíkových inkoustů

Výrobce	Název	Viskozita [mPa·S]	Sintrování [°C]/[min]	Vel. částic [nm]	Rezistivita [μΩ·cm]	Cena
*Methode [39]	3804	6	neuváděno	neuváděno	neuváděno	65\$/25ml

*Methode [39]	3800	12	neuváděno	neuváděno	neuváděno	nezjištěno
---------------	------	----	-----------	-----------	-----------	------------

Tab. 3.8 Přehled odporových PEDOT:PSS inkoustů

Výrobce	Název	Viskozita [mPa·S]	Sintrování [°C]/[min]	Vel. částic [nm]	Rezistivita [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	Cena
Heraeus [40]	Clevios P JET N V2	5 - 20	neuváděno	neuváděno	5000	212,5€ /250g
Heraeus [41]	Clevios P JET HCV 2	5 - 20	neuváděno	neuváděno	$3,33\cdot 10^3$	212,5€ /250g
Heraeus [42]	Clevios P JET 700	5 - 20	neuváděno	neuváděno	$1,54\cdot 10^3$	nezjištěno
Heraeus [43]	Clevios P JET (OLED)	4 - 20	neuváděno	neuváděno	$1\cdot 10^9 - 15\cdot 10^9$	nezjištěno

* inkoust je primárně určen pro inkjet

** zředěná pasta otestovaná na AJP

4 Diskuze

Údaje o jednotlivých vodivých inkoustech byly čerpány převážně z datasheetů, které výrobci nabízí ke stažení na svých webových stránkách, nebo byly datasheety získány prostřednictvím e-mailové konverzace se zástupci výrobců inkoustů. Někteří výrobci nenabízejí datasheety, nebo se jejich datasheety právě upravovaly, v takových případech byly potřebné údaje obdrženy přímo do e-mailové schránky.

Někteří výrobci mají své datasheety velmi obsáhlé, naopak jiní výrobci uvádějí ve svých datasheetech jen základní informace o inkoustech. Nakonec byly v kapitole 3 jako klíčové parametry inkoustů zvoleny viskozita, teplota a doba sintrování, velikost částic, rezistivita a cena inkoustu. I přes snahu se nepodařilo všechny parametry získat u každého inkoustu.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, základním fyzikálním parametrem inkoustů je viskozita, neboť určuje, zda a v jakém typu atomizéru může být daný inkoust použit. Právě díky tomu můžeme v kapitole 3 vidět, že viskozitu inkoustu uvádí téměř každý výrobce. U většiny inkoustů se viskozita pohybuje v řádech desítek či dokonce jednotek mPa·s. U stříbrného inkoustu od společnosti Resin Designs je viskozita na hodnotě 250 mPa·s, je to dáno tím, že se nejedná o klasický stříbrný vodivý inkoust, ale o stříbrno-epoxidový inkoust. Zajímavým údajem je viskozita u inkoustu od společnosti Henkel. Jedná se o zředěnou pastu určenou pro sítotisk, která byla úspěšně vyzkoušena na systému Aerosol Jet®[25]. U této zředěné pasty bylo dosaženo viskozity 71 mPa·s.

Dalším důležitým parametrem inkoustů je velikost částic, která je uváděna v nanometrech. U většiny inkoustů se velikost částic pohybuje do 100nm. U stříbrných inkoustů HPS-030 AE1 a HPS-108 AE1 od společnosti Novacentrix je velikost částic 400 nm. Výrobce uvádí, že se jedná o inkousty se stříbrnými nanočásticemi ve tvaru vloček. U zředěné pasty od společnosti Henkel je velikost částic uváděna jako menší než 3000 nm. Tato hodnota je pro systém Aerosol Jet® poněkud vysoká (doporučeno do 500 nm), a tak zůstává otázkou, jestli by nedocházelo k ucpávání trysky nebo zda by natištěné linie měly požadovanou kvalitu.

Velice důležitým parametrem je u vodivých inkoustů rezistivita. Ta by měla být u vodivých (kovových) inkoustů co nejnižší a naopak u odporových inkoustů co nejvyšší. V kapitole 3 vidíme, že kovové vodivé inkousty dosahují malých hodnot rezistivity, jsou také patrné rozdíly mezi jednotlivými kovovými příměsemi. Niklový inkoust má mnohem větší rezistivitu než inkousty platinové či zlaté. Nejnižších hodnot rezistivity dosahují inkousty od společnosti Fraunhofer, jejich měděné, platinové a zlaté inkousty dosahují nižších hodnot rezistivity než většina stříbrných inkoustů jiných výrobců. Rezistivita všech inkoustů od společnosti Fraunhofer byla menší než $0,5 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, dokonce u inkoustu Ag-HT-20 je uváděná rezistivita jen $0,03 \mu\Omega\cdot\text{cm}$. Rezistivita inkoustů ostatních výrobců byla v řádech jednotek či desítek $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. U odporových inkoustů můžeme skutečně vidět, že hodnota rezistivity je o několik řádů vyšší. U inkoustu Clevios P JET (OLED) od společnosti Heraeus je hodnota rezistivity nejvyšší a to v rozmezí od $1\cdot 10^9$ do $15\cdot 10^9 \mu\Omega\cdot\text{cm}$.

Poslední zkoumanou technickou vlastností inkoustu je teplota a doba finální tepelné úpravy, v kapitole 3 označeno jako sintrování. Většina výrobců uvádí pouze teplotu sintrování. Teplota sintrování je většinou uváděna kolem $100 \text{ }^\circ\text{C}$, ale u vysoko teplotních inkoustů může být teplota až 500 stupňů. Jedná se o důležitý údaj, protože při nesprávné tepelné úpravě nemusí dojít k dosažení parametrů, které výrobce uvádí, a to například rezistivity. Společnost Novacentrix u svých měděných inkoustů uvádí, že tepelná úprava není možná, ale že musí být použito zařízení zvané PulseForge® od společnosti Novacentrix. PulseForge® je přístroj, který zajišťuje fotonické vytvrzování, což je vysokoteplotní tepelné zpracování využívající pulzního světla z výbojky. Základním principem je vytvrzení takovou teplotou, aby inkoust dosáhl svých vlastností, po tak krátkou dobu, aby nedošlo k poškození substrátu. Celý proces trvá cca 1 ms . Právě díky velmi krátkému času, po který je substrát vystaven vysoké teplotě, je PulseForge® možné použít i pro nízko teplotní substráty jako plast nebo papír. Velkou nevýhodou je ale vysoká cena zařízení [20].

Posledním zkoumaným parametrem inkoustů je jejich cena. Cena byla nejobtížněji získatelným údajem, protože pouze společnost Novacentrix nabízí své inkousty k prodeji přímo na webových stránkách. U ostatních výrobců byla cena zjištěna prostřednictvím e-mailové komunikace. Výrobci po dotázání na cenu inkoustu buď zaslali ceník, nebo alespoň uvedli cenu do e-mailu. Problém při porovnání cen inkoustů je množství, za které

je cena uvedena. V kapitole 3 je vidět, že výrobci uvádějí cenu buď za určitý objem, nebo za určitou hmotnost. Například společnost Novacentrix uvádí u některých inkoustů cenu za hmotnost v gramech, ale u jiných inkoustů za objem v mililitrech. Porovnáme-li ceny inkoustů od společnosti Applied Nanotech, tak vidíme, že nejdražší inkoust je měděný (770\$/100g), zatímco nejlevnější inkoust je hliníkový (400\$/100g).

Kromě uvedených parametrů v kapitole 3 se dají zkoumat i další parametry inkoustů. Velice důležitým parametrem je minimální dodávané množství inkoustu, a to z toho důvodu, že trvanlivost inkoustů je omezená. Trvanlivost je ve většině případů garantována na 6 měsíců v teplotě menší než pokojové, většinou kolem 10 °C. Výjimkou je inkoust ACURA E8074 od společnosti Resin Designs, výrobce uvádí trvanlivost 6 měsíců při skladovací teplotě -10 °C. Minimální dodávané množství je většinou 100g nebo 40 - 50 ml. Například společnost UT Dots nabízí k prodeji již 1 ml zlatého, nebo 5 ml stříbrného inkoustu. Zároveň je u těchto inkoustů snížena trvanlivost na 3 měsíce.

Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na vodivé inkousty pro systém Aerosol Jet®. Hlavními úkoly bylo popsat celý systém, jeho využití, základní vlastnosti inkoustů pro tento systém a zpracovat přehled vodivých inkoustů dostupných na trhu.

Aerosol Jet® je jedna z moderních technologií selektivní depozice inkoustu na substrát. Jedná se o bezkontaktní technologii, při níž je inkoust nanášen ve formě aerosolu, který vzniká v pneumatickém nebo ultrazvukovém atomizéru. Tento patentovaný systém přináší nové možnosti v oblasti tištěné elektroniky. Využívá se například pro tisk antén, senzorů nebo pasivních součástek či vodivých cest. Oproti předešlým technologiím umožňuje tisk na nerovné substráty, tisk linií od šířky 10 μm , a také zvyšuje rychlost a flexibilitu tištěného motivu.

Inkousty pro tento systém mohou být různých typů, dělí se podle příměsí, které obsahují. Rozlišujeme vodivé, odporové, polovodivé či speciální funkční inkousty. Použití inkoustů závisí na jejich viskozitě a velikosti částic. Viskozita inkoustů může být maximálně 1000 mPa·s. Pokud chceme dosáhnout parametrů, které udává výrobce, tak je nutné správně nakombinovat použitý inkoust se substrátem a vhodně tepelně ošetřit inkoust po depozici.

Přehled vodivých inkoustů ukázal, že drtivou většinu dostupných vodivých inkoustů tvoří kovové, převážně stříbrné inkousty. Kromě stříbrných inkoustů jsou k dostání zlaté, měděné, platinové, uhlíkové, ale také speciální odporové PEDOT:PSS inkousty. Cena inkoustů se pohybuje v řádech stovek dolarů nebo eur. Inkousty pro Aerosol Jet® nabízí mnoho společností po celém světě, což je důkazem, že tato technologie neustále nabývá na větším významu. Technologie se využívá především při vzniku prototypů nebo ve výzkumu, ovšem existují dnes i společnosti, které pomocí systému již sériově vyrábějí.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] 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>
- [2] OPTOMECC. *Aerosol Jet Technology* [online]. ©2014 [vid. 9. listopad 2015]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
- [3] GOTH, Christian, Sonja PUTZO a Joerg FRANKE. Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications. *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2011, s. 1211–1216. ISSN 05695503. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2011.5898664
- [4] OPTOMECC. Aerosol Jet ® Printed Electronics Overview [online]. ©2014. [vid 12. listopad 2015]. Dostupné z: http://www.optomec.com/wpcontent/uploads/2014/04/AJ_Printed_Electronics_Overview_whitepaper.pdf
- [5] JAKUB LEVORA. *Tištěné senzory plynů*. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [6] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektrotechnice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [7] BRITANNICA, Encyclopædie. *Aerosol* [online]. 2016 [vid. 15. listopad 2015]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/science/aerosol>
- [8] NAVRÁTIL, Jiří (ed.). *Možnosti systému Aerosol Jet®*. In: FÍRT, Jaroslav. *Elektrotechnika a informatika 2015: Sborník konference*. První. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015, s. 87-90. ISBN 978-80-261-0514-5.
- [9] MIKE, Renn. *2015 Aerosol Jet User Group Meeting: Tips, tricks and materials*. 2015. Interní dokument společnosti Optomec
- [10] SOUKUP, Radek, Jiri NAVRATIL, Jan REBOUN a Tomas RERICHA. A comparison of the interdigital electrodes prepared by aerosol jet printing and lift-off technique. In: *2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* [online]. IEEE, 2015, s. 30-35 [cit. 2016-05-08]. DOI: 10.1109/ISSE.2015.7247956. ISBN 978-1-4799-8860-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7247956>
- [11] PAULSEN, Jason A., Michael RENN, Kurt CHRISTENSON a Richard PLOURDE. Printing conformal electronics on 3D structures with aerosol jet technology. *FIIW 2012 - 2012 Future of Instrumentation International Workshop Proceedings* [online]. 2012, s. 47–50. Dostupné z: doi:10.1109/FIIW.2012.6378343

- [12] REITBERGER, Thomas, Johannes HOERBER, Rene SCHRAMM, Simon SENNEFELDER a Joerg FRANKE. Aerosol Jet® printing of optical waveguides. In: 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) [online]. IEEE, 2015, s. 5-10 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1109/ISSE.2015.7247951. ISBN 978-1-4799-8860-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7247951>
- [13] TAIT, Jeffrey G., Ewelina WITKOWSKA, Masaya HIRADE, Tung Huei KE, Pawel E. MALINOWSKI, Soeren STEUDEL, Chihaya ADACHI a Paul HEREMANS. Uniform Aerosol Jet printed polymer lines with 30 ??m width for 140 ppi resolution RGB organic light emitting diodes. *Organic Electronics: physics, materials, applications* [online]. 2015, roč. 22, s. 40–43. ISSN 15661199. Dostupné z: [doi:10.1016/j.orgel.2015.03.034](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2015.03.034)
- [14] UT DOTS. *About Nano* [online]. [vid. 10. únor 2016]. Dostupné z: <http://www.utdots.com/about-nano.html>
- [15] OPTOMECC. *Printed Antennas* [online]. ©2014 Dostupné z: <http://www.optomecc.com/printed-electronics/aerosol-jet-core-applications/printed-antennas/>
- [16] OPTOMECC. *Aerosol Jet materials faqs* [datasheet]. ©2014 [vid. 10. únor 2016]. Dostupné z: <http://www.optomecc.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
- [17] OPTOMECC. *Aerosol Jet Materials*. [online]. ©2014 Dostupné z: <http://www.optomecc.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
- [18] IKTS, Fraunhofer. *Material inks and printing technologies of inkjet, aerosol jet and screen printing* [online]. [vid. 26. duben 2016]. Dostupné z: http://www.ikts.fraunhofer.de/en/research/energy_bio-medical_technology/materials_and_components/HT_ElectrochemistryCatalysis/material_inks.html
- [19] BRITANNICA, Encyclopædie. *Viscosity* [online]. ©2014 [vid. 27. únor 2016]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/science/viscosity>
- [20] NOVACENTRIX. *What Is Photonic Curing* [online]. ©2016 [vid. 30. duben 2016]. Dostupné z: http://www.novacentrix.com/tech/photonic_curing

Seznam datasheetů

- [21] ANP [Advanced Nano Products]. *Nano-silver Ink for Inkjet Printing* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016]. Dostupné z: e-mailová konverzace
- [22] Applied Nanotech. Inc. *Ag-IJ10: Nanosilver Ink* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016]. Dostupné z: e-mailová konverzace
- [23] Clariant. *Product Description & Properties* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016]. Dostupné z: e-mailová konverzace

- [24] Fraunhofer IKTS. Silver Conductive Nano Inks, Ag-IKTS [datasheet]. [vid. 21. duben 2016]. Dostupné z: http://www.ikts.fraunhofer.de/en/research/energy_biomedical_technology/materials_and_components/HT_ElectrochemistryCatalysis/material_inks.html
- [25] Henkel. *Optomec aerosol jetting of ECII011* [datasheet]. ©2015 [vid. 21. duben 2016]. Dostupné z: e-mailová konverzace
- [26] Novacentrix. *Aerosol Inks* [online]. ©2016 [vid. 21. duben 2016]. Dostupné z <https://www.novacentrix.com/products/metalon-inks/aerosol>
- [27] Novacentrix. *Inkjet Inks* [online]. ©2016 [vid. 21. duben 2016] Dostupné z <https://www.novacentrix.com/products/metalon-inks/inkjet>
- [28] Paru CO.,LTD. *Conductive Ink for Aerosol printing* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z: e-mailová konverzace
- [29] Resin Designs, LLC. *ACURA E8074* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z: e-mailová konverzace
- [30] Sun Chemical. *Nanosilver Conductive Ink EMD5730* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z: e-mailová konverzace
- [31] UT Dots, Inc. *UTDAg Conductive Silver Nanoinks* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z: e-mailová konverzace
- [32] Applied Nanotech, Inc. *Al-IS1000: Aluminium Ink* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z: e-mailová konverzace
- [33] Fraunhofer IKTS. *Gold Conductive Nano Inks, Au-IKTS* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z: http://www.ikts.fraunhofer.de/en/research/energy_biomedical_technology/materials_and_components/HT_ElectrochemistryCatalysis/material_inks.html
- [34] UT Dots, Inc. *UTDAu Conductive Gold Nanoinks* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z: e-mailová konverzace
- [35] Applied Nanotech, Inc. *Cu-IJ70: Copper Nanoink* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z: e-mailová konverzace
- [36] Fraunhofer IKTS. *Copper Conductive Nano Inks, Cu-IKTS* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z: http://www.ikts.fraunhofer.de/en/research/energy_biomedical_technology/materials_and_components/HT_ElectrochemistryCatalysis/material_inks.html
- [37] Applied Nanotech, Inc. *Ni-IJ70-30: Nanonickel Ink* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016]. Dostupné z: e-mailová konverzace
- [38] Fraunhofer IKTS. *Platinum Conductive Nano Inks, Pt-IKTSS* [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z: http://www.ikts.fraunhofer.de/en/research/energy_biomedical_technology/materials_and_components/HT_ElectrochemistryCatalysis/material_inks.html

- [40] Methode. Electronics, INC. Conductive & Resistive Inks [online]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z <http://www.methode.com/sensors-and-switches/conductive-and-resistive-inks.html#.VyYKY9yLRhG>
- [41] Heraeus. CLEVIOS P Jet N V2 [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z http://clevios.com/en/_technik/productdetail_1034014.aspx?psMarketId=1262423&psApplicationId=
- [42] Heraeus. CLEVIOS P Jet HC V2 [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z http://clevios.com/en/_technik/productdetail_1034012.aspx?psMarketId=1262423&psApplicationId=
- [43] Heraeus. CLEVIOS P Jet HC V2 [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z http://clevios.com/en/_technik/productdetail_1034010.aspx?psMarketId=1262423&psApplicationId=
- [44] Heraeus. CLEVIOS P Jet HC V2 [datasheet]. [vid. 21. duben 2016] Dostupné z http://clevios.com/en/_technik/productdetail_1034009.aspx?psMarketId=1262423&psApplicationId=

