

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Depoziční technologie Aerosol Jet Printing

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr HRABÁK**
Osobní číslo: **E14N0011P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Depoziční technologie 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. Popište technologii Aerosol Jet Printing (AJP).
2. Diskutujte výhody a nevýhody technologie Aerosol Jet Printing oproti ostatním depozičním technologiím.
3. Navrhněte kondenzátor realizovatelný technologií AJP.
4. Realizujete navržený kondenzátor na systému AJP a zhodnoňte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové 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. Hoerber, J.; Goth, C.; Franke, J.; Hedges, M., "Electrical functionalization of thermoplastic materials by Aerosol Jet Printing," Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), 2011 IEEE 13th , vol., no., pp.813,818, 7-9 Dec. 2011 doi: 10.1109/EPTC.2011.6184525
3. Fjelstad, J., "Flexible Circuit Technology," BR Publishing, Fourth edition, Seaside 2011.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Radek Soukup, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2015
Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá depoziční technologií Aerosol Jet Printing. Teoretická část popisuje princip technologie Aerosol Jet Printing a podrobně popisuje funkci jednotlivých částí tohoto systému. Zároveň práce obsahuje výčet používaných materiálů a požadavků na vlastnosti funkčních inkoustů z hlediska způsobu jejich atomizace v Aerosol Jet Printing systému. V další části práce jsou porovnány vlastnosti Aerosol Jet Printing technologie s konkurenčními technologiemi a zhodnoceny její výhody a nevýhody. V experimentální části je popsán navržený experiment, ve kterém byly realizovány tištěné kondenzátory pomocí Aerosol Jet Printing technologie.

Klíčová slova

Aerosol Jet Printing, depoziční technologie, tištěná elektronika, tištěný kondenzátor, technologie přímého psaní.

Abstract

This diploma thesis deals with Aerosol Jet® deposition technology. The theoretical part is focused on the principle and description of the technology. The thesis includes the list of mostly used materials and the function inks required properties in term of atomization in Aerosol Jet Printing system. The thesis also includes assessment of the advantages and disadvantages of the Aerosol Jet Printing technology and its comparasion with other deposition technologies. The experimental part describes the designed experiment, in which printed capacitors were realized by using the Aerosol Jet Printing technology.

Key words

Aerosol Jet Printing, deposition technology, printed electronics, printed capacitor, direct writing technology.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 11.5.2016

Bc. Petr Hrabák

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Radku Soukupovi Ph.D. za podporu, systematické vedení a cenné rady během zpracování diplomové práce. Zároveň velmi děkuji své rodině za velkou podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 DEPOZIČNÍ TECHNOLOGIE	10
1.1 AEROSOL JET PRINTING	10
1.1.1 Princip AJP	11
1.1.2 Popis částí systému.....	12
1.1.3 Volitelné komponenty	18
1.1.4 Systémové požadavky.....	19
1.1.5 Software AJP	20
1.1.6 Materiály pro AJP	21
1.2 INK JET.....	25
1.3 SÍTOTISK	26
1.4 HLUBOTISK	27
1.5 VAKUOVÉ NAPRAŠOVÁNÍ.....	27
2 ZHODNOCENÍ VÝHOD A NEVÝHOD AJP	29
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
3.1 NÁVRH TOPOLOGIE TIŠTĚNÉHO KONDENZÁTORU	35
3.2 REALIZACE TIŠTĚNÉHO KONDENZÁTORU	37
3.2.1 Použité materiály.....	37
3.2.2 Návrh kondenzátoru v AutoCAD	39
3.2.3 Tisk kondenzátorů na AJP	40
3.3 ALTERNATIVNÍ TVORBA KONDENZÁTORŮ.....	44
3.4 INSPEKCE VZORKŮ POMOCÍ MIKROSKOPIE.....	46
3.5 NAMĚŘENÉ HODNOTY A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	51
3.5.1 Závislost kapacity na frekvenci.....	53
3.5.2 Závislost ztrátového činitele na frekvenci.....	55
3.5.3 Závislost paralelního odporu na frekvenci	56
ZÁVĚR	60
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	62
PŘÍLOHY	67

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá depoziční technologií Aerosol Jet Printing. Jedná se o novou nanášecí technologii, která má velký potenciál uplatnit se v tištěné elektronice. Aerosol Jet Printing je potenciálním konkurentem klasických depozičních technologií jako je hlubotisk, sítotisk, vakuové naprašování a Ink Jet technologie.

Teoretická část práce se zabývá popisem principu technologie Aerosol Jet Printing, podrobně popisuje jednotlivé části systému a jejich funkci. Dále jsou v práci uvedeny požadavky a softwarové programy, které ke svému chodu systém používá. V další části je provedena rešerše nejčastěji používaných materiálů v Aerosol Jet Printing systémech. Popisuje složení funkčních inkoustů a požadavky AJP systému na vlastnosti inkoustu z hlediska použití v pneumatickém, nebo ultrazvukovém atomizéru. Zároveň je zde výčet používaných substrátů. Následně jsou v práci popsány principy konkurenčních technologií, a to Ink Jet technologie, sítotisku, hlubotisku a vakuového naprašování. Poslední část rešeršní práce se zabývá zhodnocením výhod a nevýhod AJP systému včetně porovnání jeho vlastností s popsányými technologiemi.

V praktické části práce je podrobně popsán návrh a realizace kondenzátorů tištěných na Aerosol Jet Printing systému. Zároveň je v práci popsán alternativní postup nanesení dielektrického inkoustu pomocí techniky spin coating. U vyrobených kondenzátorů jsou změřeny a sestrojeny grafy závislosti kapacity na frekvenci, závislosti ztrátového činitele na frekvenci a závislosti paralelního odporu na frekvenci. V závěru práce je zhodnocení jednotlivých výsledků.

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Význam	Český ekvivalent
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	Amorfní termoplastický kopolymer
AF	Amorphous Fluoroplastic	Amorfní fluoroplast
AJP	Aerosol Jet Printing	-
CAD	Computer Aided Design	Počítačem podporovaný návrh
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačem podporovaná výroba
CIJ	Continuus Ink Jet	Kontinuální Ink Jet
CPU	Central Processing Unit	Procesor
DOD	Drop On Demand	Princip techniky Ink Jet
DWG, DXF	Drawing, Drawing Exchange Format	Přípony souborů AutoCAD
FR4	Flame Retardant Class 4	Kompozitní materiál ze skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice
IJ	Ink Jet	-
LCP	Liquid Crystal Polymer	Polymery tekutých krystalů
LPM	Litters per Minute	Litry za minutu
MIM	Metal – Insulator - Metal	Kov – izolant - kov
MWCNTs	Multi-Walled Carbon Nanotubes	Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky
PA6	Polyamide 6	Polyamid 6
PC	Polycarbonate	Polykarbonát
PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Polystyrene Sulfonate	Polystyren sulfonát
PEN	Polyethylene Naphthalate	Polyetylenaftalát
PET	Polyethylene Terephthalate	Polyetylentereftalát
PI	Polyimide	Polyimid
PMMA	Polymethylmethacrylate	Polymethylmethakrylát
PVP	Polyvinylpyrrolidone	Polyvinylpyrrolidon
SCCM	Standard Cubic Centimeters per Minute	Standardní kubický centimetr za minutu
SMD	Surface Mount Device	Součástka pro povrchovou montáž
SMT	Surface Mount Technology	Technologie povrchové montáže
SU-8	Epoxy Based Negative UV photorezist	Epoxidový UV fotorezist
SW	Software	Programové vybavení
SWCNTs	Single-Walled Carbon Nanotubes	Jednostěnné uhlíkové nanotrubičky
UV	Ultraviolet	Ultrafialové záření
VI	Virtual Impactor	-

1 Depoziční technologie

1.1 Aerosol jet printing

Aerosol jet printing (AJP) je bezkontaktní depoziční technologie využívající aerodynamického proudu procesního plynu k nanesení materiálu na substrát pomocí aerosolu. Jedná se o novou technologii, která byla vyvinuta společností Optomec (USA – Nové Mexiko) a patentována v roce 2010. AJP podporuje širokou škálu materiálů, jako jsou funkční nanočásticové inkousty (vodivé, polovodivé, dielektrické, rezistivní, adhezivní, atd.), sítotiskové pasty, vodivé polymery, izolátory, lepidla a biologické materiály. Díky tomu lze jednoduše vytvářet tištěné propojovací struktury, jemné vodivé motivy a miniaturní elektronické součástky jako jsou pasivní součástky, senzory a tranzistory. Technologie AJP používá pro návrh motivů systémy CAD/CAM, které slouží k návrhu tištěného motivu a jeho rychlé změně. Oproti tradiční litografické technologii odpadá nutnost vytváření masek, filmových předloh a leptacího procesu. Další výraznou výhodou oproti sítotisku a Ink Jet technologii je možnost tisku na nerovné a 3D substráty. [1, 2, 3]

Rozměry nanesených motivů AJP jsou závislé na velikosti použité trysky. Tryska s nejmenším průměrem má 100 μm a naopak největší má průměr otvoru 3 mm. Minimální dosažitelná šířka čáry a rozteč mezi dvěma čarami je 8 μm . Tloušťka naneseného motivu je vyšší než 100 nm. Průměr jedné kapky 0,02-5 μm . Maximální velikost substrátu pro systém AJ 300 series UP, který vlastní ZČU, je 300 mm x 300 mm. [4, 5]

AJP systémy se používají v prestižních vývojových laboratořích na celém světě v oblasti výzkumu nové generace mikroelektronických zařízení a prvků, a to především díky jejich flexibilitě a univerzálnímu použití. Tyto systémy mohou být rovněž použity i v takových vědních oborech, jako je například biologie a biomedicína, kde ostatní selektivní depoziční techniky nelze použít. Mezi výzkumné instituce využívající AJP systémy patří např. National Renewable Energy Laboratory, Fraunhofer (IFAM, IKTS, ENAS, IWS, ISE), CEA LETI, Illinois Manufacturing Excellence Center, Printable Electronics Technology Centre, Sirris, National Aeronautics and Space Administration,

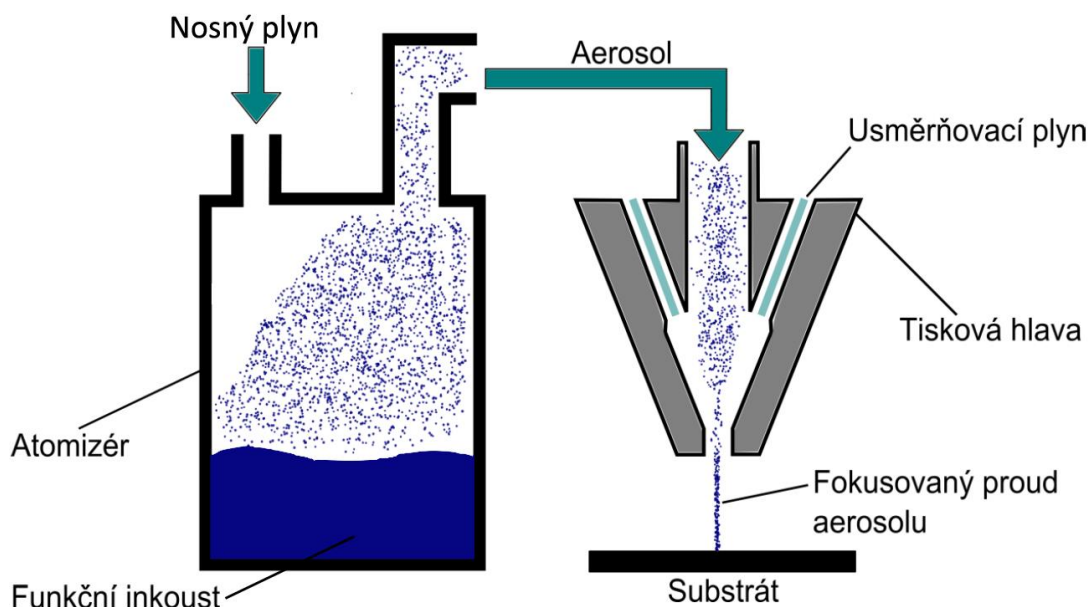
Sandia National Laboratories, US Air Force, US Army, US Navy, Ohio State University, Washington University, Penn State University, State University of New York, University of New South Wales (Austrálie), POSTECH (Korea), National Chiao Tung University (Taiwan), Sinano (Čína), Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (Francie). [6]

Mezi zmíněné vývojové laboratoře vlastní systém AJP patří od srpna 2014 i Regionální inovační centrum elektrotechniky Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Momentálně je technologie využívána při výrobě vysoce účinných fotovoltaických článků, vysoce účinných palivových článků, plochých monitorů, ohebných displejů, tenkovrstvých tranzistorů, flexibilních displejů a flexibilních obvodů, integrovaných rezistorů, antén a senzorů. [3, 5, 7, 8]

1.1.1 Princip AJP

Proces AJP využívá aerodynamické zaostřování nanášených materiálů s vysokým rozlišením na substrát. Systém se skládá ze dvou hlavních částí – atomizéru a tiskové hlavy jak je zobrazeno na *Obr 1.1*. [3]



Obr. 1.1: Principiální schéma technologie AJP. [9]

V atomizéru dochází k vytvoření aerosolu (suspenze pevných nebo kapalných částic v plynném prostředí) z procesního plynu a nanášeného materiálu. Vytvořený aerosol

s částicemi nanášeného materiálu o průměru 1-2 μm je pomocí nosného plynu transportován do tiskové hlavy. V tiskové hlavě dochází k bezkontaktnímu zaostření proudu aerosolu pomocí usměrňovacího plynu a nanesení aerosolu na substrát. Proud aerosolu opouští tiskovou hlavu při vysoké rychlosti (50 m/s). Tato vysoká rychlost vystupujícího aerosolu umožňuje velký odstup substrátu od tiskové hlavy (1-5 mm), což umožňuje tisk na nerovinné substráty. Nanášení je prováděno za atmosférických podmínek a při pokojové teplotě. [9, 10, 11]

Systém AJP má několik procesních parametrů. Velikost průtoku nosného plynu, který dopravuje aerosol k substrátu. Dále je to velikost průtoku usměrňovacího plynu, který soustřeďuje aerosol do úzkého svazku, rychlost pohybu držáku substrátu, který polohuje substrát pod trysku a jeho teplota. Všechny tyto parametry ovlivňují kvalitu natištěného motivu. [1, 9, 11]

1.1.2 Popis částí systému

Jednotlivé části systému AJP jsou zobrazeny na *Obr. 1.4* a popsány níže:

- **Atomizace**

Atomizace je proces vytváření aerosolové páry z inkoustu umístěném v atomizačním zásobníku – atomizéru. Přivedený proud plynného dusíku atomizuje inkoust a odvádí ho z atomizéru. V takto vzniklém aerosolu jsou různé velikosti kapek inkoustu. Největší kapky jsou z aerosolu odděleny a znovu rozbíjeny. Naopak malé a střední kapky mají dostatečný moment setrvačnosti a jsou proudem dusíku vyvedeny z atomizéru. [7]

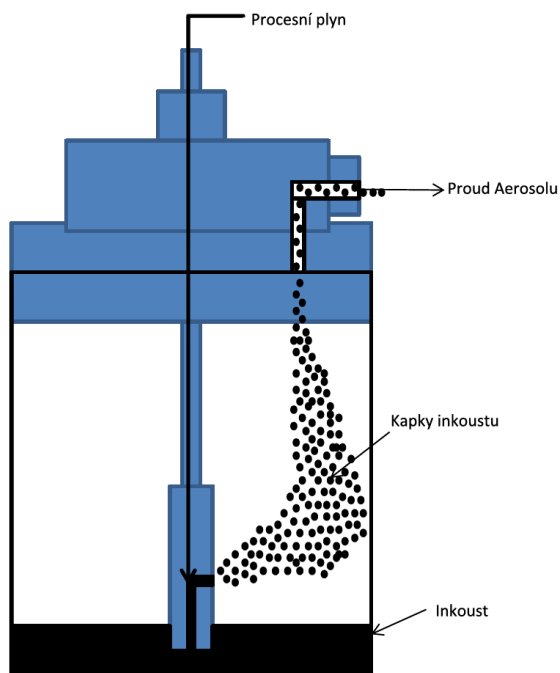
V komerčních technologiích AJP se používají dva typy atomizace:

- a) **Pneumatická atomizace**

Tento způsob atomizace vytváří aerosol vstřikem plynného dusíku kolmo k hladině inkoustu, jak je znázorněno na *Obr. 1.2*. Inkoust je vysokou rychlostí vystřelen na boční stěny atomizéru, o něž se rozbije na miniaturní kapky. Pokud jsou kapky moc velké, spadnou zpátky do zásobníku a proces se opakuje. Množství atomizovaného inkoustu se mění s množstvím přiváděného dusíku, který je řízen regulátorem hmotnostního

průtoku. Na fyzikální vlastnosti aerosolu má vliv viskozita inkoustu, povrchové napětí, rychlost proudění kapaliny, teplota inkoustu, rychlost proudění vzduchu kapek, které se vytvořily, a odpařování rozpouštědla z inkoustu způsobené neustálým prouděním procesního plynu, které se minimalizuje pomocí tzv. bubbleru. Inkoust v atomizační nádobě je možné míchat a zahřívát. Proces pneumatické atomizace potřebuje ke svému chodu minimálně 30 ml inkoustu, pokud se nepoužije nádoba se speciální teflonovou vložkou. Pak je pro tisk zapotřebí přibližně 12 ml inkoustu. [4, 7]

Pro pneumatickou atomizaci se používají inkousty s velikostí pevných částic nižší než 300 nm tvořících 65% hmotnosti objemu inkoustu, viskozitou v rozmezí 0,7-1000 mPas, s nízkým tlakem par ($\leq 0,1$ mm Hg) a vysokým bodem varu rozpouštědla (> 180 °C). Kapky vytvořené v aerosolu jsou větší než 50 nm. [4, 7, 12, 13]



Obr. 1.2: Princip pneumatické atomizace. [7]

b) Ultrazvuková atomizace

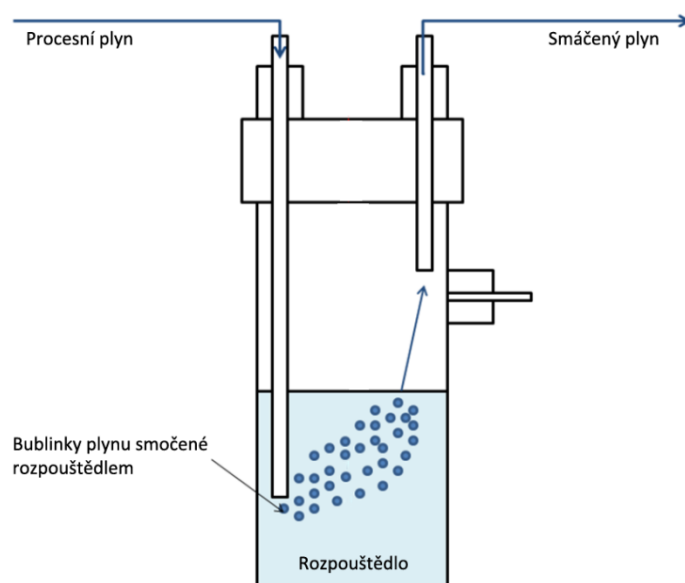
Ultrazvuková atomizace vytváří aerosol pomocí ultrazvukových vln. V tomto případě je inkoust umístěn v nádobě, která je ponořena ve vodě. Ultrazvukové vlny vytvořené piezoelektrickým převodníkem o frekvenci vyšší než 20 kHz rozkmitají vodu, která vibračně působí na nádobu s inkoustem. Pokud amplituda kapilárních vln dosáhne mezní hranice, inkoust již neudrží svou strukturu a začnou z něho vystřelovat kapky

inkoustu, které jsou strženy proudem plynného dusíku. Množství inkoustu v atomizační nádobě je oproti pneumatické atomizaci nižší, stačí pouze 1 ml inkoustu. Velikost kapek inkoustu je tedy řízena velikostí frekvence piezoelektrického převodníku. [4, 7]

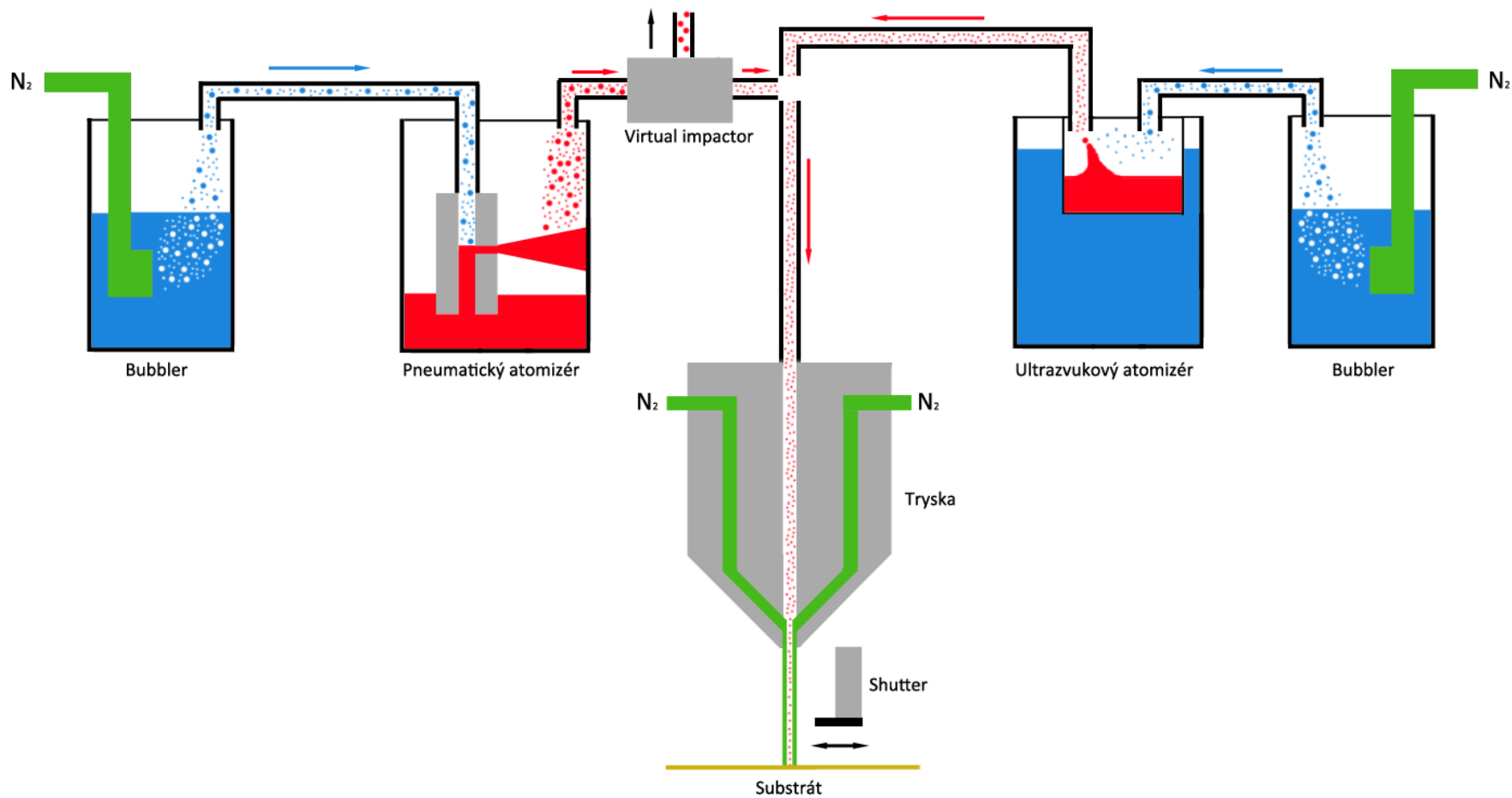
Inkousty pro ultrazvukovou atomizaci obsahují pevné částice o velikosti nižší než 50 nm tvořících 10-20 % hmotnosti objemu inkoustu s viskozitou v rozmezí 0,5-15 mPas. Oproti inkoustům pro pneumatickou atomizaci se používají inkousty s vysokým tlakem par a nízkým bodem varu rozpouštědla. Velikost kapek v aerosolu vytvořeném ultrazvukovou atomizací je nižší než 50 nm. [4, 7, 13, 14]

- **Bubbler**

Nepřetržitý tok procesního plynu (dusíku nebo stlačeného vzduchu) na povrch inkoustu atomizéru způsobuje odpařování rozpouštědla z atomizéru. To vede k degradaci inkoustu, která má vliv na kvalitu tisku. Ztráty obsahu rozpouštědla v inkoustu jsou sníženy průchodem procesního plynu skrz probublávací systém tzv. bubbler. Nádoba bubbleru obsahuje látky, ve kterých je inkoust rozpuštěn (voda, isopropyl alkohol, aceton, atd.). Procesní plyn je pomocí rozprašovače vstříknut pod hladinu rozpouštědla v bubbleru, kde dojde k jeho smočení rozpouštědlem. Smočený procesní plyn se přivádí do atomizéru, kde doplní množství rozpouštědla sníženého atomizačním procesem. Princip bubbleru je znázorněn na Obr. 1.3. [7]



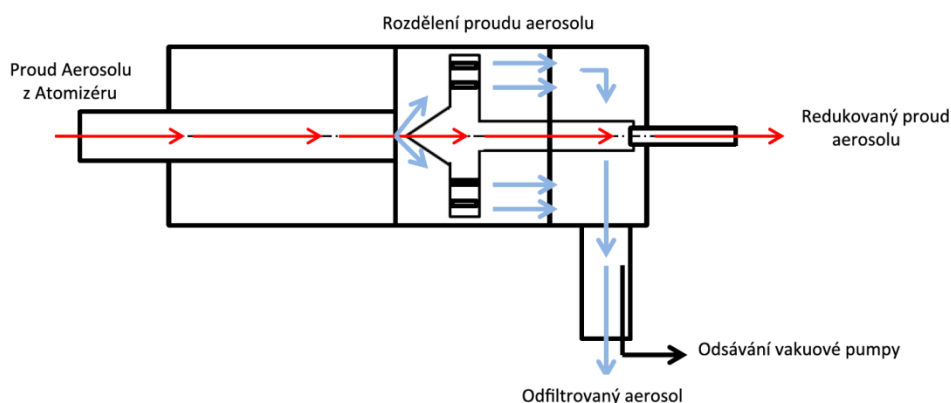
Obr. 1.3: Princip bubbleru. [7]



Obr. 1.4: Schéma systému AJP. [4]

- **Virtual impactor**

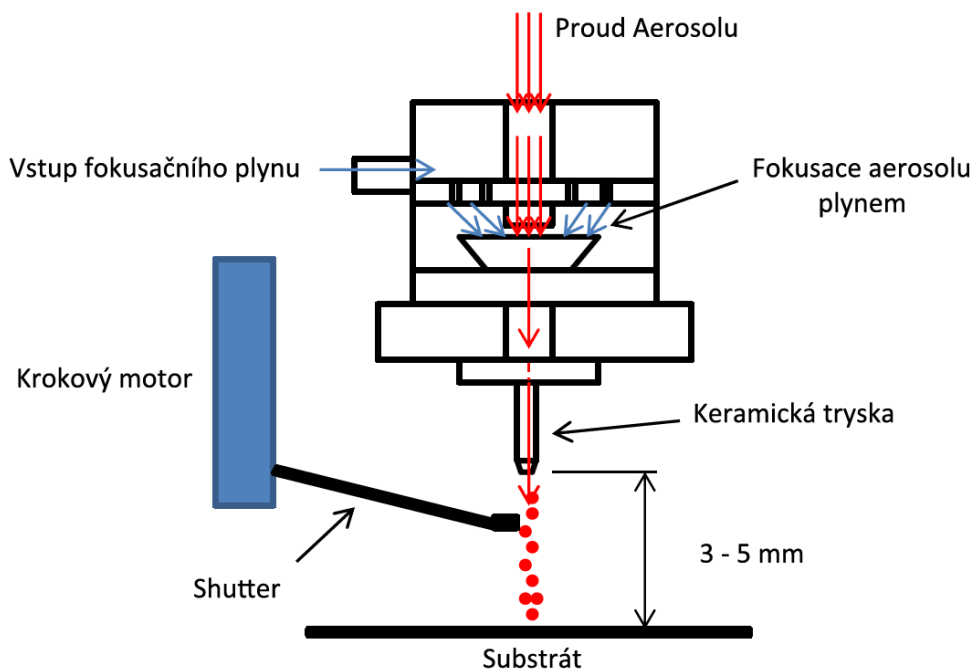
Virtual impactor (VI) slouží k homogenizování aerosolu. Proud aerosolu vystupující z atomizéru obsahuje velmi vysoké množství kapek inkoustu, které by mohly ucpat depoziční trysku. Zároveň je hmotnostní tok inkoustu příliš velký na výrobu stopy s vysokým rozlišením. Virtual impactor se nachází těsně za atomizérem. Má vakuový vývod, který odčerpává malou část aerosolového proudu vycházejícího z atomizéru. Malé kapky s nízkým momentem setrvačnosti jsou vakuem vytaženy z proudu plynného dusíku a přivedeny na filtr s aktivním uhlím. Naopak střední kapky mají příliš velký moment setrvačnosti a tím pádem skrz VI projdou. Materiál zachycený v uhlíkovém filtru může být recyklován a znovu použit. Princip VI je vyobrazen *Obr. 1.5*. Odstranění malých kapek z aerosolu pomáhá snižovat přestřík a nadměrné útvary v tištěných čarách. Vakuum ve VI je řízeno regulátorem hmotnostního průtoku, který je ovládán obsluhou. [4, 7]



Obr. 1.5: Princip Virtual Impactoru. [7]

- **Tryska**

Aerosolový proud je přenesen z VI do depoziční trysky pomocí polypropylenového nebo polyethylenového potrubí. Proud aerosolu je fokusován na střed pomocí proudu dusíku na střed trysky. Průtok dusíku je možné řídit pomocí nezávislého regulátoru hmotnostního průtoku. Hroty trysky jsou keramické nebo ocelové a jejich rozměr záleží na velikosti tištěného motivu (např.: 150 μm , 200 μm , 300 μm). Tryska je zobrazena na *Obr. 1.6*. [7]



Obr. 1.6: Tisková hlava. [7]

- **Shutter**

Shutter neboli stavítko je mechanický zásobník, který zabraňuje depozici aerosolu na substrát při vytváření složitých vzorů. A to v případě, kdy je potřeba proud aerosolu náhle zastavit - při přestávkách nebo krocích tisku. Krokový motor přemístí shutter pod špičku trysky. [4, 7]

- **Modul řízení pohybu**

Substrát je držen pomocí vakuového držáku na 300 mm x 300 mm desce. Tuto desku je možné vyhřát na 120 °C, aby došlo k zvýšení přilnavosti inkoustu na substrát. Osa X se může pohybovat po 400 mm, s místem 50 mm pro pracovní nástroje, uchycení kamery, depoziční hlavu a laser. Osa Y se pohybuje po 300 mm a je pevně připevněna k ose X, vůči které svírá 10 úhlových vteřin. Pracovními nástroji může obsluha pohybovat po ose Z ve vzdálenosti 50 mm. Přesnost pohybu na ose X a Y je $\pm 6 \mu\text{m}$ s opakovatelností $\pm 1 \mu\text{m}$. Systém umožňuje zrychlení 0,5 g při 100% zatížení. Pohyb po osách X a Y zajišťují servomotory s maximální rychlostí 300 mm/s. [13]

- ***Sledovací modul***

Sledovací modul obsahuje dvě kamery. Sledování procesu umožňuje tzv. sledovací kamera, která snímá místo nanášení materiálu na substrát a zobrazuje ho na monitor počítače. Seřizovací kamera umožňuje sesazení depoziční hlavy vůči sesazovacím značkám na substrátu (tzv. fiducials). Obě kamery umožňují zvětšit obraz až 200krát. [13]

1.1.3 Volitelné komponenty

AJP tiskárna Aerosol Jet 300 od společnosti Optomec nabízí tyto volitelné systémové komponenty:

- ***Laserový systém***

Laserový systém slouží primárně k následnému zpracování nanoseného materiálu tzv. sintrování. Při *in situ* sintrování dochází k spékání nano- a mikro-částic v nanoseném materiálu, což zajistí deklarované parametry deponovaných materiálů. V laserovém systému je použit laser s následujícími parametry: vlnová délka 830 nm, výkon 700 mW, průměr paprsku 1 mm, velikost zaostřeného bodu 15 μm , doba otevření a zavření shutteru < 1 ms. Laser je umístěn ve výšce 31 mm od substrátu a pracuje se vstupním a výstupním napětím 110 V. [13, 15]

- ***Motorizovaná osa Z***

Obsluha systému AJP může ručně nastavit konstantní vzdálenost depoziční hlavy od substrátu (max. 5 mm). Motorizovaná osa Z nabízí možnost automatického řízení konstantní vzdálenosti depoziční hlavy při tisku na nerovinné 3D substráty. Tato vzdálenost je automaticky řízena softwarem KEWA. [13]

- **3 mm široká tisková hlava „Sprint series“**

Tato tisková hlava je oproti klasické tiskové hlavě primárně určena pro maximální rychlost a flexibilitu při výrobě prototypů na úkor snížení možnosti řízení procesu. Umožňuje bezkontaktní tisk velkého množství funkcí v jediném kroku. Tisková hlava je vybavena vyměnitelnými tryskami se standardním průměrem, včetně 0,75 mm kruhové trysky a dvěma tryskami s drážkou o průměru 1,5 a 3 mm. Tisková hlava může vytvářet geometrie s šířkou od 0,3-1,5 mm a tloušťkou 100 nm - 10 μm. Stejně jako klasická tisková hlava podporuje všechny druhy funkčních inkoustů. [13]

- **Ruční náklon držáku substrátu**

Držák substrátu je možné naklonit o 15-60° vůči „Sprint series“ tiskové hlavě. Tato funkce zlepšuje tisk na obtížně zaměřitelná místa, nerovinné a 3D substráty. [13]

- **UV vytvrzovací systém**

Ultrafialový vytvrzovací systém se používá pro vytvrzování nanesených UV tvrditelných pryskyřic. Systém umožňuje ozářit jak celý substrát, tak i jednotlivé části, a to synchronizovaným, nebo nesynchronizovaným ozářením. Systém má výbornou ozařovací stabilitu a je vybaven zpětnovazebnou regulací teploty. Vytvrzovací modul má intenzitu záření 9200 mW/cm² s vlnovou délkou 385 nm a s ozařovací přesností ± 3 %. [13]

1.1.4 Systémové požadavky

Systém AJP vyžaduje ke svému bezproblémovému chodu PC s programem AutoCAD (podporované verze 2002- 2013), který umožňuje návrh nanášených motivů přes VMTools. [13]

Zásobníky s procesním plynem používaný v pneumatickém atomizéru a jako nosný plyn aerosolu. Jako procesní plyn se používá suchý inertní plyn (dusík nebo stlačený vzduch) s tlakem 4-5,5 bar. Stlačený vzduch musí být filtrován přes olejový filtr a exsikátor plněný silikagelem, aby neobsahoval nečistoty a vlhkost. [13]

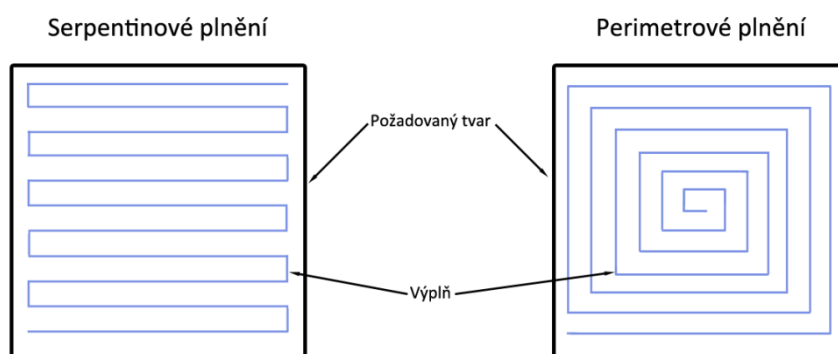
Ultrazvukový atomizér potřebuje pro svůj chod vodní napájení z tepelně řízeného přívodu vody. Teplota přiváděné vody musí být v rozmezí 10-40 °C s teplotní stabilitou $\pm 0,5$ °C a minimálním průtokem čerpadla 4 LPM. Proto se nedoporučuje napájení z vodovodu, nýbrž z jiného teplotně kontrolovaného přívodu vody. [13]

Celý systém musí být připojen na elektrické napájení 120/240 V, 50/60 Hz, 30 A. [13]

1.1.5 Software AJP

Aerosol jet printing technologie využívá dva softwarové programy – VMTools a KEWA. [13]

VMTools je rozšíření pro program AutoCAD (podporované verze 2002-2013), provozovaný na operačním systému Windows. Tento software se využívá pro programování dráhy nástroje ve standardních souborech systému AutoCAD (DWG a DXF). Soubory DWG nebo DXF se importují do VMTools, kde jsou křivky převedeny pomocí plnicích algoritmů. Při převádění křivek se nepřevádí pouze jejich tvar, ale i pořadí jejich vytvoření. Proto je nutné při návrhu motivu v programu AutoCAD vytvářet čáry tak, aby docházelo ke spojitému nanášení motivu. Program umožňuje dva typy plnění při vytváření vrstev – serpentínový nebo perimetrový. Jedná se o matematické algoritmy založené na bázi vektorového rastrování. Vrstvy se tedy netisknou po řádcích, jako je tomu u Ink Jet (IJ), ale po předem definovaných trasách, jak je zobrazeno na *Obr. 1.7*. VMTools poté vygeneruje příkazy pro řízení pohybu dráhy nástroje. Tyto vygenerované dráhy jsou plně kompatibilní se systémem KEWA. [1, 13]



Obr. 1.7: Princip plnicích algoritmů AJP. [14]

KEWA – „Aerosol Jet Workstation Control software“ umožňuje obsluhu řídit depoziční hlavu AJP v grafickém prostředí. Tento SW běží na CPU v řídicí jednotce AJP. Pomocí programu KEWA lze v grafickém prostředí ovládat veškeré aspekty činnosti AJP, pokud nejsou plně automatizovány výstupním souborem z VMTools. Kromě toho, že má obsluha celkovou kontrolu nad procesem, nabízí KEWA další pokročilé funkce, které usnadňují manipulaci se substrátem. Jedná se o nástroj pro kalibraci ofsetu, rozpoznávání vzorů pro automatické zarovnání dílů, a seřízení dráhy nástroje pro nezarovnané nebo otočné díly. [13]

1.1.6 Materiály pro AJP

Pro konvenční AJP je dostupná široká řada komerčně dostupných inkoustů. Stejně jako u každé nové technologie se hledají optimální materiály, které budou dosahovat optimálních výsledků finálního produktu. Konkrétní aplikace vyžadují optimální kombinaci inkoustu a substrátu.

- ***Inkousty pro AJP***

Jak již bylo zmíněno, mezi hlavní výhody AJP technologie patří možnost nanášení široké škály funkčních inkoustů. Funkční inkousty se zpravidla skládají ze tří hlavních složek – kapaliny (vody, organických rozpouštědel, síťovatelných monomerů), z funkčních částic umožňujících vazbu funkčních molekul (vodivých částic, polymerů, barviv) a aditiv, které mají určitou funkci (povrchově aktivních činidel, konzervačních látek, fotoiniciátorů). [17, 18]

Inkousty musí splňovat několik technických požadavků – musí být kompatibilní s technologií tisku, musí splňovat cílové parametry jako je správná geometrie nebo vodivost, a velikost částic obsažených v inkoustu nesmí být vyšší než 1 μm . Pro dosažení vysoké elektrické vodivosti, nebo k tvorbě a zhuštění mikrostruktury, je nanesený materiál vystaven teplotě ve slinovací cyklu. Teplota slinování je závislá na druhu použitého substrátu. Substráty na bázi polymerů nesmějí být vystaveny teplotě vyšší než 180 °C, ale keramické substráty snesou teplotu až několika set stupňů Celsia. Ovlivnit teplotu spékání je možné přidáním dispergačního činidla v procesu přípravy inkoustu. [18, 19]

V inkoustech nanášených pomocí AJP musí být použito rozpouštědlo s vysokým bodem varu, s nízkým tlakem par (v porovnání s etylenglykolem) a s velikostí pevných částí menší než 200 nm. Pevné částice musí tvořit 5-70 % váhového množství z celkového objemu. Pokud inkoust obsahuje více druhů pevných částic, musí být tyto částice rovnoměrně rozptýleny v celém jeho objemu. Doporučená viskozita inkoustu je 0,5-1000 mPas. [8]

V závislosti na vlastnostech použitého inkoustu se volí způsob atomizace. Inkousty, které se přetváří na aerosol v pneumatickém atomizéru, mají větší velikost částic, vyšší viskozitu a větší množství pevných částic, než inkousty, které se používají v ultrazvukovém atomizéru. Porovnání vlastností inkoustů pro pneumatickou a ultrazvukovou atomizaci je uvedeno v tabulce 1.I. [8, 12, 15]

Tab. 1.I Porovnání vlastností inkoustů pro pneumatickou a ultrazvukovou atomizaci. [12, 14]

Vlastnost	Pneumatická atomizace	Ultrazvuková atomizace
Velikost částic [nm]	< 300	< 50
Váhové množství [wt%]	> 65	10 – 20
Počet aglomerátů	velmi málo	žádné
Rychlost sedimentace [h]	1 - 2	1 - 2
Teplota rozpouštědla [°C]	25 – 50	10 – 50
Množství aditiv [%]	3 – 5	3 – 5
Viskozita [cP]	50 – 200	1 – 30
Skladovatelnost	12 měsíců	12 měsíců
Slinovací teplota [°C]	130	-

- **Substráty pro AJP**

Jak již bylo zmíněno, AJP je bezkontaktní technologie, a proto se hodí pro nanášení materiálů na rovinné, nerovinné, flexibilní i 3D substráty. Volba použitého substrátu záleží na aplikaci, vytvrzovacích a slinovacích podmínkách a požadovaných vlastnostech nanášeného materiálu. [20, 21]

Substráty založené na bázi papíru mají dobrou smáčivost a adhezi, ale mají vysokou absorpci použitých rozpouštědel. Papírové substráty jsou porézní, což negativně ovlivňuje vodivost nanášeného materiálu. Výhodou je jejich nízká cena. [21, 22]

Plastové substráty mají také dobrou smáčivost, ale delší vysoušecí a vytvrzovací čas. V porovnání s papírovými substráty nejsou pórovité a díky tomu mají sníženou schopnost adheze. Adheze se může zlepšit správným vytvrzováním a spékáním naneseného materiálu, popřípadě lze adhezi zvýšit před nanesením materiálu, a to zvýšením povrchového napětí substrátu korónou nebo pomocí plazmy. [21, 22]

Polymerní substráty, které nejsou citlivé na vysokou teplotu, mohou být i s naneseným materiálem slinuty v přetavovací peci. Mezi hlavní zástupce těchto plastových substrátů patří polyimidová fólie Kapton®, která si udržuje svou fyzikální a chemickou stálost v rozmezí teplot 269-400 °C. Polyamidový substrát PA6/6T je také tepelně stálý, a to až do 295 °C. Dalším teplotně stálým substrátem je LCP jehož bod tání je 280 °C. Díky svým vlastnostem jsou tyto polymerní substráty využívány v náročnějších aplikacích, které mají požadavek na vyšší teplotní odolnost. Polymerní substráty PMMA, PET, PEN, PC mají relativně nízkou teplotu tání (140 °C). Materiály nanesené na tyto substráty musejí být lokálně vytvrzeny pomocí laserového systému, UV vytvrzovacího systému, nebo fotonickým vytvrzováním. Oproti tepelně odolným substrátům je jejich výroba jednodušší a jejich výrobní náklady jsou výrazně nižší. [8, 21, 23, 24, 25, 26]

Flexibilní skelné substráty se díky své optické propustnosti využívají v zobrazovací technice. Jsou chemicky a tepelně stálé až do teploty 600 °C, mají nízkou tepelnou roztažnost a patří k nejlepším elektrickým izolantům. Nevýhodou těchto substrátů je jejich vysoká cena a křehkost. [26]

Mezi flexibilní substráty se řadí i textilní tkaniny tzv. smart textilie. Elektrické obvody se buď integrují do tkaniny, nebo jsou do textilie zatkané. Smart textilie se mohou vyrábět z vodivých mikrodrátů, ovrstvením syntetických monofilních vláken vrstvami kovů, jejich solí nebo vodivých polymerů. Tyto textilie musí mít požadované vlastnosti, jako je jejich dlouhá životnost, odolnost proti oděru a automatickému praní, flexibilita, mechanická odolnost, a v neposlední řadě musí být pohodlná při nošení. Integrací do plošných textilií lze vytvářet senzory, aktuátory, fotovoltaické zdroje a integrovaná zařízení. [26, 27]

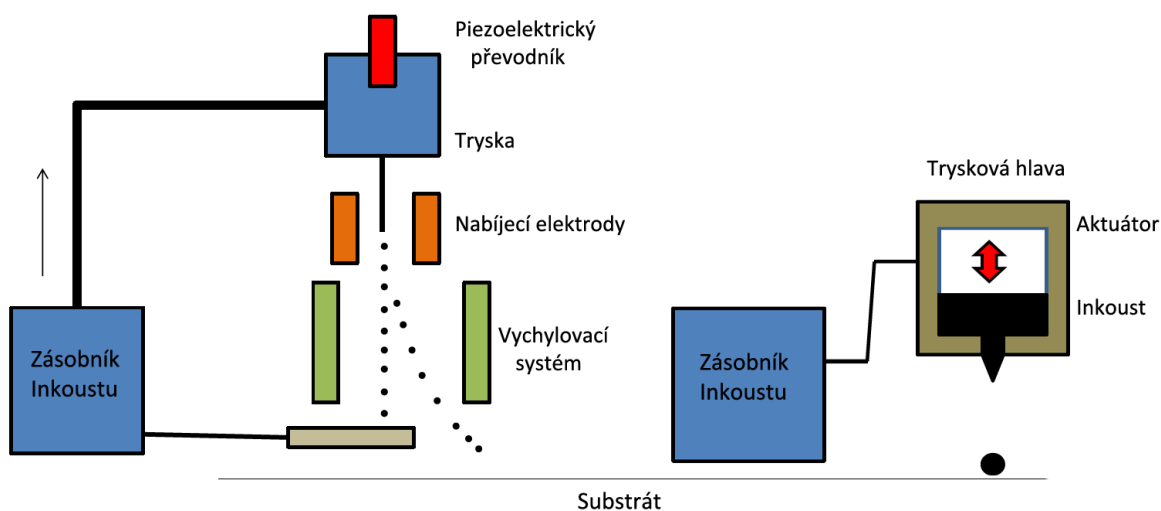
Seznam komerčně vyráběných materiálů určených pro AJP a jejich výrobců je uveden v tabulce 1.II.

Tab. 1.II Seznam komerčně vyráběných depozičních materiálů pro AJP. [8]

Kovové vodiče	Rezistivní inkousty	Nekovové vodiče
Alfa (Au)	Acheson (C)	Brewer Science (SWCNTs)
An Cuig (Pt)	Asahi (C)	Heraeus (PEDOT:PSS)
Applied Nanotech (Ag, Cu, Ni, Al)	Dupont (C, ruthenát)	NanoIntegris (SWCNTs, MWCNTs)
Bayer Materials Science (Ag)	Lord (C)	SouthWest Nanotechnologies (SWCNTs, MWCNTs)
Cabot (Ag)	Method Development (C)	
Cima Nanotech (Ag)		
Dupont (Au)		
Harima (Au, Ag)		
Intrinsic (Ag, Cu)		
Nanomass (Au, Ag)		
Nova Centrix (Ag, Cu)		
Resin Designs (Ag)		
UT Dots (Au, Ag, Pt)		
UT Dots (Au, Ag, Pt)		
Dielektrika a adhezivní vrstvy		Polovodiče
Aldrich (polyimid)	Aldrich (organické polovodiče)	Aldrich (obecné rozpouštědla, kyseliny a zásady)
BASF (PVP)	Alfa (organické polovodiče)	Alfa (obecné rozpouštědla, kyseliny a zásady)
Dupont (Teflon AF)	Brewer Science (SWCNTs)	Rohm & Hass
Gersteltec (SU-8)	Cheap Tubes (SWCNTs)	Shiplay (fotorezisty)
Henkel (adhezivní)	Merck (organické polovodiče)	
Loctite (adhezivní)	NanoIntegris (SWCNTs)	
Mantech Materials (polyimid)	Southwest Nanotechnologies (SWCNTs)	
Microchem (SU-8)		
Nazdar (matný nátěr)		
Norland (UV adhezivní)		
Summers Optical (UV adhezivní)		
Sun Chemical (UV akrylát)		

1.2 Ink Jet

Ink Jet je aditivní výrobní technologie, která nanáší kapky inkoustu přímo na substrát. Tisk je realizován bezkontaktně. Stejně jako AJP se používá k tištění miniaturních tranzistorů, kapacitorů a induktorů. Princip technologie IJ vychází z klasických kancelářských inkoustových tiskáren, které jsou již řadu let rozšířené v domácnostech. Ke generování inkoustových kapek se používají dvě metody - kontinuální inkoustový (CIJ) tisk a tisk "drop-on-demand" (DOD). Princip je zobrazen na *Obr. 1.8.* [7, 28, 29]



Obr. 1.8: Principiální schéma CIJ inkoustového tisku a DOD inkoustového tisku. [7]

Kontinuální tisk je založen na nepřetržitém proudu inkoustu z trysky na substrát. Každá kapka inkoustu je individuálně nabita elektrostatickým polem na nenulový potenciál, a následně přes vychylovací systém vychýlena do požadované polohy na substrát. V případě, že není třeba tisknout, je proud inkoustu odchycen a vrácen zpět do inkoustového zásobníku. CIJ pracuje s inkousty s nižší viskozitou než DOD, má vyšší rychlost nanášení, frekvence tvorby kapek je až 60 kHz, a typicky používá pro tisk jednu trysku. [7, 28, 29]

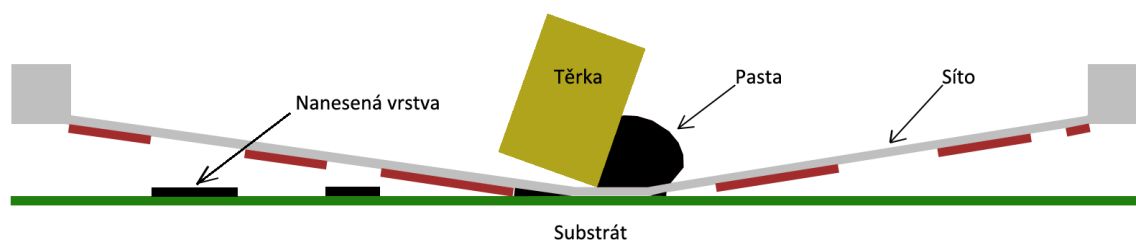
DOD generuje kapky inkoustu pouze v případě, že mají být vytištěny. Vygenerování kapky inkoustu je řízeno pomocí spouštěcího signálu z aktuátoru, proto tato metoda nepotřebuje žádný zásobník na inkoust, a nedochází tak k jeho plýtvání. Tryska je umístěna na pohyblivé hlavici, takže není potřeba vychylovacího systému pro umístění

kapky na substrát. Tvorba kapek je ve frekvenci 1-20 kHz. Oproti CIJ generuje menší kapky, je přesnější, ale pomalejší. Díky tomu se tato metoda používá pro nanášení funkčních inkoustů. [7, 28, 29]

1.3 Sítotisk

Sítotisk je již tradiční depoziční technologie, která se používá zejména při výrobě hybridní elektroniky, fotovoltiky a tištěné elektroniky v elektronickém průmyslu. Oproti klasickým tiskovým metodám je rychlejší, jednodušší a univerzálnější. Díky své schopnosti produkovat přesně definované vrstvy z různých pastovitých materiálů (včetně vodivých, odporových, dielektrických a organických materiálů) se používá nejen při výrobě tlustovrstvých hybridních obvodů, ale i k výrobě kondenzátorů, rezistorů, cívek, antén, tranzistorů, senzorů a vícevrstevných obvodů. Pomocí sítotisku lze nanášet materiály na textilní a flexibilní substráty. [30, 31]

Princip sítotisku je zobrazen na *Obr. 1.9*. Pasta je pomocí třerky protlačována skrz oka v sítu. Na sítu je vytvořen požadovaný motiv tak, aby v místech, kde nemá být pasta nanášena na substrát, neprošla skrz oka síta. Tloušťka nanášené vrstvy je závislá zejména na parametrech síta: jeho tvaru a velikosti ok, hustotě ok a druhu použitých vláken při jeho výrobě. Tloušťku nanášené vrstvy navíc ovlivňují i vlastnosti použité pasty (viskozita, smáčivost). Obvyklá tloušťka nanášených vrstev se pohybuje v rozmezí 3-30 μm . [30, 31]



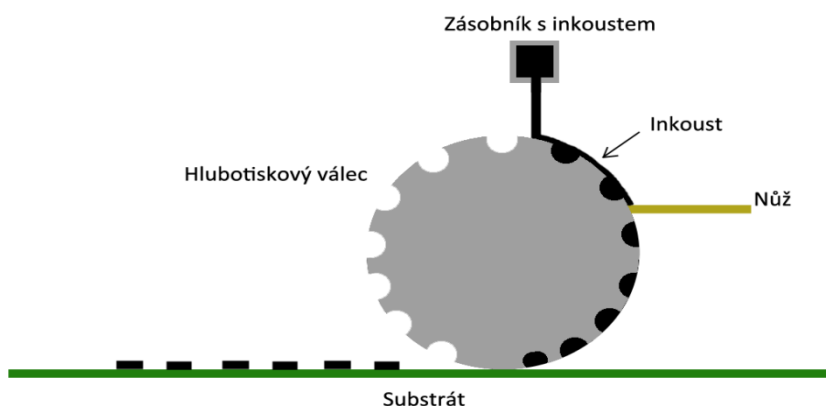
Obr. 1.9: Princip sítotisku. [32]

V reakci na další snížení výrobních nákladů se v poslední době objevil tzv. pokročilý sítotiskový proces. Tato technologie umožňuje nanášet ultratenké vrstvy a linie. Hlavním rysem pokročilého sítotiskového procesu je optimální kombinace speciální emulze, pasty, sítotiskové tiskárny a inovativního síta s precizními oky. Takto optimalizovaný proces vytváří linie menší než 50 μm . Do sítotiskových metod patří i tzv. rotační sítotisk.

Jeho princip je založen na otáčivém pohybu dvou válců. Jeden válec je tvořen sítím, ve kterém je umístěn inkoust a stacionární těrka. Na druhém válci je navinut flexibilní substrát. Pomocí těrky je inkoust protlačen skrz motiv válce na substrát. Díky tomu, lze dosahovat vyšší rychlosti tisku, kvality tisku a sériovosti výroby. [32, 33]

1.4 Hlubitisk

Hlubitisk je zástupcem komerčně používaných depozičních technologií. Umožňuje vytvářet vysoce kvalitní motivy s vysokou efektivitou. Princip technologie je zobrazen na *Obr. 1.10*. Na válec z galvanické mědi se pomocí laseru vytvoří požadovaný motiv. Poté se galvanicky pokoví chromem, aby byl chráněn proti opotřebení během přenosu inkoustu na substrát. Vyryté buňky motivu se naplní inkoustem ze zásobníku. Pro odstranění přebytečného inkoustu se používá nůž. Inkoust se poté točivým pohybem a tlakem válce přenesse na substrát. Hlubitiskovou technologií se dají nanášet motivy o šířce 30–200 μm a tloušťce 3–30 μm . [34]

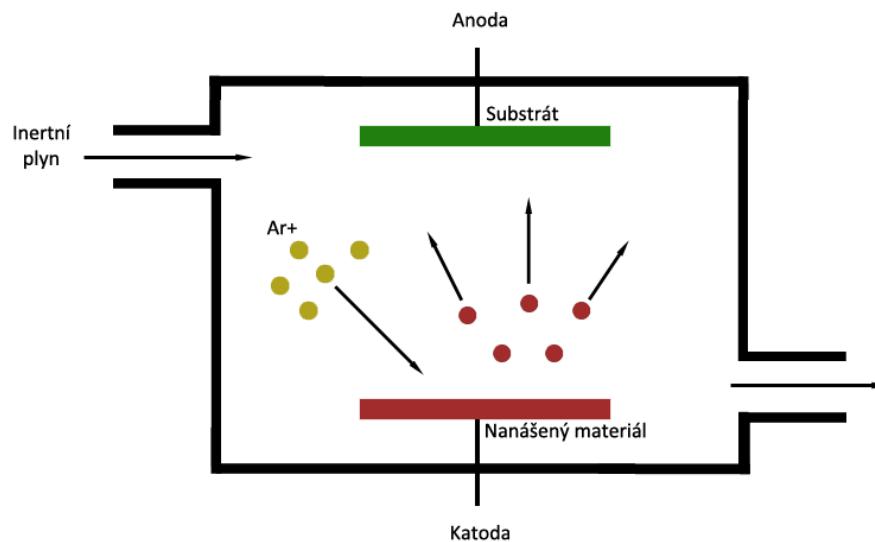


Obr. 1.10: Princip hlubitisku. [34]

1.5 Vakuové naprašování

Vakuové naprašování patří mezi technologie vytváření tenkých vrstev. Jedná se o jednoduchou tenkovrstvou technologii, která umožňuje vytváření vodivých (zlatých, hliníkových, měděných, platinových), odporových (CrNi, TaN) a dielektrických (oxidy hliníku, tantalu, titanu, atd.) vrstev. Princip vakuového naprašování je zobrazen na *Obr. 1.11*. Před samotným nanášením je nutné upravit substrát tak, aby docházelo k rovnoměrnému růstu nanášené vrstvy, a aby byla vrstva ve všech místech homogenní.

Toho je docíleno pomocí glazování, které sníží povrchovou drsnost na méně než $0,1 \mu\text{m}$. K samotnému naprašování dochází v pracovní komoře, kde je snížen tlak na 10^{-1} Pa . Pracovní komora obsahuje elektroodový systém a je napuštěna inertním plynem (např. dusík, argon). Katoda elektroodového systému je tvořena nanášeným materiálem, a na anodě je umístěn substrát, na který má být materiál nanesen. V komoře vzniká doutnavý výboj, který vytvoří a urychlí kladné ionty tak, že z katody vyrážejí částice naprašovaného materiálu. Vyražené částice se šíří v komoře, usazují se na anodě, a na ní vzniká požadovaná tenká vrstva. Na takto vytvořených vrstvách se poté tradičním litografickým procesem vytvářejí požadované motivy. Tloušťka vrstev vytvořených vakuovým naprašováním se pohybuje v rozmezí $0,001\text{--}30 \mu\text{m}$. [35, 36, 37]



Obr. 1.11: Princip vakuového naprašování. [36]

2 Zhodnocení výhod a nevýhod AJP

AJP je nová technologie uplatňující se především v oblasti tištěné elektroniky. Je považována za potenciálního konkurenta technologie Ink Jet, neboť také umožňuje bezkontaktní, bezmaskové nanášení široké škály funkčních inkoustů nejen na flexibilní substráty. Na rozdíl od IJ umožňuje použití trojrozměrných a nerovinných substrátů. [1, 28]

Technologie AJP a IJ mají větší flexibilitu, škálovatelnost a různorodost ve srovnání s tradičními litografickými technologiemi. Litografie je subtraktivní technologie - výsledného motivu je dosaženo odstraněním velkého množství materiálu. Nejprve je na substrát nanесena vodivá vrstva a poté fotorezist. Na fotorezist se přiloží požadovaná maska ve tvaru požadovaného motivu. Po vyvíjení fotorezistu následuje proces leptání, který odstraní nežádoucí oblasti vodivé vrstvy. Takto vznikne požadovaný vodivý motiv. Jak je vidno z popisu jednotlivých úkonů, tradiční technologie zahrnuje velké množství kroků, ve kterých dojde k odstranění většiny vrstev nanесených materiálů. Tím vzniká velké množství materiálového odpadu a zároveň je výrobní proces spojen s velmi vysokou spotřebou energie. [1, 3, 28]

Technologie AJP a IJ se jeví jako alternativa pro výrobu mikroelektronických zařízení, propojovacích struktur, světlovodů a dalších součástí jako jsou například pasivní součástky, aktuátory, tranzistory, 3D antény, nebo senzory. Oproti litografické metodě se vodivé motivy vytváří přímo v CAD/CAM systémech. Díky tomu lze velmi flexibilně a efektivně měnit návrh vodivého motivu, bez potřeb vyrábění nových litografických masek jako je tomu u sítotisku, což sníží náklady na materiál a spotřebu energie. [3]

Z porovnání vlastností AJP, IJ, sítotisku, hlubotisku a vakuového naprašování uvedeného v tabulce 2. I je patrné, že AJP umožňuje tisknout nejjemnější motivy - o šířce 10 μm a tloušťce 100 nm. Motivы vytvořené Ink Jet technologií jsou širší a zároveň mají větší tloušťku. Obdobně je na tom sítotisk, jehož nejjemnější motivы mají šířku 30 μm a tloušťku 3-30 μm . Motivы nanесené hlubotiskovou technologií mají v porovnání s AJP větší šířku nejmenší nanесené dráhy 30 μm , ale menší tloušťku nanесené vrstvy 0,02 μm . Nejtenčí vrstvy se dají vytvořit pomocí vakuového naprašování $> 0,001 \mu\text{m}$. Hlavní výhodou sítotisku a hlubotisku je jejich rychlost a opakovatelnost. Z porovnávaných

technologií jsou nejrychlejší. Z toho vyplývá i fakt, že AJP se zatím používá spíše k výrobě s nižšími objemy a s vysokou různorodostí produktů (tzv. high mix low volume production) a tzv. „rapid prototyping“. „Rapid prototyping“ sjednocuje všechny technologie, které vytváří produkt jinou než klasickou cestou. Takto vytvořený produkt má kromě totožných rozměrů, stejné mechanické, elektrické i funkční vlastnosti jako finální výrobek. Tyto technologie jsou dražší než sériové technologie, ale umožňují mnohem rychlejší kastomizaci výrobku a jeho následnou výrobu. [8, 29, 38]

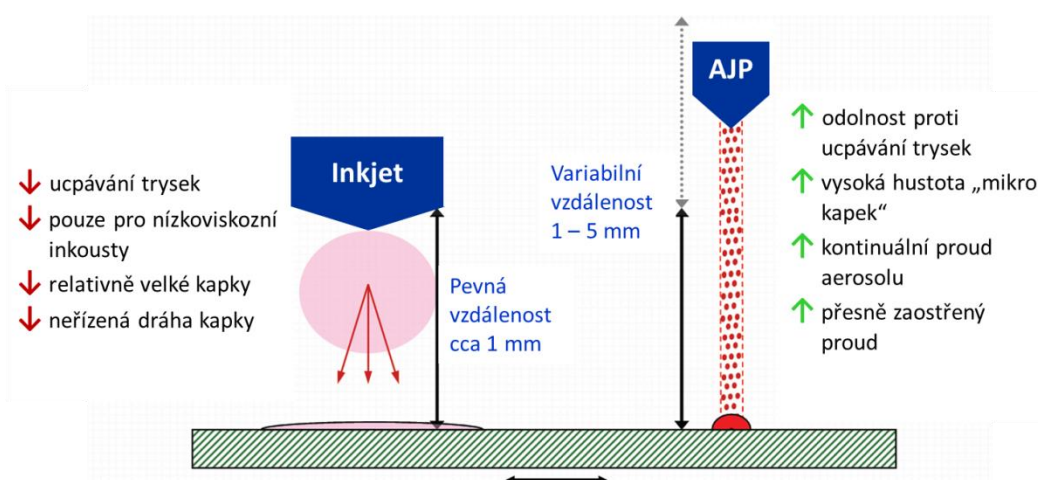
Tab. 2.1: Porovnání vlastností AJP a dalších konvenčních technologií. [28, 29]

Parametr	Aerosol Jet	Ink Jet	Hlubotisk	Sítotisk	Vakuové naprašování
Šířka nanesené dráhy [μm]	10 – 5 000	20 – 5 000	30 – 200	30 – 100	2 (R2R fotolitografie)
Tloušťka nanesené vrstvy [μm]	0,1 – 0,5	1 – 15	0,02 – 12	3 – 30	0,001 – 30
Rozsah viskozit deponovaných materiálů [mPas]	0,7 – 1 000	1 – 30	10 – 200	100 – 70 000	-
Bezkontaktní depozice	Ano	Ano	Ne	Ne	Ano
Rychlost nanášení	0,25 mm ³ /s *	0,3 mm ³ /s *	0,25 m/s	0,25 m/s	-
Ostrost hran deponovaného motivu	Vysoká	Střední	Střední	Nízká	Vysoká
Depozice bez šablon a masek	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne
In-situ sintrování	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne
Variabilní řízení tloušťky během depozice	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne
Schopnost 3D tisku	Výborná	Střední	Ne	Ne	Ne
Pracovní objem materiálu < 3 ml	Ano	Ano	Ne	Ne	-
Spojité depozice	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano
Efektivita spotřeby materiálu	Vysoká	Vysoká	Střední	Nízká	Nízká
Selektivní depozice biologických materiálů	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne

* U jedno tryskových depozičních hlav

Technologie AJP a IJ jsou oproti sítotisku a hlubotisku bezkontaktní. Pro nanášení materiálů nepotřebují žádné masky, filmy ani další nástroje. Vakuové naprašování se také řadí mezi bezkontaktní nanášecí technologie, ale následné vytvoření motivu již využívá klasické litografické postupy. Aerosol Jet Printing je CAD systémem řízená a beznástrojová technologie, která urychluje vývoj a výrobu produktu a zároveň umožňuje větší flexibilitu během výroby. Aktivní a pasivní prvky mohou být vytištěny přímo na substrát, stejně jako jejich vzájemné propojení. To umožňuje tvorbu spolehlivých integrovaných součástí pro elektronické systémy. V porovnání s konvenčními technologiemi využívá suroviny efektivněji (pracovní objem materiálu je nižší než 3 ml), a tím snižuje množství odpadu. Oproti subtraktivním technologiím nepoužívá žádné leptavé chemikálie a je šetrnější k životnímu prostředí. [3]

Pro vytváření vodivých struktur se u AJP, IJ, hlubotisku a sítotisku používají obdobné materiály. Inkousty a pasty obsahující částice mědi, zlata, nebo stříbra. Sítotisk používá pasty o vysoké viskozitě v rozmezí 500–70 000 mPas. Naopak IJ musí mít inkousty o daleko nižší viskozitě v rozmezí 1-30 mPas, aby nedocházelo k ucpávání depozičních trysek. Vakuové naprašování vytváří vrstvy z pevných materiálů. Aerosol Jet Printing má oproti ostatním popsaným technologiím výhodu, neboť inkoust je nejprve přetvořen na aerosol a až poté nanášen. Díky tomu jsou AJP systémy schopny tisknout celou řadu vodivých, polovodivých, dielektrických, rezistivních a biologických materiálů na téměř jakýkoli substrát. Proces nanášení podporuje širokou škálu komerčně dostupných materiálů, stejně tak i uživatelem připravené materiály. Porovnání AJP a IJ je zobrazeno na Obr. 2.1. [3, 8, 12, 13]



Obr. 2.1: Porovnání AJP a IJ. [29]

Kvalita naneseného materiálu je závislá na typu použitého inkoustu, kombinaci inkoust – substrát a dalších faktorech - drsnosti substrátu nebo jeho povrchové napětí. Při depozici materiálů pomocí AJP tiskáren nedochází k fyzikálním ani chemickým změnám vlastností substrátu a nanášeného materiálu. Lze nanášet prvky o velikosti vyšší než je 10 μm s vysokou přesností umístění $\pm 1 \mu\text{m}$ a s velkou ostrostí hran. Nanesený materiál má vysokou vodivost, malou drsnost povrchu a dobrou přilnavost. [3, 12, 13, 28]

Jako jediný z porovnávaných technologií umožňuje AJP systém tzv. *in situ* sintrování. Toho se využívá při nanášení materiálů na substráty s nízkou tepelnou kapacitou, jako jsou polykarbonáty a polyestery (s tepelnou kapacitou kolem 100 $^{\circ}\text{C}$), vyžadující výrobní proces, který může nanášený materiál spéci při nízkých teplotách. AJP tiskárny umožňují lokálně vytvrzovat nanesené materiály pomocí laserového nebo UV vytvrzovacího systému. To umožňuje používat i nízkonákladové polymerní substráty a snížit výrobní cenu finálního produktu. Naopak vodivé pasty nanášené konvenčními aditivními technologiemi potřebují přetavit při teplotách vyšších než 200 $^{\circ}\text{C}$, což vylučuje použití nízkonákladových substrátů na bázi polymerů. [13, 15, 13, 26]

Sítotisk, hlubotisk, ani vakuové naprašování neumožňuje nanášet materiály na nerovinné substráty. Naopak nejlepší podporu 3D substrátů má AJP. S tím souvisí i možnost variabilního řízení vzdálenosti depoziční trysky od substrátu během nanášení. Motorizovaná osa Z může automaticky držet konstantní vzdálenost (1–5 mm) od trysky k substrátu během nanášení materiálu na nerovinné substráty. [8, 13]

Nevýhodou AJP je nanášení velkoplošných spojitých vrstev. Jejich vytváření je zdlouhavé a vytvořené vrstvy nemusí mít ve všech místech konstantní tloušťku, což je způsobeno principem této technologie. K vytváření vrstev je výhodnější použít sítotisk, hlubotisk, nebo vakuové naprašování. Při nanášení motivu pomocí AJP tiskárny se v okolí nanesené dráhy vytvoří tzv. přestřík. Tvorba přestříku je nežádoucí, vzniká důsledkem proudu aerosolové mlhy. Ta se skládá z velmi malých kapiček inkoustu v proudu transportního plynu. V extrémním případě by mohl přestřík na jemném motivu způsobit nežádoucí zkrat. Tato nevýhoda se dá omezit optimálním nastavením procesních parametrů. [1, 20, 39]

Další nevýhoda AJP systému je ve snížení kvality naneseného materiálu při lokálním vytvrzování - při vytvrzování vodivého materiálu na flexibilním substrátu dochází k popraskání částecek naneseného kovu a tím dojde ke snížení vodivosti nanesené vrstvy. [40]

Vodivé dráhy vytvořené AJP tiskárnou mají oproti vodivým drahám vytvořeným klasickou litografickou metodou a IJ technologií vyšší rezistivitu a plošný odpor. Tato nevýhoda je způsobena principem technologie. [39]

Studie porovnávající morfologii AJP a IJ byla vytvořena Tobiasem Seifertem (2015). Autor pro studii použil IJ tiskárnu Fujifilm Dimatix Materials Printer 3000 a AJP tiskárnu výrobce Optomec – Aerosol Jet 300 CE. Ink Jet tiskárna byla vybavena 16 tryskovou tiskovou hlavou o jmenovitém objemu kapky 10 pl. Průměr trysky 21,5 μm , vzdálenost mezi jednotlivými tryskami 254 μm . Trysky byly umístěny ve výšce 1 mm nad substrátem. Maximální frekvence tryskání byla 5 kHz. Napětí působící na piezosnímač bylo v rozmezí 36 ± 4 V. AJP tiskárna byla vybavena prodlouženou tryskou o průměru otvoru 200 μm . Všechny experimenty byly prováděny v běžných atmosférických podmínkách. Teploty držáků substrátu byly nastaveny na 50 $^{\circ}\text{C}$ a teplota inkoustu byla držena na 30 $^{\circ}\text{C}$. Jako inkoust byl použit stříbrný nanočásticový inkoust Cabot CSD 32 (hustota $2,0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, obsah pevných částic 45-55 wt%, viskozita 50-100 cP). Jako substrát byl použit oxid křemičitý s průměrnou tloušťkou 600 μm . Byly tisknuty následující tvary: samostatné kapky, čáry (o šířce 5-150 μm) a čtverce (o straně 5 mm). Výsledné tvary byly zkoumány světelným mikroskopem Nikon Eclipse 200. Vytvořené samostatné kapky IJ byly pravidelné s ostrými hranami. Oproti tomu kapky vytvořené AJP měly nízkou ostrost hran a měly okolo sebe přestřiky způsobené proudem aerosolu. U tisknutých čar pomocí IJ byl sledován směr tisku a vzdálenost mezi tryskou a substrátem. U AJP se sledovala závislost rychlosti procesu a rychlost proudění plynu. Čáry vytištěné Ink Jet systémem měly opět vysokou ostrost hran. U AJP se na obou stranách objevoval přestřik, oproti této skutečnosti umožňuje AJP tisknout tenčí čáry s menšími průřezy než IJ. Čtvercové vrstvy vytvořené pomocí IJ měly většinu inkoustu nahromaděnou ve středu - vrstva byla nerovnoměrná. Vrstvy AJP byly rovnoměrnější, ale čtverce vykazovaly vyboulení stříbrné barvy v rozích. Tento efekt je způsoben tím, že v rohu je rychlost nanášení nižší než v celkovém procesu, tím pádem se zde nahromadilo více materiálu. [1]

Možnost použití AJP pro pouzdření součástek bylo zkoumáno v belgickém centru průmyslových technologií Sirris (2012). Pomocí AJP tiskárny byly nanášeny motivy ze stříbrného inkoustu CSD-32 od firmy Cabot na organické substráty (PI, FR4, PC, ABS). Nanesené dráhy byly propojeny pomocí Au a Al drátků. Výsledné spoje vykazovaly poruchy. Příčinou těchto poruch byla omezená adheze stříbrné vrstvy na organické materiály. Ačkoliv by se adheze substrátu dala zvýšit pomocí adhezní vrstvy nebo laserovou úpravou substrátu, autoři článku nedoporučují AJP technologii pro drátové propojování. Dále studie zkoumá možnost použití AJP pro povrchové montáže (SMT). Na stejné organické substráty byl nanesen stříbrný motiv pro osazení 30 SMD součástek. Součástky byly osazeny automatickým systémem Autotronic z důvodů vysoké přesnosti osazení. Pro propojení se použily dvě nejběžnější SMT techniky – pájení přetavením a propojení vodivým lepidlem. Vytvořené vzorky byly zkoumány vizuálně a namáháním ve smyku. Všechny testované vzorky splňovaly specifikaci SMT. Stříbrné motivy nanesené AJP technologií na všech testovaných substrátech jsou vhodné pro povrchovou montáž. [20]

Vliv procesních parametrů na ostrost natištěného motivu zkoumal Ankit Mahajan (2013). Pro výzkum byl použit stříbrný inkoust a polyimidový substrát. Pomocí Aerosol Jet Printingové tiskárny bylo naneseno několik motivů, u kterých byla zkoumána šířka a tloušťka natištěné čáry. Šířka a tloušťka natištěné čáry je závislá na velikosti průtoku usměřovacího a nosného plynu, průměru trysky a rychlosti pohybu držáku substrátu. Se zvyšujícím se poměrem průtoku usměřovacího a nosného plynu se šířka čáry snižovala, naopak tloušťka nanesené čáry rostla. S rostoucím průměrem trysky šířka natištěné čáry rostla, ale její tloušťka klesala. Při zvyšujícím se průtoku nosného plynu se šířka natištěné čáry neměnila, ale zvyšovala se její tloušťka. S rostoucí rychlostí pohybu držáku substrátu se šířka i tloušťka čáry snižovala. [11]

3 Experimentální část

Na základě rešeršní práce popsané v předchozích kapitolách byl navržen a realizován experiment. Cílem tohoto experimentu bylo vytvořit tištěné kondenzátory pomocí technologie AJP. Experiment je inspirován studií Southamptonské univerzity – „An all-inkjet printed flexible capacitor for wearable applications“. [41] V této studii byl vytvořen kondenzátor pomocí Ink Jet tiskárny Dimatix DMP-2831 pro využití ve smart textiliích. Kondenzátor byl natištěn na Kaptonový substrát. Pro tisk elektrod byl použit stříbrný inkoust U5714 od firmy SunChemical Ltd. Po natištění byl stříbrný inkoust sintrován při teplotě 150 °C po dobu 10 minut. Pro tisk dielektrické vrstvy byl použit inkoust SU-8 PriElex V005 od firmy MicroChem Corp. Poté bylo dielektrikum zasíťováno pomocí UV komory po dobu 10 sekund. Vlastnosti natištěného kondenzátoru byly porovnávány s komerčně dostupnými keramickými kondenzátory o stejné kapacitě. Byla měřena závislost změny kapacity na frekvenci, impedance na frekvenci a závislost paralelního a sériového odporu na frekvenci. Realizovaný experiment popisuje tvorbu tištěného kondenzátoru pomocí AJP tiskárny. V následujících kapitolách bude provedený experiment detailně popsán.

3.1 Návrh topologie tištěného kondenzátoru

Realizovaný kondenzátor má paralelní strukturu typu MIM (kov – izolant - kov), v němž jsou dvě vodivé elektrody odděleny dielektrickým materiálem. Tento typ kondenzátoru se nejčastěji používá u desek s tištěnými obvody. Svým prostorovým uspořádáním odpovídá fyzikálnímu modelu ideálního deskového kondenzátoru, pro který platí vztah (1.1) [42]:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \times A}{d} \quad (1.1)$$

kde ΔQ – náboj uložený na desce kondenzátoru (C),

ΔV – rozdíl napěťového potenciálu mezi deskami kondenzátoru (V),

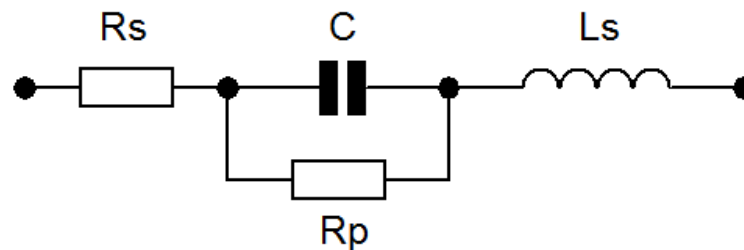
ε_r – dielektrická konstanta (–),

ε_0 – permitivita vakua (Fm^{-1}),

A – plocha desky kondenzátoru (m^2),

d – vzdálenost mezi deskami kondenzátoru (m).

Reálný kondenzátor má kromě kapacity další vlastnosti, které se vyjadřují pomocí úplného náhradního schéma kondenzátoru Obr. 3.1. Paralelní odpor R_p vyjadřuje izolační odpor dielektrika, sériový odpor R_s vyjadřuje parazitní odpor přívodů, a sériová indukčnost vyjadřuje parazitní indukčnost přívodů.



Obr. 3.1: Úplné náhradní schéma kondenzátoru. [42]

Ztráty energie vznikající v kondenzátoru jsou popsány ztrátovým činitelem $\text{tg } \delta$. Ten vyjadřuje poměr mezi odporovou a kapacitní složkou kondenzátoru. Ztrátový úhel δ je úhel, o který je snížen fázový posun ideálního kondenzátoru. Čím je hodnota ztrátového činitele nižší, tím je kondenzátor kvalitnější a vhodnější pro použití ve vysokofrekvenčních obvodech. Jeho velikost je závislá na teplotě, frekvenci a napětí. Pro ztrátový činitel paralelního náhradního schématu platí vztah (1.2): [42, 43]

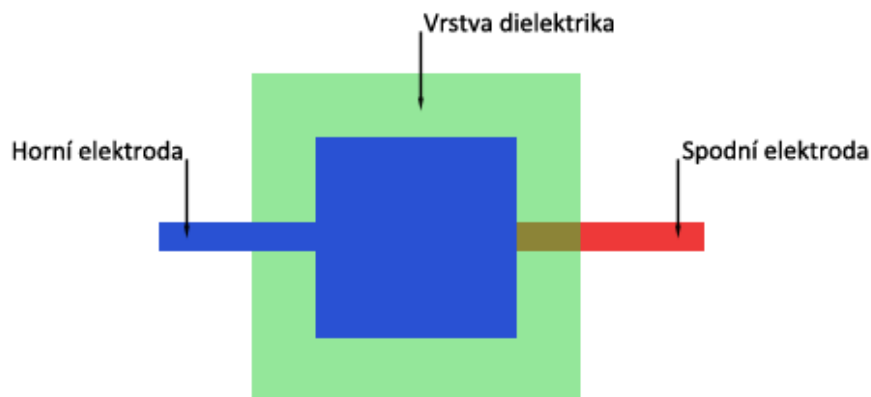
$$\text{tg } \delta = \frac{1}{\omega \times C_p \times R_p} \quad (1.2)$$

kde ω – úhlová frekvence (s^{-1}),

C_p – paralelní kapacita (F),

R_p – paralelní odpor (Ω).

Obr. 3.2 zobrazuje teoretický návrh AJP tištěného kondenzátoru. První nanosená vrstva je vodivá spodní elektroda ze stříbrného inkoustu. Druhá nanosená vrstva je z dielektrického inkoustu, tvořící dielektrikum kondenzátoru. Třetí vrstvu tvoří horní vodivá elektroda ze stříbrného inkoustu. Všechny vrstvy jsou nanoseny AJP technologií. Dielektrikum je oproti elektrodám větší, aby se zamezilo nebezpečí vzniku zkratu mezi elektrodami.



Obr. 3.2: Návrh topologie kondenzátoru.

3.2 Realizace tištěného kondenzátoru

Pomocí AJP tiskárny OPTOMEK Aerosol Jet 300 bylo postupně natištěno 20 vzorků kondenzátorů. Realizované kondenzátory měly velikost elektrod 5 mm x 5 mm.

3.2.1 Použité materiály

Pro tisk kondenzátorů byly použity dva druhy substrátů a to Kapton® 500HN od firmy DuPont a Melinex® ST504 od firmy DuPont Teijin Films.

Kapton® 500HN je polyimidový substrát, který je stálý v rozmezí teplot od -269 °C do 400 °C. Kaptonová fólie 500HN má tloušťku 125 µm. Mezi jeho výhody patří nízký součinitel teplotní roztažnosti, vynikající elektrické izolační vlastnosti a dobrá odolnost vůči chemikáliím. Hlavní nevýhodou tohoto substrátu je vyšší pořizovací cena.

Melinex® ST504 je levný, čirý, lesklý polyethylenový substrát s dobrou chemickou odolností, trvanlivostí a odolností proti vlhkosti. Substrát je z jedné strany opatřen adhezivní vrstvou a celková tloušťka substrátu je 175 µm. Hlavní nevýhodou tohoto substrátu je, že může být použit pouze v aplikacích s nízkou teplotou zpracování.

Další vlastnosti obou použitých substrátů jsou uvedeny v tabulce 3.I.

Tab. 3.I: Vlastnosti použitých substrátů. [44, 45]

Materiál	Dielektrická konstanta [-]	Izolační pevnost [kV/mm]	Objemová rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Ztrátový činitel [-]	Pevnost v tahu [MPa]	Koeficient tepelné roztažnosti [ppm/°C]	Teplota skelného přechodu [°C]
Kapton® 500HN	3,5	154	10^{17}	0,0026	231	20	360-410
Melinex® ST504	2,9	118	10^{17}	-	172	18	265

V experimentech popisujících tvorbu tištěných kondenzátorů se pro tisk elektrod nejčastěji používá stříbrný nanočásticový inkoust. Tento inkoust vykazuje velmi vysokou elektrickou vodivost a nízkou teplotu spékání nanočástic stříbra (do 200 °C). Díky nízké teplotě zpracování je použitelný pro tisk vodivých vrstev na nízkonákladové flexibilní substráty na bázi polymerů.

Elektrody kondenzátoru byly natištěny stříbrným nanočásticovým inkoustem PG 007 – AJ od firmy Paru Ltd. Inkoust obsahuje 60 wt% nanočástic stříbra o velikosti 20-200 nm. K nanočástičkám stříbra je přidáno rozpouštědlo dipropylenglykol a viskozita inkoustu je rovna 70 mPas. Z vlastností toho inkoustu vyplývá, že je možné ho atomizovat v pneumatickém atomizéru. Slinovací teplota inkoustu je v rozmezí 80–200 °C. Další vlastnosti použitého stříbrného inkoustu jsou uvedeny v tabulce 3.II.

Tab. 3.II: Vlastnosti stříbrného inkoustu PG 007 – AJ. [46]

PG 007 - AJ	Velikost nanočástic [nm]	Váhové množství nanočástic [wt%]	Viskozita [mPas]	Sintrovací teplota [°C]	Rezistivita [$\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
	20 – 200	60	70	80-200	2,5

Pro tisk dielektrické vrstvy byl namíchán polyimidový inkoust z CORIN XLS Polyimide prášku od firmy NeXolve Corporation. Jedná se o bezbarvý, čirý nanokompozit, který je odolný proti slunečnímu záření a oxidaci. CORIN XLS prášek obsahuje inertní polyimidový prášek (> 99 wt %) a dimethylacetamid (< 1 wt %). Pro depozici na AJP byl prášek dále naředěn tekutým dimethylacetamidovým rozpouštědlem v poměru 1 díl polyimidu na 4 díly rozpouštědla. Pro nanášení polyimidu metodou spin coating byl použit naředěný inkoust. Vlastnosti polyimidu jsou uvedeny v tabulce 3.III.

Tab. 3.III: Vlastnosti práškového CORIN XLS Polyimidu. [47]

CORIN XLS Polyimide	Dielektrická konstanta [-]	Izolační pevnost [kV/mm]	Povrchová rezistivita [Ω]	Objemová rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Sintrovací teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Pevnost v tahu [MPa]	Koeficient tepelné roztažnosti [ppm/ $^{\circ}\text{C}$]	Teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]
	2,4-2,5	197	$> 10^{12}$	$> 10^9$	< 100	74	68	266

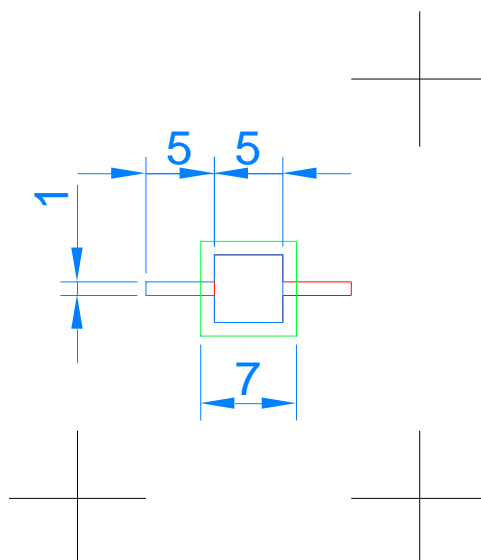
Pro kontaktování kondenzátorů bylo použito vodivé lepidlo MG Chemicals 83315-15G. Toto stříbrné vodivé lepidlo se skládá ze dvou složek: epoxidového lepidla a stříbrných částic. Složky lepidla se míchají v poměru 1:1, a díky tomuto poměru je lepidlo označováno jako pomalu schnoucí. Proto si své vlastnosti zachovává dlouhou dobu (až 5 hod) a během této doby je dobře zpracovatelné. Na rozdíl od jednosložkových lepidel, která ke svému vytvrzení potřebují vysoké teploty (130-170 $^{\circ}\text{C}$), se vodivé lepidlo 8331S-15G vytvrzuje při teplotě v rozmezí 65–100 $^{\circ}\text{C}$. Díky tomu je optimální pro lepení elektroniky citlivé na vysokou teplotu. Další jeho vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.IV.

Tab. 3.IV: Vlastnosti vodivého lepidla MG Chemicals 83315-15G. [48]

MG Chemicals 83315-15G	Sintrovací teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Objemová rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Pevnost v tahu [N/mm^2]	Koeficient tepelné roztažnosti [ppm/ $^{\circ}\text{C}$]	Teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]	Tepelná vodivost [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
	65-100	0,006	14	78	34	0,85

3.2.2 Návrh kondenzátoru v AutoCAD

V prvním kroku bylo nutné vytvořit výkres kondenzátoru v programu AutoCAD. Pro každou vrstvu kondenzátoru byl vytvořen vlastní výkresový soubor. Jak je patrné z Obr. 3.3, velikost elektrod byla zvolena 5 x 5 mm. Délka přívodu k elektrodám byla navržena na 5 mm o šířce 1 mm. Z důvodu snazšího kontaktování pro měření vlastností kondenzátoru. Vzhledem ke správné funkci kondenzátoru bylo dielektrikum (Obr. 3.3 zobrazeno zelenou barvou) navrženo s přesahem 1 mm na každé straně vůči elektrodám. Dále bylo nutné do výkresu vytvořit tři sesazovací značky ve vzdálenosti 1,5 cm od motivu kondenzátoru, z důvodů správného sesazení motivu při depozici jednotlivých vrstev.



Obr. 3.3: Výkres kondenzátoru v programu AutoCAD.

Takto navržené kondenzátory byly pomocí programu VMTools převedeny na příkazy pro řízení dráhy depoziční hlavy. Pro tvorbu jednotlivých vrstev bylo vybráno serpentinové plnění. Takto převedený soubor byl poté nahrán do programu KEWA, kde již dochází k řízení tiskárny a následné depozici motivů.

3.2.3 Tisk kondenzátorů na AJP

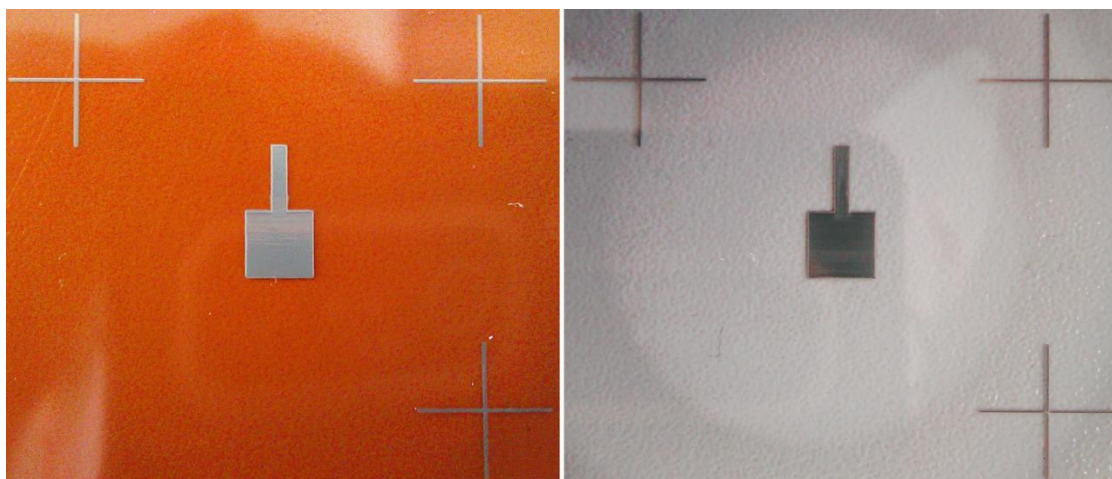
Vlastní výroba kondenzátoru byla rozdělena do tří hlavních fází, dle pořadí natištění jednotlivých vrstev. Pro deponování vrstev byla použita AJP tiskárna Aerosol Jet 300 od firmy Optomec. Pro depozici inkoustu byla vybrána keramická tryska s otvorem o průměru 300 μm . Vzdálenost substrátu od depoziční trysky byla pevně nastavena na 3 mm. Teplota držáku substrátu byla během nanášení nastavena na 65 $^{\circ}\text{C}$.

Po každém tisku bylo nutné jednotlivé komponenty důkladně očistit, aby nedocházelo ke kontaminování jednotlivých vrstev nanočástčkami použitých inkoustů. Například zbylé nanočástčky stříbra by mohly negativně ovlivnit funkci dielektrické vrstvy, což by bylo nežádoucí. Před každým tiskem byly všechny komponenty mechanicky očištěny od viditelných nečistot a poté umyty v ultrazvukové čističce Sonorex digital 10P. V této ultrazvukové čističce je zdroj, který pomocí frekvence až 35 kHz - odstraňuje organické a anorganické nečistoty pomocí jevu zvaného kavitace.

Při kavitaci dochází k lokálnímu poklesu tlaku, který v kapalině vytvoří dutiny. Dutiny vytvoří rázové vlny a ty posléze odtrhávají nečistoty z čištěných povrchů. Komponenty AJP systému byly omývány po dobu 30 min při teplotě 50 °C.

- **První fáze**

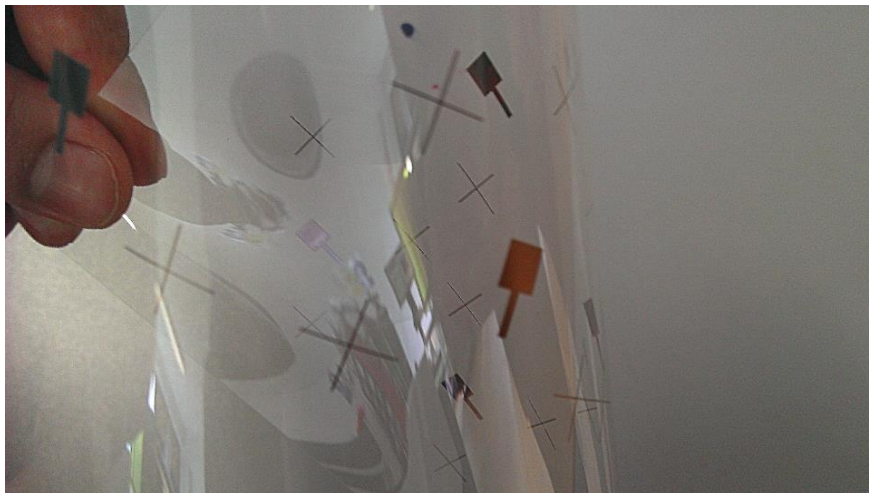
V první fázi došlo k vytvoření spodních elektrod ze stříbrného nanočásticového inkoustu PG 007 – AJ. Vzhledem k vlastnostem stříbrného inkoustu, uvedených v tabulce 3.II, byla použita pneumatická atomizace. Poté se postupným zkoušením nastavil optimální tvar tištěné dráhy pomocí změny jednotlivých toků plynů a rychlosti pohybu držáku substrátu. Nejprve byla nastavena hodnota toku zaostřovacího plynu, který zaostřuje aerosol na substrát, na 100 SCCM. Dále byl nastaven tok plynu virtual impactoru, který z aerosolu vytahuje kapky s nízkým momentem setrvačnosti, na hodnotu 650 SCCM. Tok plynu v atomizéru byl nastaven na hodnotu 800 SCCM. Rychlost pohybu držáku substrátu byla pro tištění elektrod nastavena na 5 mm/s. Poté byly postupně natištěny motivy spodních elektrod kondenzátorů. Detail spodních elektrod je zobrazen na *Obr. 3.4*.



Obr. 3.4: Detail natištěných spodních elektrod kondenzátorů na Kaptonovém a PET substrátu.

Po natištění spodních elektrod bylo nutné vytvrdit nanosený nanočásticový inkoust, tak aby byly zajištěny deklarované parametry stříbrného inkoustu. Pro vytvrzení inkoustu byla použita laboratorní sušárna Chromservis TNC 50 s přirozenou cirkulací vzduchu.

Teplota v sušárně byla nastavena na 140 °C, což je polovina z doporučeného rozmezí sintrovacích teplot použitého stříbrného inkoustu (viz. tabulka 3.II). Doba vytvrzení byla stanovena na 5 min. Ukázka flexibility elektrod na PET substrátu je zobrazena na *Obr. 3.5*.



Obr. 3.5: Ukázka flexibility natištěných elektrod na PET substrátu.

- ***Druhá fáze***

V druhé fázi byl na spodní elektrodu nanesen polyimidový inkoust CORIN XLS, který v kondenzátoru tvoří dielektrickou vrstvu mezi elektrodami. Opět bylo nutné nastavit optimální tvar tištěné dráhy a to postupným zkoušením změny toků plynů v AJP tiskárně a změnou rychlosti pohybu substrátu. Hodnota toku zaostřovacího plynu byla nastavena na 80 SCCM, velikost toku plynu ve virtual impactoru byla nastavena na 500 SCCM a velikost toku plynu v atomizéru byla nastavena na 600 SCCM. K atomizaci polyimidového inkoustu byl rovněž použit pneumatický atomizér. Při depozici polyimidového inkoustu docházelo během atomizace k jeho pění, které negativně ovlivňovalo depozici dielektrické vrstvy. Pro zlepšení podmínek atomizace byl inkoust míchán a zahříván na teplotu 35 °C. Rychlost pohybu držáku substrátu byla pro tištění dielektrik nastavena na 6 mm/s. Poté bylo nutné umístit depoziční hlavu tak, aby se nová vrstva správně natiskla na spodní elektrodu. Toho bylo docíleno programem KEWA, kde byly pomocí seřizovací kamery nastaveny sesazovací značky na substrátu. Poté již byly

postupně natištěny motivy dielektrik kondenzátorů. Detail natištěných dielektrik je zobrazen na *Obr. 3.6*.



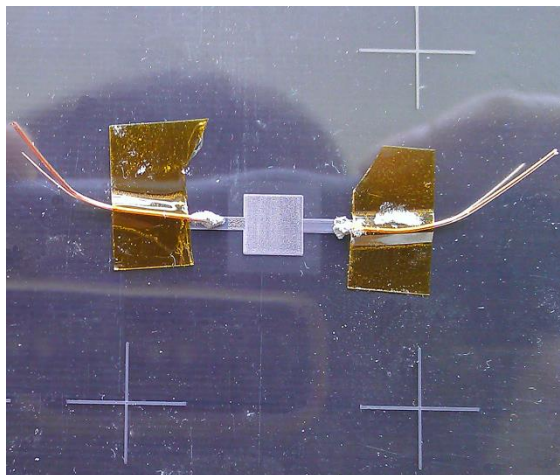
Obr. 3.6: Detail natištěných dielektrik kondenzátorů na Kaptonovém a PET substrátu.

Při nanášení polyimidového inkoustu bylo zvlášť natištěno jedno dielektrikum, aby bylo možné změřit tloušťku deponované vrstvy. Nanesený polyimidový inkoust byl vytvrzen přímo na držáku substrátu - zvýšením teploty držáku substrátu na 80 °C po dobu 15 min.

- ***Třetí fáze***

Ve třetí fázi došlo k vytvoření horních elektrod ze stříbrného nanočásticového inkoustu PG 007 – AJ. K atomizování inkoustu byla použita pneumatická atomizace. Hodnoty toků plynů a rychlost pohybu držáku substrátu byly nastaveny na stejné hodnoty jako při tisku spodních elektrod. Hodnota toku zaostřovacího plynu byla nastavena na 100 SCCM, tok plynu virtual impactoru na hodnotu 650 SCCM a tok plynu v atomizéru na hodnotu 800 SCCM. Rychlost pohybu držáku substrátu byla pro tisk elektrod nastavena na 5 mm/s. Následovalo nastavení polohy depoziční hlavy programem KEWA, tak aby se horní elektrody správně natiskly na dielektrickou vrstvu. Toho bylo docíleno pomocí seřizovací kamery, která byla nastavena na sesazovací značky na substrátu. Poté již byly postupně natištěny motivy horních elektrod kondenzátorů. Po natištění 20 horních elektrod, byl nanesený nanočásticový inkoust vytvrzen v laboratorní sušárně Chromservis TNC 50. Vytvrzení stříbrného inkoustu proběhlo za teploty 140 °C a trvalo 5 minut.

Po vlastním natištění kondenzátorů pomocí AJP byly jednotlivé kondenzátory nakontaktovány vodivým lepidlem MG Chemicals 8331S-15G a měděnými drátky pro snazší měření kapacity. Lepidlo bylo vytvrzeno v laboratorní sušárně Chromservis TNC 50 při teplotě 80 °C po dobu 45 minut. Detail natištěného a nakontaktovaného kondenzátoru je zobrazen na *Obr. 3.7*.



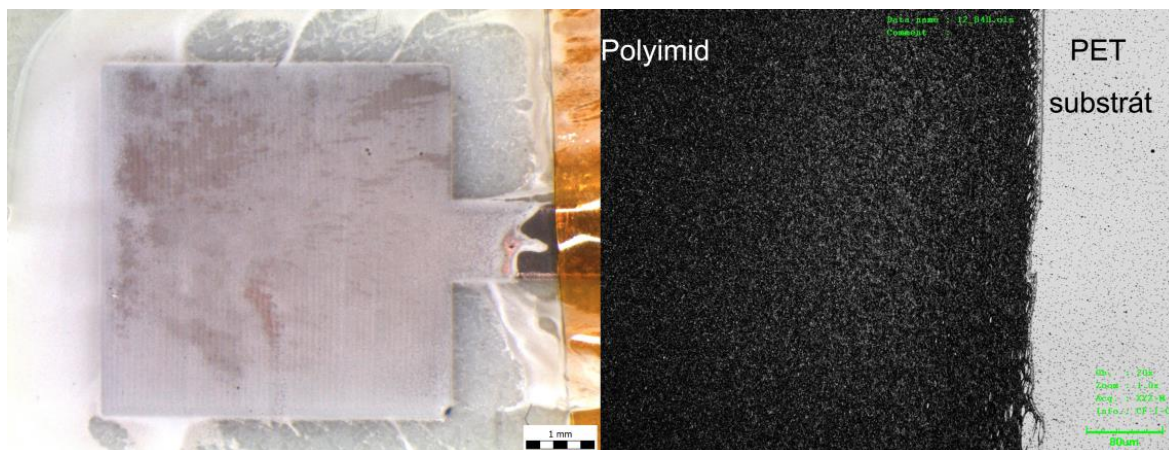
Obr. 3.7: Detail nakontaktovaného kondenzátoru na PET substrátu.

3.3 Alternativní tvorba kondenzátorů

Po prvním měření kapacit natištěných kondenzátorů na AJP byly výsledky neuspokojivé. Kapacita byla naměřena pouze na pěti kondenzátorech a jejich hodnota neodpovídala teoretickým předpokladům. Na vině byly pravděpodobně zkratky mezi horními a dolními elektrodami a poruchy objevené při mikroskopii. Na základě toho byl navržen další postup - nanesení polyimidové vrstvy pomocí techniky tzv. spin coating. Jedná se o techniku nanášení tenkých vrstev materiálů na bázi těkavých látek na rovinné substráty. Tato technika využívá působení odstředivých sil vzniklých rotací substrátu. Nanášený materiál se při rotaci rozprostře po substrátu a současně se z něho vypaří těkavé látky.

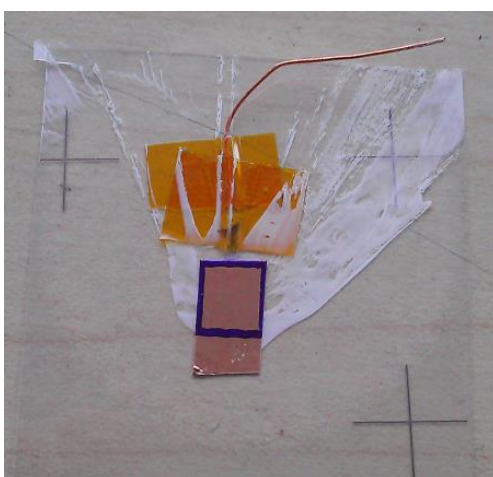
Pomocí AJP tiskárny bylo znovu natištěno 20 spodních elektrod na PET substrát, za stejných podmínek jako je uvedeno v kapitole 3.2.3. v části „První fáze“. Na takto natištěné spodní elektrody byla postupně ve spin coateru nanášena vrstva polyimidu. Postupným zkoušením byla nastavena optimální rychlost otáček substrátu na 5000 ot/min, doba depozice na 30 sekund a substrát byl na držák umístěn excentricky. Při těchto podmínkách byla vrstva nanášeného polyimidu nejvíce homogenní.

Na *Obr. 3.8* je zobrazena vrstva dielektrika naneseného spin coatingem. V detailním zvětšení je vidět, že je tato vrstva spojitá a homogenní. Nanesená dielektrika byla poté sintrována při teplotě 70 °C po dobu 30 minut v laboratorní sušárně Chromservis TNC 50.



Obr. 3.8: Dielektrická vrstva nanesená spin coatingem a její detail při 20x zvětšení.

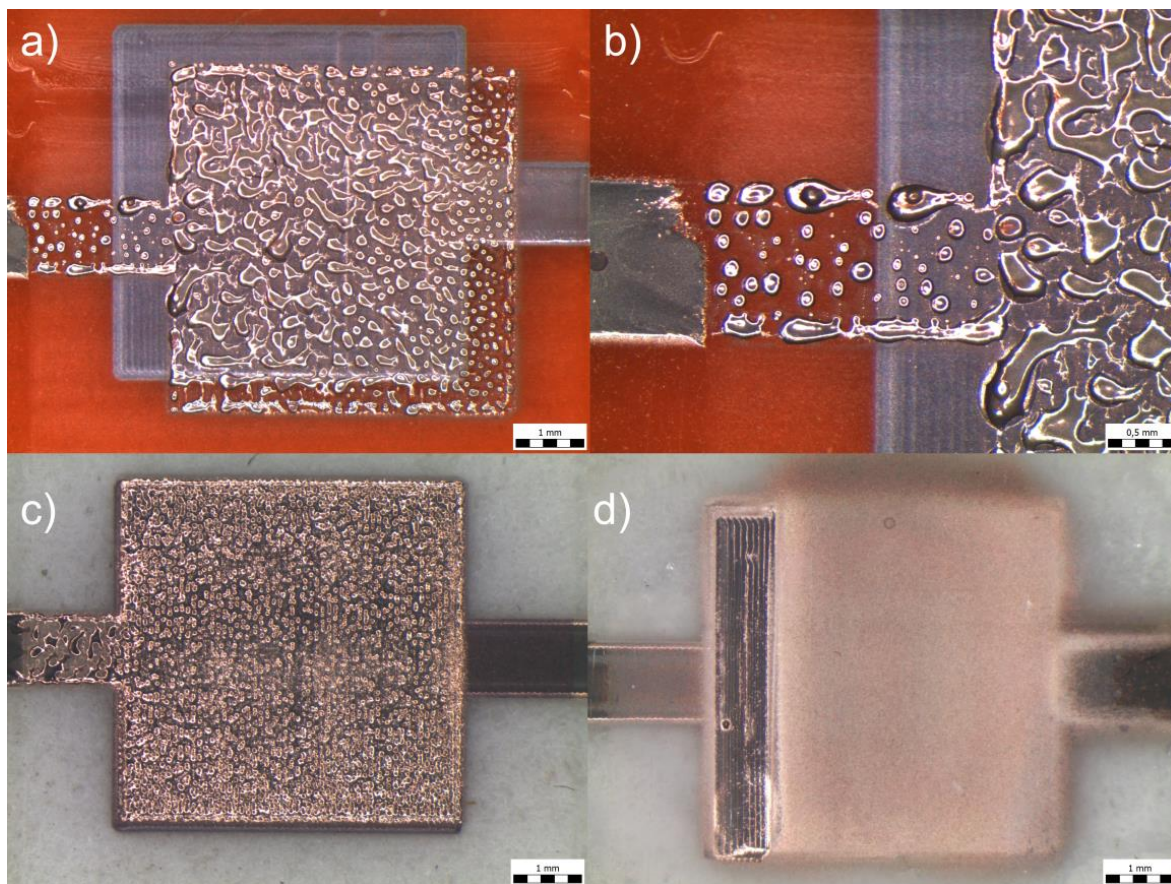
Na polovinu takto nanesených dielektrik byly poté AJP tiskárnou natištěny horní stříbrné elektrody. To bylo provedeno stejným způsobem, jako je popsáno v kapitole 3.2.3. v části „Třetí fáze“. Pro vytvoření horních elektrod na zbývajících vzorcích byla použita měděná lepicí fólie. Její použití bylo zvoleno z důvodů možného negativního působení dimethylacetamidového rozpouštědla, obsaženého v polyimidovém inkoustu, na použitý stříbrný inkoust. Horní elektrody byly vystřiženy tak, aby svým tvarem překrývaly spodní elektrodu kondenzátoru, jak je možné vidět na *Obr. 3.9*.



Obr. 3.9: Kondenzátor s dielektrickou vrstvou nanesenou spin coatingem a horní elektrodou z měděné fólie.

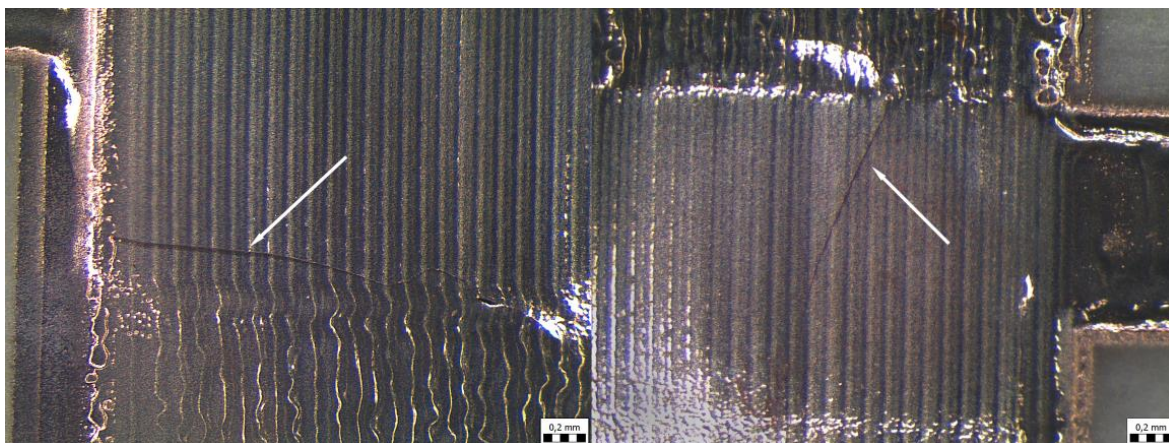
3.4 Inspekce vzorků pomocí mikroskopie

K optické analýze natištěných kondenzátorů byl použit stereomikroskop Olympus SZX10, který je speciálně navržen pro rutinní výzkum bez tvarového a barevného zkreslení. Stereomikroskop umožňuje až 10x zvětšení. Každý natištěný kondenzátor byl pečlivě prozkoumán a na některých bylo odhaleno množství poruch. Například: špatné sesazení jednotlivých vrstev (Obr. 3.10 a), špatná smáčivost a adheze mezi polyimidovým dielektrikem a horní stříbrnou elektrodou (Obr. 3.10 b,c), mezera v deponovaném materiálu (Obr. 3.10 d) a praskliny (Obr. 3.11).



Obr. 3.10: Fotky poruch v natištěných kondenzátorech.

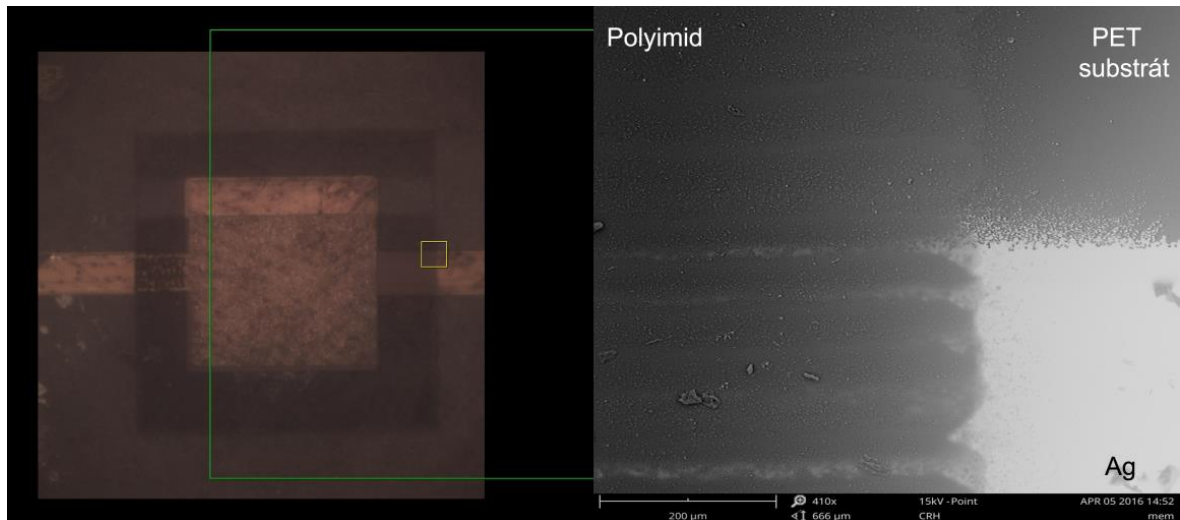
Tyto poruchy negativně ovlivnily funkci kondenzátorů, což se později projevilo i během vlastního měření. Z třiceti natištěných kondenzátorů pomocí AJP, vykazovala polovina vzorků některou z výše uvedených vad.



Obr. 3.11: Fotky prasklin v natištěných kondenzátorech.

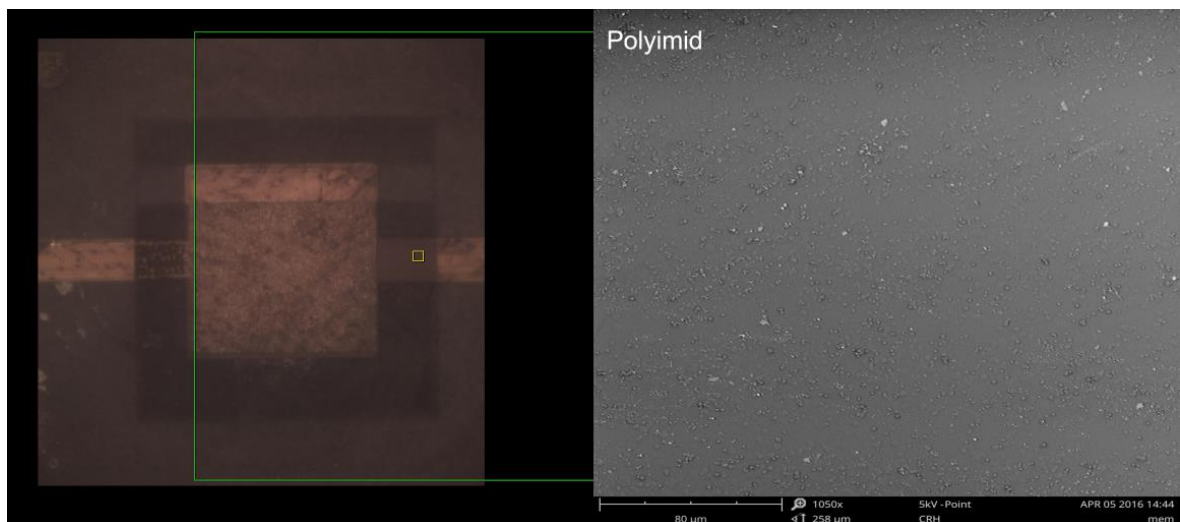
Pro hloubkovou inspekci vzorků a měření tloušťky dielektrik byl použit laserový konfokální mikroskop Olympus Lext OLS 3000. Jedná se o světelný mikroskop, který je charakteristický svým vysokým rozlišením, kontrastem a možností tvorby barevných 3D modelů snímaných objektů. Objekt je nasnímán pomocí laserového paprsku, který dopadá na jeho povrch. Paprsek se od zkoumaného povrchu objektu odrazí a přes systém zrcadel a filtrů je přiveden na fotonásobič. Takto získaná hodnota je převedena ve skenovacím zařízení do X a Y souřadnic, ze kterých se pomocí SW mikroskopu sestaví digitální obraz snímaného objektu. Olympus Lext OLS 3000 zahrnuje objektiv, který poskytuje až 100 násobné zvětšení zkoumaného předmětu a jeho minimální rozlišení je 0,12 μm .

Při hloubkové kontrole byla zkoumána celistvost natištěného dielektrika. Na Obr. 3.12 jsou patrná prosvítající místa stříbrného inkoustu pod dielektrikem. Ty jsou způsobené principem fokusování aerosolového proudu inkoustu zaostřovacím plynem. Největší objem inkoustu je ve středu proudu aerosolu a jeho množství se vzdáleností od středu klesá. Při vytváření vrstev, kdy se po sobě tisknou jednotlivé čáry, mohou ve vrstvách vznikat tenká místa. Tato tenká místa by mohla v dielektriku vytvořit zkrat mezi elektrodami a umožnit tak průchod nežádoucího svodového proudu.



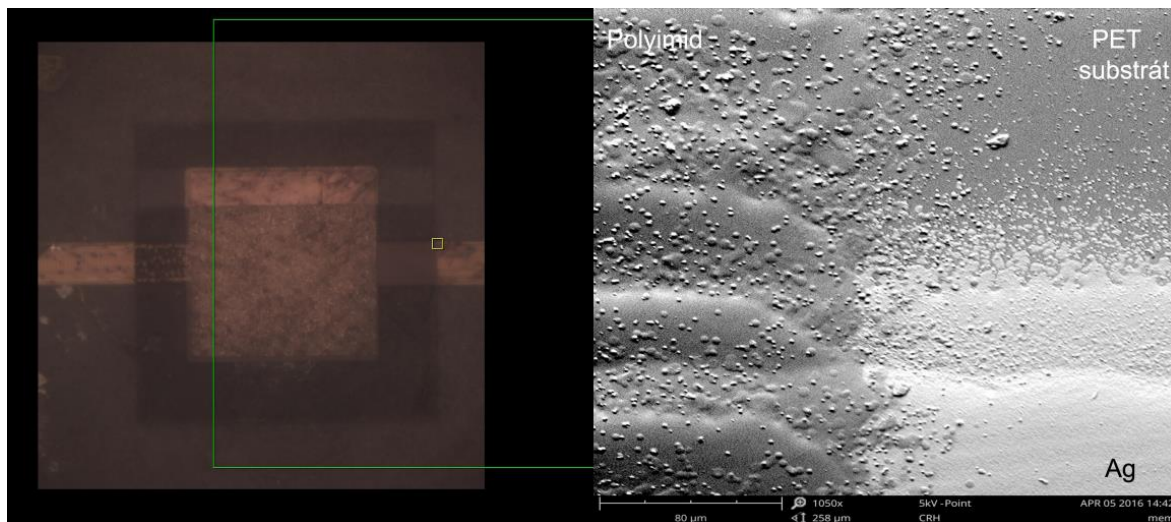
Obr. 3.12: Prosvítající Ag inkoust v PI vrstvě.

Na Obr. 3.13 je zobrazena struktura dielektrické vrstvy při 1050x zvětšení. V tomto případě bylo zkoumáno, zda v natištěné polyimidové vrstvě nejsou přítomny částičky stříbrného inkoustu. Tyto částičky by také mohly způsobit zkraty v kondenzátoru. Jiné částice než polyimidové jsou na obrázku zobrazeny bílou barvou. Několik těchto částiček bylo podrobeno prvkové analýze na elektronovém mikroskopu s prvkovou analýzou Phenom ProX. Žádná ze zkoumaných částic nevykazovala přítomnost stříbra.



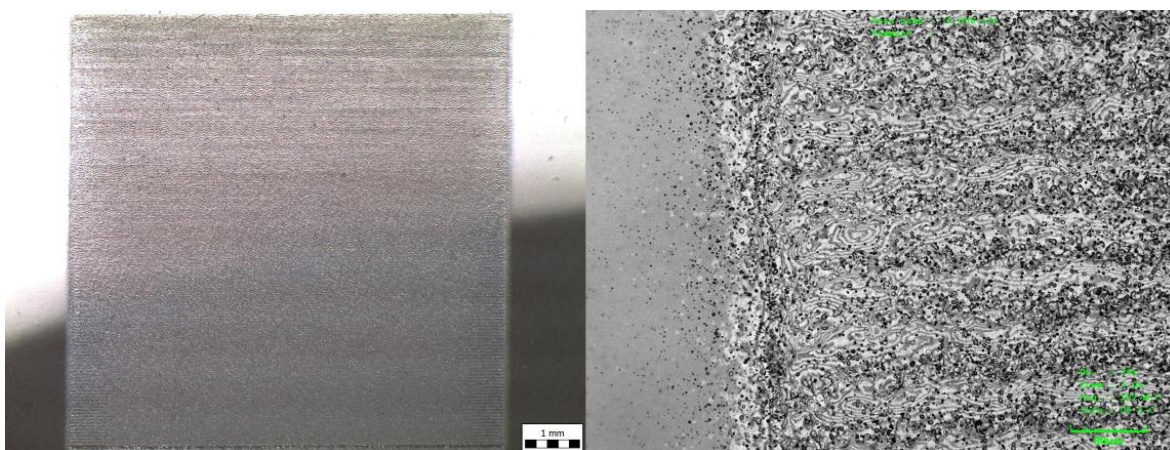
Obr. 3.13: Struktura dielektrika při 1050x zvětšení.

V okolí nanesené dráhy se vytvořil přestřík. Jeho detail je zobrazený na *Obr. 3.14*. Kapičky stříbrného inkoustu jsou zobrazeny bíle a přestřík polyimidu šedě. Tvorba přestříku je nežádoucí a je důsledkem proudu aerosolu, který se skládá z velmi malých kapiček inkoustu v proudu procesního plynu. Avšak v našem případě nemá přestřík na funkci kondenzátorů vliv.



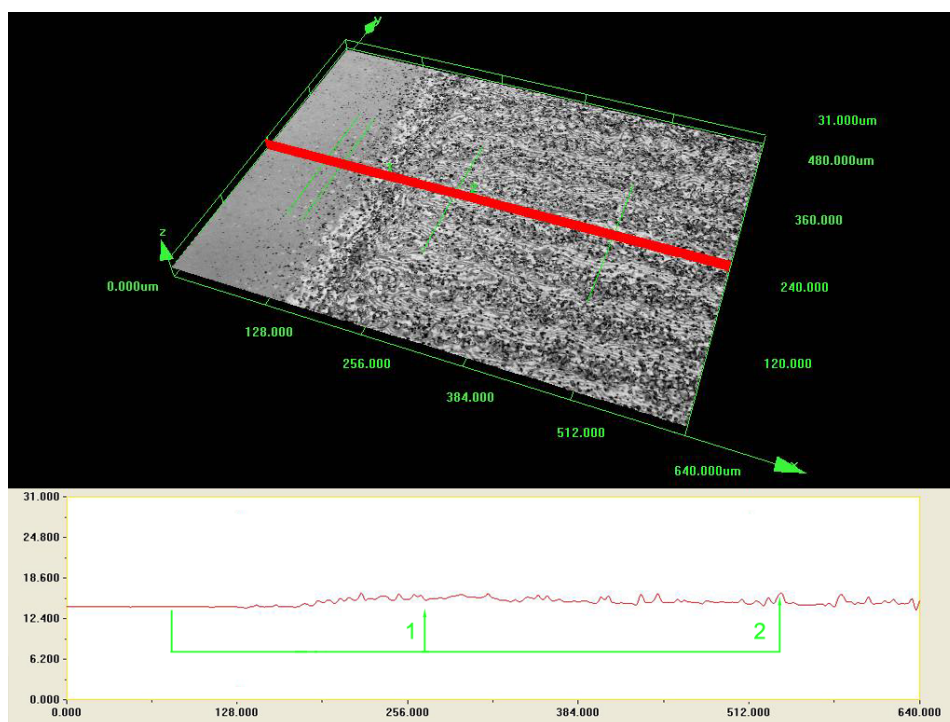
Obr. 3.14: Přestřík okolo natištěného motivu.

Pro změření tloušťky dielektrické vrstvy, bylo nutné nanést samostatnou vrstvu polyimidu na substrát. Samostatně natištěná vrstva substrátu je zobrazena na *Obr. 3.15*. Z detailního přiblížení je patrné, že natištěné vrstvy jsou složeny z po sobě tištěných čar. To je příčinou nerovnosti vrstev.



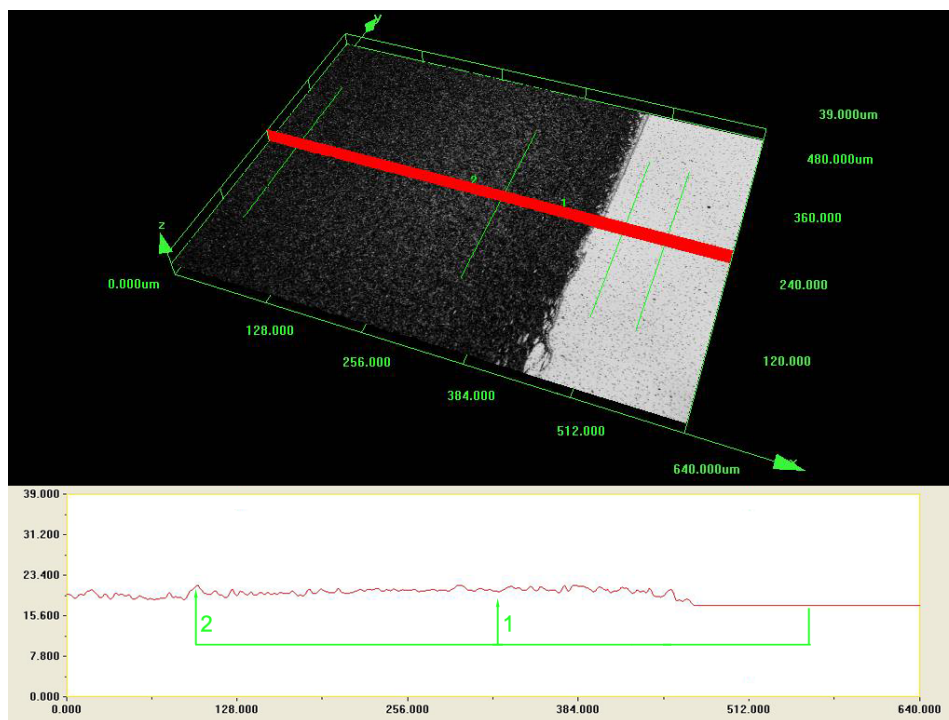
Obr. 3.15: Natištěná vrstva polyimidu pomocí AJP a její detail při 20x zvětšení.

Pomocí mikroskopu Olympus Lext OLS 3000 byl vytvořen 3D model vrstvy, který umožňuje měření v osách XYZ a je vyobrazen na *Obr. 3.16*. Tloušťka vrstvy byla měřena při 20 násobném zvětšení na dvou místech. První tloušťka byla změřena mezi povrchem substrátu a nejužším místem vrstvy. Druhá tloušťka byla změřena od substrátu k nejširšímu místu vrstvy. Polyimidová vrstva natištěná AJP byla v nejužším místě 0,741 μm široká a v nejširším místě byla naměřena tloušťka 1,325 μm .



Obr. 3.16: Měření tloušťky PI natištěného pomocí AJP při 20x zvětšení.

Stejně bylo postupováno při měření tloušťky dielektrika naneseného metodou spin coating. Měření bylo provedeno při 20 násobném zvětšení a tloušťka byla změřena v nejtenčím a nejširším místě, jak zobrazuje *Obr. 3.17*. V nejužším místě bylo naměřeno 1,496 μm a v nejširším místě byla naměřena tloušťka 3,189 μm .



Obr. 3.17: Měření tloušťky PI naneseného spin coatingem při 20x zvětšení.

Při porovnávání naměřených hodnot je patrné, že tloušťka vrstvy nanesené metodou spin coating je dvojnásobně větší než tloušťka dielektrika naneseného tiskárnou AJP. Z toho lze předpokládat, že kondenzátory s dielektrikem vytvořeným technikou spin coating budou mít dvakrát menší kapacitu.

3.5 Naměřené hodnoty a zhodnocení výsledků

Kondenzátory vytvořené technologií AJP jsou v grafech a tabulkách označeny „AJP“, kondenzátory s natištěnými elektrodami a dielektrickou vrstvou nanesenou technologií spin coating jsou označeny „AJP_Spin“. Kondenzátory, které mají spodní elektrodu natištěnou pomocí AJP, dielektrikum nanesené technologií spin coating a horní elektrodu vytvořenou z měděné samolepící fólie jsou označeny „AJP_Spin_F“.

Podle vztahu pro výpočet kapacity ideálního deskového kondenzátoru (1.1) byly vypočteny teoretické kapacity jednotlivých vzorků. Z vlastností použitého polyimidového inkoustu, uvedených v tabulce 3.III, byla pro výpočet zvolena hodnota relativní permitivity $\epsilon_r = 2,4$. Permittivita vakua $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$. Elektrody o velikosti $5 \times 5 \text{ mm}$ mají účinnou plochu desek kondenzátoru $A = 25 \text{ mm}^2$. Výpočet byl proveden pro tři tloušťky dielektrika. Minimální (d_{\min}) a maximální (d_{\max}) tloušťka dielektrika

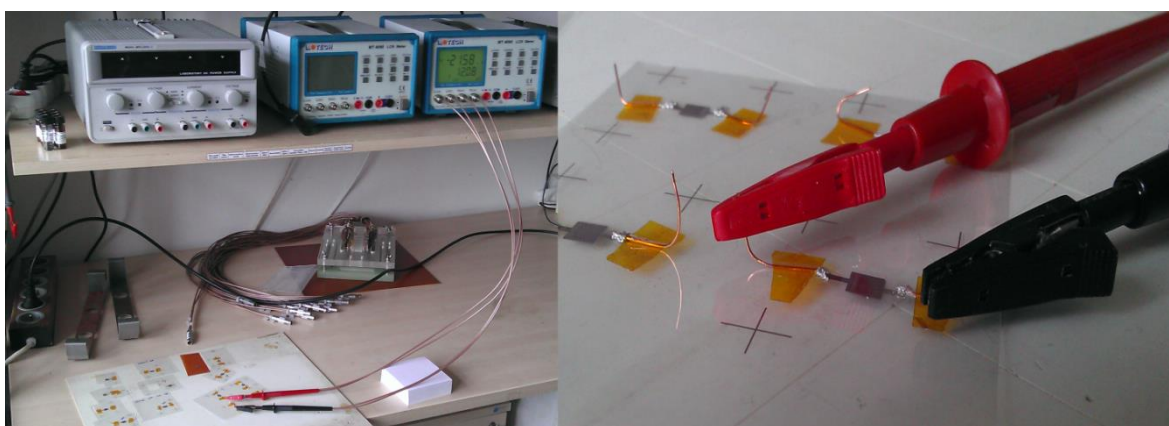
byla změřena pomocí mikroskopu. Z těchto hodnot byla dopočtena průměrná tloušťka dielektrika ($d_{\text{prům}}$). U kondenzátorů s horní elektrodou vytvořenou ze samolepící fólie, byla přičtena tloušťka adhezivní vrstvy $32 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$.

Tab. 3.V: Vypočtené kapacity dle teoretického vzorce.

		d_{min}	$d_{\text{prům}}$	d_{max}
AJP	tloušťka dielektrika [μm]	0,741	1,033	1,325
	C [pF]	717	514	401
AJP_Spin	tloušťka dielektrika [μm]	1,496	2,343	3,189
	C [pF]	355	227	167
AJP_Spin_F	tloušťka dielektrika [μm]	29,496	34,843	40,189
	C [pF]	18,0	15,2	13,2

Z tabulky 3.V je patrné, že kapacita kondenzátorů vytvořených pomocí AJP by se měla pohybovat v rozmezí 401–717 pF při optimálním soutuisku vrstev. Kapacita kondenzátorů kombinující technologie AJP a spin coating by měla být řádově stejná, ale měla by dosahovat polovičních hodnot (167–355 pF), což je způsobeno dvojnásobnou šířkou dielektrika. Kapacita kondenzátorů s měděnou fólií by měla být nejmenší, a to 13,2–18 pF.

Kondenzátory byly měřeny RCL můstkem MOTTECH MT 4090. Tento RCL měřič umožňuje měřit kapacity, indukčnosti, impedance a jejich parametry při frekvencích 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 200 kHz. Přesnost udávaná výrobcem je 0,2 %. Pro měření vzorků bylo měřicí napětí nastaveno na 250 mVrms. U jednotlivých vzorků se měřila paralelní kapacita C_p a ztrátový činitel $\text{tg } \delta$. Měření jednotlivých vzorků je zachyceno na Obr. 3.18.



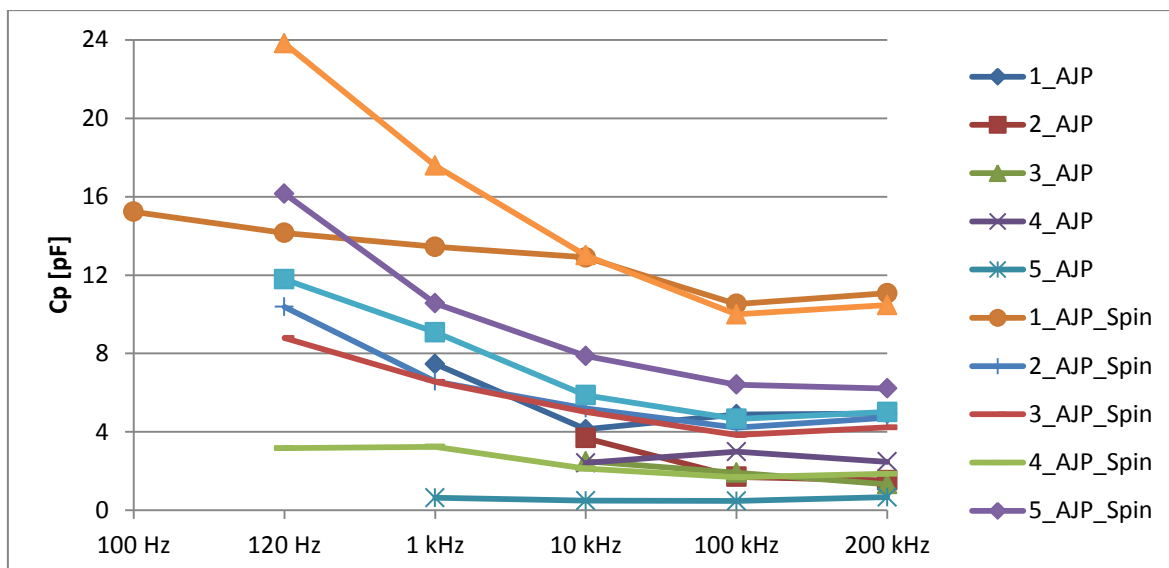
Obr. 3.18: Měření jednotlivých vzorků pomocí RCL můstku MOTTECH MT 4090.

Ze vztahu ztrátového činitele pro paralelní náhradní schéma kondenzátoru (1.2) byl dopočten paralelní odpor kondenzátoru R_p . Z celkového počtu čtyřiceti vytvořených vzorků byla kapacita změřena na polovině kondenzátorů. Na AJP natištěných kondenzátorech byla kapacita změřena na 5 vzorcích z 20. Na kondenzátorech s měděnou samolepicí fólií (AJP_Spin_F) byla kapacita změřena na 9 vzorcích z 10 a na kondenzátorech kombinující technologii AJP a spin coating (AJP_Spin) byla změřena kapacita na 7 vzorcích z 10. Naměřené a vypočtené parametry kondenzátorů jsou uvedeny v příloze č. 1. U ostatních vzorků byl naměřen velmi malý izolační odpor (řádově jednotky Ω). Ten indikuje vodivé propojení elektrod kondenzátorů.

3.5.1 Závislost kapacity na frekvenci

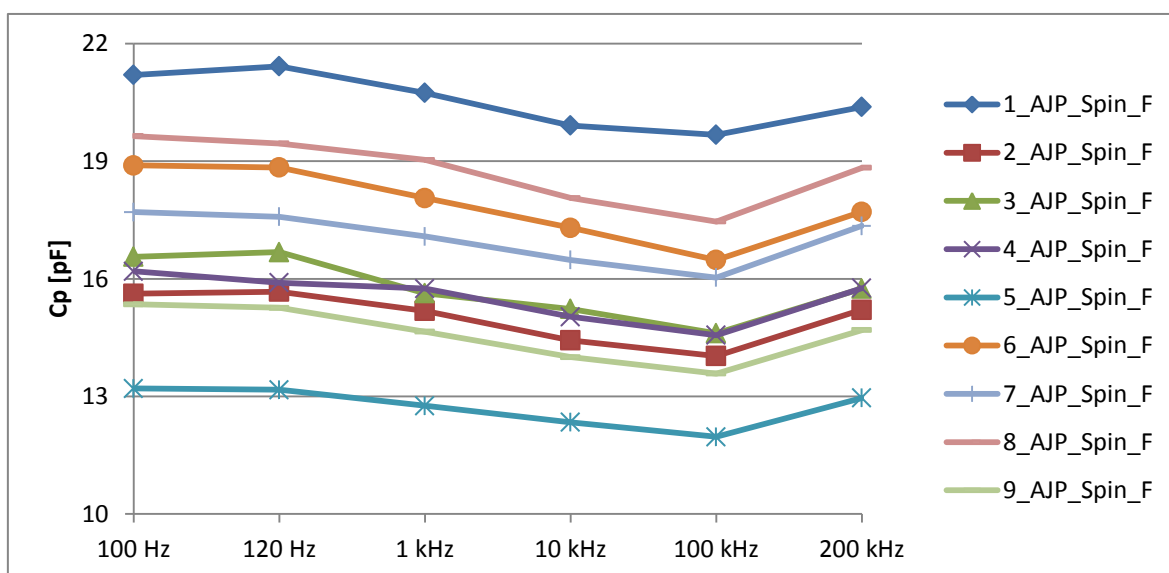
Z naměřených hodnot kapacit kondenzátorů, uvedených v příloze č. 1, byly sestrojeny grafy závislosti kapacity na frekvenci. Kondenzátory vyrobené AJP technologií, kondenzátory s AJP natištěnými elektrodami a spin coatingem naneseným dielektrikem svou kapacitou neodpovídají vypočteným teoretickým kapacitám uvedeným v tabulce 3.V. Vypočtená kapacita je o řád vyšší než naměřená. Tato skutečnost může být způsobena defekty kondenzátorů popsaných v kapitole 3.4. V dielektrické vrstvě mohou být zbytky cizích prvků (např.: částičky stříbrného inkoustu), vrstvička polyimidu nemusí být zcela homogenní a v úzkých místech může docházet k vodivému propojení elektrod. Mezi elektrodami pravděpodobně protéká velký svodový proud, který je proměnlivý s teplotou, napětím a frekvencí. Svým průchodem negativně ovlivňuje kapacitu kondenzátorů.

Z Obr. 3.19 je patrné, že se naměřená kapacita u vzorků AJP pohybovala mezi 0,476 pF a 7,464 pF. U kondenzátorů AJP_Spin byla naměřena kapacita vyšší a to v rozmezí 1,69-23,82 pF. Ze závislosti kapacity kondenzátorů, AJP a AJP_Spin na frekvenci je patrné, že se vzrůstající frekvencí jejich kapacita klesá. Na frekvencích 100 kHz a 200 kHz je pak téměř konstantní. Konstantní kapacitou se vyznačují vzorky 3_AJP a 5_AJP, u kterých nebyla naměřena žádná kapacita při frekvencích 100 Hz, 120 Hz a v případě vzorku 3_AJP ani při 1 kHz. Vzorek 5_AJP má však oproti ostatním vzorkům velmi malou kapacitu (0,476-0,671 pF).



Obr. 3.19: Graf závislosti kapacity na frekvenci vzorků AJP a AJP_Spin.

U kondenzátorů vyrobených alternativním postupem tzn. AJP natištěnou spodní elektrodou, spin coatingem naneseným dielektrikem a horní elektrodou vytvořenou z měděné samolepicí fólie se naměřené hodnoty kapacity (11,97-21,42 pF) přibližují k teoreticky vypočteným (13,2-18 pF). Ze závislosti kapacity vzorků AJP_Spin_F je patrné, že kapacita všech vzorků se vzrůstající frekvencí klesá. Nejnižší kapacity kondenzátorů byly naměřeny při 100 kHz. Při 200 kHz kapacita opět vzrostla. Graf závislosti kapacity na frekvenci vzorků AJP_Spin_F je zobrazen na Obr. 3.20.

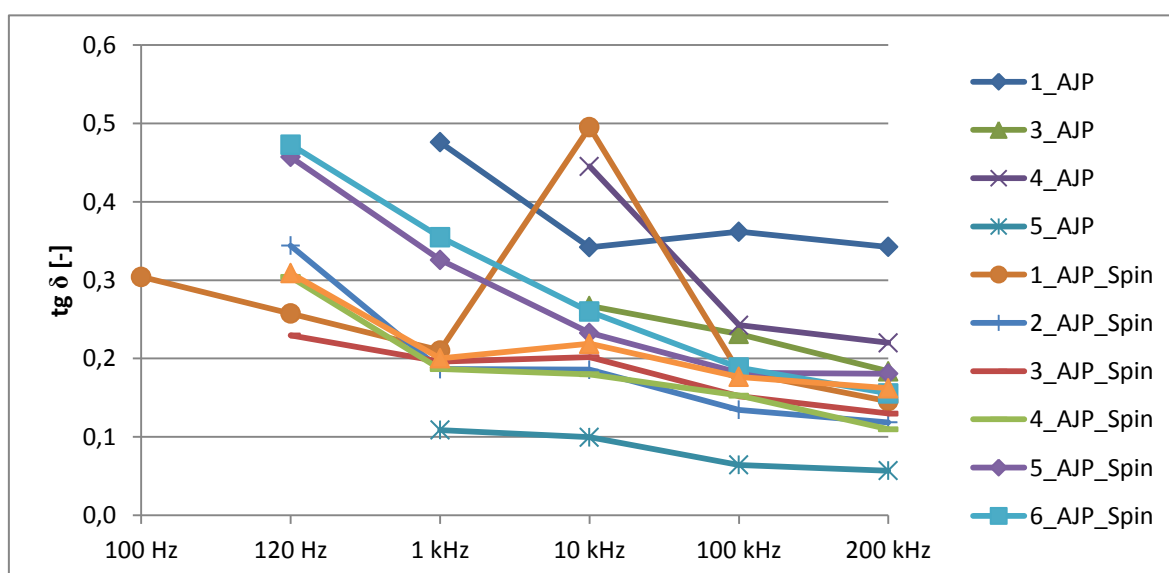


Obr. 3.20: Graf závislosti kapacity na frekvenci vzorků AJP_Spin_F.

3.5.2 Závislost ztrátového činitele na frekvenci

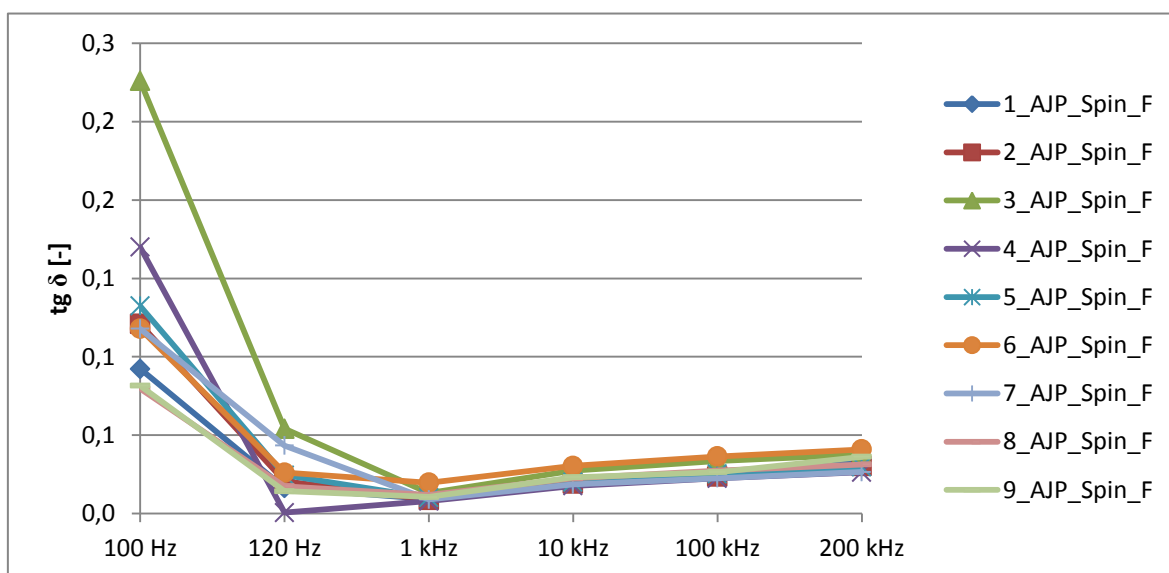
Z naměřených hodnot ztrátového činitele kondenzátorů, uvedených v příloze č. 1, byly sestrojeny grafy závislosti ztrátového činitele na frekvenci. Pomocí tohoto činitele se popisují celkové ztráty energie v kondenzátoru, které se skládají z dielektrických ztrát a ztrát způsobených svodovým proudem. Jeho velikost je nepřímo úměrná velikosti frekvence, jak je patrné ze vztahu ztrátového činitele pro paralelní náhradní schéma kondenzátoru (1.2).

Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ se u vzorků AJP a AJP_Spin pohybuje v rozmezí 0,0571–3,201. Nejnižší hodnoty ztrátového činitele má vzorek 5_AJP. Nejvyšší hodnota ztrátového činitele u tohoto vzorku byla 0,0571 při 200 kHz a nejvyšší 0,1089 při 1 kHz. Naopak nejvyšších hodnot ztrátového činitele dosahoval vzorek 2_AJP, který z důvodů zkreslení grafu není vyobrazen na závislosti ztrátového činitele na frekvenci vzorků AJP a AJP_Spin (Obr. 3.21). Ze závislosti ztrátového činitele na frekvenci je patrné, že se zvyšující se frekvencí hodnota ztrátového činitele klesá. Nicméně z naměřených hodnot ztrátového činitele lze usoudit, že v kondenzátorech dochází k velkým ztrátám energie a jejich jakost je tedy nízká. Hodnoty ztrátových činitelů vzorků AJP a AJP_Spin se přibližují hodnotám ztrátových činitelů elektrolytických kondenzátorů, jejichž hodnota je řádově 10^{-1} .



Obr. 3.21: Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci vzorků AJP a AJP_Spin.

U vzorků AJP_Spin_F byl naměřen ztrátový činitel o řád nižší. Nejvyšší ztráty byly změřeny při frekvenci 100 Hz. Jak je patrné ze závislosti ztrátového činitele na frekvenci, u vzorků 1_AJP_Spin_F, 2_AJP_Spin_F, 5_AJP_Spin_F, 6_AJP_Spin_F, 8_AJP_Spin_F a 9_AJP_Spin_F je ztrátový činitel při frekvenci 120 Hz a 1 kHz téměř konstantní. U frekvencí vyšších než 1 kHz byl u všech vzorků naměřen nárůst ztrátového činitele. Nejnižšího hodnota ztrátového činitele byla naměřena u vzorku 4_AJP_Spin_F a to 0,0205 při 120 Hz. V porovnání se vzorky AJP a AJP_Spin dosahuje hodnota ztrátového činitele u vzorků AJP_Spin_F výrazně nižších hodnot. Tyto hodnoty jsou již srovnatelné se ztrátovými činiteli kondenzátorů s papírovým dielektrikem (10^{-2}). Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci vzorků AJP_Spin_F je zobrazen na Obr. 3.22.

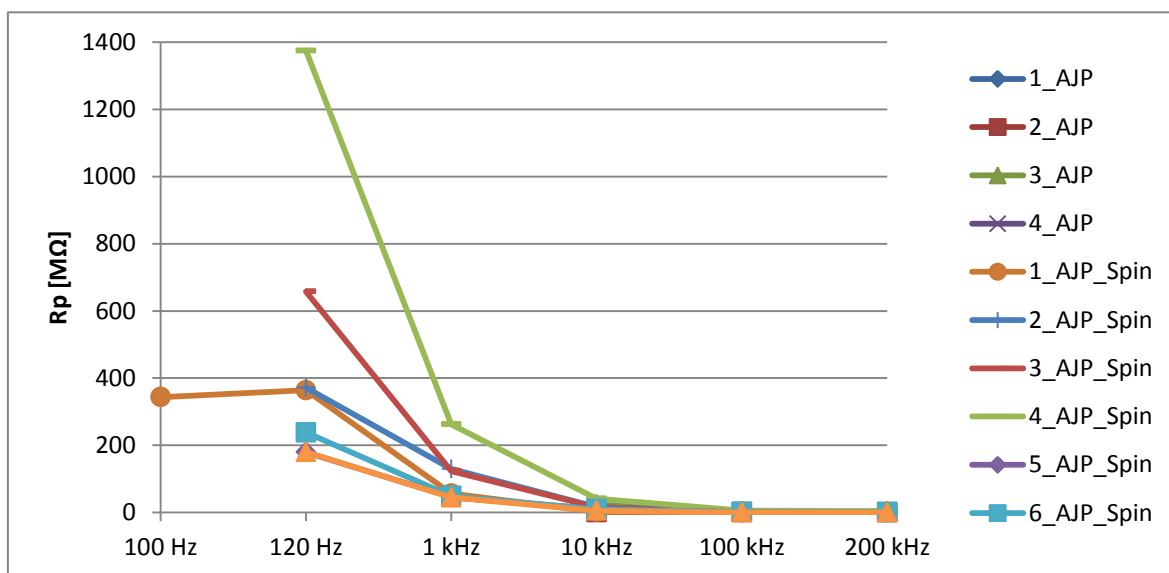


Obr. 3.22: Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci vzorků AJP_Spin_F.

3.5.3 Závislost paralelního odporu na frekvenci

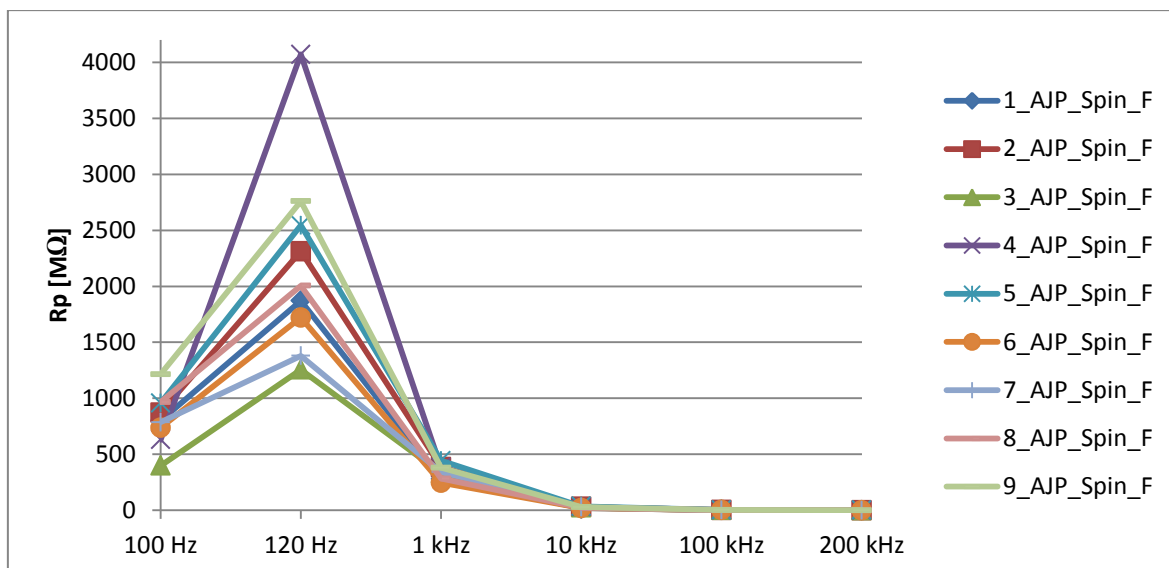
Z naměřených hodnot kapacit kondenzátorů a ztrátových činitelů, uvedených v příloze č. 1, byly dle vztahu ztrátového činitele pro paralelní náhradní schéma kondenzátoru (1.2) dopočteny hodnoty paralelních odporů kondenzátorů. Z těch byly sestrojeny grafy závislosti paralelního odporu na frekvenci. Pomocí paralelního odporu kondenzátoru vyjadřujeme velikost izolačního odporu dielektrika. Izolační odpor kondenzátoru by měl být co největší. Pokud je hodnota izolačního odporu nízká, dochází ke snížení náboje v kondenzátoru. Ze vztahu ztrátového činitele pro paralelní náhradní obvod (1.2) vyplývá, že s rostoucí frekvencí velikost izolačního odporu klesá.

Graf závislosti paralelního odporu na frekvenci vzorků AJP a AJP_Spin je zobrazen na Obr. 2.23. Ze vzorků AJP byl největší paralelní odpor vypočten u vzorku 1_AJP. Při frekvenci 1 kHz má vzorek paralelní odpor 45 M Ω , který postupně klesá až na hodnotu 0,4711 M Ω při 200 kHz, která je zároveň nejnižší hodnotou paralelního odporu ze vzorků AJP. U vzorků AJP_Spin byl největší izolační odpor vypočten při 120 Hz. Vzorek 4_AJP_Spin má hodnotu paralelního odporu 1375 M Ω . Se zvyšující frekvencí paralelní odpor klesá a to až na 0,4686 M Ω u vzorku 7_AJP_Spin při 200 kHz. Prudký pokles paralelního odporu je způsoben zvyšujícím se svodovým proudem v kondenzátoru. V grafickém vyjádření závislosti paralelního odporu na frekvenci nebyl zobrazen vzorek 5_AJP. Svou kapacitou 0,5 pF ho nelze porovnávat s ostatními vzorky.



Obr. 3.23: Graf závislosti paralelního odporu na frekvenci vzorků AJP a AJP_Spin.

Ze závislosti paralelního odporu na frekvenci vzorků AJP_Spin_F (Obr. 3.24) je patrné, že s rostoucí frekvencí paralelní odpor kondenzátorů klesá. Největší izolační odpor byl vypočten u všech vzorků při 120 Hz. Největší izolační odpor byl naměřen u vzorku 4_AJP_Spin_F, kdy byl roven 4069 M Ω . Nejnižší hodnota byla vypočtena u vzorku 1_AJP_Spin_F. Při frekvenci 200 kHz má vzorek paralelní odpor 0,8186 M Ω .



Obr. 3.24: Graf závislosti paralelního odporu na frekvenci vzorků AJP_Spin_F.

Velikost paralelního odporu vyjadřuje izolačního odpor dielektrika. Jeho velikost je závislá i na vzdálenosti elektrod respektive tloušťce dielektrika. Z toho vyplývá fakt, že největší paralelní odpor byl vypočten u vzorků AJP_Spin_F. Tyto vzorky mají nejtlustší dielektrikum (29,496–40,189 μm) a jejich izolační odpor tak dosahuje až dvakrát větších hodnot než u vzorků AJP_Spin. Naopak vzorky AJP mají dielektrickou vrstvu nejtenčí (0,741–1,325 μm) a tedy i nejnižší paralelní odpor.

V porovnání s experimentem [41] popsaným v úvodu kapitoly 3 se pomocí AJP tiskárny nepodařilo realizovat plně funkční tištěné kondenzátory. Na vině je pravděpodobně problém v dielektriku. Ten může být způsoben samotnou tloušťkou dielektrika, ve kterém se mohou vyskytovat nečistoty, a použitým polyimidovým inkoustem CORIN XLS. Stáří inkoustu bylo větší než 6 měsíců, což je maximální doba skladovatelnosti uváděná výrobcem. V inkoustu mohlo dojít k chemickým změnám a ty mohly způsobit nehomogenity v dielektriku. Použitý dielektrický inkoust obsahuje velmi agresivní dimethylacetamidové rozpouštědlo, které mohlo mít negativní vliv na použitý stříbrný inkoust a tedy i na funkci kondenzátoru.

Srovnatelných výsledků bylo v experimentální části této práce dosaženo alternativním postupem, kdy byla vrstva polyimidového inkoustu nanášena pomocí metody spin coating a horní elektroda byla vytvořena pomocí samolepící měděné fólie. Vzdálenost elektrod v experimentu [41] byla 15 μm a naměřená kapacita 48,59 pF.

V experimentu řešeném v této práci byla u kondenzátorů vytvořených alternativním postupem naměřena kapacita 21,42 pF. Rozdíl v kapacitě tištěných kondenzátorů je dán tím, že vzdálenost elektrod alternativně vyrobených kondenzátorů v řešeném experimentu byla až o 25,19 μm větší.

Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo seznámit se s depoziční technologií Aerosol Jet Printing a diskutovat její výhody a nevýhody oproti ostatním depozičním technologiím. Jedná se o novou nanášecí technologii, která byla patentována v roce 2010. Princip technologie Aerosol Jet Printing je založen na tvorbě aerosolu z nanášeného materiálu a jeho následné bezkontaktní depozice pomocí zaostřovacího plynu. Technologií AJP se dá nanášet široká škála funkčních inkoustů, u kterých se podle jejich vlastností volí způsob atomizace. Funkční inkousty s vyššími viskozitami se atomizují v pneumatickém atomizéru a naopak inkousty s malými viskozitami se atomizují v ultrazvukovém atomizéru. Princip technologie umožňuje nanášení motivů i na flexibilní a nerovinné substráty. Návrh tištěných motivů se vytváří v programu AutoCAD, což umožňuje rychlý vývoj a zároveň velkou flexibilitu při vytváření produktu.

V porovnání s konkurenčními technologiemi může tiskárna nanášet jemnější motivy s vysokou ostrotí hran, ke své depozici nepoužívá šablony ani masky. Umožňuje *in situ* sintrování a efektivně spotřebovává použité materiály. Mezi hlavní nevýhody technologie Aerosol Jet Printing patří tisk velkých ploch, které nejsou díky principu nanášení dráhy zcela rovinné. Další nevýhodou je přestřík tvořící se okolo nanesené dráhy, který by mohl při tvorbě velmi jemných motivů způsobovat nežádoucí vodivé propojení mezi dvěma vodivými cestami. V porovnání s ostatními technologiemi má AJP při použití jednotryskové depoziční hlavy malou rychlost. Z těchto důvodů se technologie Aerosol Jet Printing zatím používá pouze k nízké objemové výrobě a jako rapid prototyping technologie.

Cílem experimentu bylo navrhnout a realizovat kondenzátor technologií AJP. V návrhu byla zvolena sendvičová struktura typu MIM o velikosti elektrod 5x5 mm. K vytvoření elektrod kondenzátoru byl použit stříbrný inkoust PG 007 – AJ. Jako dielektrikum byl použit polyimidový inkoust CORIN XLS s dimethylacetamidovým rozpouštědlem. U takto realizovaných kondenzátorů bylo oproti teoreticky vypočtené hodnotě 514 pF naměřeno pouze 0,476-7,464 pF. Špatná funkce AJP tištěných kondenzátorů je pravděpodobně způsobena dielektrikem. Při jeho inspekci bylo zjištěno, že v jeho úzkých místech může docházet k vodivému spojení elektrod, přes které by mohl protékat velký svodový proud. Inspekce dále odhalila špatnou adhezi a smáčivost horní

stříbrné elektrody na polyimidové vrstvě. Tento jev může být způsoben agresivitou dimethylacetamidového rozpouštědla, které negativně působí na nanášený stříbrný inkoust. Z těchto důvodů byl k výrobě kondenzátorů zvolen alternativní postup. Spodní elektrody byly natištěny pomocí AJP, dielektrikum nanášeno technikou spin coating a horní elektroda byla vytvořena z měděné samolepící fólie. U takto vytvořených vzorků se již vypočtená hodnota kapacity 13,21-18 pF shodovala s naměřenou 11,97-21,42 pF. Ztrátový činitel alternativně vytvořených kondenzátorů má řádově hodnotu 10^{-2} .

Z výše uvedených důvodů se pro další výzkum v oblasti tištěných kondenzátorů pomocí Aerosol Jet Printing technologie doporučuje použít jiný dielektrický inkoust. Například polyvinylfenolový inkoust, který momentálně vyvíjí německá instituce Fraunhofer. Ze zatím publikovaných odborných článků [49] dosahuje tento inkoust slibných výsledků. Další možností je místo sendvičového uspořádání vrstev kondenzátorů vytvořit koplanární kondenzátor s hřebenovitým tvarem elektrod.

Aerosol Jet Printing je nová depoziční technologie, která má slibné uplatnění v tištěné elektronice. Avšak celý systém je zatím ve fázi testování a vývoje. S tímto faktem je spojen i vývoj materiálů, které je nutné pečlivě prozkoumat a určit pro ně optimální nastavení parametrů pro depozici.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SEIFERT, Tobias, Enrico SOWADE, Frank ROSCHER, Maik WIEMER, Thomas GESSNER a Reinhard R. BAUMANN. Additive Manufacturing Technologies Compared: Morphology of Deposits of Silver Ink Using Inkjet and Aerosol Jet Printing. *Industrial*. 2015, 54 (vydání 2): 769-779. DOI: 10.1021/ie503636c. ISSN 0888-5885. Dostupné také z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie503636c>
- [2] SUKESHINI A., Mary, Frederick MEISENKOTHEN, Paul GARDNER a Thomas L. REITZ. Aerosol Jet® Printing of functionally graded SOFC anode interlayer and microstructural investigation by low voltage scanning electron microscopy. *Journal of Power Sources*. 2013, 224: 295-303. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.09.094. ISSN 03787753. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877531201525X>
- [3] Aerosol Jet® Printed Electronics Overview. *Optomec* [online]. Albuquerque, 2014, 2014-4-4 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/resources/whitepapers-additive-manufacturing/>
- [4] Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou. HW server [online]. Plzeň:RICE, 2015, 2015-3-3 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [5] Aerosol Jet ® 300 Series Systems Datasheet. Optomec [online]. Albuquerque, 2014, 2015-1-25 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-printers/aerosol-jet-300-series-systems/>
- [6] Optomec Overview [online]. Albuquerque, 2014, 2015-9-23 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/company/optomec-overview/>
- [7] WADHWA, Arjun. Run-time Ink Stability in Pneumatic Aerosol Jet Printing Using a Split Stream Solvent Add Back System [online]. Rochester institute of technology, 2015, 2015-3-18 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://scholarworks.rit.edu/theses/8597/>
- [8] Aerosol Jet ® Materials F&Qs. Optomec [online]. Albuquerque, 2014, 2014-2-23 [cit.2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
- [9] BINDER, Sebastian, Markus GLATTHAAR a Edda RÄDLEIN. Analytical Investigation of Aerosol Jet Printing. *Aerosol Science and Technology* [online]. 2014, 48 (9), 924-929 [cit. 2016-02-11]. DOI: 10.1080/02786826.2014.940439. ISSN 0278-6826. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02786826.2014.940439>
- [10] Základní fakta o aerosolech. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha, 2005, 2014-4-7 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/dokument148105.html>
- [11] MAHAJAN, Ankit, C. Daniel FRISBIE a Lorraine F. FRANCIS. Optimization of Aerosol Jet Printing for High-Resolution, High-Aspect Ratio Silver Lines. *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. 2013, 5(11), 4856-4864 [cit. 2016-02-11]. DOI: 10.1021/am400606y. ISSN 1944-8244. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/am400606y>

- [12] *Aerosol Jet Printed Ink Requirements Specification: Pneumatic Atomizer Process for Antenna Printing application*. Albuquerque: Optomec, 2013.
- [13] *Aerosol Jet 300: Deposition System Specification*. Albuquerque: Optomec, 2014.
- [14] BOLGER, John, Leon LANTZ, Rich LEWIS, Rick TRUDEAU a Daniel HINES. Multi-layer PC boards Fabricated using Aerosol-jet Printing. International Symposium on Microelectronics [online]. 2013, 2013(1), 000921-000926 [cit. 2016-02-25]. DOI: 10.4071/isom-2013-THP54. ISSN 2380-4505. Dostupné z: <http://imapsource.org/doi/10.4071/isom-2013-THP54>
- [15] *Guidelines for Optimized Material (Ink) for the Aerosol Jet Process Ultrasonic Atomizer*. Albuquerque: Optomec, 2013.
- [16] ZHANG, Yan, Changqing LIU a David WHALLEY. Direct-write techniques for maskless production of microelectronics: A review of current state-of-the-art technologies. In: *2009 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging* [online]. IEEE, 2009, s. 497-503 [cit. 2016-02-11]. DOI: 10.1109/ICEPT.2009.5270702. ISBN 978-1-4244-4658-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5270702>
- [17] Printed Electronics Research & Development. In: *Qi2* [online]. Santa Clara: Qi2, 2012 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.qi2.com/index.php/researchanddevelopment/printedelectronics>
- [18] JOSHI, Ronak. Inkjet ink Requirements & Formulation Guideline [online prezentace]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/ronakjoshi/inkjet-ink-requirements-formulation-guideline>
- [19] FRITSCH, Marco, Sindy MOSC, Robert JURK a Nikolai TROFIMENKO. NANOINKS AND CONTROL OF THEIR SINTERING TEMPERATURE. *Fraunhofer IKTS Annual Report* [online]. 2014, 2013/14, 32-33 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/en/images/publications/jahresberichte/1/jb2013/11_1_Nanoinks_and_control_of_their_sintering_temperature.pdf
- [20] STOUKATCH, S., P. LAURENT, S. DRICOT, et al. Evaluation of Aerosol Jet Printing (AJP) technology for electronic packaging and interconnect technique. In: *2012 4th Electronic System-Integration Technology Conference* [online]. IEEE, 2012, s. 1-5 [cit. 2016-02-11]. DOI: 10.1109/ESTC.2012.6542067. ISBN 9781467346443. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6542067>
- [21] Non-contact conductive printing with inkjet & AJP technology. In: *Sirris* [online]. Brussel, 2012 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://www.slideshare.net/sirris_be/2012-1127masterclassconductiveinkssirris-15482775
- [22] TAYLOR, Wesley. *Technical Synopsis of Plasma Surface Treatments* [online]. In: Gainesville: University of Florida, 2009 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.iopp.org/files/public/TaylorWesleyUFlorida.pdf>
- [23] KAPTON, KAPTONOVÉ POLYIMIDOVÉ LEPICÍ PÁSKY, FOLIE, MASKOVACÍ TERČE, TOPNÉ FOLIE. *ELCHEMCo* [online]. Praha [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://web.elchemco.cz/KAPTON.php>

- [24] *ULTRALAM® 3000: Liquid Crystalline Polymer, Circuit Material, Double-Clad Laminates* [online]. Chandler: Rogers, 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <https://www.rogerscorp.com/documents/730/acm/ULTRALAM-3000-LCP-laminate-data-sheet-ULTRALAM-3850.aspx>
- [25] Laser mění strukturu pokovovaných materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2002 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laser-meni-strukturu-pokovovanych-materialu.html>
- [26] WONG, William S a Alberto SALLEO. *Flexible electronics: materials and applications*. New York: Springer, 2009, xviii, 462 p. ISBN 9780387743639.
- [27] SOUKUP, R., T. BLECHA, A. HAMACEK a J. REBOUN. Smart textile-based protective system for firefighters. In: *Proceedings of the 5th Electronics System-integration Technology Conference (ESTC)* [online]. IEEE, 2014, s. 1-5 [cit. 2016-02-11]. DOI:10.1109/ESTC.2014.6962821. ISBN 9781479940264. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6962821>
- [28] HON, K.K.B., L. LI a I.M. HUTCHINGS. Direct writing technology—Advances and developments. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2008, **57**(2), 601-620 [cit. 2016-02-11]. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.006. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850608001935>
- [29] ZHANG, Yan, Changqing LIU a David WHALLEY. Direct-write techniques for maskless production of microelectronics: A review of current state-of-the-art technologies. In: *2009 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging* [online]. IEEE, 2009, s. 497-503 [cit. 2016-02-11]. DOI: 10.1109/ICEPT.2009.5270702. ISBN 9781424446582. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5270702>
- [30] SOUKUP, Radek, Aleš HAMÁČEK a Jan ŘEBOUN. Technical challenges of screen printing deposition for ultra-fine patterns. In: *Electroscope* [online]. 3. Plzeň: Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, 2011 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2011/Cislo3_2011/r5c4c7.pdf
- [31] Screen printing technology. *Kuroda Electric* [online]. Praha, 2012 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.kuroda-electric.eu/screen-printing>
- [32] SOUKUP, R., A. HAMACEK a J. REBOUN. Advanced screen printing for the fabrication of organic humidity sensors. In: *2012 4th Electronic System-Integration Technology Conference* [online]. IEEE, 2012, s. 1-5 [cit. 2016-02-11]. DOI: 10.1109/ESTC.2012.6542183. ISBN 9781467346443. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6542183>
- [33] *Roll to Roll (R2R) Processing Technology Assessment* [online]. Washington DC: U. S. Department of Energy, 2015, s. 32 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/QTR%20Ch8%20-%20Roll%20To%20Roll%20Processing%20TA%20Feb-13-2015.pdf>
- [34] KHAN, Saleem, Leandro LORENZELLI a Ravinder S. DAHIYA. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2015, **15**(6), 3164-3185 [cit. 2016-02-11]. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2375203. ISSN 1530437x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6974982>

- [35] SMITH, T.H., D.S. BONING, J. STEFANI a S.W. BUTLER. Run by run advanced process control of metal sputter deposition. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* [online]. 11(2), 276-284 [cit. 2016-03-08]. DOI: 10.1109/66.670176. ISSN 08946507. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=670176>
- [36] ADÁMEK, Martin, Radimír VRBA, Jan JAROŠ, Edita HEJÁTKOVÁ a Jan PRÁŠEK. Mikrosenzory a mikromechanické systémy [online]. Brno: VUT v Brně, 2002 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/Menufram.htm>
- [37] Mechanism of the vacuum thin film coating system. ShinMaywa Industries, Ltd. [online]. Hyogo (Japonsko), 2014 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: http://www.shinmaywa.co.jp/vac/vac_e/vacuum/vacuum_2.html
- [38] RAPID PROTOTYPING. 3D TECH spol. s r.o. [online]. Ondřejov, 2016 [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.3dtech.cz/rapid-prototyping>
- [39] MASHAYEKHI, Mohammad, Lee WINCHESTER, Louise EVANS, et al. Evaluation of Aerosol, Superfine Inkjet, and Photolithography Printing Techniques for Metallization of Application Specific Printed Electronic Circuits. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online], 1-8 [cit. 2016-03-08]. DOI: 10.1109/TED.2016.2522388. ISSN 00189383. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7404246>
- [40] FOLGAR, Christian, Louis FOLGAR a Denis CORMIER. Multifunctional Material Direct Printing for Laser Sintering Systems. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium* [online]. Austin (Texas), 2013, 282-296 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2013/2013-23-Folgar.pdf>
- [41] LI, Yi, Russel TORAH, Steve BEEBY a John TUDOR. An all-inkjet printed flexible capacitor for wearable applications. In: *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2012 Symposium*. Cannes, 2012, s. 192-195. ISBN 978-1-4673-0785-7.
- [42] LEUCHTER, Jan. Součástky elektrotechniky a elektroniky - Kondenzátory [online prezentace]. 2010 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://user.unob.cz/leuchter/7_PŘ_BAK_Kondenzátory.pdf
- [43] Ztrátový činitel $tg\Delta$. *Elektronická učebnice ELUC* [online]. Olomouc: MŠMT, 2015 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/558>
- [44] General Specifications for Kapton® Polyimide Films - DuPont. In: DuPont [online]. Wilmington, 2012 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-general-specs.pdf>
- [45] MELINEX® ST504. In: DuPont Teijin Films [online]. Chester, 2014 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <http://www.dupontteijinfilms.com/FilmEnterprise/Datasheet.asp?Result=Print&ID=269>
- [46] Nano Ink for Printed Electronics. In: Paru Co., Ltd. [online]. Jeollanam-Do (Korea), 2002 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: https://paru.trustpass.alibaba.com/product/143600174-0/Nano_Ink_for_Printed_Electronics.html

- [47] CORIN XLS Polyimide. In: NeXolve materials [online]. Huntsville, 2015 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://nexolvematerials.com/low-cure-polyimides/corin-xls-polyimide>
- [48] Silver Conductive Epoxy: 4 Hr. Working Time / High Conductivity. In: MG Chemicals [online]. Surrey (Canada), 2010 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.mgchemicals.com/products/adhesives/electrically-conductive/silver-conductive-epoxy-slow-cure-high-conductivity/>
- [49] MCKERRICHER, Garret, Jose GONZALEZ PEREZ a Atif SHAMIM. Fully Inkjet Printed RF Inductors and Capacitors Using Polymer Dielectric and Silver Conductive Ink With Through Vias. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2015, **62**(3), 1002-1009 [cit. 2016-05-10]. DOI: 10.1109/TED.2015.2396004. ISSN 0018-9383. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7035088>

Přílohy

Příloha č.1

Frekvence		100 Hz	120 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	200 kHz
1_AJP	Cp[pF]			7,4640	4,1340	4,8950	4,9350
	Tg δ			0,4759	0,3420	0,3618	0,3423
	Rp [M Ω]			44,8057	11,2570	0,8987	0,4711
2_AJP	Cp[pF]				3,6820	1,7060	1,5320
	Tg δ				3,2010	1,4230	0,9849
	Rp [M Ω]				1,3504	0,6556	0,5274
3_AJP	Cp[pF]				2,5030	1,9230	1,3380
	Tg δ				0,2670	0,2314	0,1837
	Rp [M Ω]				23,8149	3,5767	3,2376
4_AJP	Cp[pF]				2,4200	2,9950	2,4750
	Tg δ				0,4450	0,2425	0,2202
	Rp [M Ω]				14,7790	2,1913	1,4602
5_AJP	Cp[pF]			0,6370	0,4930	0,4760	0,6710
	Tg δ			0,1089	0,0996	0,0644	0,0571
	Rp [M Ω]			2294,3138	324,1260	51,9191	20,7698
1_AJP_Spin_F	Cp[pF]	21,2000	21,4200	20,7400	19,9100	19,6700	20,3800
	Tg δ	0,0938	0,0331	0,0275	0,0376	0,0389	0,0477
	Rp [M Ω]	800,3527	1870,6452	279,0479	21,2599	2,0800	0,8186
2_AJP_Spin_F	Cp[pF]	15,6200	15,6700	15,1800	14,4300	14,0300	15,2100
	Tg δ	0,1168	0,0366	0,0271	0,0354	0,0389	0,0443
	Rp [M Ω]	872,3610	2312,5376	386,8825	31,1566	2,9162	1,1810
3_AJP_Spin_F	Cp[pF]	16,5600	16,6800	15,6300	15,2300	14,6100	15,7500
	Tg δ	0,2407	0,0633	0,0306	0,0420	0,0468	0,0502
	Rp [M Ω]	399,2857	1256,1431	332,7666	24,8812	2,3277	1,0065
4_AJP_Spin_F	Cp[pF]	16,1900	15,9000	15,7500	15,0300	14,5600	15,7600
	Tg δ	0,1560	0,0205	0,0264	0,0342	0,0380	0,0411
	Rp [M Ω]	630,1569	4069,0020	382,7680	30,9624	2,8766	1,2285
5_AJP_Spin_F	Cp[pF]	13,2000	13,1700	12,7600	12,3400	11,9700	12,9600
	Tg δ	0,1259	0,0396	0,0281	0,0360	0,0402	0,0439
	Rp [M Ω]	957,6801	2543,0677	443,8775	35,8263	3,3075	1,3987
6_AJP_Spin_F	Cp[pF]	18,8900	18,8400	18,0600	17,3000	16,4800	17,7100
	Tg δ	0,1143	0,0409	0,0358	0,0444	0,0492	0,0528
	Rp [M Ω]	737,1264	1721,2132	246,1611	20,7201	1,9629	0,8510
7_AJP_Spin_F	Cp[pF]	17,7000	17,5800	17,0800	16,4800	16,0300	17,3500
	Tg δ	0,1143	0,0547	0,0272	0,0349	0,0381	0,0413
	Rp [M Ω]	786,6846	1379,2173	342,5811	27,6718	2,6059	1,1106
8_AJP_Spin_F	Cp[pF]	19,6400	19,4500	19,0300	18,0600	17,4600	18,8300
	Tg δ	0,0838	0,0340	0,0295	0,0380	0,0419	0,0451
	Rp [M Ω]	967,0182	2005,5817	283,5041	23,1910	2,1755	0,9371
9_AJP_Spin_F	Cp[pF]	15,3500	15,2600	14,6500	14,0000	13,5800	14,6900
	Tg δ	0,0853	0,0315	0,0285	0,0386	0,0412	0,0490
	Rp [M Ω]	1215,5217	2759,1404	381,1866	29,4513	2,8446	1,1055

1_AJP_Spin	Cp[pF]	15,2300	14,1500	13,4400	12,9000	10,5300	11,0700
	Tg δ	0,3042	0,2574	0,2104	0,4951	0,1832	0,1456
	Rp [M Ω]	343,5271	364,1446	56,2827	2,4919	0,8250	0,4937
2_AJP_Spin	Cp[pF]		10,3800	6,5750	5,2050	4,2190	4,7210
	Tg δ		0,3440	0,1866	0,1858	0,1345	0,1186
	Rp [M Ω]		371,4352	129,7217	16,4571	2,8047	1,4213
3_AJP_Spin	Cp[pF]		8,7840	6,5520	5,0170	3,8430	4,2360
	Tg δ		0,2295	0,1963	0,2018	0,1519	0,1298
	Rp [M Ω]		657,9060	123,7445	15,7201	2,7264	1,4473
4_AJP_Spin	Cp[pF]		3,1750	3,2450	2,1340	1,6900	1,8620
	Tg δ		0,3039	0,1866	0,1799	0,1528	0,1098
	Rp [M Ω]		1374,5624	262,8414	41,4567	6,1633	3,8923
5_AJP_Spin	Cp[pF]		16,1500	10,5600	7,8700	6,4090	6,2180
	Tg δ		0,4570	0,3258	0,2328	0,1819	0,1807
	Rp [M Ω]		179,7009	46,2599	8,6869	1,3652	0,7082
6_AJP_Spin	Cp[pF]		11,7800	9,0780	5,8710	4,6630	5,0140
	Tg δ		0,4727	0,3547	0,2599	0,1884	0,1557
	Rp [M Ω]		238,1815	49,4275	10,4304	1,8116	1,0193
7_AJP_Spin	Cp[pF]		23,8200	17,5800	13,0100	9,9920	10,4700
	Tg δ		0,3089	0,2003	0,2188	0,1766	0,1622
	Rp [M Ω]		180,2516	45,1981	5,5911	0,9019	0,4686